

Equipment for measuring electrocardiographic signals with modular parts as a pedagogical purpose in a subject of Medical Mechatronics

Edson Ynilupu-Mattos, Bachiller¹, Fabio Jeri-Alejos, Bachiller¹, Franco De la torre-Loyola, Bachiller¹, Jimmy Warthon-Meléndez, Bachiller¹, Bruno Terrones-Vásquez, Estudiante¹

¹Ricardo Palma University, Peru,

edsram_1@hotmail.com, fabiojeri2012@gmail.com, fr.delatorre21@gmail.com, jim.warthon@gmail.com, brunoatv1@gmail.com

Abstract– The Medical Mechatronics course is focused on the acquisition of new knowledge related to applications in the field of Medicine; this course is taught in the tenth semester of the Mechatronics Engineering degree, Ricardo Palma University. The first evaluation criterion of the course is to make an electrocardiographic signal measuring equipment, this represents a challenge for the student when having to implement this equipment. The main objective of this work is the development of an electrocardiographic signal measurement equipment with modular parts as a pedagogical purpose, which reinforces the understanding of the concepts and parameters involved in designing and implementing this equipment in the subject. The composition contains a mechanical design with modular parts; the electronic design allows the signal to be conditioned and analyzed at each stage required for its acquisition; and the algorithm design allows the signal to be interpreted in order to obtain the heart rate. The results reflect the intuitive use of the equipment, with the obtaining and visualization of the desired signal; concluding that, the equipment presents a good structure as a pedagogical guide and an adequate ergonomics to fulfill its purpose.

Keywords: *pedagogical guide, medical mechatronics, electrocardiograph*

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.293>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Equipo de medición de señales electrocardiográficas de piezas modulares como fin pedagógico en una asignatura de Mecatrónica Médica

Edson Ynilupu-Mattos, Bachiller¹, Fabio Jeri-Alejos, Bachiller¹, Franco De la torre-Loyola, Bachiller¹, Jimmy Warthon-Meléndez, Bachiller¹, Bruno Terrones-Vásquez, Estudiante¹

¹Ricardo Palma University, Peru,

edsram_1@hotmail.com, fabiojeri2012@gmail.com, fr.delatorre21@gmail.com, jim.warthon@gmail.com, brunoatv1@gmail.com

Resumen— La asignatura Mecatrónica Médica está enfocada para que el estudiante adquiera nuevos conocimientos relacionados a las aplicaciones en el ámbito de la Medicina; esta asignatura se imparte en el décimo semestre de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Ricardo Palma. El primer criterio de evaluación de la asignatura es realizar un equipo de medición de señales electrocardiográficas, esto representa un desafío para el alumno al tener que implementar este equipo. El objetivo principal de este trabajo es la elaboración de un equipo de medición de señales electrocardiográficas de piezas modulares como fin pedagógico, que refuerce la comprensión y entendimiento de los conceptos y parámetros que comprende diseñar e implementar este equipo en la asignatura. La composición abarca un diseño mecánico de piezas modulares; el diseño electrónico permite acondicionar y analizar la señal en cada etapa requerida para su adquisición; y el diseño del algoritmo permite interpretar la señal para poder obtener la frecuencia cardíaca. Los resultados reflejan el uso intuitivo del equipo, con la obtención y visualización de la señal deseada; concluyendo así que, el equipo presenta una buena estructura como guía pedagógica y una ergonomía adecuada para cumplir su propósito.

Palabras Claves—guía pedagógica, mecatrónica médica, electrocardiógrafo.

I. INTRODUCCIÓN

La asignatura Mecatrónica Médica es de naturaleza práctico - teórico, dirigido a que el estudiante adquiera conocimientos relacionados a las aplicaciones de Ingeniería Mecatrónica al ámbito de la Medicina. Esta asignatura en estudio, se imparte en el décimo semestre de la carrera de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería de la Universidad Ricardo Palma [1].

Tal asignatura es obligatoria cursarla para el fundamental desempeño académico del futuro egresado de esa escuela, desde el Plan de Estudio 2008 – II [2]. Durante el curso, el estudiante aplica los fundamentos de los circuitos eléctricos y electrónica digital – analógica, emplea componentes y equipos médicos para brindar solución al ámbito biomecánico; también realiza diseños de sistemas básicos de adquisición de información biológica usando técnicas de sensado general combinado conceptos fundamentales de instrumentación asistida por computador y electrónica [3].

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.293>

ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

La Fig. 1 compara, en porcentaje, a la asignatura Mecatrónica Médica, incluyendo sus requisitos de asignaturas previas, con las demás asignaturas del décimo semestre, demostrando su relevancia, con un 37 por ciento, en cantidad de créditos, horas por semana y asignaturas previas que necesita para cursarla en tal semestre.

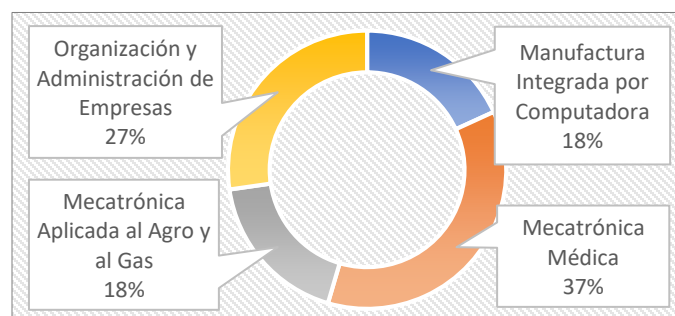


Fig. 1 Asignaturas del décimo semestre de la carrera de Ingeniería Mecatrónica.

A. Mecatrónica Médica como asignatura del décimo semestre

Unos de los objetivos del estudiante, al culminar la asignatura, será el identificar y usar adecuadamente los potenciales bioeléctricos del cuerpo para un tratamiento o monitoreo específico, además de diseñar la parte de control, electrónica y software para tal fin.

En la asignatura, se asigna una semana única a cada criterio de evaluación para que el alumnado tenga una fecha determinada y pueda disponer de tiempo para realizar cada evaluación única de manera ordenada durante toda la asignatura; esa fecha asignada es la estimada y deseada, pero tal fecha puede aplazarse, incumpliendo y desordenando la estructura de evaluación de la asignatura, al no tener una guía pedagógica del equipo.

En el primer criterio de evaluación de esta presente asignatura se realiza un equipo de medición de señales electrocardiográficas, donde el alumnado tiene un plazo máximo establecido para poder presentar tal equipo funcional. Por ello, representa un desafío para todo el alumnado el tener que implementar el equipo.

B. Métodos de diseño de equipos de medición de señales electrocardiográficas

Existen diversos métodos de diseño de equipos de medición de señales electrocardiográficas. En 2012, G. Vega

realizó un diseño y la construcción de un electrocardiógrafo de 12 derivaciones para el análisis de señales cardíacas, en Cuenca, Ecuador, obteniendo como resultado el análisis de exámenes al paciente cuando realice ejercicio físico; además de monitorear el ritmo y frecuencia cardíaca en reposo brindando una utilidad en ambulancias y clínicas [4]. En este análisis se empleó para la implementación de su diseño la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6009, el cual está enfocado especialmente a experimentos académicos de laboratorio y como guía pedagógica [5].

En 2007, L. Álvarez realizó un análisis de esquemas de filtrado para señales electrocardiográficas, en Pereira, Colombia, donde muestra la señal de un ECG (electrocardiografía) en frecuencia desde 0.05 hertz a 100 hertz, utilizando un filtro Pasa-Banda de sexto orden, obteniendo como resultados unas combinaciones de anchos de banda de 0.025 hertz a 100 hertz y 0.05 a 50 hertz para observar el comportamiento de filtros antes unas ciertas condiciones, concluyendo que el filtro mencionado anteriormente obtuvo la mejor respuesta [6]. Este análisis de esquemas de filtrado permitirá al alumnado elegir los parámetros del filtro a usar.

C. Análisis de la importancia del equipo enfocada a la pedagogía

El primer criterio de evaluación de la asignatura Mecatrónica Médica representa un desafío para todo el alumnado, ya que se emplea parámetros electrónicos, filtrado de señales, amplificadores operacionales, red de protección contra señales de ruido, aislamiento electrónico - mecánico y se debe acondicionar adecuadamente los potenciales bioeléctricos del cuerpo humano.

La Fig. 2 representa la finalidad del equipo, en diagrama de flujo, demostrando el apoyo al alumnado para que disponga, como patrón o base, un equipo funcional y que refuerce la comprensión y entendimiento de los conceptos que comprende diseñar el equipo y así pueda cumplir con el objetivo requerido de tal asignatura, además de apoyar al alumnado en cumplir con la fecha de entrega del proyecto en la semana que se dispone del primer criterio de evaluación.

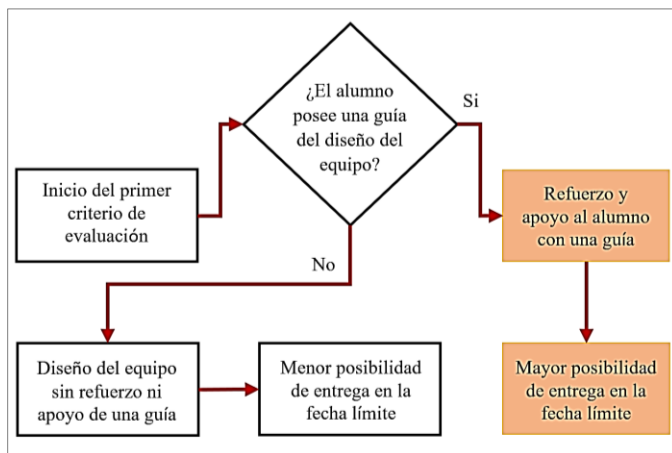


Fig. 2 Diagrama de flujo de la finalidad del equipo de medición de señales electrocardiográficas.

II. REQUERIMIENTOS DEL EQUIPO DE MEDICIÓN DE SEÑALES ELECTROCARDIOGRÁFICAS DE PIEZAS MODULARES

El equipo debe satisfacer los siguientes requerimientos para poder cumplir su idóneo uso:

- Estructura estable y resistente.
- Control electrónico automático.
- Uso práctico e intuitivo para el operario.

En adición a lo anterior, el equipo también debe cumplir:

A. Requerimientos mecánicos

- Poseer una estructura ergonómica para su correcto e idóneo uso.
- Debe ser capaz, en un futuro, de intercambiar piezas modulares y funcionar con otros tipos de señales. Por ejemplo: señales electromiográficas.
- Dimensión suficiente para poder encajar todas las piezas modulares que puedan intercambiarse.

B. Requerimientos electrónicos

- Poseer un sistema de carga de baterías de Litio.
- Disponer de una fuente simétrica regulable requerida por el equipo.
- Adquisición de la señal, la más filtrada posible, para su apropiada lectura.
- Visualización de la señal filtrada y de los resultados en un Display.

C. Requerimientos del algoritmo

- Codificación que permita obtener los pulsos por minutos de la señal.

III. DISEÑO MECATRÓNICO

El diseño del equipo está compuesto por tres partes:

- Diseño mecánico
- Diseño electrónico
- Diseño del algoritmo

A. Diseño mecánico

La Tabla I muestra los materiales mecánicos adecuados que requiere el equipo de medición de señales.

TABLA I
MATERIALES MECÁNICOS DEL EQUIPO

Item	Materiales	Descripción
01	Fibropanel de densidad media.	Para la estructura externa.
02	Material no conductor de relleno de espacios vacíos.	Por los movimientos bruscos al manipular el equipo.
03	Separadores no conductores.	Entre los componentes externos e internos de la placa electrónica.
04	Acrílico color negro.	Estructura interna y protección del circuito.

El diseño mecánico del equipo se divide en tres secciones:

- Sección A
- Sección B
- Sección C

1) Sección A

En esta sección se ubica la placa electrónica y el conector Digital MultipleX (DMX); tiene dimensiones de 10.6 centímetros de largo, 3.2 centímetros de alto y 10.6 centímetros de ancho.

La Fig. 3 muestra la sección A del diseño mecánico ensamblado en la asignatura de Mecatrónica Médica.



Fig. 3 Sección A del diseño mecánico del equipo ensamblado en la asignatura.

2) Sección B

En esta sección se ubica la alimentación incorporando un voltímetro analógico para conocer el estado de las baterías; tiene dimensiones de 10.6 centímetros de largo, 4.6 centímetros de alto y 10.6 centímetros de ancho.

La Fig. 4 muestra la sección B del diseño mecánico ensamblado en la asignatura de Mecatrónica Médica.



Fig. 4 Sección B del diseño mecánico del equipo ensamblado en la asignatura.

3) Sección C

En esta sección se ubica la placa de desarrollo Arduino Nano, el cual es una plataforma de desarrollo basada en una placa electrónica de hardware libre; tiene dimensiones de 10.6 centímetros de largo, 2.3 centímetros de alto y 11.2 centímetros de ancho.

La Fig. 5 muestra la sección C del diseño mecánico ensamblado en la asignatura de Mecatrónica Médica.



Fig. 5 Sección C del diseño mecánico del equipo ensamblado en la asignatura.

B. Diseño electrónico

La Tabla II muestra los materiales electrónicos adecuados que requiere el equipo.

TABLA II
MATERIALES ELECTRÓNICOS DEL EQUIPO

Item	Cantidad	Materiales	Descripción
01	1	Voltímetro	Estado de las baterías.
02	1	Conector DMX	Para los cables de transmisión.
03	1	Battery Management System (BMS)	Protección de las baterías.
04	3	Baterías Lipo 18650	3000 miliamperios hora
05	1	Porta batería	Para la batería Lipo 18650
06	18	Resistencias de carbono	0.1, 0.2, 1, 2.7, 3.3, 3.6, 10 y 30 kilohmios
07	1	Arduino Nano	Ejecución de instrucciones
08	2	Amplificar Operacional	TL084
09	1	PCB	Printed Circuit Board.
10	4	Transistores	2N3904, 2N3906 y BD135-6
11	1	Diodo	1N4001
12	2	Capacitor	47 y 2.2 microfaradios
13	1	Diodo Zener	1N4615
14	3	Electrodos	Electrocardiógrafos
15	-	Cables de transmisión	Tres metros de longitud.

El diseño electrónico se realizó en Autodesk Eagle, el cual es un software de diseño y esquema de PCB. Este diseño se compone de seis etapas para la adquisición de la señal deseada. La Fig. 6 muestra, en un diagrama de bloques, la composición electrónica y las etapas para la adquisición de la señal filtrada realizada por el equipo.

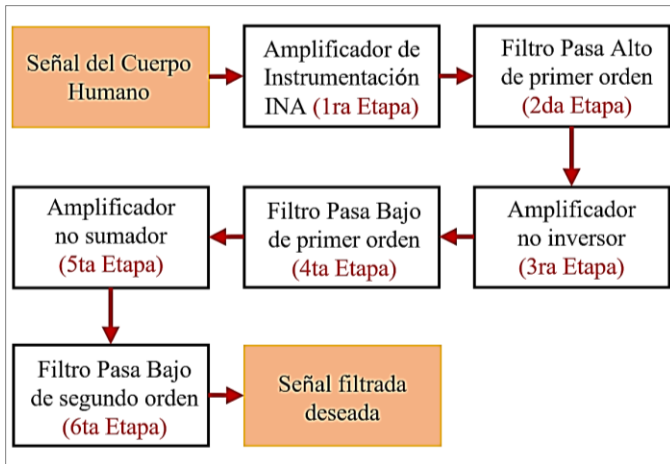


Fig. 6 Diagrama de bloques de la composición electrónica del equipo.

1) Amplificador de Instrumentación (INA)

Se empleó, para el diseño del Amplificador de Instrumentación, tres amplificadores operacionales del primer integrado TL084 [7]; este diseño posee dos etapas: *Pre amplificadora* y *Diferencial*. Se usó esta configuración esencialmente por su Factor de Rechazo al Modo Común (CMRR) [8], siendo esta característica necesaria para la primera etapa del diseño electrónico. La siguiente ecuación representa la ganancia total (Ad_1), con magnitud adimensional, del Amplificador de Instrumentación (INA), obteniendo la cantidad de 50:

$$(1 + 2 * R_2 / R_3) (R_6 / R_1) = Ad_1 \quad (1)$$

La Fig. 7 muestra la primera etapa de la adquisición de la señal filtrada.

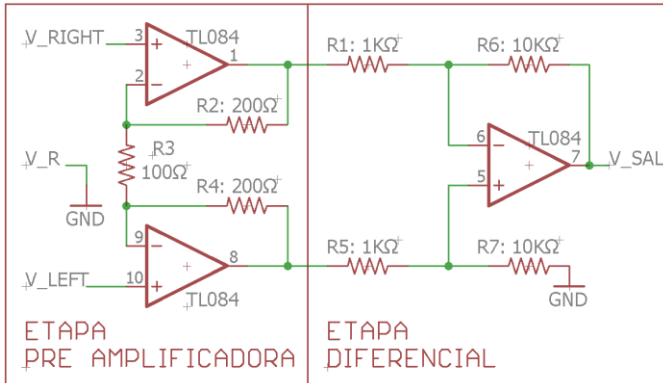


Fig. 7 Amplificador de Instrumentación (INA).

2) Filtro Pasa Alto de primer orden

Para la implementación física de este filtro, se empleó componentes analógicos de elementos pasivos; por ello, se usó un filtro pasivo. La siguiente ecuación representa la frecuencia de corte (f_c) generada en el Filtro Pasa Alto de primer orden, obteniendo unos 340 milihertz aproximadamente:

$$1 / (2 * \pi * R * C) = f_c \quad (2)$$

La Fig. 8 muestra la segunda etapa de la adquisición de la señal filtrada.

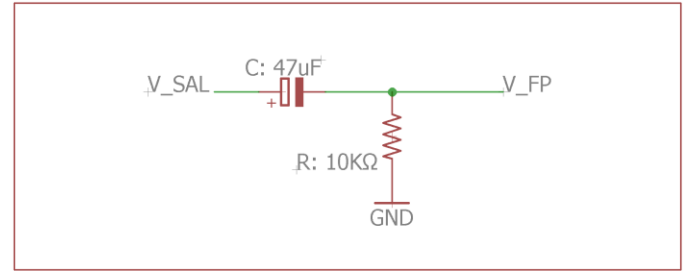


Fig. 8 Filtro Pasa Alto de primer orden.

3) Amplificador no inversor

Se empleó, para el diseño del Amplificador no inversor, el amplificador operacional restante del primer integrado TL084 que se usó en la primera etapa. La siguiente ecuación representa la ganancia total (Ad_2), con magnitud adimensional, del Amplificador no inversor, obteniendo la cantidad de 150:

$$1 + (R_2 / R_1) = Ad_2 \quad (3)$$

La Fig. 9 muestra la tercera etapa de la adquisición de la señal filtrada.

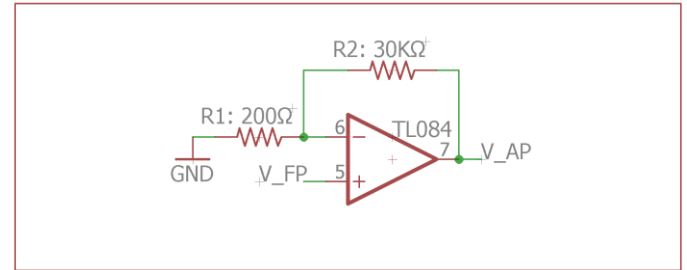


Fig. 9 Amplificador no inversor.

4) Filtro Pasa Bajo de primer orden

Para la implementación física de este filtro, se empleó componentes analógicos de elementos pasivos; por ello, se usó un filtro pasivo. La siguiente ecuación representa la frecuencia de corte (f_c) generada en el Filtro Pasa Bajo de primer orden, obteniendo unos 27 hertz aproximadamente:

$$1 / (2 * \pi * R * C) = f_c \quad (4)$$

La Fig. 10 muestra la cuarta etapa de la adquisición de la señal filtrada.

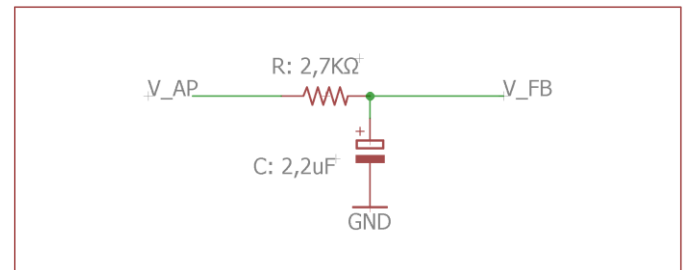


Fig. 10 Filtro Pasa Bajo de primer orden.

5) Amplificador sumador no inversor

Se empleó, para el diseño del Amplificador sumador no inversor, un amplificador operacional del segundo integrado TL084 para poder establecer un nivel de referencia adecuado para la señal. La siguiente ecuación representa la tensión de salida (V_{AS}) cuando el valor de R_3 es igual a R_4 :

$$(1/2) * (V_Z + V_{FB}) * (1 + (R_2/R_1)) = V_{AS} \quad (5)$$

Donde:

V_Z : Tensión del diodo Zener.

V_{FB} : Tensión de salida de la cuarta etapa.

La Fig. 11 muestra la quinta etapa de la adquisición de la señal filtrada.

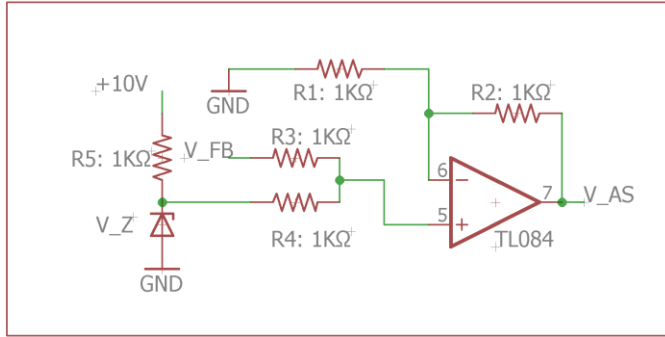


Fig. 11 Amplificador sumador no inversor.

6) Filtro Pasa Bajo de segundo orden

Para la implementación física de este filtro de segundo orden, se empleó componentes analógicos RC de elementos pasivos; por ello, se usó un filtro pasivo. La siguiente ecuación representa la frecuencia de corte (f_c) generada en el Filtro Pasa Bajo de segundo orden con un factor de calidad (Q) de 0.4787, obteniendo unos 11 hertz aproximadamente:

$$(1/(13.22 * \pi * R_1 * C_1 * Q)) + (Q/(3.30 * \pi * R_2 * C_2)) = f_c \quad (6)$$

La Fig. 12 muestra la sexta etapa de la adquisición de la señal filtrada.

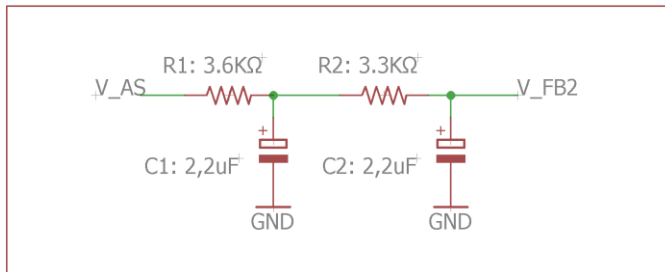


Fig. 12 Filtro Pasa Bajo de segundo orden.

C. Diseño del algoritmo

La Fig. 13 muestra, en un diagrama de bloques, el proceso de la adquisición de datos, usando la placa de desarrollo Arduino Nano, para la obtención de la frecuencia cardíaca de la señal obtenida.

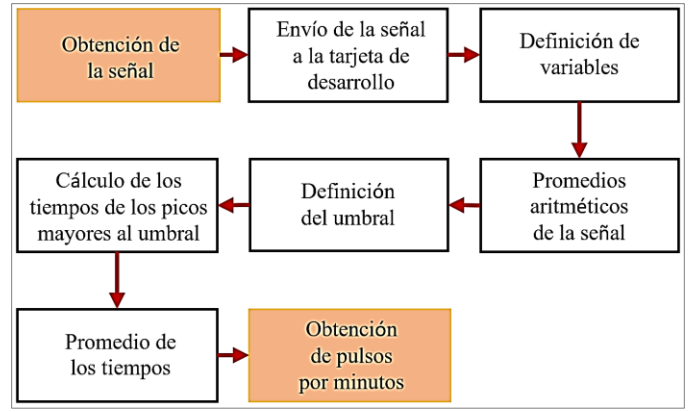


Fig. 13 Diagrama de bloques de la adquisición de datos del equipo.

IV. RESULTADOS

La Fig. 14 muestra las señales en cada etapa del diseño electrónico visualizadas en el osciloscopio digital Tektronix TDS 2012B [9]. Estas visualizaciones de las señales brindarán una mayor comprensión y entendimiento de los conceptos de cada etapa que comprende diseñar el equipo.

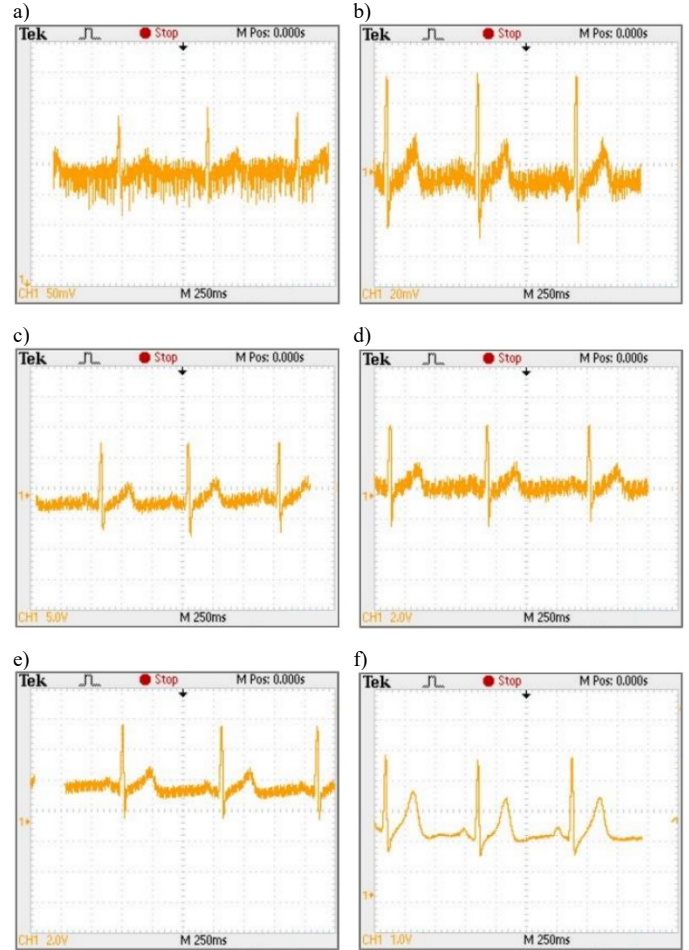


Fig. 14 Señal en la primera etapa (a), segunda etapa (b), tercera etapa (c), cuarta etapa (d), quinta etapa (e) y sexta etapa (f) del diseño electrónico.

La Fig. 15 muestra las posiciones A y B donde se ubican los electrodos de las señales de entrada V_{RIGHT} y V_{LEFT} con la posición C del electrodo de señal de referencia V_R de la primera etapa del diseño electrónico, respectivamente. Estas posiciones brindarán una referencia al alumnado sobre la ubicación correcta de los electrodos en el cuerpo humano.

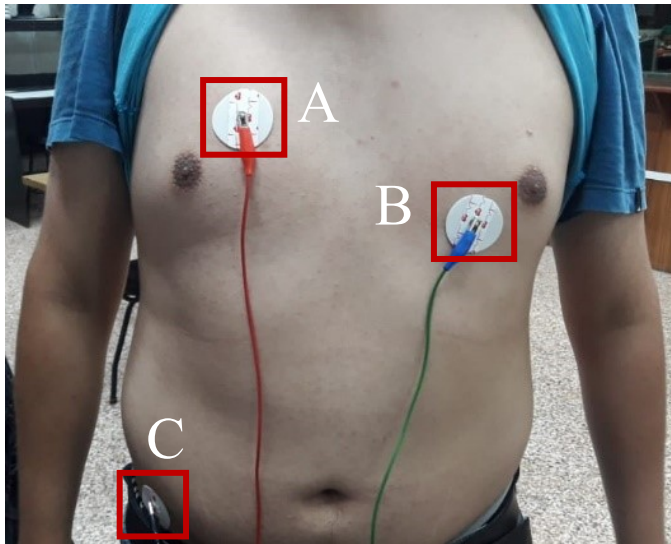


Fig. 15 Posiciones de los electrodos para la adquisición de las señales.

La Fig. 16 muestra las semanas establecidas de todos los criterios de evaluación de la asignatura de Mecatrónica Médica, incluida la duración del primer criterio si no se tiene una guía pedagógica.

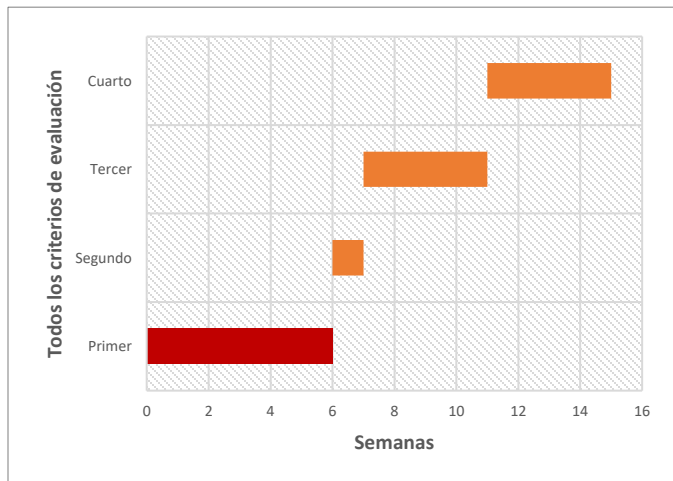


Fig. 16 Diagrama de Gantt de todos los criterios de evaluación sin una guía pedagógica para el primer criterio de evaluación.

La Fig. 17, aparte de mostrar todos los criterios de evaluación de la asignatura, muestra la duración del primer criterio de evaluación si se tiene una guía pedagógica. La duración del primer criterio es menor al usar una guía pedagógica, dando al alumno semanas para reforzar los temas académicos del primer criterio de evaluación hasta la fecha límite o comenzar el segundo criterio de evaluación con más semanas disponibles antes de la fecha límite.

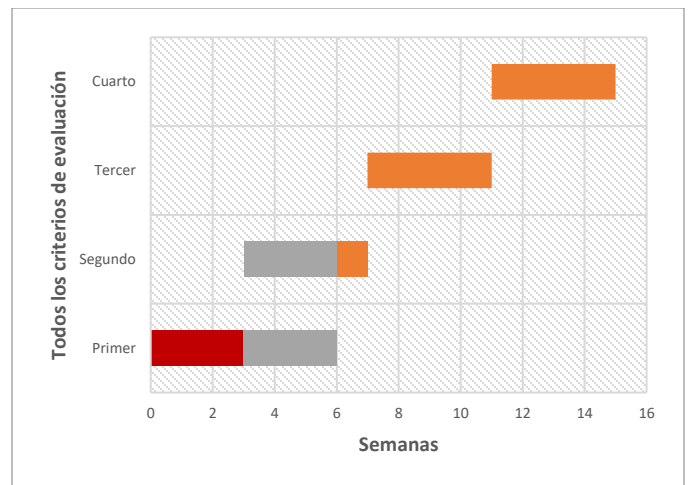


Fig. 17 Diagrama de Gantt de todos los criterios de evaluación con una guía pedagógica para el primer criterio de evaluación

La Fig. 18 muestra la sección A, B y C del diseño mecánico ensamblado del equipo funcional, donde la sección A es la pieza modular que contiene todo el diseño electrónico de la adquisición de la señal y se podrá intercambiar, en un futuro, con otro tipo de señal deseada.

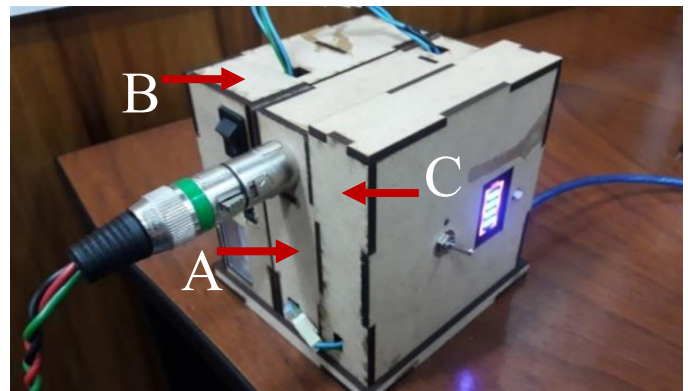


Fig. 18 Diseño mecánico ensamblado del equipo funcional

V. CONCLUSIONES

El equipo posee una estructura y diseño ergonómico; la forma de usarlo es práctica e intuitiva para el alumnado de la asignatura, pero antes de emplear el equipo para su propósito, es necesario llevar a cabo una capacitación previa para la correcta obtención de la señal por cada etapa electrónica.

Este equipo funcional, en cada etapa electrónica, brindará una mayor comprensión y entendimiento de todos conceptos que comprende diseñar, construir e implementar el equipo, ya que se puede visualizar cada señal, desde la primera hasta la última etapa electrónica, con los parámetros empleados y fórmulas necesarias para la adquisición de la señal.

Para poder obtener las frecuencias de cortes, ganancias y tensiones de salidas más exacta en todas las etapas del diseño electrónico, se debe implementar componentes analógicos de precisión; esto permitirá que el equipo sea aún más eficiente.

El uso de interrupción interna en el promedio de tiempos del diseño del algoritmo permite una reacción inmediata en

respuesta al evento electrónico de corto tiempo debido al cambio continuo para la obtención de pulsos por minutos que se genera en la señal deseada.

VI. OBSERVACIONES

Para que el alumno no esté expuesto a posibles descargas de la red eléctrica, se debe usar baterías para la alimentación; por ello, se empleó baterías Lipo con un sistema de fuente simétrica obteniendo un voltaje simétrico requerido en el equipo.

Los electrodos deben hacer buen contacto con la piel, aplicando una solución alcohólica para evitar interferencias capacitivas que podrían perturbar la señal deseada; además, una posición diferente de los electrodos, darían lugar a otras diferentes derivaciones electrocardiográficas de una misma señal.

Para las siguientes piezas modulares intercambiables de otras señales se usará la placa de desarrollo NodeMCU-ESP8266, reemplazando al Arduino Nano usado actualmente porque posee un procesador con una arquitectura de 32 bits; esto brindará una mejor adquisición de la señal.

REFERENCIAS

- [1] Información académica, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma [En línea]. Disponible en: <http://www.urp.edu.pe/ingenieria.mecatronica/>
- [2] Plan de estudio 2018 II Programa de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma [En línea]. Disponible en: http://www.urp.edu.pe/ingenieria.mecatronica/portal/index.php?urp=plane_studios
- [3] Asignatura: Mecatrónica Médica, Programa de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Ricardo Palma [En línea]. Disponible en: <http://v-beta.urp.edu.pe/pdf/id/5408/n/im1007>
- [4] G. Vega, “Diseño y construcción de un electrocardiógrafo de 12 derivaciones para el análisis de señales cardiacas”, Tesis de Ingeniero Electrónico, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, 2012.
- [5] National Instruments, “USB-6009 Dispositivo de E/S Multifunción” [En línea]. Disponible en: <https://www.ni.com/es-cr/support/model.usb-6009.html>
- [6] L. Álvarez, “Análisis de esquemas de filtrado para señales electrocardiográfica (ECG)”, Tesis de Tecnóloga en Electricidad, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, 2007.
- [7] Texas Instruments, “TL08xx JFET – Input operational Amplifiers” [En línea]. Disponible en: <http://www.ti.com/sitesearch/docs/universalsearch.tsp?searchTerm=tl084#q=tl084&t=everything&linkId=1>
- [8] E. Spinelli, “Amplificadores de Instrumentación en Aplicaciones Biomédicas.”, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de La Plata, Buenos Aires, Argentina, 2007.
- [9] Tektronik Incorporation, “TDS1000B and TDS2000B Series Manual” [En línea]. Disponible en: <https://www.tek.com/oscilloscope/tds1001b-manual/tds1000b-and-tds2000b-series>