

Extracción de eventos en electrocardiograma mediante el procesamiento de señales, utilizando el algoritmo MTEO

Leticia Gómez Rivera, María Margarita Labastida Roldán

Universidad Autónoma de Tlaxcala,
Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología,
México

lety.gr0108@gmail.com,
mariamargarita.labastida.r@uatx.mx

Resumen. Los sistemas enfocados en el área de la salud son importantes para mejorar los resultados obtenidos por los médicos especializados, debido a que estos sistemas son capaces de procesar y analizar grandes cantidades de información. En esta investigación, se implementa un sistema que representa una alternativa a los electrocardiógrafos multicanal con interpretación, ya que en México, el número de electrocardiógrafos por Entidad Federativa es completamente bajo. En promedio, Querétaro tiene el mayor número de electrocardiógrafos y solo cuenta con siete dispositivos por hospital [1]. El sistema desarrollado en esta investigación realiza el filtrado de la señal de electrocardiograma, obtiene la ubicación de las ondas P, Q, R, S y T, la duración de los intervalos RR, PR, QRS y PP, además de la Frecuencia Cardíaca. Estos datos son importantes porque el especialista puede consultarlos con un grado de precisión de milisegundos, lo cual ayuda a realizar un diagnóstico más preciso, ya que diversos factores como la falta de experiencia del médico o las dificultades para detectar irregularidades en grandes cantidades de información pueden desencadenar en un diagnóstico erróneo y afectar la calidad de vida del paciente, y en casos más graves, su propia salud.

Palabras clave: Electrocardiograma, filtro, señal, intervalos.

Extraction of Electrocardiogram Events through Signal Processing Using the MTEO Algorithm

Abstract. Systems focused on the health area are important to improve the results obtained by medical specialists, because these systems are capable of processing and analyzing large amounts of information. In this research, a system is implemented that represents an alternative to multichannel electrocardiographs with interpretation, since in Mexico, the number of electrocardiographs by Federal Entity is completely low. On average, Querétaro has the highest number of electrocardiographs and only seven devices per hospital [1]. The system developed in this research performs the filtering of the electrocardiogram signal, obtaining the location of the P, Q, R, S and T waves, the duration of the RR, PR, QRS and PP intervals, as well as the Heart Rate. This data is important because

the specialist can consult it with a degree of precision of milliseconds, which helps to make a more accurate diagnosis, since various factors such as the lack of experience of the doctor or the difficulties in detecting irregularities in large amounts of information can trigger a wrong diagnosis and affect the quality of life of the patient, and in more serious cases, their own health.

Keywords: Electrocardiogram, filter, signal, intervals.

1. Introducción

Las enfermedades cardiovasculares constituyen la primera causa de muerte en nuestro país a nivel mundial. En 2015, la Organización Mundial de la Salud (OMS), estimó que el 31% de todas las muertes registradas en el mundo se debieron a estas condiciones. En México se estima que las enfermedades cardiovasculares representan el 20% del total de muertes en los adultos. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en 2016 se reportaron 136,342 fallecimientos a causa de enfermedades del corazón, un aumento de 7,611 muertes respecto al 2015. Las causas de muerte incluyen enfermedad isquémica del corazón, enfermedades cerebrovasculares, hipertensivas, entre otras [2].

Observando las estadísticas de las muertes ocasionadas por enfermedades cardiovasculares resulta alarmante la cifra de personas afectadas, por lo cual, es necesario hacer un análisis de este tema en el área de la computación debido a que se puede realizar un aporte importante al campo de la cardiología, ayudando a los médicos a obtener diagnósticos precisos para dar un tratamiento oportuno a la enfermedad.

El electrocardiograma es un gráfico en el que se estudian las variaciones de voltaje en relación con el tiempo y en el que se registra la actividad de la corriente eléctrica que se está desarrollando en el corazón durante un tiempo determinado [3], por este motivo, obtener las ondas que componen al electrocardiograma, sus intervalos y la frecuencia cardíaca es un elemento clave para realizar una evaluación del estado del corazón. En esta investigación se propone una herramienta implementada en MatLab, para filtrar la señal de electrocardiograma, obtener las ondas P, Q, R, S y T presentes en ella, realizar el cálculo de intervalos RR, PP, RR y QRS, los cuales se miden como el tiempo transcurrido en segundos de una onda a la siguiente y calcular la Frecuencia Cardíaca. El motivo principal para realizar esta investigación, es implementar una alternativa diferente de los sistemas convencionales que realizan la extracción de ondas e intervalos (electrocardiógrafos) y así obtener esta información solo haciendo uso de una computadora.

2. Conceptos básicos

En esta sección se definen brevemente los conceptos básicos que están presentes en esta investigación.

Filtrado: Se emplea de formas muy variadas en el Procesamiento Digital de Señales, por ejemplo, para eliminar el ruido indeseado que pueda existir en las señales, para la conformación espectral en la ecualización de canales de comunicación, en la detección de señales de radar, sonar, etc. [4].

Electrocardiógrafo: Detecta las señales eléctricas asociadas con la actividad cardíaca y produce un electrocardiograma.

Electrocardiógrafo multicanal con interpretación: Identifica la señal completa y determina todas las señales de las ondas P, complejos QRS y ondas T. Imprime una lista de señales como son: frecuencia cardíaca, la amplitud de la señal, el tamaño de las ondas y los intervalos entre los componentes de las ondas [5].

Onda P: Es la primera flexión hacia arriba que aparece en el Electrocardiograma. Esta onda representa el momento en el que las aurículas se están contrayendo y enviando sangre hacia los ventrículos.

Complejo QRS: Corresponde con el momento en que los ventrículos se contraen y expulsan su contenido sanguíneo, como su nombre lo indica, consta de las ondas Q, R y S.

Onda T: La onda T representa el momento en el que el corazón se encuentra en un periodo de relajación, una vez que expulsó la sangre de los ventrículos. Consiste en una deflexión normalmente positiva

Intervalo PR: Es la distancia desde el inicio de la onda P hasta el inicio del complejo QRS. La duración normal en adultos del intervalo PR oscila entre 120 y 200 ms.

Segmento PR: Es la distancia que se encuentra entre el final de la onda P y la siguiente deflexión positiva o negativa del ECG [6].

3. Trabajos relacionados

Los trabajos que se mencionan en esta sección se relacionan con este trabajo porque en cada uno de ellos se extraen eventos del electrocardiograma, los cuales contemplan ondas P, Q, R, S, T, complejos QRS, frecuencia cardíaca, intervalos y segmentos, además de los porcentajes de exactitud obtenidos después de la extracción, lo cual es un marco de referencia para comparar los resultados y verificar si el sistema de extracción de eventos tiene un mejor desempeño o resultados similares.

En [7] se plantea un sistema de procesamiento para señales electrocardiográficas, basado en el empleo de una herramienta de software diseñada en *LabVIEW 2011*. Esta herramienta consta de tres etapas que son: ajuste de nivel, filtrado digital de señal y detección automática de los complejos QRS.

También se menciona un nuevo método para obtener la frecuencia cardíaca de un electrocardiograma, en el que primero se detectan los complejos QRS presentes en la señal y a partir de ellos se determina la frecuencia cardíaca. Para lograr la detección de los complejos QRS se describe que es necesario obtener las ondas R, discriminando las ondas P y T.

En [7] se encuentra una clara relación con esta investigación debido a que uno de los alcances contemplados es realizar el cálculo de la frecuencia cardíaca a partir del conteo de complejos QRS. Se menciona también que se obtuvo un valor promedio de 94.38% de exactitud al detectar la frecuencia cardíaca, lo que constituye un marco de referencia para poder observar el desempeño del Sistema de Extracción de Eventos.

En [8] se propone implementar técnicas de análisis de bajo costo computacional para medir con precisión los principales intervalos que componen el latido cardíaco, por tal motivo, se describe que la detección del latido cardíaco consiste en ubicar los intervalos donde ocurren los complejos QRS y se menciona que la detección de los puntos Q y S se realiza para medir algunos intervalos como lo son el QS y el ST. Esta detección se basa en la estimación del punto más pronunciado en la curva inicial y final del pulso.

En [8] se describe un algoritmo de detección de la Onda T, que consiste en generar una señal donde se captan las ondas T y se elimina el resto de los componentes de la señal, después se genera un pulso único que se define sobre el espacio de tiempo de cada onda T y finalmente se ubica con precisión el final del pulso obtenido correspondiente al final de la onda T. Se menciona que como resultado de la detección de Complejos QRS se obtuvo un error promedio de 0.095%, y el error porcentual promedio en la medición de los intervalos QT, en los pacientes de control fue de 1.89% y en pacientes enfermos fue de 5.09%. El aporte de este trabajo a la investigación es que propone un algoritmo para la detección de la onda T y también sirve como punto de referencia para comparar el porcentaje de error promedio en la detección de complejos QRS y observar si el sistema de extracción de eventos obtiene resultados similares a los obtenidos en [8].

En [9] se menciona la necesidad de realizar la prueba de Electrocardiograma de forma inalámbrica para facilitar la aplicación de dicha prueba en situaciones cotidianas sin perder eficacia, por tal motivo, se propone el desarrollo de un dispositivo inalámbrico, con una interfaz de pc-usuario visualizada en MatLab. También se menciona que para realizar las pruebas se tomaron muestras de voluntarios con una duración de un minuto cada una. En [9] se menciona que se obtienen resultados de precisión de 95.54% en la detección de ondas P, de 98.11% en detección de los complejos QRS y de 95.54% en la detección de la onda T, los cuales pueden ser comparados con los resultados del sistema de extracción de eventos para su evaluación.

4. Descripción de la aplicación

En este trabajo, se implementa un sistema que obtiene las ondas, intervalos y frecuencia cardíaca presentes en un electrocardiograma, mostrando así una alternativa a los electrocardiógrafos convencionales. Como primer paso, el sistema toma como dato de entrada una prueba de Electrocardiograma en formato de archivo .mat, para ser procesado por Matlab. El Electrocardiograma se carga y se muestra en la interfaz gráfica. Después, haciendo uso del algoritmo MTEO se realiza el filtrado de la señal y la eliminación del ruido para obtener las ondas P, Q, R, S y T.

El posicionamiento de las ondas se muestra de manera gráfica en el electrocardiograma y en forma numérica en un contenedor rotulado con la letra de la onda, donde se muestra el segundo en el que ocurrió. El siguiente paso por realizar es el cálculo de los intervalos, los cuales son: Intervalo RR, PP, PR y QRS, sus valores también se muestran de segundos en la interfaz gráfica del sistema. Por último, se calcula la frecuencia cardíaca del electrocardiograma y se muestran los latidos por minuto en un apartado de la interfaz gráfica. El proceso se muestra de manera general en la Fig. 1.

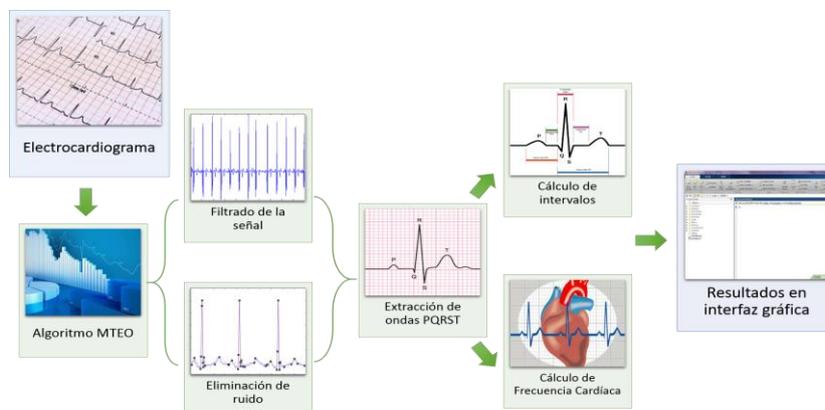


Fig. 1. Diagrama General del Sistema.

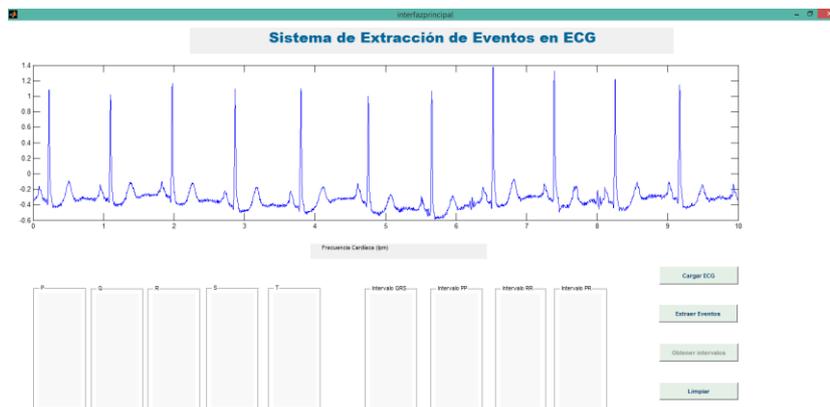


Fig. 2. Opción Cargar ECG.

5. Interfaz de usuario

En este apartado se muestra la interfaz gráfica del sistema, la cual fue implementada en MatLab y está conformada por un componente en el que se muestra la señal del electrocardiograma y por contenedores donde se muestran los resultados después del filtrado. Se presentan cuatro opciones que pueden ser realizadas por el usuario del sistema:

Cargar ECG: En esta opción, el usuario puede elegir el electrocardiograma que quiere procesar y después de la elección, la señal se muestra en pantalla (ver Fig. 2.)

Extraer eventos: Cuando el usuario selecciona esta opción, se inicia con el filtrado de la señal y se muestra la ubicación de las ondas P, Q, R, S y T, además de los segundos en los que ocurrieron. Esto se puede observar en Fig. 3.

Obtener intervalos: En esta opción se realiza el cálculo de los intervalos RR, PP, PR y QRS y se muestra su duración en segundos. También se realiza el cálculo de la Frecuencia Cardíaca y se muestran los latidos por minuto (ver Fig. 4.)

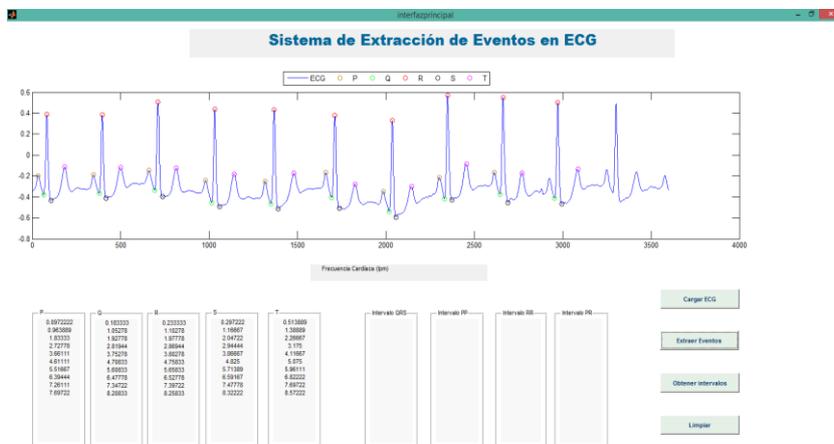


Fig. 3. Opción Extraer Eventos.

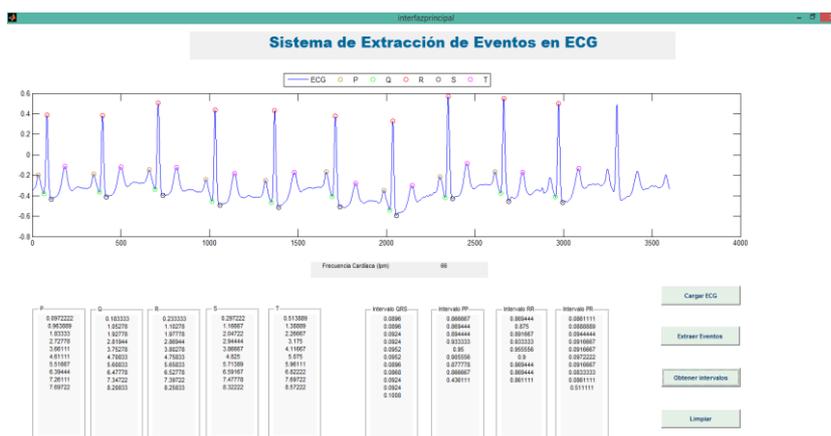


Fig. 4. Opción Obtener intervalos.

- **Limpiar:** Esta opción limpia los datos presentes en los contenedores para que el usuario pueda cargar una nueva señal de Electrocardiograma.

6. Implementación

Como primer paso a seguir para obtener las ondas P, Q, R, S y T, se realiza el filtrado de la señal de electrocardiograma haciendo uso de las funciones de Matlab *butter()* y *filfilt()*. La función *butter()* diseña un filtro Butterworth de paso bajo, paso alto, paso de banda o bandstop.

La función *filfilt()* realiza el filtrado digital de fase cero procesando los datos de entrada, tanto en las direcciones hacia delante como en las direcciones inversa *x*.

Para realizar la extracción de las ondas P, Q, R, S y T, se hace uso del algoritmo MTEO [10] implementado en Matlab. El Operador de Energía Teager Multirresolución (MTEO) en conjunto con un análisis estadístico se emplea en la etapa de detección de ondas en electrocardiograma y prueba simultáneamente tanto la frecuencia como la amplitud de potenciales de acción de unidades motoras (MUAP), para reducir las falsas detecciones y mejorar la precisión de detección. La salida MTEO se utiliza para la alineación de MUAP, la reducción de plantillas y la extracción de características para reducir el ruido de fondo y los picos no relacionados [10].

El cálculo de intervalos se realiza a partir del posicionamiento de las ondas. El intervalo RR es el tiempo transcurrido en segundos de una onda R a la siguiente y para calcularlo se toma como dato de entrada el vector de picos R y se realiza una sustracción. Para calcular el intervalo PP se sigue el mismo procedimiento que en el cálculo del intervalo RR solo que en este caso el dato de entrada es la onda P. El intervalo PR se mide desde el inicio de la onda P, hasta el inicio de la onda R o de la onda Q y para realizar su cálculo se toman como datos de entrada el vector de ondas Q y el de ondas P y se realiza una sustracción. El intervalo QRS se mide desde el comienzo de la onda Q hasta el final de la onda S y como datos de entrada para realizar su cálculo se utilizan los vectores de ondas Q y S.

En este trabajo, el cálculo de la Frecuencia Cardíaca se realiza utilizando el procedimiento médico de conteo de número de complejos QRS que ocurren en 10 s. y después multiplicarlos por seis para obtener los latidos por minuto. Para esto, se obtiene el número de elementos contenidos en el vector de intervalos QRS y después se multiplica por seis.

7. Experimentación y análisis de resultados

Para realizar las pruebas del Sistema de Extracción de Eventos propuesto en este trabajo, se reunieron 20 muestras de Electrocardiograma de la Base de Datos MIT-BIH Arrhythmia [11], las cuales cuentan con un identificador de tipo numérico que inicia en 100 y termina en 124, se tomó un tiempo de duración de 10 s. de cada muestra y fueron descargadas en formato .mat para ser procesadas en MatLab.

7.1. Pruebas cuantitativas

En este trabajo se realizaron pruebas cuantitativas al sistema para poder determinar la exactitud que tiene al extraer los eventos del electrocardiograma, los cuales son las ondas, intervalos y frecuencia cardíaca. Las pruebas fueron realizadas por el Médico Cirujano Julio César Ruiz Rivera y en este apartado se muestra la evaluación de la señal 119.mat, debido a que es una de las señales en las que es más difícil poder detectar las ondas a simple vista y el objetivo es identificar si el sistema realiza la extracción de eventos de manera eficiente. El procedimiento de evaluación se detalla a continuación:

1. El especialista observa la señal electrocardiográfica obtenida en el sitio de Physionet LightWave [12]. La señal se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Señal 119.mat. Obtenida de LightWave [12].

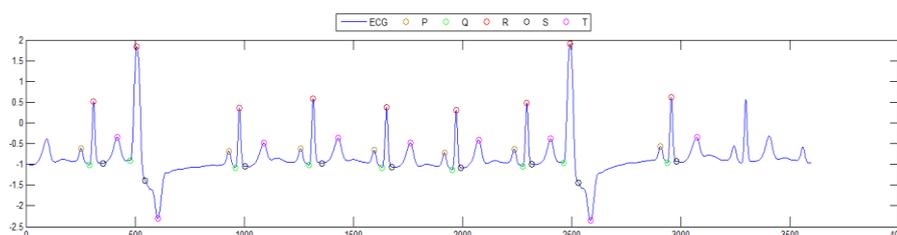


Fig. 6. Señal 119.mat. Procesada por el Sistema.

2. Compara la señal de LightWave con la obtenida por el Sistema después del filtrado y la extracción de ondas. La señal filtrada por el Sistema se muestra en la Fig. 6.
3. El especialista revisa la duración en segundos de los intervalos, además de la frecuencia cardíaca y el segundo en el que ocurre cada onda (ver Fig. 7.).
4. El especialista evalúa los resultados haciendo uso de un artefacto de evaluación donde se incluye el identificador de cada uno de los electrocardiogramas de prueba, un apartado para evaluar si las ondas P, Q, R, S y T fueron ubicadas correctamente en el electrocardiograma, una sección para evaluar si la frecuencia cardíaca fue calculada correctamente y por último, una sección donde se evalúa la cantidad de intervalos QRS, PP, PR y RR calculados correctamente.

7.2. Análisis de resultados

Después de que el especialista realizó la evaluación del Sistema con el artefacto de evaluación en las 20 pruebas de electrocardiograma se obtienen los resultados que se visualizan en la Tabla 1 “Porcentajes de extracción de Eventos en Electrocardiograma”.

8. Conclusiones y trabajo a futuro

Se propone que el sistema de Extracción de Eventos mostrado en este trabajo sea evaluado por lo menos por cinco especialistas más, esto con el objetivo de verificar que los resultados de la etapa de pruebas fueron correctos y así garantizar su buen funcionamiento.

Se concluye que, si los especialistas no cuentan con un electrocardiógrafo multicanal con interpretación, este sistema es útil para ayudarlos a realizar un diagnóstico con

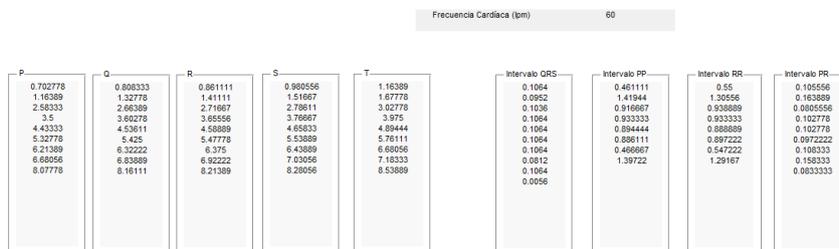


Fig. 7. Resultados obtenidos de la Señal 119.mat.

Tabla 1. Porcentajes de extracción de Eventos en Electrocardiograma.

Elemento Extraído	Porcentaje de Exactitud
Onda P	100%
Onda Q	100%
Onda R	100%
Onda S	100%
Onda T	100%
Frecuencia Cardíaca	100%
Intervalo QRS	100%
Intervalo PP	100%
Intervalo RR	100%
Intervalo PR	100%

mayor grado de precisión, ya que les proporciona los datos necesarios para detectar el tipo de enfermedad que sufre el paciente.

Las contribuciones de este trabajo se pueden observar principalmente en la recolección de muestras para conformar la base de conocimiento, ya que puede apoyar a otras personas interesadas en realizar aportes al área de cardiología porque se detalla el tiempo que fue tomado de cada muestra y el formato en el que se descarga el electrocardiograma para ser procesado en MatLab, además de que esta investigación también puede ser utilizada para realizar nuevos trabajos, como la detección de enfermedades en el corazón, y por último, la rúbrica de evaluación propuesta en esta investigación puede utilizarse y modificarse para que otros trabajos que estén relacionados sean evaluados por un especialista.

Como trabajo futuro, se propone que, utilizando los datos obtenidos por el sistema de Extracción de Eventos, se implemente un clasificador para detectar y clasificar anomalías en el ritmo cardíaco. Los datos de entrada serían las mismas pruebas de electrocardiograma que se utilizaron en esta investigación y las que pertenecen a ocho tipos de anomalías en el ritmo cardíaco: Fibrilación auricular, bradicardia sinusal, taquiarritmia supraventricular, aleteo auricular, bloqueo AV de primer grado, bloqueo cardíaco completo, bloqueo Mobitz II y taquicardia ventricular.

Las variables predictoras contempladas a ser utilizadas por el clasificador son: Intervalo QRS, Intervalo PP, Intervalo PR, Intervalo RR, Frecuencia Cardíaca, Onda P y Onda Q.

Referencias

1. Solis, C.L.: Electrocardiografía y su impacto en México el Hospital, 74(1), pp.13 (2018)
2. OMENT: Un panorama de las enfermedades cardiovasculares, Observatorio Mexicano de Enfermedades No Transmisibles/ Universidad Autónoma de Nuevo León, <http://oment.uanl.mx/un-panorama-de-las-enfermedadescardiovasculares> (2019)
3. López, A., Macaya, C.: Libro de la salud cardiovascular del Hospital Clínico San Carlos y de la Fundación BBVA. España: Editorial Nerea, S.A. (2009)
4. Proakis, J., Manolakis, D.: Tratamiento Digital de Señales. Pearson Educación S.A. (2007)
5. Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud. Guía Tecnológica No. 17: Electrocardiógrafo. Secretaría de Salud (2006)
6. Bayes, A.: Manual de Electrocardiografía básica. Barcelona: Caduceo Multimedia, S.L. (2014)
7. Bistel-Esquivel, R.A., Fajardo-Márquez, A.: Diseño de un Sistema de Adquisición y Procesamiento de la Señal de ECG basado en Instrumentación Virtual. Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones, 36(1) (2015)
8. Dugarte, J.N, Alvarez, A., Dugarte, E., Álvarez, G.: Técnicas de procesamiento de la señal ECGAR aplicadas en el prototipo DIGICARDIAC. Revista del Instituto Nacional de Higiene Rafael Rangel, 46(1–2), pp. 84106 (2020)
9. Quintero, J., Tabares, S., Perdomo, J.: Prototipo Electrocardiógrafo Inalámbrico para la detección de enfermedades que desencadenen la muerte súbita, con software de diagnóstico médico aproximado. <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/memoutp/article/view/1267> (2018)
10. Sedghamiz, H., Santonocito, D.: Unsupervised Detection and Classification of Motor Unit Action Potentials in Intramuscular Electromyography Signals (2015)
11. Moody, G.B., Mark, R.G.: The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database. IEEE Eng in Med and Biol, (PMID: 11446209) , 20(3), pp. 45–50 (2001)
12. Goldberger, A.L., Amaral, L.A.N., Glass, L., Hausdorff, J.M., Ivanov, P.Ch., Mark, R.G., Mietus, J.E., Moody, G.B., Peng, C.-K., Stanley, H.E.: PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals Circulation, 101(23), pp. e215–e220 (2003)