

Construcción de un monitor cardiaco de 3 derivaciones con fines didácticos Construction of a 3-leads cardiac monitor for educational purposes

S. E. Soria-Medina ^a, G. R. Peñaloza-Mendoza ^{b,*}, A. Campos-Hernández ^b

^a CIIDT de Ingeniería Biomédica, TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

^b Departamento de Ingeniería Biomédica, TecNM – Instituto Tecnológico Superior de Pátzcuaro, 61615, Pátzcuaro, Michoacán, México.

Resumen

El presente trabajo muestra el diseño y la construcción de un prototipo ambulatorio didáctico de medición de actividad eléctrica del corazón (ECG). La metodología se basa en el análisis teórico de las bioseñales cardiacas y los métodos de adquisición de las mismas, posteriormente se realiza el diseño tomando como referencia la introducción de ecuaciones y diagramas de circuitos que permiten la toma y adecuación de la señal, siendo estas la obtención de la bioseñal realizada a través de electrodos superficiales conectados en las extremidades del usuario y enviadas a un sistema de aislamiento eléctrico para evitar una posible descarga al usuario; el procesamiento por medio de circuitos electrónicos analógicos para la amplificación, filtrado y adecuación de la señal, por último se implementa una tarjeta Arduino, para digitalizar la señal y mostrar en pantalla la información. Las pruebas de funcionamiento se realizan empleando un simulador multiparamétrico que genera señales de electrocardiograma con diferentes características para validar que las medidas sean confiables.

Palabras Clave: Electrocardiograma, Monitor Cardiaco, Instrumento Médico, Adquisición de señales, Bioseñales.

Abstract

The present work shows the design and construction of a didactic ambulatory prototype for measuring the electrical activity of the heart (ECG). The methodology is based on the theoretical analysis of cardiac biosignals and their acquisition methods, later the design is carried out taking as reference the introduction of equations and circuit diagrams that allow the capture and adaptation of the signal, these being the Obtaining the biosignal performed through surface electrodes connected to the user's extremities and sent to an electrical isolation system to avoid a possible shock to the user; the processing by means of analog electronic circuits for the amplification, filtering and adequacy of the signal, finally an Arduino card is implemented, to digitize the signal and display the information on the screen. Performance tests are performed using a multiparameter simulator that generates electrocardiogram signals with different characteristics to validate that the measurements are reliable.

Keywords: Electrocardiogram, Cardiac Monitor, Medical Instrument, Signal Acquisition, Biosignals.

1. Introducción

Un electrocardiograma (ECG) es un dispositivo médico que se encarga de captar y mostrar la señal eléctrica del corazón (American Heart Association, 1975). Este sistema permite captar y visualizar las señales bioeléctricas generadas por el corazón mediante el empleo de electrodos colocados en una posición que se ubique en cualquier parte distal a los hombros y caderas del usuario. La adquisición, procesamiento y representación gráfica de estas bioseñales proporcionan información esencial sobre el estado de salud cardiovascular de las personas que lo usen (International Electrotechnical Commission, 2010; Kligfield et. al., 2007). A lo largo del

tiempo, el ECG se ha convertido en una herramienta no invasiva de gran relevancia en el diagnóstico oportuno de enfermedades cardiacas, ya que permite detectar patologías o patrones anormales en la actividad eléctrica del corazón, que podrían ser indicativos de enfermedades potencialmente mortales. Por lo tanto, su correcto uso puede marcar la diferencia entre la vida y la muerte de un paciente (Kligfield et. al., 2007; Lee & Mark, 2008). El conjunto de electrodos registra la actividad eléctrica cardíaca y la amplifica, para enviarla posteriormente a un oscilógrafo, que registra esta actividad en un papel para ECG. Existen diversos tipos de electrocardiogramas (ECG), empezando desde los de una derivación, el cual sería el más sencillo, los de 3 derivaciones,

* Autor para la correspondencia: grey@itspa.edu.mx

Correo electrónico: ciidt@itspa.edu.mx (Sergio Emmanuel Soria-Medina), grey@itspa.edu.mx (Guillermo Rey Peñaloza-Mendoza), acampos@itspa.edu.mx (Alicia Campos Hernández).

los de 6 derivaciones hasta los de 12 derivaciones, siendo los de 3 y 6 derivaciones los más utilizados en el área prehospitalaria. Las derivaciones básicas son las bipolares, estas son las derivaciones cardiacas básicas del ECG descritas por Einthoven, dichas derivaciones registran las diferencias de potencial entre dos electrodos ubicados en extremidades diferentes (Ludewing, 1999). Los equipos electromédicos deben ser muy seguros, sobre todo los equipos que se deben conectar al cuerpo humano para realizar su cometido, en los que una faceta importante es su seguridad eléctrica. El control de la seguridad eléctrica depende del diseño y la integración de las fuentes de alimentación en los equipos electromédicos (Organización Mundial de la Salud, 2011).

En el presente trabajo se muestra la aplicación didáctica de diagramas y ecuaciones que permiten la implementación de un Electrocardiograma (ECG) de tres derivaciones básico. La implementación se construye a partir de las características de la bioseñal de ECG donde se determina el tipo de conexión de electrodos a utilizar y el procesamiento necesario el cual consta de circuitos amplificadores y de filtrado donde se calculan paso a paso sus elementos usando estructuras definidas de acuerdo a la operación requerida por la bioseñal. Por último, una tarjeta Arduino se programa para que tome la señal y la muestre en la pantalla junto a los parámetros de la señal adquirida. Cada una de las etapas se realiza en secuencia simulando y posteriormente probando de manera práctica mediante señales senoidales de prueba. Cada estructura del ECG contiene puntas de prueba que permiten tomar las lecturas y observar la evolución de la señal a través del procesamiento de la misma.

2. Marco de Referencia

En la educación de nivel superior el reto en el proceso de enseñanza - aprendizaje requiere identificar las áreas de oportunidad y potencializarlas respondiendo a las diferentes necesidades de los estudiantes. Una de estas estrategias es implementar didácticas que permitan llevar la teoría a un ambiente donde se pueda visualizar de manera real mediante un prototipo que presenta un mayor alcance en las múltiples inteligencias.

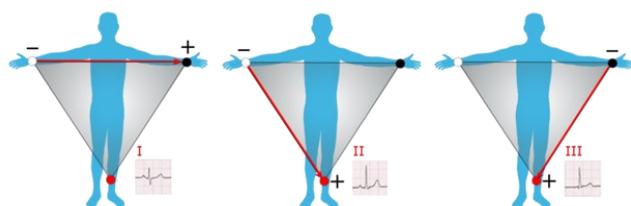


Figura 1: Derivaciones I, II y III usando el triángulo de Einthoven.

Dentro de la ingeniería biomédica un elemento esencial es el ECG. Las señales de ECG se pueden detectar en muchos puntos del cuerpo, pero décadas de tradición médica estandarizaron las ubicaciones aceptadas de esos puntos en una formación imaginaria de tres derivaciones de extremidades, llamada triángulo de Einthoven (Kligfield et. al., 2007; Ludewing, 1999). En las derivaciones bipolares de miembros de Einthoven, registran la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

- La derivación I se encuentra entre el brazo izquierdo (LA) (+) y el derecho (RA) (-).

- La derivación II se encuentra entre la pierna izquierda (LL) (+) y el brazo derecho (RA) (-).
- La derivación III se encuentra entre la pierna izquierda (LL) (+) y el brazo izquierdo (LA) (-).

Para obtener señales ECG se hace necesario analizar: la morfología de estas señales, el tipo de electrodos a usar y su ubicación en el cuerpo del paciente. Mediante electrodos aplicados en los puntos indicados en la Figura 1, se pueden obtener las señales y tras amplificarlas, se puede realizar su registro gráfico.

3. Planteamiento del Problema y Solución Propuesta

3.1. Planteamiento del Problema

La ingeniería biomédica es una disciplina que abarca múltiples áreas de conocimiento, como electrónica, programación y medicina, entre otras. Estas áreas se estudian de forma individual y multidisciplinaria en los planes de estudio. Sin embargo, es común encontrar deficiencias en la formación específica en los contenidos multidisciplinarios, lo que limita las capacidades de los estudiantes. Esto puede resultar en un desempeño profesional deficiente en el futuro. En la actualidad, los problemas cardíacos son muy comunes y hay una gran variedad de anomalías. En el proceso de detección, los médicos utilizan equipos de electrocardiografía para obtener la señal y poder interpretarla. Sin esta señal, sería imposible realizar un diagnóstico preciso. Por lo tanto, es esencial contar con personal capacitado para brindar mantenimiento preventivo y correctivo a estos equipos (Pardo Ospina & Tejedor Restrepo, 2020; Salerno & Zanaboni, 2016).

Además, en las instituciones descentralizadas los recursos económicos destinados al equipamiento de laboratorios son limitados, esto implica la falta de materiales y recursos que permitan demostrar el funcionamiento de equipos o sistemas y resolver problemas reales mediante prácticas, por lo que, se abusa del contenido teórico provocando una limitante en el desarrollo de habilidades.

3.2. Solución Propuesta

El desarrollo de habilidades prácticas es fundamental en la formación académica de los estudiantes de ingeniería biomédica, esto les permite obtener habilidades necesarias para su crecimiento profesional, por lo que resulta imperativo plantear un enfoque educativo que permita el desarrollo de dispositivos básicos del área de la salud. Se propone como método didáctico desarrollar un prototipo de electrocardiografía con aislamiento eléctrico de 3 derivaciones, mediante el uso de estructuras de circuitos de amplificación y filtrados específicos con el cálculo de sus componentes para obtener la señal y adecuarla para poder visualizarla. Se establecen como características: determinar el tipo de conexión de electrodos más apropiada, diseñar el sistema de aislamiento eléctrico, la amplificación y el filtrado para la señal, además de digitalizar la información para presentarla en una pantalla.

4. Materiales y Método

Las señales cardíacas por su morfología, presentan amplitudes bajas, lo cual hace necesario su amplificación, para poder realizar aplicaciones y que los sistemas electrónicos puedan realizar su trabajo de manera correcta. Para las señales ECG es necesario implementar una etapa de amplificación que cumpla con los requisitos para adquirir biopotenciales, entre ellos están: tener un alto CMRR y un lazo de realimentación que permita disminuir ruidos que son provocados por el paciente (Secretaría de Salud, 2017; Sivarajan, & Rosenbaum, 2019). En la Figura 2, se muestra un diagrama a bloques general del circuito desarrollado en el presente trabajo, en él se muestra el uso de la conexión Mason-Likar para el sistema de registro de los potenciales eléctricos del corazón (conexiones LL, AL, AR y LR) en la cual dos electrodos se colocan en las fosas infraclaviculares, un tercero en la línea anterior axilar, entre la última costilla y la cresta iliaca, mientras que el cuarto se coloca encima de la cresta iliaca. Enseguida se coloca un amplificador de aislamiento con el objetivo de aumentar la impedancia de entrada del circuito lo que permite aislar al usuario del circuito, el uso de este componente puede evitar el choque cardíaco accidental. Posteriormente se utiliza un amplificador de instrumentación INA131 de la firma Analog Device para la adquisición de la bioseñal, este se emplea debido a que su configuración requiere de pocos elementos para funcionar.

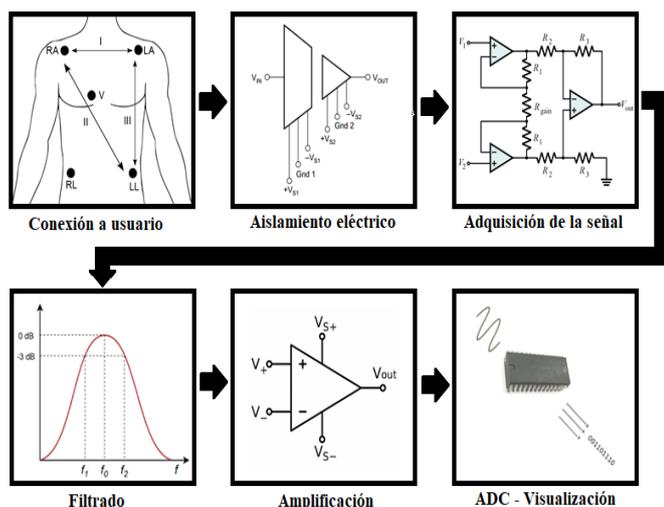


Figura 2: Diagrama de bloques del procesamiento de la bioseñal.

La siguiente etapa es el diseño de un filtro pasabanda activo de segundo orden MFB, como su nombre lo dice solo permite el paso de una banda de frecuencias y atenúa todas las demás. Esto se realiza para eliminar las componentes no deseadas obtenidas por interferencias y señales externas. Sus principales tres características son las siguientes:

- La salida es inversa respecto a la entrada (signo menos en la función de transferencia).
- La ganancia puede ser mayor, igual o menor a uno
- Permite trabajar con cualquier de factor de calidad Q (selectividad).

Junto al filtro pasabanda se diseña un filtro rechaza banda para eliminar la frecuencia de 60Hz que es suministrada al circuito cuando se emplea una fuente de energía conectada a la

red eléctrica. Por último, se desarrolla una etapa de amplificación adicional que permite la elevación del voltaje a niveles que puedan ser utilizados para su visualización digitalmente, para esto se utiliza un amplificador operacional conocido como TL084, la configuración usada es la del amplificador sumador inversor y amplificador no inversor en cascada.

4.1. Circuito de adquisición de bioseñal

La primera etapa realiza la conexión de electrodos sobre el usuario con la cual se toma la señal del corazón y permite enviar la información al circuito. La señal de salida de cada conexión de electrodo será enviada a la etapa de aislamiento para que esta conecte la señal adquirida con las siguientes etapas y prevenir un posible choque eléctrico como se muestra en la Figura 3.

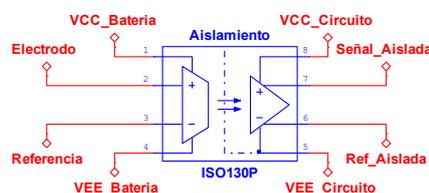


Figura 3: Circuito de aislamiento empleado para cada una de las señales provenientes de los electrodos del usuario.

Este circuito contiene 8 pines de conexión, 4 de entrada los cuales dos son de la señal de entrada, electrodo activo y referencia, además de dos adicionales que representan la energía de alimentación de entrada que serán baterías. Los 4 pines de salida corresponden dos a la señal de salida que sería la misma señal de entrada, pero aislada eléctricamente y los dos pines restantes representan la alimentación que tendrá el circuito de salida, que deberá ser de diferente fuente que la entrada. Posteriormente el amplificador de instrumentación elevará el voltaje con una ganancia ajustable y generará la operación matemática correspondiente a la derivación pertinente, para DI es LA – RA, DII es LL – RA y DIII es LL – LA, esto se observa en la Figura 4.

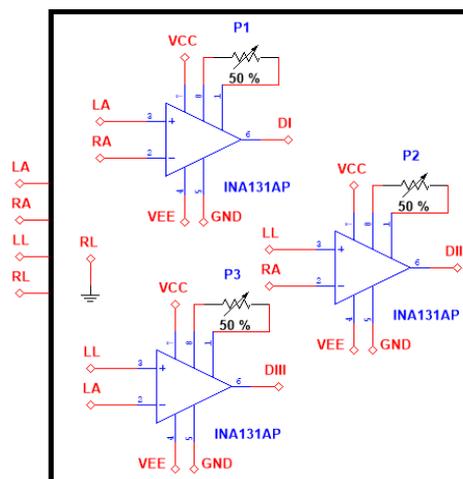


Figura 4: Circuito de adquisición de las derivaciones DI, DII y DIII.

4.2. Circuito de filtrado

salida a una frecuencia de 100 Hz desplazando en el eje horizontal la señal de salida para visualizarla junto a la señal de entrada sin que se superpongan. Terminadas las pruebas del circuito de filtrado se construye el circuito completo que permite tomar las señales del usuario y procesarlas tal como se muestra en la Figura 10, este circuito permite obtener la señal de la derivación DI, el cual es igual para las derivaciones DII y DIII cambiando las entradas iniciales por las correspondientes a esas derivaciones. El circuito completo se armó en protoboard para la realización de pruebas con un simulador multiparamétrico MS400 el cual permite generar la señal eléctrica del corazón con diferentes parámetros de amplitud y frecuencia, esto se puede observar en la Figura 11, para la conexión del circuito al simulador se emplea un cable VGA adaptado, así como se emplean baterías para alimentar el circuito.

el mismo diseño, estas tarjetas solo cambian las conexiones de entrada de los electrodos, así mismo, como se ve en la Figura 13

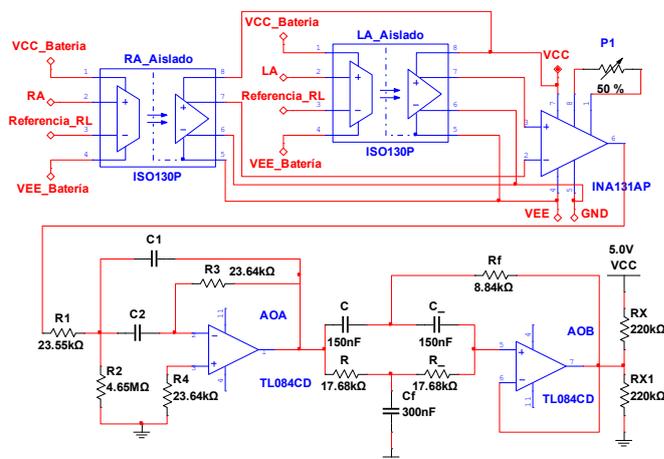


Figura 10: Circuito completo para la derivación DI.

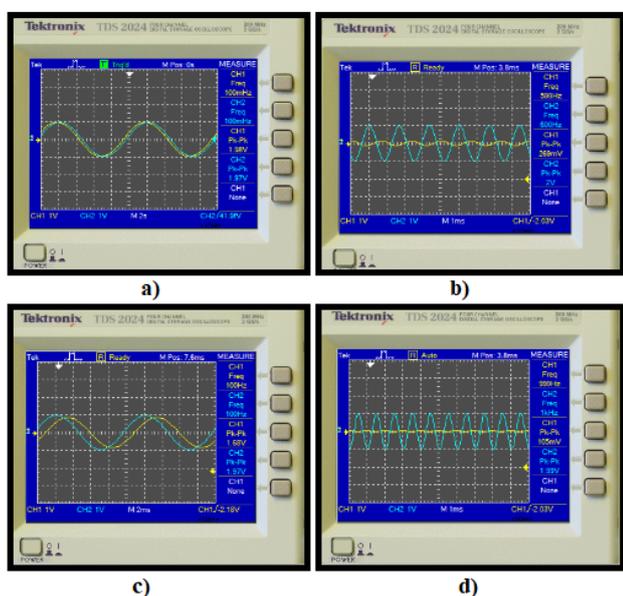


Figura 8: Gráficas de las pruebas realizadas, señal de entrada en azul y señal de salida en amarillo, a).- Frecuencia 1 Hz, b).- Frecuencia 60 Hz, c).- Frecuencia 100 Hz y d).- Frecuencia 1kHz

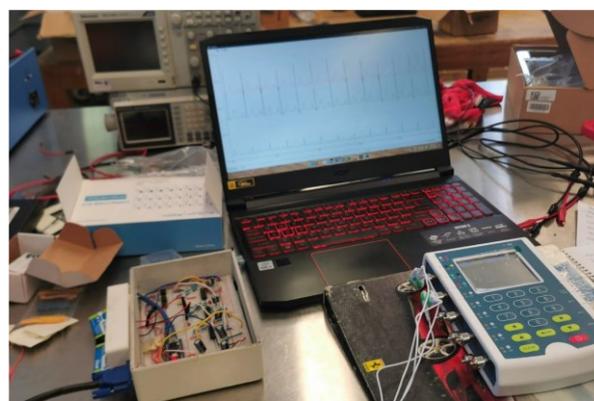


Figura 11: Estructura física del prototipo a prueba.

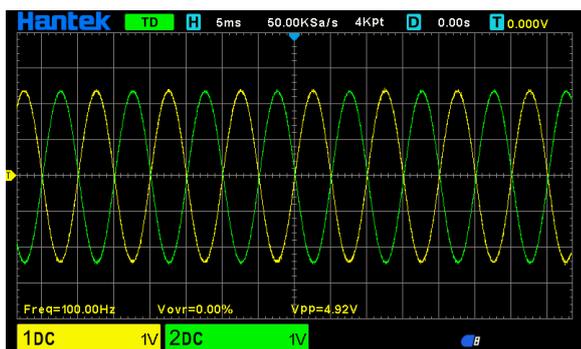


Figura 9 Señales de entrada (amarilla) y salida (verde) del filtrado a 100Hz.

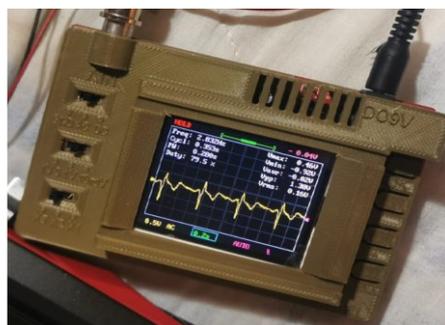


Figura 12: Señal de prueba de un ECG con bloqueo de rama.

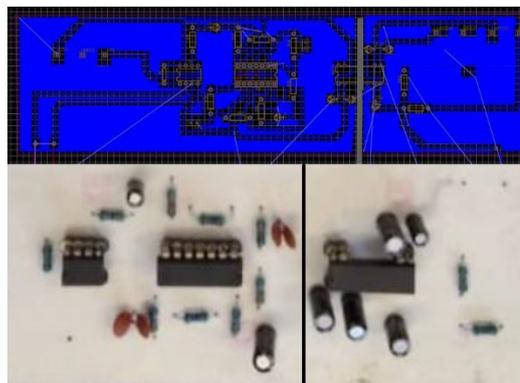


Figura 13: Diseño de PCB y placa de circuito de la derivación DI.

Las señales inicialmente se visualizan en la pantalla de un pequeño osciloscopio compatible con Arduino, usando el simulador multiparamétrico se generan múltiples señales de ECG para probar la funcionalidad del prototipo. En la Figura 12 se muestra un ejemplo de la señal de salida del prototipo con una señal de ECG que contiene un bloqueo de rama. Comprobado el funcionamiento del prototipo en protoboard, se procedió a diseñar el PCB del circuito, este se diseñó con las derivaciones por separado ya que las 3 derivaciones presentan

. Con el circuito completo en placa se realizan pruebas junto al simulador, ejemplo de esto se observa en la Figura 14, donde se genera una señal de ECG sin patología y a una frecuencia cardíaca de 80 latidos por minuto visualizada en una pantalla gráfica y al mismo tiempo en la Figura 15 se muestra el resultado en el Serial Plotter de Arduino.

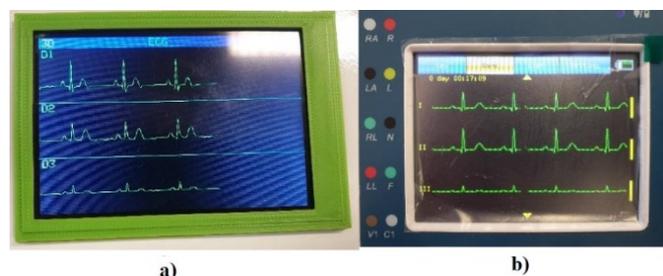


Figura 14: Señal de ECG salida en a).- el circuito y b).- en el simulador.

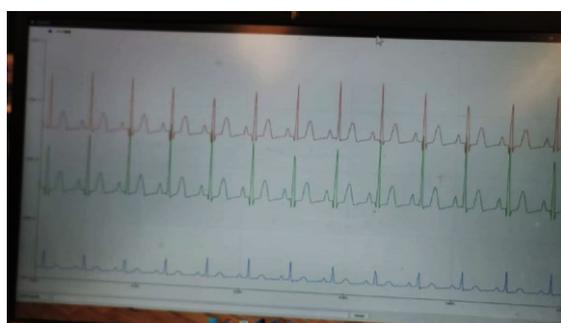


Figura 15: Visualización de las 3 derivaciones con el Serial Plotter en PC.

Para determinar la efectividad del prototipo y teniendo como objetivo el uso didáctico del prototipo se realizan mediciones en frecuencia cardíaca y amplitud del complejo QRS, así mismo se identifica la existencia de las ondas P, Q, R, S y T en cada una de las pruebas realizadas. En la Tabla 1 se muestran la variabilidad máxima existente en la frecuencia cardíaca y amplitud del complejo QRS con 20 señales diferentes tanto normal como con patologías, además de variar amplitud y frecuencia en cada una, dando un total de 100 pruebas.

Tabla 1: Resultados en pruebas realizadas con el simulador y el prototipo

	Frecuencia cardíaca	Amplitud Complejo QRS	Existencia de las 5 ondas base
Error máximo	1.13%	2.36%	0%

6. Conclusión y Trabajo Futuro

Se logró implementar la estrategia didáctica para la construcción de un ECG de 3 derivaciones que cumple con las características fundamentales para detectar las ondas P, QRS y T del ECG, además se logró un sistema abierto que permite obtener las señales de cada etapa de procesamiento además de poder visualizar las señales resultantes en una pantalla integrada en el prototipo. El prototipo cuenta con el

aislamiento eléctrico que permite garantizar la seguridad eléctrica, sin embargo, se utiliza en conjunto con un simulador multiparamétrico y no se conecta a usuario, esto debido a que el prototipo no se encuentra regulado por las respectivas normas existentes para la calibración de equipo médico, pero cumple con todos los elementos mínimos necesarios para mostrar el funcionamiento general. En cada prueba se obtuvieron visualmente las 5 ondas del ECG. La estrategia didáctica se implementó permitiendo que los estudiantes entregaran un ECG con resultados que presentan desviaciones mínimas en la medición de la frecuencia cardíaca y en la amplitud del complejo QRS. Los estudiantes tomaron como referencias estructuras establecidas de amplificadores y filtros, pero en base a la teoría calcularon los elementos necesarios para mantener la señal deseada y eliminar las no deseadas por lo que el resultado fue similar en todos los casos aun cuando los elementos cambiaron de valores. Se deja como trabajo futuro la implementación del producto de esta estrategia de manera didáctica en un grupo de inicio de la carrera donde pueda ser utilizado para mostrar el funcionamiento de un ECG.

Referencias

- American Heart Association (AHA) (1975). Electrocardiography Subcommittee, et al. Recommendations for standards in electrocardiography. *American Heart Journal*, 89, 4, 662–94.
- International Electrotechnical Commission (IEC) (2010). Medical electrical equipment - Part 1-1: General requirements for basic safety and essential performance. Geneva: IEC.
- Kligfield P, Gettes LS, et al. (2007). Recommendations for the Standardization and Interpretation of the Electrocardiogram. Part I: The Electrocardiogram and Its Technology: 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 Endorsed by the International Society for Computerized Electrocardiology. *Circulation*; 115, 1306–1324.
- Lee, D. C., & Mark, R. G. (2008). Electrocardiography: practice and interpretation. In *Electrocardiography*. Springer, 11–28.
- Ludewing, L. R. (1999). Amplificadores operacionales y circuitos integrados lineales. Naucalpal de Juárez: Prentice Hall.
- Organización Mundial de la Salud. (2011). Introducción a la gestión de inventarios de equipo médico. Serie de documentos técnicos de la OMS sobre dispositivos médicos. Recuperado de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/44817/9789243501390_spa.pdf;sequence=1.
- Pardo Ospina, J., & Tejedor Restrepo, R. (2020). Diseño de un Módulo de Adquisición de Potencial Eléctrico Cardíaco ECG de Bajo Costo. Universidad de los Llanos.
- Salerno, D. M., & Zanaboni, P. (2016). The clinical utility of electrocardiography. In *Practical Medical Procedures at a Glance*. Wiley-Blackwell, 138–139.
- Secretaría de Salud. (2017). Plan Estratégico de Infraestructura y Equipamiento Médico 2017–2024. Recuperado de <http://www.csg.salud.gob.mx/descargas/pdf/pipelinedeinversionesenequipamientomedico20170830.pdf>.
- Sivarajan, V. B., & Rosenbaum, D. S. (2019). Basics of Electrocardiogram Interpretation. In *Manual of Cardiovascular Medicine*. LWW, 21–26.
- Zárate-Ocaña, G. T., Ramos-Cuevas, M. D., Contreras-Cariño, L. B., Bélen-Luna, J. C., & González-Morán, C. O. (2018). Diseño y construcción de un prototipo biomédico para la adquisición vía remota de signos vitales utilizando tecnologías del internet de las cosas (IoT). *Memorias Del Congreso Nacional De Ingeniería Biomédica*, 5, 1, 470–473. Recuperado a partir de <http://memoriascnib.mx/index.php/memorias/article/view/564>.