

# Fundamentos electrofisiológicos del electrocardiograma

## Propósito general

Comprender los fundamentos físicos del electrocardiograma.

Analizar el significado de las ondas, intervalos, segmentos y complejo QRS en el electrocardiograma.

## 1. Introducción

El electrocardiograma (ECG) es un estudio simple, no invasivo, que registra la actividad eléctrica del corazón. Esta actividad es la suma de pequeños cambios en el voltaje extracelular, producidos por el movimiento de corrientes a través de canales en los miocitos cardíacos. El ECG puede utilizarse para detectar anomalías anatómo-funcionales, tales como alteraciones en el ritmo cardíaco, en el sistema de conducción, isquemia e infartos miocárdicos, alteraciones en la excitabilidad producidas por cambios en las concentraciones de electrolitos y efectos de diversos medicamentos. También proporciona información acerca de la anatomía cardíaca, por ejemplo, en casos de insuficiencia cardíaca, donde el corazón aumenta su tamaño.

Las células miocárdicas son células musculares estriadas que pueden contraerse debido a la presencia de proteínas como actina y miosina que forman parte de la unidad contráctil del músculo: la sarcómera. Los miocitos adyacentes tienen continuidad en su citoplasma a través de discos intercalares (uniones tipo nexo) a través de los cuales se puede transmitir un estímulo eléctrico, esto explica que el músculo cardíaco funcione como un sincitio. Además de las células contráctiles del corazón, existen células miocárdicas especializadas en generar y conducir los estímulos eléctricos a todo el miocardio.

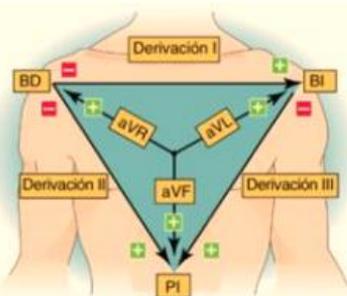
En condiciones normales, la generación del impulso eléctrico se origina en el nodo sinoatrial (SA), el cual se propaga por los 3 haces internodales hasta alcanzar el nodo atrioventricular (AV), después de un retraso de aproximadamente 100 ms, continúa por el Haz de His y las Fibras de Purkinje que lo distribuyen hacia todo el miocardio ventricular para poder producir la sístole ventricular. Conforme el impulso se propaga por el corazón, la membrana de las células se despolariza y repolariza, lo que genera dipolos eléctricos: regiones con diferencias de carga en la superficie de las células. Los dipolos individuales se suman y generan vectores eléctricos que tienen magnitud, dirección y sentido. Estos vectores representan corrientes que se conducen fácilmente por el líquido extracelular y que podemos registrar en la superficie del cuerpo. El ECG es la gráfica de estas corrientes respecto al tiempo.

Cuando un vector eléctrico se acerca a un electrodo de registro, se observará una deflexión positiva en el trazo y cuando se aleja de este electrodo, se observará una deflexión negativa. En el último caso, si el vector es perpendicular a la línea entre el electrodo de registro y el de referencia, no se observará ningún cambio. En el ECG, cuando un vector es horizontal y se dirige hacia el lado izquierdo de la persona se dice que el vector está en  $0^\circ$ , a partir de este punto de referencia la escala de los vectores rota en sentido de las manecillas del reloj.

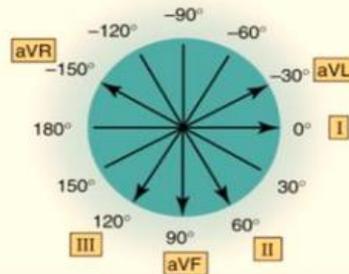
Para registrar el vector eléctrico generado por la actividad cardiaca, se utiliza un sistema de derivaciones en dos planos perpendiculares entre sí, el plano frontal con 6 derivaciones de los miembros y el plano transversal por las derivaciones precordiales. Cada derivación es un eje sobre el cual el corazón proyecta su actividad eléctrica, es decir, cada derivación proyecta una cara del corazón:

- Septal: V1, V2
- Anterior: V3, V4
- Inferior: aVF, II, III
- Lateral superior: I, aVL, aVR
- Lateral inferior: V5, V6

El ECG de 12 derivaciones (3 bipolares, 3 monopolares extendidas y 6 monopolares precordiales) se obtiene colocando al paciente decúbito supino y conectando 4 electrodos a las extremidades y 6 electrodos en la superficie del tórax. Para las derivaciones bipolares, se utilizan los electrodos colocados en las extremidades superiores y en la pierna izquierda, la derivación I mide la diferencia de potencial entre ambos brazos, la derivación II compara el potencial en el brazo derecho con la pierna izquierda y la derivación III mide la diferencia de potencial entre el brazo izquierdo y la pierna izquierda, (la pierna derecha sirve como referencia). Se puede ver que estas derivaciones bipolares forman un triángulo equilátero (triángulo de Einthoven), con el vértice en la ingle y los otros dos extremos en los hombros, dando como resultado las derivaciones unipolares (Fig 1), cuando estas se pasan a un plano cartesiano se obtiene el sistema de referencia axial, también llamado círculo de Cabrera (Fig 2). Este sistema es útil cuando queremos conocer el eje de orientación del corazón.



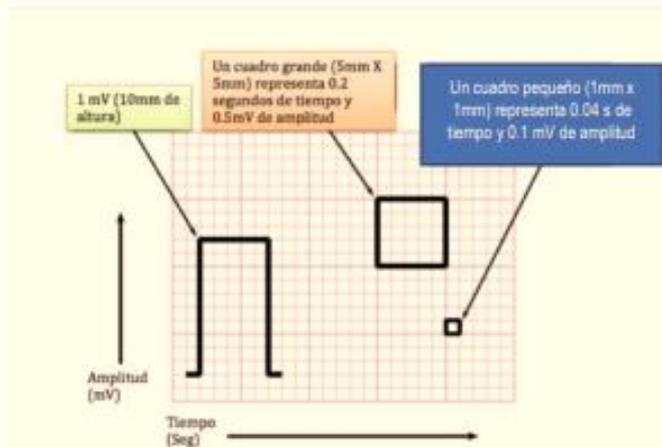
*Figura 1. Triángulo de Einthoven*  
 I: Eje en plano frontal de  $0^\circ$   
 II: Eje en plano frontal de  $60^\circ$   
 III: Eje en plano frontal de  $120^\circ$



*Figura 2. Círculo de Cabrera*  
 aVR: Eje en plano frontal de  $-150^\circ$   
 aVL: Eje en plano frontal de  $-30^\circ$   
 aVF: Eje en plano frontal de  $90^\circ$

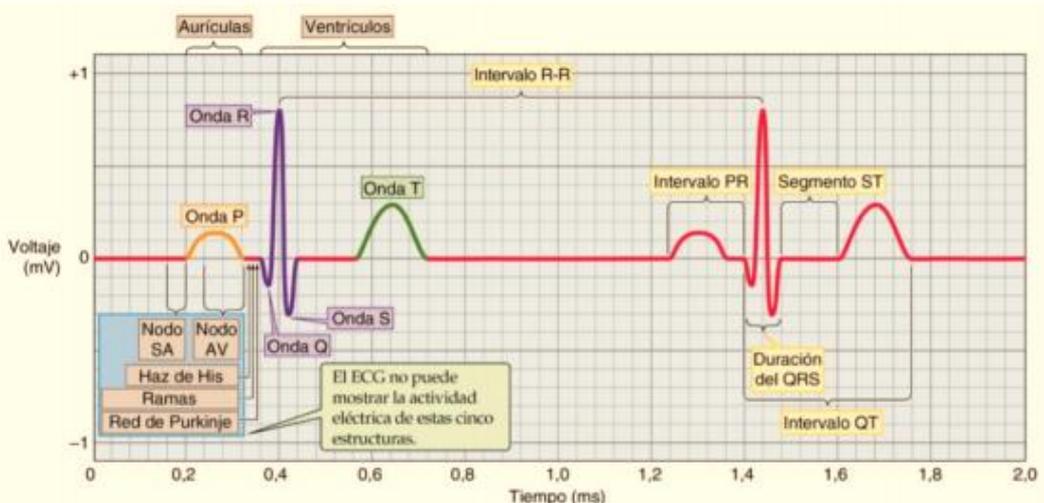
Para las derivaciones monopolar (aVR, aVL, aVF y derivaciones precordiales V1-V6), se mide la diferencia de potencial entre un electrodo de registro y la combinación de los potenciales registrados en las otras derivaciones de las extremidades. Así pues, con las doce derivaciones podemos “observar” vectores de despolarización que se propagan en diferentes planos anatómicos del corazón, esto nos proporciona información invaluable sobre la anatomía y la fisiología de los sistemas de conducción y contracción del corazón.

Para la interpretación adecuada de un ECG lo primero que se debe saber es la escala de tiempo y amplitud que se utiliza internacionalmente (Fig. 3).



**Figura 3. Calibración estándar de un ECG**

El ECG (Fig. 4) está compuesto por segmentos (la línea que une una onda con otra sin incluir ninguna de ellas, normalmente es isoelectrica), ondas (las deflexiones positivas o negativas características que se observan en el registro electrocardiográfico) e intervalos (la porción del ECG que incluye un segmento además de una o más ondas).



**Figura 4. Componentes de un ECG**

**Ondas P, QRS, T y U:** La onda P representa la despolarización de los atrios, el complejo QRS la despolarización de los ventrículos, la onda T la repolarización de los ventrículos, la repolarización atrial queda enmascarada por la magnitud del voltaje del QRS y por último la onda U que no siempre se observa y se genera por la repolarización de los músculos papilares (Fig. 4).

**Segmento ST:** Es un periodo de inactividad que separa la despolarización ventricular de la repolarización ventricular. Este segmento normalmente es isoelectrico. Al punto de unión entre el complejo QRS y el segmento ST se le llama punto J, el cual nos es de utilidad para identificar cuando existe un desnivel en el segmento ST (Fig. 4).

**Intervalo PR:** Representa el retraso fisiológico, el cual se mide desde el comienzo de la onda P hasta el inicio de la onda Q. Cuando dicho intervalo se encuentra acortado podemos deducir que la conducción atrioventricular está acelerada, fenómeno que sucede en los síndromes de preexcitación. En contraste, si está alargada la conducción se encuentra enlentecida, es decir, existe bloqueo de la conducción auriculo-ventricular (Fig. 4).

**Intervalo QT:** Representa la sístole ventricular o el conjunto de la despolarización y repolarización ventricular. Este intervalo depende de la frecuencia cardiaca; se acorta cuando existe taquicardia y se alarga en las bradicardias (Fig. 4 y Tabla 1).

**Intervalo R-R:** distancia entre dos ondas R sucesivas, en un ritmo sinusal, este intervalo tiende a permanecer constante, la medida de éste determinará la frecuencia cardiaca (Fig. 4).

Antes de analizar la secuencia, morfología, duración y amplitud de estos elementos, para realizar una Interpretación electrocardiográfica correcta se deben analizar el ritmo, la frecuencia cardiaca y el eje cardiaco.

**Ritmo:** El ritmo normal del corazón es el ritmo sinusal, para poder considerar que es sinusal debe cumplir con las siguientes características:

1. Que exista onda P en todas las derivaciones
2. Ondas P positivas en DI, DIII y aVF, negativa en aVR y difásica en aVL.
3. Una onda P antecede a un complejo QRS.
4. El intervalo RR debe ser constante

**Frecuencia cardiaca (FC):** existen diferentes métodos para calcular la frecuencia cardiaca. En este caso explicaremos el más utilizado: El papel del electrocardiograma corre a una velocidad de 25 mm/s lo que quiere decir que en cada segundo hay cinco cuadros grandes de 0.5 cm y que en un minuto hay 300 de estos cuadros, para calcular la frecuencia buscamos una onda R, la cual, de ser posible se encuentre en las líneas gruesas de la cuadrícula, y a partir de aquí contamos el número de cuadros que hay hasta la siguiente onda R. Por simple regla de tres si en un minuto hay 300 cuadros, entre dos R habrá los cuadros calculados, por lo que dividiendo 300 entre el número de cuadros que hay en un intervalo RR obtendremos la frecuencia cardiaca. Puede suceder que la distancia que hay en un intervalo RR no tenga un número exacto de cuadros grandes, en este caso se dividirán entre 1500 los cuadros chicos en un intervalo RR, es importante recordar que este método solo aplica para cuando existe un ritmo sinusal.

**Eje del QRS:** el vector medio del QRS puede estimarse a partir de las derivaciones

estándar y monopolares aplicando el sistema hexaxial en el plano cartesiano: se localiza la derivación más isodifásica, es decir, cuya amplitud es igual a cero, en este caso el vector medio QRS se encontrará en la perpendicular de la derivación más isodifásica. De esta manera, si el complejo QRS es isodifásico en aVF, la perpendicular es D1 y en esta derivación el valor neto del QRS es positivo el eje estará en  $0^\circ$ , pero si es negativo estará en  $180^\circ$  (Fig. 2). El valor normal del eje cardiaco para un adulto sano es de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

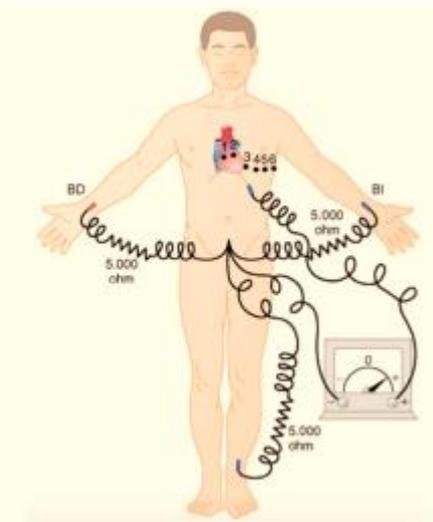
## 2. Metodología

### Material:

- Electrocardiograma
- Cables conductores
- Electrodo de superficie
- Gel de conducción
- Voluntario con consentimiento

### Método:

Se tomará un registro electrocardiográfico a los voluntarios con previo consentimiento. Los voluntarios se descubrirán la región torácica y se colocarán en decúbito dorsal sobre la mesa de exploración, posteriormente se procederá a colocar los electrodos de acuerdo a los estándares internacionales (Fig. 5):



- aVL: brazo izquierdo
- aVR: brazo derecho
- aVF: pie izquierdo
- V1: 4to espacio intercostal (EI), línea paraesternal derecha
- V2: 4to EI, línea paraesternal izquierda
- V3: 5to EI, entre de V2 y V4
- V4: 5to EI, línea medioclavicular
- V5: 5to EI, entre V4 y V6 (línea axilar anterior)
- V6: 5to EI, línea axilar media

\*Previo a la colocación de los electrodos, limpiar la piel con alcohol y colocar gel conductor.

**Figura 5. Colocación de electrodos**

Presione en el equipo el botón *On/Off* en el teclado para encender o apagar el equipo, a continuación, presione *profile*, donde podrá elegir en el menú un perfil predeterminado, automático (auto)\*. Posteriormente, presione la tecla *patients* para ingresar los datos de los voluntarios. Revise que la calibración del equipo se encuentre a una velocidad de 25 mm/s y 10 mm/mV; por último, presione la tecla *print* para comenzar la impresión



del registro.

\*¡IMPORTANTE! Si se modifica la configuración del equipo a manual (man), favor de regresarlo a la configuración estándar automática (auto).

### 3. Resultados

- 1) Con el registro obtenido llena la siguiente tabla y determina si los valores son normales:

	Tiempo	Voltaje
Onda P		
Intervalo PR		
Onda Q		
Complejo QRS		
Segmento ST		
Onda T		
Intervalo QT		
Onda U		

- 2) Haz un análisis del registro electrocardiográfico considerando los siguientes pasos:
  - Análisis del ritmo
  - Cálculo de la frecuencia cardíaca
  - Cálculo del eje eléctrico del QRS
  - Análisis de la morfología, duración y amplitud de cada segmento, intervalo y onda
- 3) Elabora y entrega un reporte

Es posible complementar la práctica colocando las derivaciones derechas, utilizadas en situaciones especiales como dextrocardia o infarto derecho; normalmente se colocan V3R y V4R en la misma posición que V3 y V4, pero en hemitórax derecho. En otras condiciones, como en un infarto posterior, se pueden colocar electrodos en la región posterior del tórax: (V7: en el 5to EI y la línea axilar posterior), (V8 en el 5to EI y la línea escapular posterior) y (V9 en el 5to EI y el borde izquierdo de la columna).

Se sugiere analizar algunos ejemplos de registros electrocardiográficos obtenidos de internet o de algún hospital, a pesar de que algunos de ellos sean patológicos, el objetivo de estos es únicamente para realizar el cálculo de frecuencia cardíaca, ritmo, eje y medición de las diferentes ondas, intervalos y segmentos.

#### 4. Referencias

- Boron. Fisiología médica, Elsevier, 3ª Ed, 2017
- Guyton y Hall. Tratado de Fisiología Médica, Elsevier, 13ª edición, 2016.
- Rhoades, R.A. y Bell, D.R. Fisiología médica. Fundamentos de medicina clínica. 5ª edición, Wolters Kluwer, Lippincott Williams & Wilkins, 2018.
- Alexánderson-Rosas, E y Gamba-Ayala, G. Fisiología cardiovascular, renal y respiratoria. Manual Moderno, 1a edición, 2014
- Jenkins D, Gerred S. ECG en ejemplos. 3º Edición, Elsevier, 2012.
- Thaler S. Malcolm. El libro del ECG. Wolters Kluwer, 8ªed, 2017
- Velez D. Electrocardiografía. Marban, 3ra, 2017.



CC BY

Esta obra está bajo una  
Licencia Creative Commons  
Atribución 4.0 Internacional