

# El electrocardiograma y su tecnología

## Cuarta parte

• Dr. Gerardo Pozas Garza<sup>1</sup>

### Palabras clave

Electrocardiograma de doce derivaciones, intervalo QT, alternancia eléctrica, análisis computarizado.

### Introducción

En los primeros cuatro artículos de esta serie –publicados en números pasados de Avances– se abordó la metodología de adquisición del electrocardiograma, así como los errores derivados de una falta de apego a la técnica estándar.<sup>1,2,3,4</sup> El presente artículo analiza la tecnología en torno al electrocardiograma, además con este se finaliza la primera sección de esta serie. Los siguientes artículos se dedicarán a estudiar el electrocardiograma normal y anormal.

La mayor parte de los equipos electrocardiográficos usados en la actualidad son digitales, permiten el registro simultáneo de las doce derivaciones, proporcionan valores de medición para las ondas y complejos electrocardiográficos (duración y eje eléctrico) y emiten una interpretación computarizada. Por lo tanto, es indispensable conocer las bondades y limitaciones que la tecnología ofrece en torno al electrocardiograma.

Este artículo se divide en dos partes: a) la señal electrocardiográfica y su procesamiento, y b) la interpretación computarizada.

### La señal electrocardiográfica y su procesamiento

El análisis automático en los electrocardiógrafos digitales de 12 derivaciones comprende una serie de pasos secuenciales: 1) adquisición de la señal (incluyendo el filtrado); 2) transformación de los datos (obtención de un complejo promedio para cada derivación y clasifi-

cación de los latidos como “dominantes” y “no dominantes”); 3) caracterización de las ondas y complejos (identificación del inicio y finalización de cada deflexión); 4) medición de la amplitud de las deflexiones y de los intervalos; y 5) clasificación diagnóstica.<sup>5</sup>

### La señal electrocardiográfica

El electrocardiograma de superficie registra la diferencia de potencial de voltaje que se genera en el corazón a través de electrodos colocados en puntos preestablecidos en la superficie corporal. El electrocardiograma es un reflejo de las diferencias en el voltaje transmembrana que ocurren en las células miocárdicas durante los fenómenos de despolarización y repolarización. La actividad eléctrica generada por el corazón se manifiesta por vectores que tienen magnitud, dirección y sentido. El potencial eléctrico registrado en las derivaciones electrocardiográficas representa la sumatoria de las fuerzas eléctricas instantáneas (vectores) que ocurren en forma secuencial durante los procesos de despolarización y repolarización (ver Figura 1).

La señal recogida por el electrocardiógrafo debe ser filtrada y amplificada.<sup>6</sup> Los electrocardiógrafos digitales eliminan o suprimen las señales de baja frecuencia debidas a fluctuaciones de la línea de base, por movimiento y respiración, así como las señales de alta frecuencia originadas por artefactos musculares e interferencia electromagnética. Una vez que la señal ha sido filtrada y amplificada, se crea un complejo representativo para cada derivación a partir de la morfología dominante. Es a partir de la morfología dominante que se hacen las mediciones de amplitud y duración de las ondas y complejos que componen el electrocardiograma. Sin embargo, los valores finales relacionados con la duración, amplitud y eje eléctrico son el resultado de mediciones globales obtenidos a partir de la adquisición de las derivaciones individuales.<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Cardiólogo electrofisiólogo del Hospital San José Tec de Monterrey y del Instituto de Cardiología y Medicina Vascul ar del Tec de Monterrey.

## El filtrado de la señal

La actividad eléctrica generada por el corazón se encuentra en el rango de los milivoltios (para la amplitud de voltaje) y de los milisegundos (para la duración de los eventos). El electrocardiograma tiene componentes de alta frecuencia y componentes de baja frecuencia. Los primeros son aquellos que muestran un cambio rápido en la señal y corresponden al complejo QRS (particularmente la onda Q y los empastamientos del complejo QRS); los segundos son las ondas P, T y U. La frecuencia fundamental del complejo QRS es cercana a 10 hertz, y la mayor parte de la información está contenida por debajo de los 100 hertz. En el paciente pediátrico puede existir información tan alta como 250 hertz. La frecuencia fundamental de la onda T es 1-2 hertz.

## Filtrado de baja frecuencia

La frecuencia cardiaca se expresa clínicamente en latidos por minuto. Una frecuencia cardiaca de 75 latidos por minuto equivale a tener 1.25 latidos por segundo (75 latidos en 60 segundos). Esto corresponde a que la frecuencia del evento es de 1.25 hertz (Hz, ciclos por segundo). Sin embargo, desde la perspectiva clínica es de mayor utilidad calcular el período de tiempo (T) entre dos latidos, que es la recíproca de la frecuencia del evento. Para ello se debe emplear la siguiente fórmula:  $T=1/\text{frecuencia}$ . Para el ejemplo antes citado  $1/1.25=0.8$  segundos. Es decir, el intervalo entre latidos es de 0.8 segundos (800 milisegundos).

En la práctica clínica es poco común que el valor de frecuencia cardiaca sea menor de 40 latidos por minuto (0.67 Hz) y más aún que sea inferior a 30 latidos por minuto (0.5 Hz). En teoría, el filtrado de baja frecuencia debería programarse de acuerdo a estos valores. Sin embargo, con el filtrado tradicional, un punto de corte de 0.5 Hz para las señales de baja frecuencia se asocia a una distorsión considerable de la señal, particularmente en los componentes del electrocardiograma en los que la frecuencia y la amplitud cambian abruptamente (fin del QRS e inicio del ST, desnivel del segmento ST). Por ello, la Asociación Americana del Corazón recomendó en 1975 (ratificado en 1990) un punto de corte de 0.05 Hz para la electrocardiografía diagnóstica.<sup>8</sup> Se acepta, sin embargo, un filtro de hasta 0.5 Hz para equipos digitales nuevos que corrigen para la fluctuación de la línea de base mientras preservan la fidelidad de registro del segmento ST (ver Figura 1A). Un filtrado inadecuado de la señal de baja frecuencia puede afectar sensiblemente la repolarización ventricular.

## Filtrado de alta frecuencia

Entre mayor sea el valor de la frecuencia contenido dentro del filtro, la precisión de las mediciones de los componentes de la fase rápida de ascenso, la amplitud pico y las ondas de poca duración será mayor. Los equipos digitales tienen una resolución temporal en el rango de los milisegundos y una resolución de amplitud en el rango de los microvoltios. Para la medición rutinaria de la amplitud y duración de las ondas del electrocardiograma en adultos, adolescentes y niños se recomienda un punto de corte superior de por lo menos 150 Hz; para los infantes es más apropiado un punto de corte de 250 Hz. (ver Figura 1A). Un filtrado inadecuado de la señal de alta frecuencia resulta en una infraestimación del pico de la onda R (y por tanto de la amplitud de la onda), así como en un amortiguamiento de la onda Q y de las muescas o empastamientos electrocardiográficos.

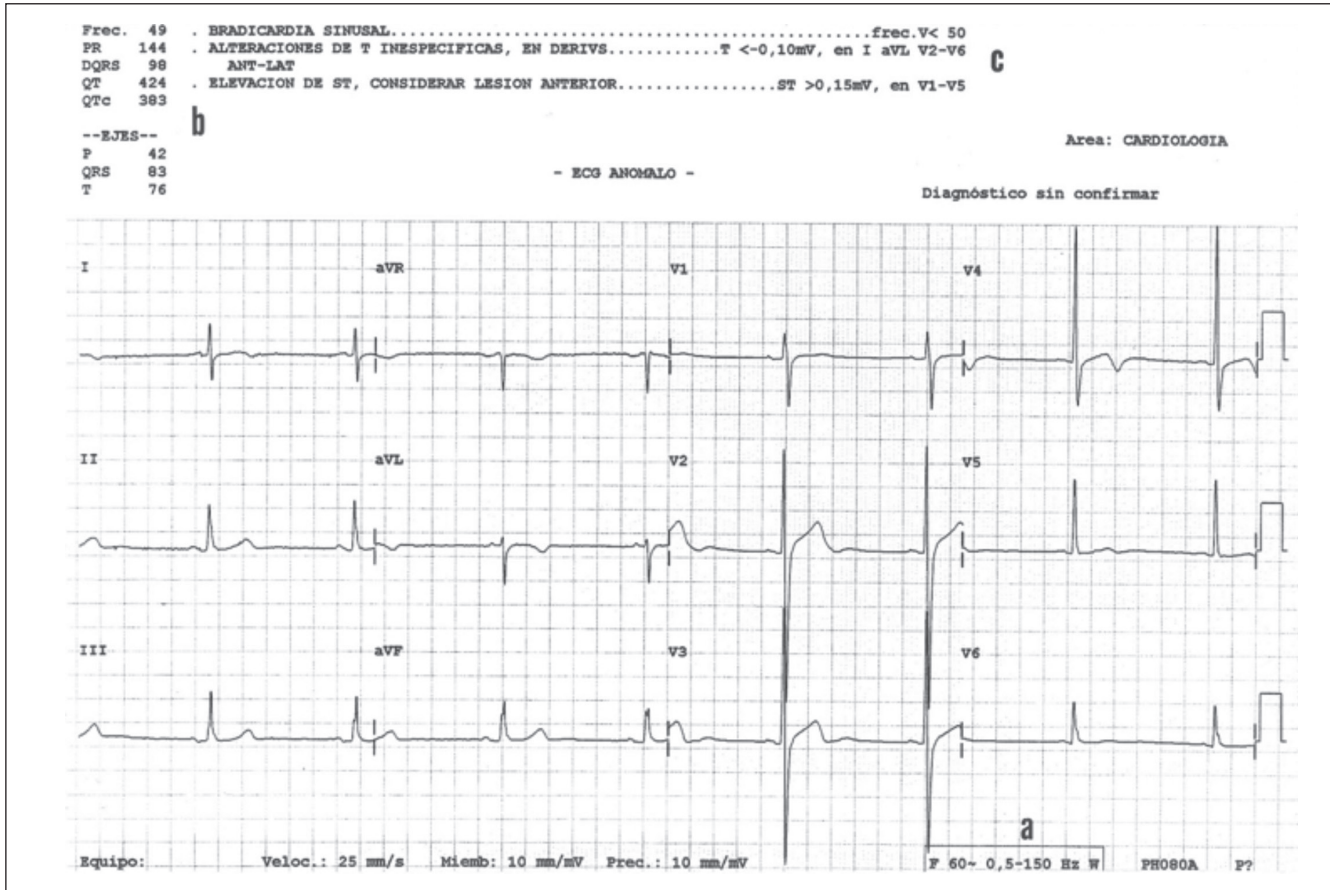
## Obtención de una morfología representativa para una derivación

La amplitud y la duración del complejo QRS puede mostrar variabilidad tanto latido a latido, así como entre latidos consecutivos por efecto de la respiración. Los electrocardiógrafos digitales reducen o eliminan las variaciones no deseadas entre los latidos a partir de la obtención de complejos representativos para cada derivación que sirven como un formato de referencia. La sobreposición de los complejos es el paso crítico para la adquisición del formato de referencia de la morfología dominante. Las mediciones automáticas se realizan a partir de estos formatos de referencia representativos y no de la medición de los complejos individuales. Debido a la existencia de alteraciones patológicas que modifican la variabilidad entre los latidos (v. gr. alternancia eléctrica), los equipos electrocardiográficos deben retener ciertas características que les permitan reconocer dichas alteraciones.<sup>9,10</sup>

## Mediciones globales a partir de las derivaciones adquiridas simultáneamente (ver Figura 1 B)

La sobreposición temporal de los complejos permite medir el punto de inicio más temprano y el punto de finalización más tardío de una onda o complejo en particular. Estas mediciones son más precisas que las realizadas en una derivación dada. Dependiendo del método de sobreposición de los complejos y de la obtención del formato representativo, así como de la definición de inicio y fin de una onda, podrán observarse variaciones en la fidelidad de la medición, sobre todo entre

Figura 1. Electrocardiograma de 12 derivaciones correspondiente a un sujeto masculino adulto sano



1A: Filtros de baja y alta frecuencia. 1B: Mediciones globales. 1C: Interpretación computarizada.

diferentes electrocardiógrafos de diferentes compañías. Este hecho se demuestra en la medición del intervalo QT, en la que la definición del fin de la onda T puede modificar la reproducibilidad.<sup>11</sup> Los equipos digitales de uso actual, que tienen la capacidad de adquisición simultánea de las doce derivaciones, debe hacernos reflexionar sobre la actualización de los métodos de medición y en los valores de referencia que fueron derivados, años atrás, de equipos analógicos de un solo canal.

Cuando el vector cardíaco durante la parte inicial o final de una deflexión electrocardiográfica es perpendicular a una derivación, se registrará un componente isoelectrico inicial o final en dicha derivación (ver Figura 2). Como consecuencia, las mediciones efectuadas en una sola derivación en forma sistemática van a infraestimar la duración de las deflexiones PQRST. La aplicación clínica se refleja en un parámetro electrocardiográfico conocido como dispersión del intervalo QT que consiste en la diferencia en la duración del in-

tervalo QT como resultado del registro de componentes isoelectricos en la onda T en algunas derivaciones en condiciones normales.<sup>12</sup>

### Interpretación computarizada

Hubert Pipberger, pionero del análisis computarizado del electrocardiograma, señaló en 1961: "permite discriminar entre los registros normales y los anormales con alto grado de precisión [...] el médico necesita interpretar, por lo tanto, solamente aquellos estudios caracterizados por la computadora como anormales". Sin embargo, Charles Fisch, electrocardiografista contemporáneo, declaró en 1989: "debido a la amplia disponibilidad del análisis computarizado, el proceso intelectual necesario para obtener el diagnóstico se dificulta [...] la computadora puede ser un obstáculo para la adquisición de la habilidad interpretativa".

Se requieren dos procesos secuenciales para brindar una interpretación computarizada. El primero consiste

en los aspectos tecnológicos relacionados con el procesamiento de la señal: preparación de la señal (muestreo, filtrado y formación de patrones), caracterización de los complejos y medición. El segundo paso radica en aplicar algoritmos diagnósticos al electrocardiograma procesado (ver Figura 1C). Los algoritmos son de dos tipos: heurísticos (basado en reglas que son deterministas, más comúnmente usado) o estadísticos (basado en reglas que son probabilísticas, menos usado).<sup>13</sup> Se ilustra un ejemplo de cómo un algoritmo determinista establece el diagnóstico de un infarto de miocardio: si la duración de la onda Q es de 30 milisegundos o mayor el algoritmo determina que existe un infarto; si la onda Q tiene una duración de 29 milisegundos o menor no lo diagnosticará. En cambio, un algoritmo probabilístico incorpora otros parámetros electrocardiográficos o demográficos (edad, raza, género, historia clínica) para la toma de decisiones. En términos generales, los algoritmos tienen un buen desempeño en el reconocimiento del infarto de miocardio, la hipertrofia ventricular y los trastornos de conducción intraventricular; sin embargo, su capacidad diagnóstica es menor cuando se trata de trastornos electrolíticos, cambios del segmento ST / onda T y arritmias cardiacas.<sup>14</sup>

En un futuro cercano existirá la posibilidad de registrar 16 derivaciones en forma simultánea (V3R, V4R, V7, V8) (ver Figura 3). Algunos equipos tienen la capacidad de desplegar gráficamente los vectores cardiacos (P, QRS, ST y T), lo que facilita la interpretación electrocardiográfica. Se sugiere que los algoritmos computarizados emitan recomendaciones dirigidas al usuario

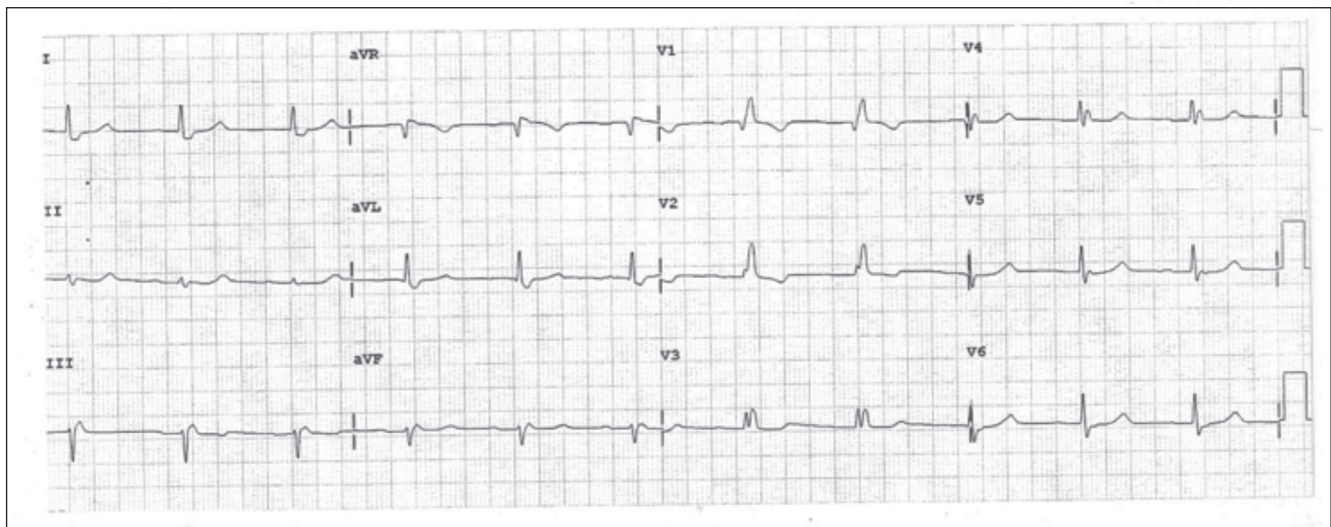
para mejorar el rendimiento diagnóstico del electrocardiograma. A continuación se listan algunos enunciados que ilustran la aplicación de la interpretación computarizada:

1. Sugerencia de practicar las derivaciones V3R / V4R en presencia de un infarto agudo de miocardio de la región inferior.
2. Considerar el diagnóstico de una obstrucción proximal de la arteria descendente anterior en caso de una inversión profunda o gigante de la onda T en las derivaciones precordiales.
3. Alertar al usuario cuando se selecciona un valor de corte superior subóptimo para el filtrado de alta frecuencia (v. gr. 40 Hz).
4. Recomendar el despliegue de Cabrera en caso de infarto de miocardio que involucre las derivaciones DI y aVL para mejorar la sensibilidad diagnóstica.

### Conclusiones

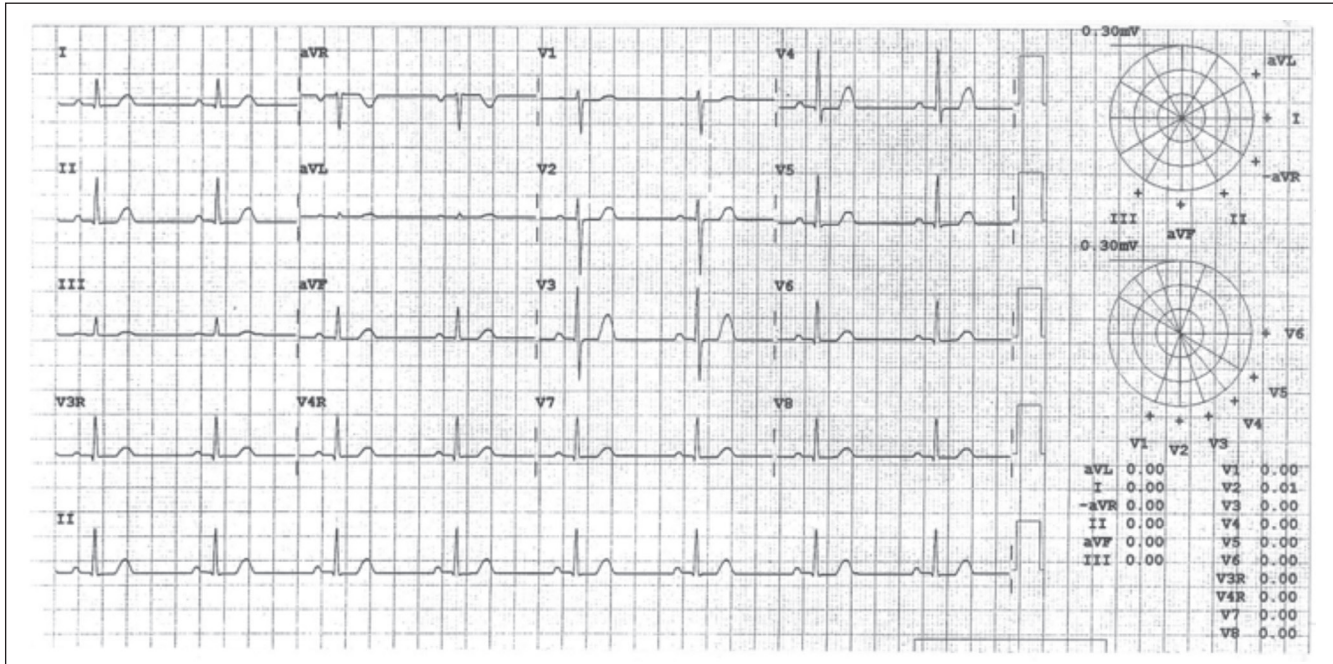
El análisis computarizado es una información útil y complementaria que siempre debe ser validada por el médico. El empleo de sistemas computarizados facilita el almacenamiento y organización de los datos, hace expedita la recuperación y clasificación del material, y auxilia en la enseñanza e investigación en torno a la electrocardiografía.

**Figura 2.** Electrocardiograma de 12 derivaciones que muestra un bloqueo de la rama derecha de grado mayor



Obsérvese que la porción terminal del complejo QRS en las derivaciones DII y V6 es isoléctrico, por lo que aparenta tener menor duración.

**Figura 3.** Electrocardiograma de 16 derivaciones simultáneas tomado de un modelo computarizado



Se muestran las líneas de derivación siguiendo el despliegue de Cabrera u ordenado.

#### Referencias bibliográficas:

- Pozas G. Implementación de una técnica estándar para la adquisición del electrocardiograma. *Revista Avances* 2010;20:52-56.
- Pozas G. Modificaciones a la técnica estándar para la adquisición del electrocardiograma. *Revista Avances* 2010;21:45-51.
- Pozas G. Error en la técnica de registro electrocardiográfico: derivaciones del plano frontal. *Revista Avances* 2010;22:37-41.
- Pozas G. Error en la técnica de registro electrocardiográfico: derivaciones del plano precordial. *Revista Avances* 2011;23:33-38.
- A Scientific statement from the American Heart Association Electrocardiography and Arrhythmias Committee, Council on Clinical Cardiology; the American College of Cardiology Foundation; and the Heart Rhythm Society. Recommendations for the standardization and interpretation of the electrocardiogram. *Circulation* 2007;115:1306-1324.
- Bronzino J. *Biomedical engineering fundamentals*. CRC Press 2006, pag. 24-1 a 24-11.
- Najarian K, Splinter R. *Biomedical signal and image processing*. CRC Press 2006, pag. 194-200.
- Bailey JJ, Berson AS, Garson A, Horan JG, et al. Recommendations for standardization and specifications in automated electrocardiography: a report for health professionals by an ad hoc writing group of the committee on electrocardiography and cardiac electrophysiology of the council on clinical cardiology, American Heart Association. *Circulation* 1990;81:730-739.
- Armoundas A, Tomaselli G, Esperer H. Pathophysiological basis and clinical application of T wave alternans. *J Am Coll Cardiol* 2002;40:207-217.
- Rosenbaum D, Jackson L, Smith J, et al. Electrical alternans and vulnerability to ventricular arrhythmias. *N Engl J Med* 1994;330:235-241.

- Camm J. Clinical trial design to evaluate the effects of drugs on cardiac repolarization: current state of the art. *Heart Rhythm* 2005;2:S23-S29.
- Zabel M, Klingenhoben T, Franz M, Hohnloser S. Assessment of QT dispersion for prediction of mortality or arrhythmic events after myocardial infarction. *Circulation* 1998;97:2543-2550.
- Willems J, Brohet C, Degani R, et al. The diagnostic performance of computer programs for the interpretation of electrocardiograms. *N Engl J Med* 1991;325:1767-1773.
- Laks M, Selvester R. Computerized electrocardiography-An adjunct to the physician. *N Engl J med* 1991;325:1803-1804.

#### Correspondencia:

Dr. Gerardo Pozas Garza

Email: gpozas@itesm.mx