

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Las ciencias no tratan de explicar y casi no intentan interpretar: se consagran sobre todo a hacer modelos. Por modelo se entiende una construcción matemática que, con la adición de ciertas aclaraciones verbales, describe los fenómenos observados. La justificación de esa construcción matemática es única y precisamente que sea eficaz.

JOHN VON NEUMANN

En los primeros apartados de este capítulo introductorio se describen algunos conceptos básicos, comenzando por los conceptos más generales, como la relación entre la Medicina y la Bioingeniería, hasta llegar al objeto de nuestra tesis, los potenciales ventriculares tardíos (PVT). El capítulo termina con los objetivos y el planteamiento de la tesis.

1.1 Medicina, Ingeniería y Bioingeniería (Valentinuzzi, 1988)

Existe acuerdo en que la Bioingeniería estudia y busca la aplicación de principios y métodos de las Ciencias Exactas, en general, y de la Ingeniería, en particular, a la solución de problemas de las Ciencias Biológicas y Médicas. La Ingeniería trata de mejorar, mantener y restablecer el bienestar humano aplicando conocimientos de las Ciencias Exactas. La Medicina trata de mejorar, mantener y restablecer la salud humana (que es el primer bienestar) aplicando conocimientos de las Ciencias Biológicas. Dada la similitud y el paralelismo de ambos objetivos, no debe extrañar que las dos actividades aúnen esfuerzos para cumplir el objetivo de la Medicina. Surge así, por lo menos, una parte de la Bioingeniería.

1.2 Fenómenos bioeléctricos básicos (Valentinuzzi, 1988)

Los fenómenos bioeléctricos básicos son los potenciales de acción de los tejidos excitables y sus respectivos potenciales de reposo. Este es un tema estudiado por la electro-fisiología, en la actualidad fuertemente dependiente de la electrónica y, en consecuencia, una de las líneas imbricadas con la Bioingeniería. Estos fenómenos básicos son los que originan la electrocardiografía, la electro-encefalografía, la electromiografía y, en general, todo registro de actividad eléctrica de origen biológico. En el siguiente apartado nos centraremos en la electrocardiografía.

1.3 Electrocardiografía (Pallás, 1988)

El electrocardiograma (ECG o EKG) es el registro de la actividad eléctrica del corazón medida normalmente entre dos puntos de la superficie del cuerpo. Al ser la actividad de las cámaras cardíacas rítmica y totalmente ordenada, la forma de onda obtenida es regular. En ella se reconocen fácilmente diversas ondas cuyas amplitudes, duraciones y morfología están bien definidas.

En secuencia temporal las distintas ondas reciben el nombre de P, Q, R, S, T y U. La onda P se debe a la despolarización de la musculatura de las aurículas. Las ondas Q, R y S, que forman el llamado complejo QRS, se deben a la repolarización de las aurículas y a la despolarización de los ventrículos. La onda T se debe a la repolarización de los ventrículos. La onda U, a menudo no observable, se debe a potenciales residuales del músculo ventricular y a la repolarización lenta de los músculos papilares.

Las corrientes iónicas, debidas a los potenciales de acción asociados a la actividad cardíaca, circulan por el tórax produciendo una distribución de potenciales superficiales que, en primera aproximación, es similar a la debida a un dipolo de corriente situado en el hipotético centro eléctrico del corazón. La dirección y magnitud de dicho dipolo va cambiando a lo largo del ciclo cardíaco. Su momento dipolar constituye el denominado vector cardíaco.

Los electrodos para biopotenciales convierten corrientes iónicas (únicas presentes en los tejidos vivos) en corrientes de electrones (las únicas que pueden circular por los conductores metálicos).

La señal obtenida al medir el ECG depende de la localización de los electrodos, y por ello se ha normalizado. Cada par de electrodos o combinación entre ellos se denomina derivación, y el potencial obtenido entre ellos es la proyección del vector cardíaco en la dirección que definen.

Los parámetros considerados para analizar la señal electrocardiográfica, normalmente de forma empírica, son el ritmo y su uniformidad, y la presencia, amplitud, forma y separación de las distintas ondas. Las amplitudes están asociadas directamente al estado de las células del miocardio, mientras que los tiempos vienen condicionados por las células nerviosas.

Las limitaciones del ECG clásico (en reposo) en cuanto a la capacidad de detectar ciertas cardiopatías o diferenciarlas de otras, han llevado al planteamiento de métodos alternativos. Uno muy extendido es la electrocardiografía durante ejercicio. En ella se observa y se registra el ECG mientras el paciente camina sobre una cinta móvil o pedalea en un cicloergómetro. Otra técnica es la *vectorcardiografía*. Consiste en la reconstrucción del vector cardíaco a partir de sus proyecciones en tres direcciones ortogonales X, Y, Z. En la práctica estas derivaciones no son posibles y se emplea el sistema definido por Frank, que incluye una red de resistencias ponderadas de acuerdo con la geometría y conductividades del torso, y determinadas experimentalmente. La información que se presenta es la proyección del extremo del vector cardíaco en los planos sagital, frontal y transversal, y constituye el denominado *vectorcardiograma*. La incorporación de un ordenador en los electrocardiógrafos permite obtener información adicional. Otro método alternativo es la electrocardiografía de alta resolución, a la que dedicamos el siguiente apartado.

1.4 Electrocardiografía de alta resolución

La electrocardiografía de alta resolución se utiliza para detectar señales, los denominados micropotenciales cardíacos, de pequeña amplitud no observables en el ECG estándar. El método más común de mejora de la relación señal a ruido es el promediado de señal. Ha habido numerosas aplicaciones de esta técnica como los registros del sistema de His-Purkinje y el análisis de los potenciales ventriculares tardíos. El análisis de estos potenciales tiene una gran importancia clínica. Estos potenciales constituyen el objeto de nuestra tesis, y los describiremos en el siguiente apartado.

1.5 Potenciales ventriculares tardíos

Los potenciales ventriculares tardíos son unos potenciales de alta frecuencia y pequeña amplitud que se encuentran en la porción terminal del complejo QRS y en el segmento ST (figura 1.1). Se atribuyen a la despolarización fragmentada en los bordes de la zona cicatrizada del miocardio. La conducción retardada y la reentrada de la onda de despolarización en el tejido fibroso del borde de la zona, en conjunción con un bloqueo unidireccional, dan lugar a un sustrato arritmogénico formado por circuitos reentrantes que se cree son la causa de ciertas taquicardias ventriculares y de muerte súbita cardíaca.

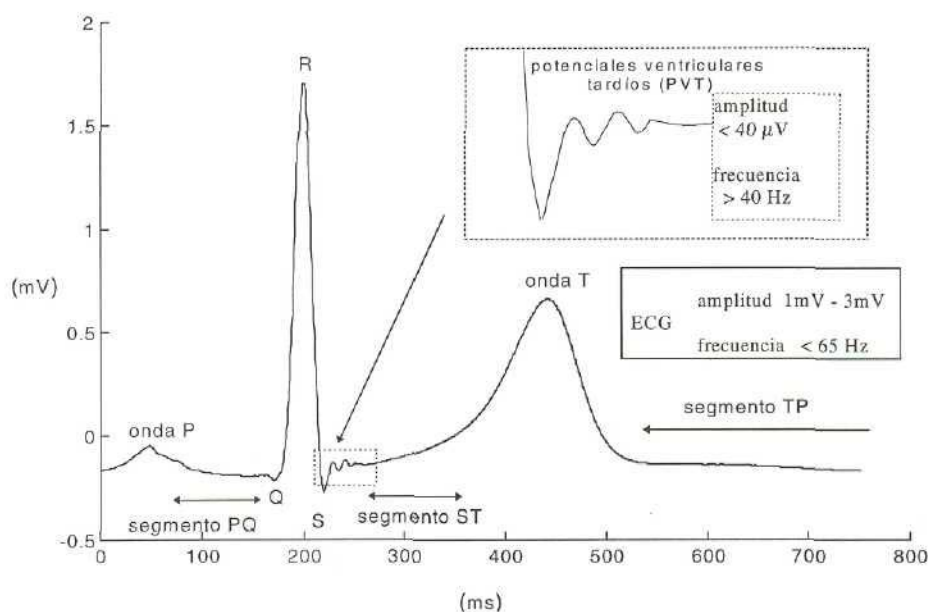


Figura 1.1 Electrocardiograma (ECG) típico con la localización de las diversas ondas y segmentos. Se incluye la localización de los potenciales ventriculares tardíos (PVT), dando los márgenes de amplitud y frecuencia.

Diversos grupos de investigadores (Breithardt et al., 1981; Simson, 1981; Denes et al., 1983) han mostrado la utilidad clínica de los potenciales ventriculares tardíos en la identificación de pacientes en el periodo postinfarto con tendencia a sufrir taquicardia ventricular y muerte súbita cardíaca. Estos potenciales también se utilizan como uno de los factores en la estratificación del riesgo en pacientes con otros desórdenes cardíacos como

la cardiomiopatía, y en la evaluación de pacientes con síncope de origen desconocido (Gang et al., 1986).

Para el registro del electrocardiograma de alta resolución se suelen utilizar las derivaciones ortogonales (X, Y, Z). La señal se amplifica mediante un amplificador de bajo ruido y alta ganancia, se digitaliza, y se procesa. El procesamiento incluye métodos para reducir el nivel de ruido, y técnicas para acentuar y analizar señales de alta frecuencia. La reducción de ruido se consigue mediante promediado de señal o filtrado adaptativo. El análisis de la alta frecuencia se realiza en el dominio del tiempo o en el de la frecuencia. El análisis en el dominio del tiempo incluye el filtrado paso alto y la extracción de características para el diagnóstico. El análisis en el dominio de la frecuencia utiliza el espectro de una señal enventanada, o bien los espectros de una serie de dichas ventanas (análisis espectro-temporal).

A pesar de haber recibido escasa atención, el análisis del ruido en el ECG es de suma importancia. Sólo a través de un cuidadoso estudio de sus características se puede llegar a filtrar el ruido suficientemente para poder detectar e interpretar fiablemente los micropotenciales cardíacos por vía no invasiva, de tanta importancia en el diagnóstico clínico (Vargas, 1992). Las fuentes principales de ruido en el ECG son: el ruido fisiológico, la interferencia de la red de distribución eléctrica, el ruido electrónico del sistema de adquisición, y el ruido de la interfaz electrodo-piel. El ruido fisiológico es debido en su mayor parte a los potenciales generados por los músculos torácicos durante la respiración. El ruido de red (50 Hz y armónicos) es periódico y puede alcanzar gran amplitud, aun tomando precauciones para reducirlo. El ruido electrónico es debido a los dispositivos activos y a las resistencias utilizadas en el sistema. El ruido generado por la interfaz electrodo-piel ha recibido atención recientemente (Fernández et al., 1991; Fernández y Pallás-Areny, 1992).

Como se ha mencionado, habitualmente se utilizan las derivaciones ortogonales X, Y, Z. Sin embargo también se han ensayado otras derivaciones, como la esofágica. A pesar de que un primer estudio parecía poco alentador (Berbari et al., 1986), estudios recientes han mostrado que las derivaciones esofágicas no deben descartarse en electrocardiografía

de alta resolución (Ramos et al., 1993a, 1993b ; Vargas et al., 1993). La ventaja de utilizar derivaciones esofágicas es que el electrodo se encuentra más cerca del corazón, con lo que la señal es mayor, y más alejado de los músculos torácicos, con lo que el ruido fisiológico es menor. Por tanto, el límite en la reducción de ruido puede venir condicionado por el ruido electrónico.

Ya mencionamos antes que la interferencia de red puede ser apreciable, aun tomando precauciones al adquirir la señal. Sin embargo, el empleo de un filtro de banda eliminada habitual distorsiona la señal de interés de modo inaceptable. Por tanto, sería deseable emplear otro método.

1.6 Antecedentes históricos (Lander y Berbari, 1992)

A principios de la década de los cincuenta, Paul H. Langner, un médico que trabajaba en la industria de los seguros de vida, comenzó una serie de estudios con el fin de examinar los componentes de alta frecuencia en el complejo QRS (Langner, 1953; Langner y Geselowitz, 1960; Langner et al. 1961). Fue capaz de observar "muescas" en el QRS, que eventualmente estaban relacionadas con una dolencia cardíaca. Nancy C. Flowers et al. (1969) reforzaron esta idea, mostrando la relación entre dichas muescas y la identificación de las cicatrices producidas por un infarto. Sin embargo, estos estudios sólo requerían un ECG de bajo ruido y no iban más allá de la medida de las ondas estándar del ECG.

La idea de que podía haber señales eléctricas cardíacas de pequeña amplitud, insuficiente para ser detectadas mediante técnicas de electrocardiografía estándar, no apareció hasta una época relativamente reciente. A finales de la década de los sesenta, Benjamín J. Scherlag y colaboradores (Scherlag et al., 1972) desarrollaron la técnica de situar los electrodos en catéteres cardíacos aplicados directamente al corazón para registrar la señal del haz de His. Este logro abrió una nueva era en electrofisiología cardíaca y difundió la idea de que había señales de pequeña amplitud en intervalos del ECG hasta entonces considerados isoelectrónicos, en este caso el segmento PR. Edward J. Berbari y et

al. (1973), consiguieron registrar por primera vez de forma no invasiva las señales del sistema de His-Purkinje en perros mediante técnicas de promediado de señal. Posteriormente se aplicó esta técnica al hombre.

La evidencia de que las regiones infartadas tienen actividad retardada se obtuvo a partir de estudios en animales por Waldo y Kaiser, Boineau y Cox, y por el laboratorio de Scherlag y Lazzara. Berbari et al. (1978) demostraron que estas despolarizaciones tardías podían ser registradas desde la superficie del cuerpo. Siguió pruebas correlativas en el hombre, incluyendo el ya clásico trabajo de Michael B. Simson (1981).

Desde comienzos de la década de los ochenta se han publicado más de 300 artículos sobre el tema del registro no invasivo de los potenciales ventriculares tardíos. En 1991 el análisis de los potenciales ventriculares tardíos utilizando electrocardiografía de alta resolución fue objeto de un intento de normalización (Breithardt et al., 1991). Se han publicado al menos dos libros dedicados enteramente a la electrocardiografía de alta resolución (Oeff, 1989; El-Sherif y Turitto, 1992). El tema empieza también a ser tratado en libros de electrocardiografía general (Heinecker y Gonska, 1992, págs. 53-54; So, 1993, págs. 25-27). En los últimos años se han publicado varios resúmenes sobre el tema, tanto desde el punto de vista médico (Simson, 1992; Berbari y Lazzara, 1992; Kjellgren y Gomes, 1993) como técnico (Berbari y Lander, 1992; Lander y Berbari, 1992; Reddy et al., 1992). Un resumen de la electrofisiología de los potenciales ventriculares tardíos se encuentra en El-Sherif (1993). Un reciente análisis crítico de los métodos de detección de potenciales ventriculares tardíos con el objetivo de mejorar dicha detección puede encontrarse en Lander et al. (1993).

1.7 Objetivos y planteamiento

El objetivo principal de la tesis es el análisis y la reducción del ruido en la electrocardiografía de alta resolución con el propósito de mejorar la detección de los potenciales ventriculares tardíos. La hipótesis es que un cuidadoso análisis del ruido y de las técnicas empleadas actualmente para su reducción permitirá proponer mejoras a dichas técnicas. En otra tesis (Fernández, 1996) se estudian diversos métodos de reducción de ruido en el momento de realizar la adquisición, tales como el apantallamiento de los electrodos, la utilización de electrodos activos y las técnicas de relajación del paciente. Nosotros nos basamos en registros adquiridos sin aplicar dichas técnicas, pues no es lo habitual en un entorno hospitalario. Por otra parte, hemos analizado y propuesto técnicas de reducción del ruido electrónico del sistema de adquisición, pues una vez aplicadas las técnicas propuestas en la mencionada tesis para la reducción de las otras fuentes de ruido, puede que el ruido electrónico sí adquiera relevancia.

Otra de las fuentes de ruido es la interferencia producida por la red de distribución eléctrica. Sin embargo, los filtros de red habituales introducen una distorsión inaceptable en la señal electrocardiográfica de alta resolución. Otro de los objetivos de la tesis será, pues, el desarrollo de un nuevo filtro para las interferencias de red que no distorsione la fase de la señal de interés y que no anule la componente de la señal a la frecuencia de red ni armónicos.

La reducción de ruido conseguida mediante promediado de señal depende de la estacionariedad del ruido, tema al que no se le ha prestado la debida atención. Otro objetivo de la tesis será, pues, el análisis de la estacionariedad del ruido, tanto para derivaciones superficiales como esofágicas. Esto nos permitirá criticar y mejorar los métodos actuales de reducción de ruido. También definiremos y estudiaremos nuevos métodos de reducción de ruido no estacionario.

Describimos brevemente el contenido de cada uno de los capítulos que siguen. El segundo capítulo está dedicado al análisis y reducción del ruido del sistema electrónico. El tercer capítulo está dedicado a la reducción de la interferencia de red. En el cuarto capítulo

se analiza la estacionariedad del ruido y se proponen varios métodos de reducción de ruido no estacionario. Mediante estos métodos se puede reducir el ruido de las otras dos fuentes: el ruido de los electrodos y el ruido fisiológico (EMG). En el capítulo quinto se describe la aplicación de las técnicas desarrolladas a la detección de potenciales ventriculares tardíos. Finalmente, en el sexto capítulo se describen las conclusiones que se han obtenido.