



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

Título del trabajo

Diseño de Prácticas de Laboratorio para la Tarjeta de Desarrollo  
PPG EduKit Orientado para Estudiantes de Postgrado

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Magíster en Ingeniería Biomédica**

Presentado por:

Nenger Arboleda Andrés Javier

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2025

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto lo dedico a mi padre Humberto Nenger a mi madre María Arboleda, a mi pareja Jenniffer Cucalón, a mi familia de Quito, a mi familia de Guayaquil. A todos por todo su apoyo incondicional.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas las personas que me han apoyado, familiares, amigos, profesores, tutores, y conocidos.

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

Yo Andrés Javier Nenger Arboleda acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 5 de septiembre de 2025

---

Ing. Andrés Nenger A.

# EVALUADORES

.....  
**MSc. David Vaca**

PROFESOR TUTOR

.....  
**PhD. Federico Domínguez**

PROFESOR EVALUADOR

## RESUMEN

La fotopleletismografía (PPG siglas en ingles), es un método que se utiliza para medir los cambios volumétricos de la sangre, la medición general se suele realizar en el dedo índice. El dispositivo consta de elementos electrónicos que emiten una luz LED que atraviesa la dermis de la persona y el fotodetector mide la cantidad de luz absorbida, esta señal es utilizada por un microcontrolador para conocer el voltaje asociado y de esta manera calcula la cantidad de oxígeno en la sangre.

En las prácticas de postgrado de la Maestría en Ingeniería Biomédica se han utilizado kits educativos con tecnología PPG. Estas prácticas permiten familiarizarse con los principios de PPG, en particular sobre la medición del nivel de oxígeno en la sangre, presión sanguínea, ritmo cardíaco. Se dispone de prácticas generalizadas desarrolladas por el fabricante, pero que no están adaptadas para los laboratorios de la ESPOL.

En este proyecto se plantea diseñar nuevas guías enfocadas a postgrado para facilitar el aprendizaje de electrónica, filtros, adquisición de señales, inteligencia artificial, mediante el análisis de un sistema para analizar señales de pulso PPG.

Como parte de un convenio de cooperación de ESPOL y VUB (Universidad Libre de Bruselas), la maestría dispone de las placas PPG EduKit para el estudio de electrónica e instrumentación implementada en el dispositivo, y también la adquisición y visualización de los datos sobre fotopleletismografía. Estos datos fueron adquiridos de un total de veinte y siete estudiantes de pregrado de la carrera de ingeniería mecatrónica de ESPOL, en la materia de sistemas biomecatrónicos.

A este grupo de estudiantes se les proporcionó las nuevas guías como parte de sus prácticas de laboratorio. Cada guía consta de los siguientes componentes: prepráctica que se envía con antelación para su desarrollo por parte de los estudiantes, la práctica que se desarrolla junto con el tutor a cargo del componente práctico y la rúbrica de

evaluación que permite al tutor revisar los conocimientos adquiridos y evaluar a los estudiantes mediante el informe de la práctica.

Las guías mejoraron la comprensión y entendimiento del dispositivo para aplicación de fotopletismografía, en las prácticas de sistemas biomecátrónicos en los estudiantes de pregrado, el enfoque final de las guías es el grupo de posgrado de la Maestría en Ingeniería Biomédica, de esta manera es válido trabajar con los estudiantes de pregrado para su implementación.

Las Guías quedan publicadas para ser implementadas en las siguientes cohortes de la Maestría en Ingeniería Biomédica.

**Palabras Clave:** Fotopletismografía, Guías, Laboratorio, Evaluación, Maestría, Ingeniería Biomédica.

## **ABSTRACT**

*Photoplethysmography (PPG) is a technique used to measure volumetric changes in blood flow. This method is commonly applied to the index finger. The device consists of electronic components that emit LED light, which passes through the person's dermis, while a photodetector measures the amount of absorbed light. This signal is processed by a microcontroller to determine the associated voltage, thereby calculating blood oxygen levels.*

*In the postgraduate laboratory sessions of the Master's in Biomedical Engineering, educational PPG boards have been used. These sessions allow students to familiarize themselves with the principles of PPG, particularly in measuring blood oxygen levels, blood pressure, and heart rate. While generalized laboratory guides developed by the manufacturer are available, these are not adapted for the laboratories at ESPOL.*

*This project proposes the design of new postgraduate-focused laboratory tutorials to facilitate learning in electronics, filters, signal acquisition, and artificial intelligence through the analysis of a PPG signal processing system.*

*As part of a cooperation agreement between ESPOL and VUB (Vrije Universiteit Brussel), the Master's in Biomedical Engineering program has access to PPG EduKit boards for studying the electronics and instrumentation implemented in this device, as well as the acquisition and visualization of photoplethysmography data.*

*A group of students was provided with the new guides as part of their laboratory practices. Each tutorial consists of the following components: a pre-lab assignment, sent in advance for students to complete; the lab session, conducted jointly with the tutor in charge of the practical component; and an evaluation rubric, which allows the tutor to assess the student's acquired knowledge through their lab reports. To validate*

*these tutorials, data was collected from a total of twenty-seven undergraduate students majoring in mechatronics engineering at ESPOL, enrolled in the biomechatronic systems course.*

*These tutorials improved undergraduate students' comprehension and understanding of the device for photoplethysmography applications in biomechatronic systems practices. The ultimate focus of these guides is the postgraduate group in the Master in Biomedical Engineering, making it valid to test their implementation with undergraduate students first.*

*The guides will be made available for future cohorts of the Master in Biomedical Engineering at ESPOL.*

*Keywords: Photoplethysmography, Laboratory tutorials, Assessment, Master's Degree, Biomedical Engineering.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	III
ÍNDICE GENERAL.....	V
ABREVIATURAS .....	VIII
SIMBOLOGÍA .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
INTRODUCCIÓN.....	XIII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1 Problemática.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.2.1 Objetivo General .....	3
1.3 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Justificación del problema.....	4
1.5 Alcance .....	5
CAPÍTULO 2.....	9
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	9
2.1 PPG EDUKIT .....	29
2.2 Sustento pedagógico .....	31
2.3 Electrónica .....	34
2.4 Filtros .....	39
2.5 ADC .....	46
2.6 Adquisición de datos.....	47

2.7	Aprendizaje Automático .....	48
CAPÍTULO 3 .....		52
3.	DISEÑO DE PRÁCTICAS .....	52
3.1	Análisis del contenido del capítulo .....	52
3.2	Nuevas guías para los estudiantes en la Maestría en Ingeniería Biomédica	53
3.2.1	Práctica 1: Principio Básicos de Señales PPG .....	54
3.2.2	Práctica 2: Filtros Aplicados a las Señales Biomédicas .....	57
3.2.3	Práctica 3: Inteligencia Artificial con Fotopletismografía .....	60
3.3	Recursos necesarios para ejecutar la guía .....	63
3.3.1	Electrónica Básica .....	63
3.3.2	Ingeniería Biomédica .....	63
3.3.3	Adquisición de Señales .....	63
3.3.4	Inteligencia Artificial .....	64
3.4	Procedimiento para evaluar la efectividad de la práctica .....	64
CAPÍTULO 4 .....		65
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	65
4.1.1	Práctica 1: Principio Básicos de Señales PPG .....	65
4.1.2	Práctica 2: Filtros Aplicados a las Señales Biomédicas .....	67
4.1.3	Práctica 3: Inteligencia Artificial con Fotopletismografía .....	69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		72
CONCLUSIONES .....		72
RECOMENDACIONES .....		73
BIBLIOGRAFÍA .....		75
ANEXOS .....		82
ANEXO A: .....		83
ANEXO B: .....		113

ANEXO C:..... 156

## ABREVIATURAS

AC	Absorción Variable (Pulsátil)
ADC	Convertidor Analógico Digital
ALC	Cancelación de Luz Ambiental
BPM	Pulsaciones por Minuto
CI	Circuito Integrado
CNN	Red Neuronal Convolutiva
DC	Absorción Fija (No Pulsátil)
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
EEG	Electroencefalograma
ECG	Electrocardiograma
FC	Frecuencia cardíaca
FIFO	First Input First Output (primero en entrar, primero en salir)
FIMCP	Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción
HRV	Variabilidad de la frecuencia cardíaca
IBI	Intervalo entre latidos
I2C	Circuito Interintegrado
LBP	Latidos por minuto
LED	Diodo Emisor de Luz
PAD	Presión Arterial Diastólica
PAM	Presión Arterial Media
PAS	Presión Arterial Sistólica
PD	Photodetector
PPG	Fotopleletismografía
VUB	Universidad Libre de Bruselas

## SIMBOLOGÍA

°C	Grados Centígrados
DIY	Do It Yourself (Hazlo tú mismo)
$f_c$	Frecuencia de corte
mil	Milésima de pulgada
mg	Miligramo
mV	Milivoltio
mA	Miliamperio
SpO2	Saturación de Oxígeno
Sps	muestras por segundo
pH	Potencial de Hidrógeno
uA	Microamperio
uS	Microsegundo
V	Voltaje
vdd	Voltaje del drenaje

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Vista superior del PPG EduKit que proporciona la interfaz analógica. Las partes más relevantes están enmarcadas y etiquetadas en colores. [2] .....	2
Fig. 2.1 Sistema cardiovascular [5] .....	10
Fig. 2.2 Diagrama del corazón [7] .....	12
Fig. 2.3 Movimientos cardíacos [9] .....	13
Fig. 2.4 Representación teórica del pulso. Variación de presión arterial en el tiempo [10].....	14
Fig. 2.5 Representación esquemática de la onda de pulso, mediante manga inflable. [12].....	17
Fig. 2.6 PPG por transmisión [13].....	18
Fig. 2.7 PPG por reflexión [13].....	18
Fig. 2.8 Partes de la señal PPG, Absorción Variable (AC) y Absorción Fija (DC) [14] .....	19
Fig. 2.9 Ciclo de señal PPG normal y etapas de la onda [15].....	19
Fig. 2.10 Absorción de hemoglobina oxigenada (HbO <sub>2</sub> ) y hemoglobina desoxigenada (Hb) para diferentes longitudes de onda [2].....	21
Fig. 2.11 Oxímetro de pulso [19].....	23
Fig. 2.12 Masimo MightSat Rx [20].....	24
Fig. 2.13 Nonin Onyx Vantage 9590 [21] .....	24
Fig. 2.14 Pulse Sensor [22].....	26
Fig. 2.15 Oxímetro de pulso y sensor de frecuencia cardíaca MAX30101 [26].....	27
Fig. 2.16 Configuración de los pines del sensor MAX30101 [25].....	28
Fig. 2.17 Xiaomi Smart Band [27] .....	29
Fig. 2.18 Bloques de construcción que representan las etapas de acondicionamiento de señales más comunes que se encuentran en PPG dispositivos en caso de que la aplicación necesite la señal PPG completa (componentes AC y DC). ....	35
Fig. 2.19 Bloques de construcción que representan las etapas de acondicionamiento de señales más comunes que se encuentran en PPG. ....	36
Fig. 2.20 a) Señal PPG filtrada b) Espectro de frecuencia PPG .....	39
Fig. 2.21 Etapas de filtrado analógico en el PPG.....	40

Fig. 2.22 Referencia de Resistencia R3 en la placa PPG .....	41
Fig. 2.23 Señal PPG en dominio del tiempo .....	43
Fig. 2.24 Transformada rápida de Fourier .....	43
Fig. 2.25 Espectro de frecuencia .....	44
Fig. 2.26 Comparación de señales filtradas .....	45
Fig. 2.27 Señal fotopleitismografía .....	45
Fig. 2.28 Señales PPG adquiridas con el PPG EduKit utilizando las modalidades analógica y digital de las configuraciones Filtro 1 y Filtro 2. Todas las señales en (a,b) se adquieren, respectivamente, simultáneamente. [2] .....	45

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros de Funcionamiento del Pulse sensor. [23].....	25
Tabla 2.2 Función Pines sensor MAX30101 [25] .....	28
Tabla 2.3 Número de publicaciones de PPG por década. [20] .....	30
Tabla 2.4 Elementos electrónicos de la placa PPG EduKit [2].....	36
Tabla 2.5 Componentes pasivos necesarios para generar dos filtros análogos en el front end. [2].....	42
Tabla 2.6 Comparación entre filtro digital y analógico .....	46
Tabla 2.7 Características ADC.....	47
Tabla 2.8 Métodos de aprendizaje, sus ventajas y desventajas [47] .....	50
Tabla 4.1 Porcentaje de aprobación en las preguntas del cuestionario de la prepráctica 1. ....	65
Tabla 4.2 Porcentaje de aprobación de la rúbrica de evaluación la práctica 2. ....	66
Tabla 4.3 Porcentaje de aprobación en las preguntas del cuestionario de la prepráctica 2. ....	67
Tabla 4.4 Porcentaje de aprobación de la rúbrica de evaluación de la práctica 2. ...	68
Tabla 4.5 Porcentaje de aprobación en las preguntas del cuestionario de la prepráctica 3. ....	69
Tabla 4.6 Porcentaje de aprobación de la rúbrica de evaluación de la práctica 3. ....	70

## INTRODUCCIÓN

La fotopleletismografía es una técnica no invasiva que permite registrar las variaciones del volumen sanguíneo en diversas partes del cuerpo, especialmente en las extremidades. El método se basa en el uso de LEDs que emiten luz hacia la piel y fotodiodos que detectan la intensidad de la luz reflejada, la cual varía en función del flujo sanguíneo. Esta tecnología ha registrado importantes avances en el campo de la adquisición de señales biológicas.[1]

Gracias a estos avances, se ha abierto una puerta para la exploración de las señales fisiológicas en el ámbito académico, tanto para su estudio como para su análisis. Es posible evidenciar estos adelantos tecnológicos en dispositivos portátiles diseñados para recopilar y compartir información sobre el usuario mediante la conexión con otros equipos electrónicos, como es el caso de relojes inteligentes y pulseras de actividad

En el ámbito de la investigación, el uso de fotopleletismografía se ha desarrollado hasta obtener tarjetas de adquisición de datos mediante fotopleletismografía, pero en particular la placa de PPG EduKit [2] de biomonitoreo óptico simple y de bajo costo. La ESPOL ha iniciado el proyecto NEST: Non intrusivE device for Telemedicine para trabajar con estas placas de origen europeo de la Universidad Libre de Bruselas (VUB por sus siglas en neerlandés) en Bélgica, existen guías desarrolladas por la VUB y no poseen un formato apropiado para las clases de Maestría en Ingeniería Biomédica donde no todos los estudiantes tienen conocimientos sobre: Principios de electrónica, adquisición de bioseñales e instrumentación biomédica. La Ingeniería Biomédica es un campo interdisciplinario, lo que atrae a estudiantes con formaciones muy diversas, desde ingenierías eléctrica y mecánica hasta medicina y biología. Esta heterogeneidad, si bien es enriquecedora, presenta un desafío significativo para la estandarización de la enseñanza. Como solución a este reto, se propone implementar nuevas guías prácticas, más comprensibles, didácticas y enfocadas a un público variado, dentro del plan de estudios de la Maestría en Ingeniería Biomédica.

En las prácticas de la maestría el objetivo es aplicar los conocimientos adquiridos desde la parte teórica de las asignaturas como: Adquisición de datos, Instrumentación Biomédica, Procesamiento digital de Señales Biomédicas. En estas asignaturas se impartieron temas acerca de etapas de filtros y acondicionamiento de señales, procesamiento de señales, en todas estas se mantuvo un acercamiento con el dispositivo PPG.

Este dispositivo facilitó la comprensión de la adquisición de signos vitales como la presión sanguínea; las guías ayudaron a que los maestrantes logren una mejor comprensión sobre el dispositivo y la tecnología PPG.

# CAPÍTULO 1

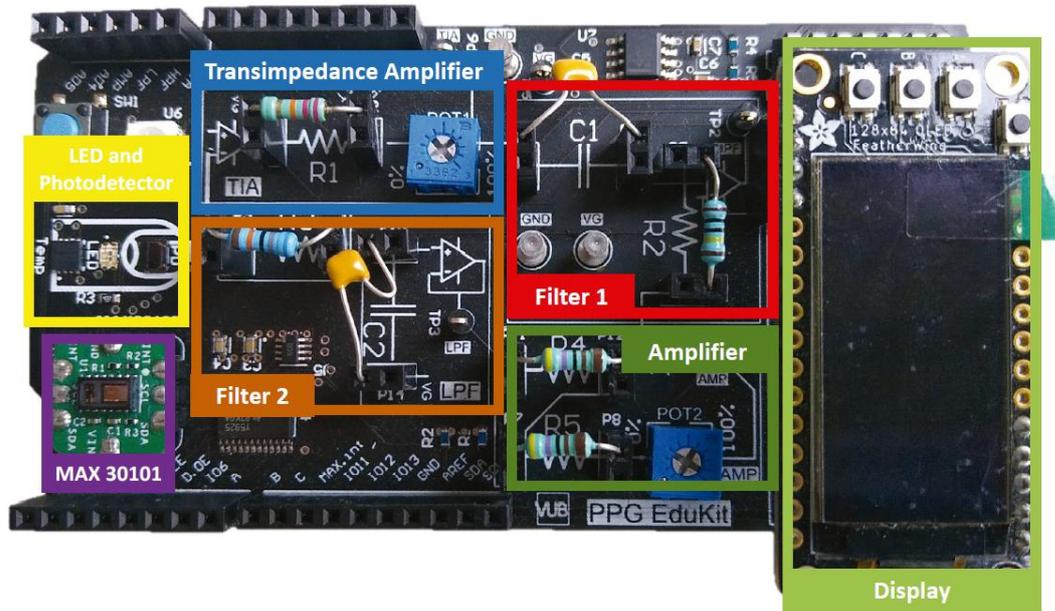
## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El creciente interés en las aplicaciones médicas ha convertido a la ingeniería biomédica se encuentra entre las disciplinas con mayor desarrollo reciente. La Fotopleletismografía (PPG) es ahora muy común gracias a su capacidad para monitorizar, de forma no invasiva, múltiples signos vitales: frecuencia cardiaca, respiratoria, oxigenación y presión arterial.

La falta de una plataforma de código abierto limita el acceso a la exploración de fotopleletismografía por parte de estudiantes de postgrado. Siendo esta una limitante en la parte de investigación y docencia. Las soluciones comerciales, si bien cubren importantes aplicaciones de la tecnología PPG, no son suficientes como herramientas educativas. [2]

El PPG EduKit es una tarjeta de desarrollo [2] que tiene como objetivo adquirir la señal PPG con fines educativos y de investigación. Esta herramienta permite a los usuarios controlar y entender completamente cada etapa del proceso: desde la adquisición y el acondicionamiento de la señal PPG hasta su visualización y procesamiento, facilitando la extracción de datos fisiológicos relevantes como la frecuencia cardiaca o la saturación de oxígeno.

El enfoque modular de la plataforma garantiza su adaptabilidad a diversos sistemas integrados, como Arduino UNO [3], y permite ejecutar tanto funciones básicas como la conversión de señales analógicas a digitales y la comunicación por cable, como operaciones más complejas, incluyendo comunicación inalámbrica y técnicas avanzadas de procesamiento de señales con inteligencia artificial. Los elementos del PPG EduKit se organizan en dos secciones clave: el front-end analógico (Hardware) y el back-end digital (Software). [2]



**Fig. 1.1 Vista superior del PPG EduKit que proporciona la interfaz analógica. Las partes más relevantes están enmarcadas y etiquetadas en colores. [2]**

## 1.1 Problemática

Las placas de PPG EduKit son dispositivos de código abierto que permiten la implementación y personalización de nuevos códigos y metodologías para la enseñanza, aprovechando que la fotopletismografía es un método no invasivo para la adquisición de frecuencia cardiaca y saturación de oxígeno. También sirven como oportunidad de implementar algoritmos de aprendizaje automático como, algoritmos de clasificación y regresión, e incluso redes neuronales para interpretar las señales de PPG complejas

El PPG EduKit es un sistema PPG modular que permite la conexión de varios tipos de elementos electrónicos y sockets para agregar más placas electrónicas, que tienen como objetivo proporcionar una plataforma educativa, en donde se puedan comprender, modificar e implementar los diferentes pasos para adquirir la señal PPG junto con la extracción de su información fisiológica relevante de una manera didáctica, intuitiva y práctica. [2]

En la actualidad existen prácticas desarrolladas a cargo de la Universidad Libre de Bruselas (VUB), encargado del desarrollo de las placas de PPG EduKit. Estas prácticas

tienen un enfoque general del uso del dispositivo, por lo tanto, como una herramienta de aprendizaje enfrenta desafíos como profundizar el desarrollo de la placa, la electrónica e instrumentación con la que ha sido fabricada.

Esta actualización de las guías de laboratorio para la Maestría en Ingeniería Biomédica incorpora nuevas prácticas con el dispositivo PPG EduKit, cada una con sus instrucciones específicas. El objetivo es que estos materiales sean más didácticos y comprensibles para los estudiantes, permitiéndoles aprovechar al máximo las capacidades técnicas de la placa, como sus sensores, microcontrolador, convertidor analógico a digital (ADC) y software de apoyo. Estas herramientas son ideales para aplicaciones educativas e investigativas en el ámbito de la salud cardiovascular y la monitorización fisiológica.

Esto hace que PPG EduKit sea una herramienta educativa interesante no sólo para la ingeniería biomédica, sino también para otros dominios de la ingeniería, como la ingeniería eléctrica o informática aplicada. Con la integración de las guías prácticas les permitirá fortalecer su comprensión teórica y aplicar conceptos en proyectos reales de instrumentación biomédica y monitoreo de salud.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Diseñar prácticas de laboratorio usando la tarjeta de desarrollo PPG EduKit orientado a estudiantes de postgrado, para el fortalecimiento de su comprensión teórica, habilidades prácticas y capacidad en la aplicación de conceptos de electrónica, programación y tecnología de sensores en proyectos reales en el marco de la ingeniería biomédica.

### 1.3 Objetivos Específicos

1. Adaptar proyectos y actividades prácticas que sean adecuados para la tarjeta de desarrollo PPG EduKit, teniendo en cuenta el dominio teórico y habilidades prácticas de los estudiantes.
2. Diseñar las guías prácticas detallando las instrucciones paso a paso, diagramas de circuitos, código de programación, objetivos de aprendizaje y discusión de la práctica.
3. Evaluar la efectividad de las prácticas de laboratorio propuestas en relación a las prácticas que se realizan actualmente en postgrado.

### 1.4 Justificación del problema

La incorporación de los dispositivos PPG EduKit en las prácticas de Laboratorio de la Maestría en Ingeniería Biomédica de la ESPOL mejora y optimiza la enseñanza de técnicas de adquisición y análisis de señales fisiológicas. Estos dispositivos ofrecen una plataforma accesible y versátil para la exploración de la fotopletismografía, permitiendo a los estudiantes desarrollar habilidades prácticas en la medición de parámetros cardiovasculares y en el análisis de señales médicas.

El uso de PPG EduKit en el laboratorio proporciona múltiples beneficios, entre ellos:

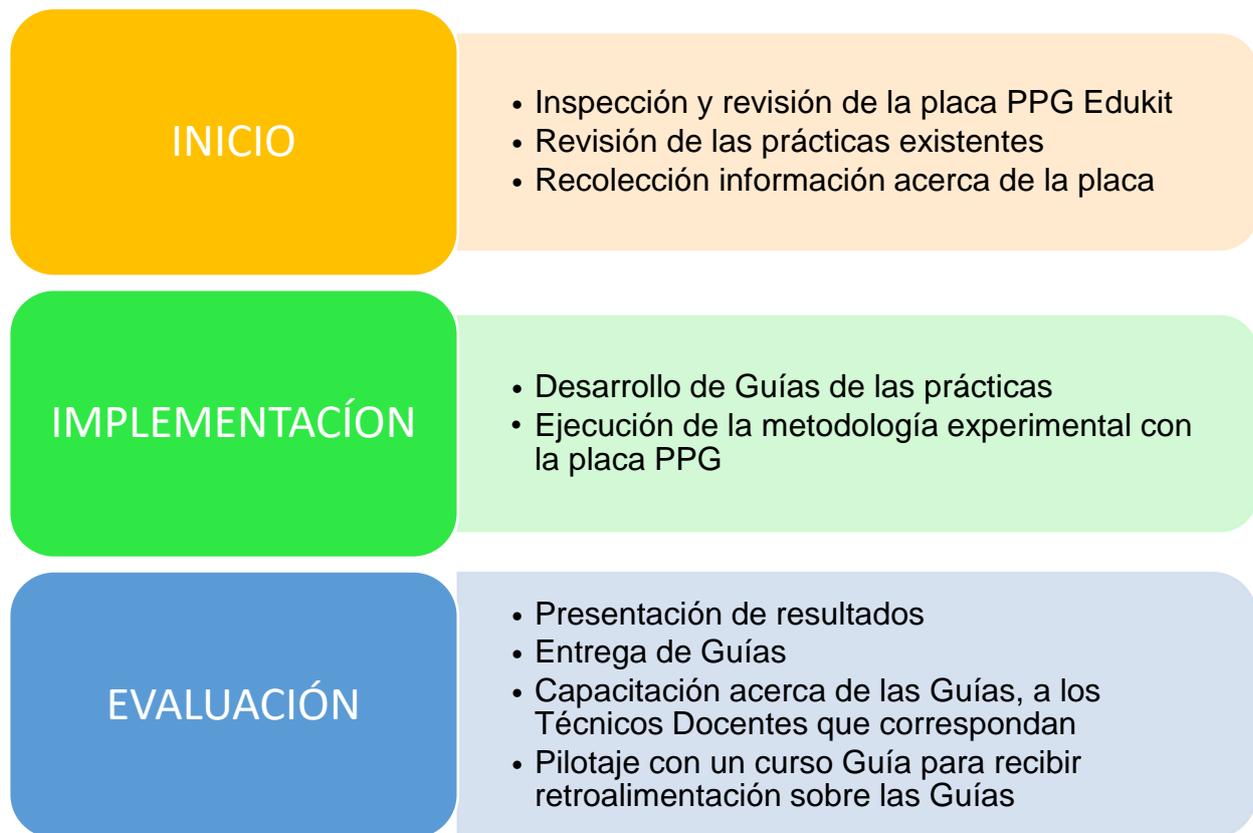
- Aprendizaje práctico y aplicado: Permite a los estudiantes manipular sensores reales, adquirir datos en tiempo real y analizar la variabilidad del pulso, ritmo cardíaco y otros parámetros fisiológicos.
- Enfoque en el manejo de información fisiológicas: La integración de estos dispositivos con software de análisis facilita el estudio de filtrado, procesamiento digital y extracción de características, conocimientos esenciales en el ámbito de la ingeniería biomédica.
- Flexibilidad y accesibilidad: Al ser sistemas portátiles y de fácil implementación, los dispositivos PPG EduKit pueden ser utilizados en diversas condiciones experimentales.

- Compatibilidad con herramientas de programación: Su uso con plataformas como Python permite a los estudiantes desarrollar algoritmos personalizados para la interpretación de señales fisiológicas.
- Relevancia en aplicaciones clínicas y de investigación: El aprendizaje basado en PPG tiene aplicaciones en la monitorización remota de pacientes, detección de anomalías cardiovasculares y en el desarrollo de tecnologías de salud digital.

La utilización de PPG EduKit en las prácticas de laboratorio fortalecerá la formación de los estudiantes en técnicas avanzadas de adquisición y procesamiento de señales biomédicas, alineándose con los estándares actuales de investigación y creación de soluciones tecnológicas de la ingeniería biomédica.

## **1.5 Alcance**

El presente trabajo tiene como objetivo actualizar las prácticas existentes sobre el uso y enseñanza del dispositivo PPG EduKit, estas están enfocadas a los estudiantes de postgrado de la maestría de biomédica de la ESPOL, este estudio abarca:



Para el desarrollo adecuado de las guías es necesario conocer previamente los siguientes puntos:

- Nivel de conocimiento técnicos de los estudiantes de postgrado

Se realizará una prueba de conocimientos técnicos en la práctica que se vaya a desarrollar. Con esto se podrá obtener una media del conocimiento de los estudiantes.

Una vez adquirida la información se considerará el siguiente contenido que debe poseer una guía:

- Objetivo general: Objetivo general de la práctica a desarrollarse, como, por ejemplo: Estudiar las etapas de electrónica de la placa PPG, Explicar el funcionamiento e importancia de los filtros en la adquisición de bioseñales, aplicar inteligencia artificial para detectar enfermedades cardiacas, comparar tecnologías existentes y emergentes, su aplicación en ambientes hospitalarios o de

investigación.

- Objetivo específico: Objetivos secundarios que involucran las prácticas. Por ejemplo: Examinar la placa PPG, identificar las técnicas de acondicionamiento, explicar filtros activos y pasivos, analizar y procesar los datos PPG.
- Introducción: Teoría y fundamentos sobre el tema relacionado en la práctica correspondiente.
- Procedimiento: Guía del paso a paso (puede ser video corto) para desarrollar la práctica con pasos, datos, gráficas, valores a obtener etc.
- Resultados: Resultados obtenidos en la práctica.
- Preguntas de reflexión: Preguntas al estudiante enfocadas en la práctica, para dar una explicación de las prácticas, por ejemplo, si se cambia cierto componente que pasa con la salida de la señal.

Una vez realizada las guías y las prácticas se pueden cuantificar con algunas herramientas como las siguientes:

- Evaluación cuantitativa de cómo los estudiantes han aprendido acerca de las nuevas tecnologías y el manejo del dispositivo PPG EduKit, examinando técnicas de acondicionamiento, filtros, procesamiento de señales, y que también puede constar con preguntas abiertas a los estudiantes.
- Control de lectura, que permita saber si los estudiantes han realizado las actividades posteriores a la práctica.
- Ventajas acerca de la práctica.
- Evaluar el mismo grupo de estudiantes antes y después de realizar la actividad práctica, de esta manera se obtendrá una mejor percepción de la efectividad de las prácticas.
- Aplicaciones en proyectos prácticos comerciales, como lo son los wearables o dispositivos electrónicos incorporados a la vestimenta, que permite

monitorear la salud de los usuarios en tiempo real.

Estas guías al estar actualizadas se presentarán de manera clara, detallada, y comprensibles, de esta forma se las utilizará en las materias de postgrado como lo son: Sistema de Adquisición de Datos, Instrumentación Biomédica, Procesamiento Digital de señales e Imágenes Biomédicas. Además, estas guías incluyen herramientas de evaluación como, informes, prueba, cuestionarios, rúbricas o control de lectura que el docente puede aplicar posterior a la práctica. Este conjunto de documentos se encontrará disponibles en un repositorio público.

Herramienta de evaluación constará de:

Rúbrica, una lista detallada de los criterios específicos que se deben cumplir para cada aspecto de la guía práctica.

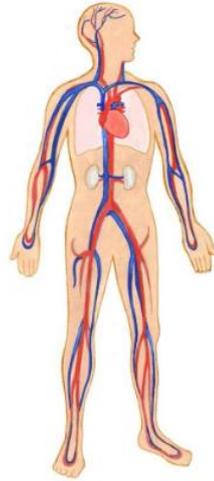
# CAPÍTULO 2

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### FUNDAMENTO ANATÓMICO Y FÍSICO

Este estudio se centra en el análisis de un conjunto de pulsos y ondas que permiten observar el estado y la dinámica del sistema cardiovascular. Para una correcta interpretación de estos datos, resulta fundamental describir los principios que rigen este sistema y las características de los elementos que intervienen en él.

El sistema cardiovascular irriga todo el cuerpo. Dicho sistema puede ajustar el gasto cardíaco y el diámetro vascular ante estímulos variables, controlando así la circulación de la sangre. El aparato circulatorio está constituido por un órgano central, el corazón, y una extensa red de conductos que incluye arterias, venas y capilares. La función de bombear la sangre y la de distribuirla a través de este circuito vascular son procesos interdependientes, cuya finalidad es garantizar el suministro de sangre apropiado a cada tejido del organismo. La homeostasis de este sistema está sujeta a un complejo control que integra múltiples factores, entre los que se encuentran variaciones en la composición de la sangre (electrolitos, osmolaridad), la acción de hormonas y mediadores químicos, la funcionalidad de órganos como los riñones y las glándulas suprarrenales. El correcto funcionamiento del corazón y la circulación depende en gran medida de la acción balanceada de los sistemas nerviosos simpático y parasimpático. [4]



**Fig. 2.1 Sistema cardiovascular [5]**

La función principal de las arterias es impulsar y distribuir la sangre rica en oxígeno desde el corazón hacia los órganos del. Por el contrario, las venas conducen la sangre desoxigenada al corazón.

## **LA SANGRE**

Para este proyecto las células sanguíneas, son de especial relevancia los eritrocitos o glóbulos rojos, constituyen el componente de mayor relevancia, la hemoglobina de la que se componen, una hemoproteína de pigmentación rojiza. Esta biomolécula facilita la captación de oxígeno de los pulmones para su posterior liberación en los tejidos periféricos y, de forma simultánea, posibilita la absorción del dióxido de carbono resultante del metabolismo celular para su eliminación mediante la exhalación.

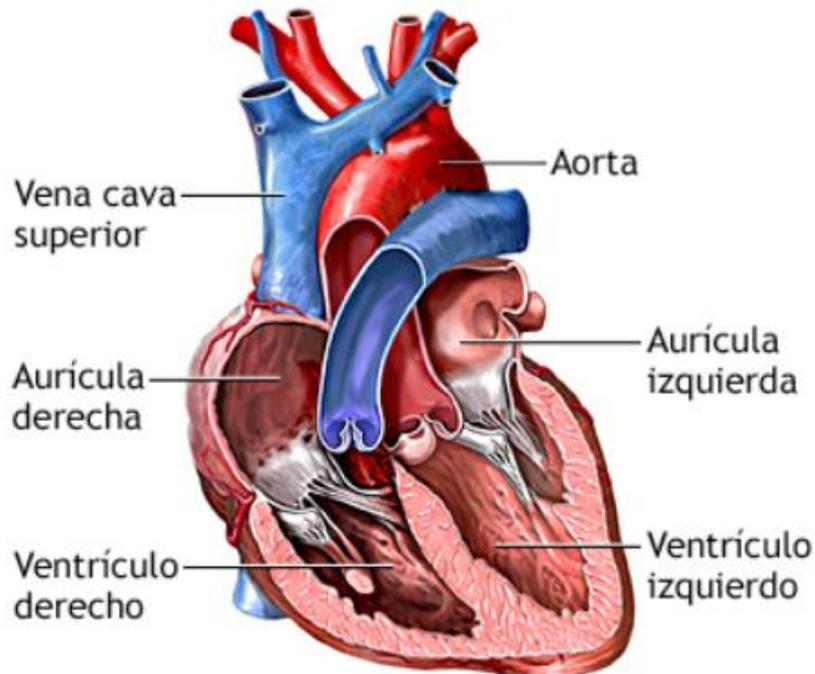
## **EL CORAZÓN**

Anatómicamente, el corazón se define como un órgano de naturaleza muscular, localizado en el mediastino (la región central de la cavidad torácica), en posición posterior al esternón. Su estructura interna se divide en cuatro cavidades: dos superiores, conocidas como aurículas, y dos inferiores, de paredes más gruesas, denominadas ventrículos. Funcionalmente, estas cámaras se agrupan en dos unidades de bombeo: el corazón derecho, integrado por la aurícula y el ventrículo derecho, y el corazón izquierdo, compuesto por sus homólogos izquierdos. (Figura. 2.2). [6]

Esta disposición en doble bomba permite dirigir el flujo sanguíneo hacia los dos circuitos principales: la circulación pulmonar y la sistémica. El corazón derecho se especializa en manejar la sangre desoxigenada. La aurícula derecha actúa como cámara de recepción, recolectando esta sangre a través de las venas cavas (superior e inferior) proveniente de la circulación sistémica, a lo que se suma el drenaje del propio miocardio a través del seno coronario. Desde la aurícula, la sangre es impulsada hacia el ventrículo derecho al abrirse la válvula tricúspide. Este ventrículo funciona como la cámara propulsora del circuito derecho, impulsando la sangre a través de la válvula pulmonar hacia la arteria pulmonar, con destino a los lechos capilares pulmonares.

En los pulmones, la sangre se somete al intercambio gaseoso: libera dióxido de carbono y se carga de oxígeno al difundirse este último desde los alvéolos. Posteriormente, la sangre ahora oxigenada es conducida por las cuatro venas pulmonares hacia la aurícula izquierda, que cumple la función de cámara de recepción para el corazón izquierdo. La sangre fluye entonces pasiva y activamente hacia el ventrículo izquierdo a través de la válvula mitral. Como la cámara de bombeo más potente del corazón, el ventrículo izquierdo se encarga de expulsar la sangre oxigenada a la aorta, por medio de la válvula aórtica, para distribuirla a todos los tejidos corporales a través de la circulación sistémica, reiniciando así el ciclo cardíaco con cada latido.

La función primordial de las cuatro válvulas cardíacas antes descritas es garantizar la unidireccionalidad del flujo sanguíneo. Su mecanismo de acción se basa en facilitar el avance de la sangre en la dirección fisiológica correcta hacia adelante, pero al mismo tiempo evitar el flujo retrógrado. [6]



**Fig. 2.2 Diagrama del corazón [7]**

## **CICLO CARDIACO**

El funcionamiento del corazón (ciclo cardíaco) se basa en variaciones de presión generadas por impulsos electroquímicos en el músculo cardíaco (miocardio), los cuales desencadenan su contracción. Estas diferencias de presión son las que permiten que la sangre sea impulsada de manera ordenada a través de las cavidades del corazón y, posteriormente, hacia todo el cuerpo. [8] Cada latido del corazón representa un ciclo cardíaco completo, el cual se compone de tres fases clave: la contracción de las aurículas (sístole auricular), la concentración de los ventrículos (sístole ventricular) y la fase de relajación general (diástole completa).

### Sístole auricular

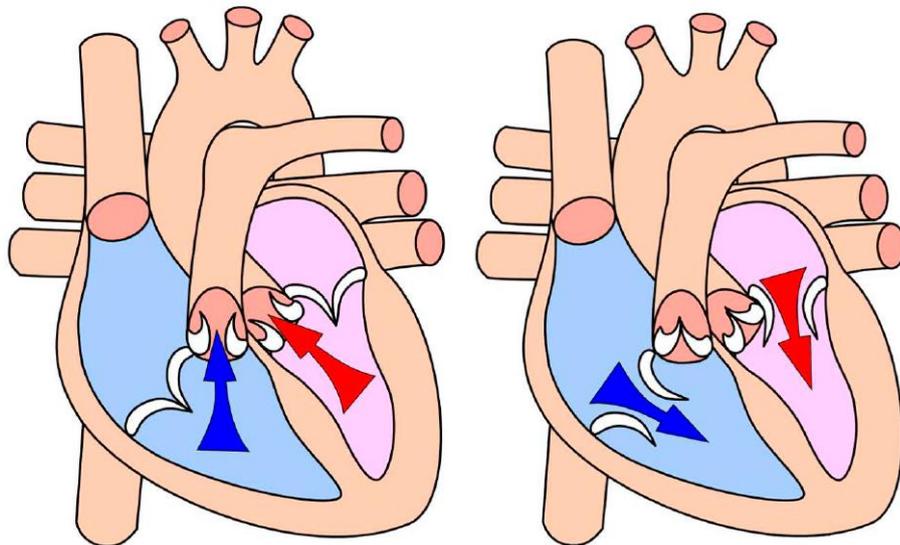
El ciclo cardíaco se inicia con un potencial de acción que induce la contracción de las aurículas, expulsando la sangre contenida en ellas hacia los ventrículos. Tras este vaciado, el cierre de las válvulas auriculoventriculares genera el primer componente audible del latido cardíaco.

### Sístole Ventricular

- Fase de contracción isovolumétrica. La despolarización ventricular desencadena la contracción del miocardio sin cambio inicial en el volumen sanguíneo.
- Fase de eyección. Al superar la presión ventricular a la existente en los grandes vasos, las válvulas sigmoideas se abren, permitiendo la expulsión de sangre hacia la circulación pulmonar (ventrículo derecho) y sistémica (ventrículo izquierdo). El cierre de estas válvulas marca el fin de esta fase.

### Diástole cardiaca completa

- Relajación isovolumétrica. Inicio de la relajación ventricular donde la presión intracavitaria disminuye sin variación del volumen sanguíneo.
- Llenado pasivo. Simultáneamente, las aurículas se han relleno de sangre, creando un gradiente de presión que abre las válvulas auriculoventriculares (mitral y tricúspide), permitiendo el llenado ventricular y dando inicio a un nuevo ciclo. [9]



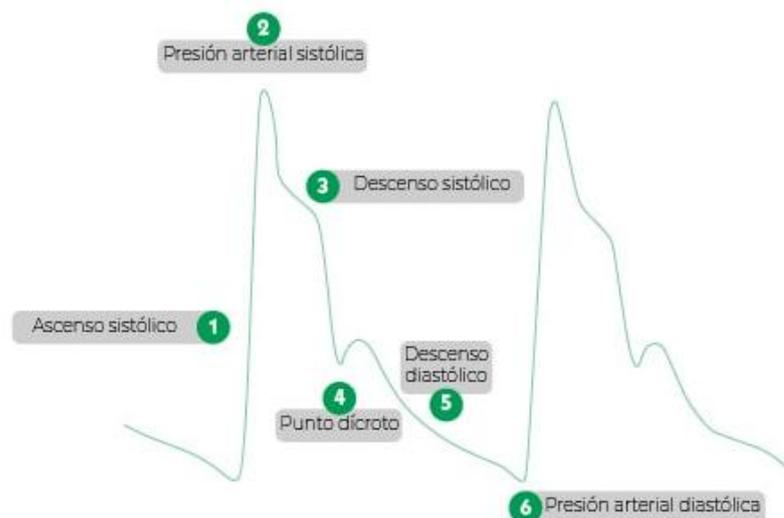
**Fig. 2.3 Movimientos cardíacos [9]**

La frecuencia cardíaca, definida como el ritmo al que se suceden los ciclos cardíacos, constituye uno de los cuatro signos vitales primarios. Su valor cuantifica el número de contracciones ventriculares por minuto y se expresa en latidos por minuto (lpm) o, internacionalmente, en beats per minute (bpm). En condiciones de reposo, el rango de

normalidad para un adulto sano oscila entre 60 y 100 lpm. Valores por debajo de este umbral se clasifican como bradicardia, mientras que aquellos que lo superan reciben el nombre de taquicardia. Cabe destacar que este rango puede variar dependiendo de factores individuales como la edad, el género, el estado físico y la salud general de la persona.

La presión arterial es una medida de la fuerza que la sangre, en movimiento, aplica sobre las paredes de las arterias y venas, cuya unidad de medida convencional son los milímetros de mercurio (mmHg). La percepción del pulso arterial en distintos puntos del cuerpo permite indirectamente monitorizar el ciclo cardíaco. Esto es posible porque cada sístole ventricular impulsa un volumen de sangre hacia la aorta, generando una onda de presión distensible (pulso sistólico), seguida de una fase de relajación (diástole) donde la presión decae. Justamente esta fluctuación rítmica de presión es la que se palpa clínicamente como pulso.

## ONDA DE PRESIÓN ARTERIAL



**Fig. 2.4 Representación teórica del pulso. Variación de presión arterial en el tiempo [10]**

## FOTOPLETISMOGRAFIA

La fotopleletismografía (PPG) es un método de medición óptica no invasiva que permite registrar las ondas de pulso generadas por el sistema cardiovascular y propagadas a través de la vasculatura periférica. Esta técnica se basa en la detección de las variaciones en el volumen sanguíneo asociadas a cada latido cardiaco.

El principio de funcionamiento consiste en la emisión de luz, generalmente mediante un diodo LED, hacia un tejido vascularizado, como la yema de un dedo. Un fotodetector, sintonizado en la misma longitud de onda de la fuente emisora, capta la intensidad luminosa ya sea reflejada (cuando el emisor y el receptor están adyacentes) o transmitidas (cuando se ubican en lados opuestos). Esta señal luminosa es convertida en una diferencia de voltaje analógico, amplificada y posteriormente procesada.

La señal resultante del PPG refleja, las fluctuaciones en el volumen de sangre en el lecho vascular superficial. Estas variaciones modulan la absorbancia de la luz debido a cambios en la concentración de eritrocitos, los cuales alteran las propiedades ópticas del tejido durante las fases sistólica y diastólica.

La fotopleletismografía se fundamenta en la interpretación de las variaciones cromáticas de la sangre, las cuales están determinadas por su grado de saturación de oxígeno ( $SpO_2$ ). Este fenómeno óptico es resultado directo de las propiedades de absorción luminosa de la hemoglobina, cuya estructura molecular modifica sus características espectrales al asociarse o disociarse del oxígeno.

La oxihemoglobina, es el nombre que recibe la hemoglobina cuando se encuentra unida al oxígeno, es la responsable del característico color rojo brillante de la sangre arterial. Tras ceder el oxígeno a los tejidos, la molécula resulta en su forma reducida (desoxihemoglobina). Estados distintos de la hemoglobina presentan propiedades ópticas diferenciales: cada uno interactúa de manera específica con la luz en longitudes de onda particulares. La oxihemoglobina presenta una mayor transmitancia en la región del color rojo (660 nm), mientras que la hemoglobina reducida absorbe con mayor

eficacia en el rango del infrarrojo cercano (940 nm). Este principio óptico es fundamental para técnicas de medición no invasivas, como la oximetría de pulso.

El principio de absorción de la luz en un material se cuantifica mediante la ley de Beer-Lambert; la absorción de la luz por un material depende de sus propiedades ópticas. Esta relación cuantifica la atenuación de un haz de luz al atravesar un medio absorbente, constituyendo la base teórica para la medición espectrofotométrica de concentraciones de analitos como la hemoglobina en la sangre. El tejido biológico es un medio heterogéneo complejo que comprende múltiples absorbentes como (sangre, agua, melanina, etc.) y dispersores (colágeno, queratina, etc.). En la PPG, se examina un volumen de tejido profundo con la luz a una longitud de onda objetivo a lo largo de cada ciclo cardiaco. Con el cambio volumétrico en los componentes pulsátiles del tejido entre la sístole y la diástole, la absorbancia de la luz dentro del tejido también varía con el tiempo, lo que conduce a una onda PPG continua. Se puede expresar de la siguiente manera

$$A_{s\lambda} = \ln \left( \frac{I_{o\lambda}}{I_{s\lambda}} \right) = \epsilon_{\lambda} * C_s * L_{s\lambda} + G_{\lambda} \quad (2.1a)$$

$$A_{d\lambda} = \ln \left( \frac{I_{o\lambda}}{I_{d\lambda}} \right) = \epsilon_{\lambda} * C_d * L_{d\lambda} + G_{\lambda} \quad (2.1b)$$

En las ecuaciones (2.1a) y (2.1b)  $I_{s\lambda}$  y  $I_{d\lambda}$  son la cantidad de intensidad de luz transmitida durante la sístole y la diástole;  $C_s$  y  $C_d$  son las concentraciones variables de la absorbancia;  $L_{s\lambda}$  y  $L_{d\lambda}$  son las longitudes de onda de la luz a través del tejido durante los estados de sístole y diástole [11]

El análisis de la curva pletismográfica, generada por los cambios en la absorción de luz, va más allá del cálculo del ritmo cardíaco. Esta técnica también posibilita medir la saturación de oxígeno en la sangre arterial, así como estimar parámetros como su viscosidad y la presión arterial.

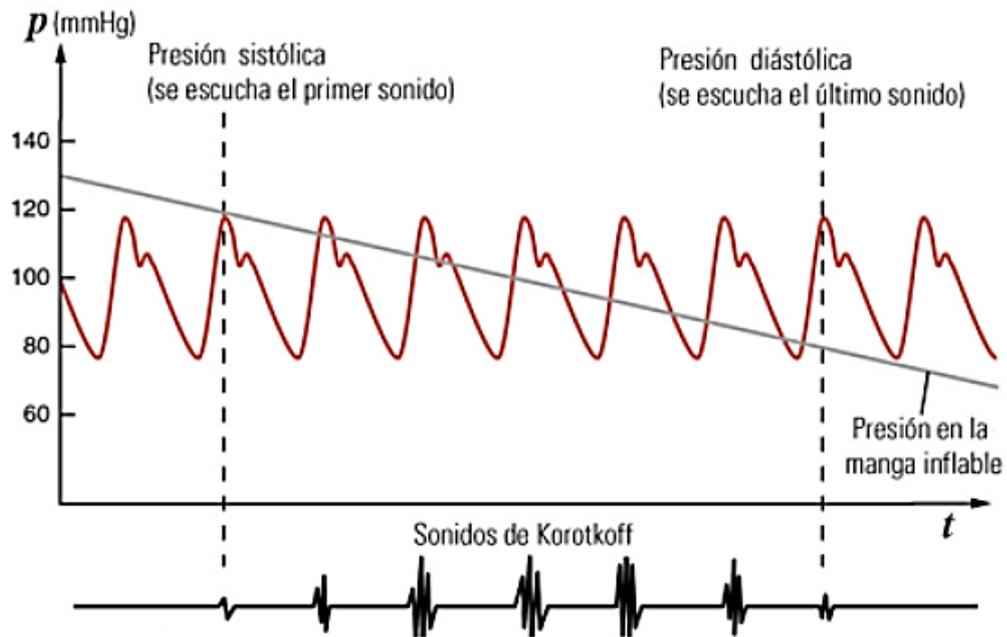


Fig. 2.5 Representación esquemática de la onda de pulso, mediante manga inflable. [12]

## REGISTRO DEL PULSO CARDÍACO UTILIZANDO PLETISMOGRAFÍA DE LUZ PPG

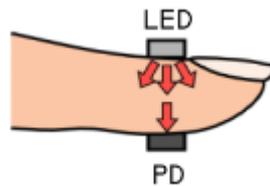
Un sensor fotopletismográfico (PPG) se emplea para captar los cambios en el volumen sanguíneo y su efecto en la absorción de luz. Este dispositivo está compuesto por un diodo emisor de luz y un receptor (como un fotodiodo o transistor sintonizado a la frecuencia específica de la luz emitida), los cuales se colocan directamente sobre la zona corporal donde se realizará la medición.

El diseño de los circuitos de polarización para la etapa receptora sigue configuraciones estándar: transistor emisor común o conversor Corriente – Voltaje para el fotodiodo. Existen dos tipos de configuración para sensores PPG, sensores por transmisión y sensores por reflexión.

### Sensores por transmisión

Para realizar mediciones en modo de transmisión, es necesario colocar el emisor y el sensor fotodetector en lados opuestos de la estructura anatómica de interés, de manera

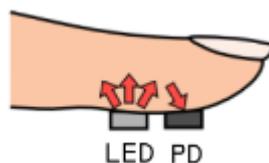
que el tejido quede interpuesto entre ambos componentes. Esta configuración permite que la luz emitida atraviese la región vascularizada antes de ser captada por el receptor, facilitando la detección de las variaciones de absorción luminosa asociadas al flujo sanguíneo.



**Fig. 2.6 PPG por transmisión [13]**

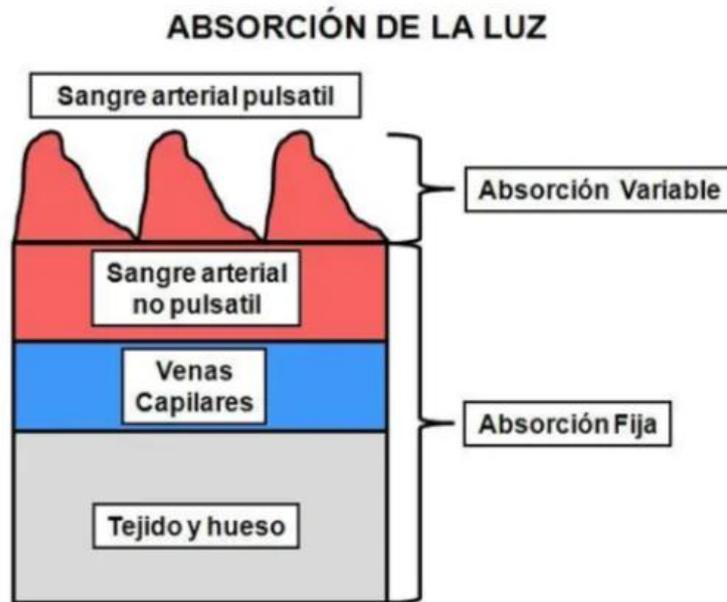
### **Sensores por reflexión**

El receptor se ubica junto al diodo emisor, con la función específica de capturar el reflejo de la luz en los tejidos, el método de reflexión ofrece una mayor versatilidad en la colocación del sensor. Al disponer el emisor y el fotodetector en el mismo lado de la superficie cutánea, este diseño puede aplicarse prácticamente sobre cualquier zona del cuerpo que presente perfusión sanguínea pulsátil, sin verse restringido por el grosor o la opacidad del tejido.



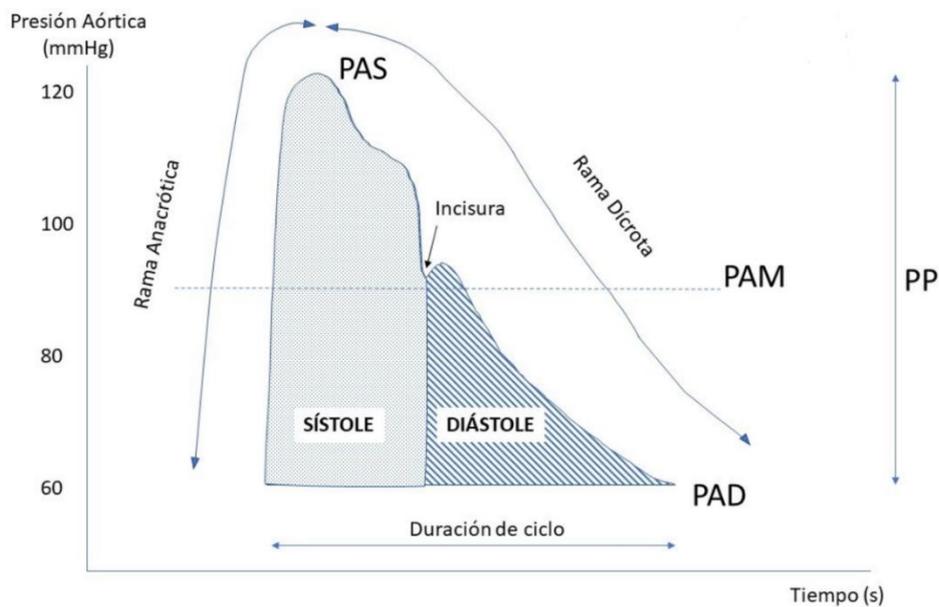
**Fig. 2.7 PPG por reflexión [13]**

La componente continua (DC) de la señal PPG surge de la absorción relativamente estable de la luz por parte de los tejidos, huesos, capilares y el sistema venoso periférico, que son responsables de absorber la mayor parte de la luz. Esta debe ser desapercibida ya que no contiene información relevante sobre la pulsación sanguínea, así que se puede filtrar utilizando filtros pasa alto. La otra componente alterna (AC), es causada por la variación del flujo sanguíneo (componentes pulsátiles) y aproximadamente el 5% de la absorción total es atribuible a este componente.[9]



**Fig. 2.8 Partes de la señal PPG, Absorción Variable (AC) y Absorción Fija (DC) [14]**

La morfología completa de la onda de pulso fotopletismográfica de una persona sana se puede observar en la siguiente figura 2.9.



**Fig. 2.9 Ciclo de señal PPG normal y etapas de la onda [15]**

La señal PPG mide el resultado o la salida de un ciclo cardíaco, ya que captura indirectamente la forma de onda de la presión arterial. El flanco ascendente de la onda

PPG representa la fase de eyección sistólica rápida, y la muesca dicrótica se considera un marcador del final de la sístole aórtica y el inicio de la fase diastólica.

Durante la fase diastólica, el músculo cardíaco se relaja, los capilares recuperan su estado inicial y el volumen sanguíneo en el sistema capilar disminuye. Esto provoca una menor absorción de la luz por el componente pulsátil. El flanco descendente de la onda PPG, o fase catacrótica, se asocia, por lo tanto, con la fase diastólica del ciclo cardíaco.

Las características más comúnmente comprendidas son la amplitud sistólica (altura del pico), que se asemeja a un componente volumétrico vinculado a las ondas de presión arterial, y los intervalos entre picos sistólicos, que representan la frecuencia y regularidad de los latidos cardíacos. Otras características relacionadas con la forma de onda se encuentran en continua investigación para comprender mejor su relevancia clínica y su utilidad en la práctica clínica. [16]

## **RITMO CARDIACO CON PPG**

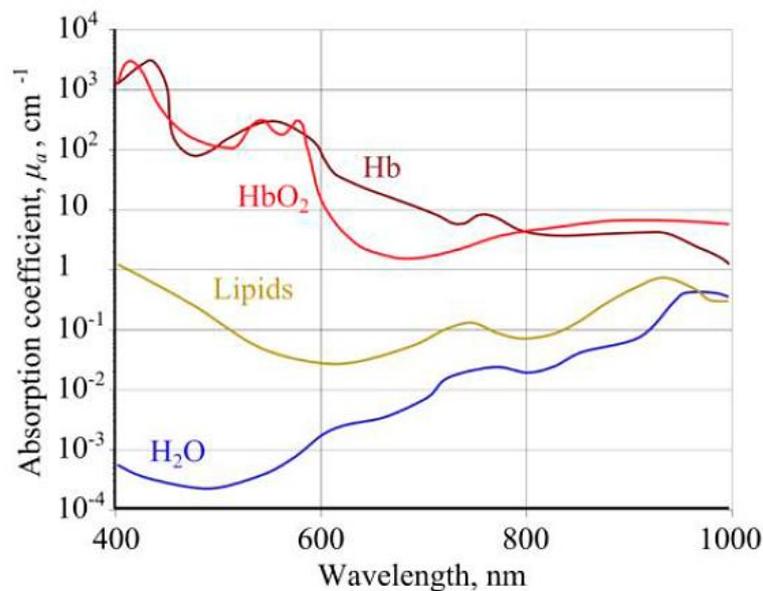
Una de las características fundamentales del corazón es su capacidad para modificar su frecuencia cardíaca. Estas fluctuaciones espontáneas de la frecuencia cardíaca (FC) reflejan la relación entre las interferencias continuas en el sistema cardiovascular y la respuesta de sus mecanismos reguladores; el rango normal en personas adultas en promedio es de 60 a 100 latidos por minuto (lpm). Este valor de frecuencia cardíaca (FC) se puede obtener fácilmente con PPG.

La PPG es una herramienta sencilla y económica que puede definirse como una técnica de biomonitorio óptico utilizada para calcular las variaciones en el volumen sanguíneo en el tejido microvascular debajo de la piel que ocurren debido a la naturaleza pulsátil de la sangre. La extracción de la señal PPG se considera sencilla; sin embargo, los componentes de esta señal pueden proporcionar información valiosa sobre el sistema cardiovascular. [17]

## SATURACIÓN DE OXIGENO

Es la fracción de hemoglobina saturada u oxihemoglobina, en relación con la hemoglobina total. Normalmente los niveles de  $SpO_2$  oscilan entre el 96 al 99%. Esta saturación de oxígeno se calcula con PPG mediante un cambio rápido de luz roja 640 – 660nm e IR 910 – 940nm a través del tejido vascular.

La oxihemoglobina absorbe menos luz roja y más infrarroja, siendo lo contrario para la desoxihemoglobina. Cuando se emite luz estas dos longitudes de onda en el tejido, la diferencia en la absorción puede aprovecharse para estimar la cantidad de oxi y desoxihemoglobina.



**Fig. 2.10 Absorción de hemoglobina oxigenada (HbO<sub>2</sub>) y hemoglobina desoxigenada (Hb) para diferentes longitudes de onda [2]**

Por lo tanto, considerando los componentes de AC y DC de ambas señales de PPG medidas simultáneamente, la  $SpO_2$  se puede derivar de la relación de absorbancias R (también conocida como “relación de relaciones”) ®, de la siguiente manera: [2]

$$\frac{\left(\frac{AC}{DC}\right)_{luz\ roja}}{\left(\frac{AC}{DC}\right)_{luz\ IR}} = SpO_2 \quad (2.2)$$

## **Aplicaciones Clínicas**

La mayoría de los dispositivos permiten visualizar y almacenar la señal PPG, así como calcular algunos parámetros fisiológicos, dejando poco espacio para que los estudiantes de ingeniería comprendan desde un punto de vista electrónico cómo se adquieren y acondicionan las señales. Las soluciones con un enfoque educativo se centran en el análisis computacional de señales y extracción directa de características, creando una capa de abstracción a partir del hardware empleado para el acondicionamiento de señales. Otras soluciones no orientadas a la educación impiden directamente la divulgación del hardware.

La fotopletismografía al ser un método no invasivo permite el seguimiento fisiológico clínico, ya que permite monitorear varios signos vitales, entre los que destacan el ritmo cardíaco, la presión sanguínea, la frecuencia respiratoria, y saturación de oxígeno en la sangre. De esta manera permite tener muchas aplicaciones clínicas de PPG como: monitorización cardíaca, evaluación cardiovascular, función respiratoria, detección de arritmias, evaluación de la anestesia. Además, aplicaciones de DIY (Do it Yourself) como: Medición de pulso con transmisión a smartphone, Sistema de detección de anomalías cardíacas mediante machine learning y PPG, Sistema PPG con comunicación en la nube. [9]

Los dispositivos PPG existentes se pueden clasificar en médicos certificados, kits de desarrollo, sistemas de evaluación, soluciones DIY y wearables.

### **PPG en dispositivos médicos certificados**

El oxímetro de pulso es uno de los dispositivos médicos más extendidos que se utiliza fotopletismografía (PPG). Desde la década de 1990, ha sido un estándar para la monitorización durante procedimientos anestésicos. Sin embargo, es crucial aclarar que su función principal es calcular la concentración de oxígeno en la sangre ( $SpO_2$ ) y el ritmo de contracción cardíaca, no detecta coágulos sanguíneos, no evalúa la capacidad

pulmonar ni diagnostica enfermedades respiratorias directamente. Estas aplicaciones corresponden a otros dispositivos o técnicas diagnósticas.

En la pandemia de COVID 19, los oxímetros fueron herramientas útiles para la cuantificación domiciliar de la saturación de oxígeno en la sangre. El COVID 19 provocaba la inflamación de los pulmones, lo que podía desencadenar en una neumonía. Los niveles normales en personas saludables son de al menos 95%, para personas que fueron diagnosticadas con COVID 19 fue de al menos 91%. [18]



**Fig. 2.11 Oxímetro de pulso [19]**

Desde la perspectiva ingenieril, los oxímetros de pulso disponibles comercialmente son “cajas negras” donde se revela poca o casi nula información sobre electrónica o el procesamiento de señales. Entre todas las diferentes opciones disponibles, este estudio se centra en la evaluación de dos oxímetros de pulso ampliamente utilizados. Sin embargo, se recomienda su uso como estándar de referencia al medir el PPG con dispositivos no certificados. [2]

El oxímetro de pulso Masimo MightSat Rx se basa en la tecnología de extracción de señales Masimo (SET®) para medir SpO<sub>2</sub>, FC, índice de perfusión (relación entre el flujo sanguíneo arterial y flujo venoso) y frecuencia respiratoria durante el movimiento y condiciones de baja perfusión [20]. Mientras que la oximetría de pulso convencional utiliza el algoritmo estándar rojo sobre IR para proporcionar SpO<sub>2</sub>, Masimo SET® utiliza otros cuatro algoritmos además de ese algoritmo convencional. Estos métodos

computacionales permiten diferenciar entre la señal de la sangre arterial de la venosa, incluso durante el flujo continuo y la baja perfusión identificando y aislando el ruido proveniente de las venas y de interferencias, para aislar únicamente la componente arterial real en la medición de oxigenación (SpO<sub>2</sub>). [20]



**Fig. 2.12 Masimo MightSat Rx [20]**

El dispositivo Nonin Onyx Vantage 9590 es un oxímetro de pulso digital portátil, de reducidas dimensiones y peso mínimo, diseñado para monitorear la saturación funcional de oxígeno de la sangre arterial (%SpO<sub>2</sub>) y el ritmo cardiaco en pacientes con perfusión tisular normal o crítica. [21]

Utiliza la tecnología PureSAT® SpO<sub>2</sub>, un filtrado inteligente pulso a pulso para proporcionar mediciones precisas para todas las pigmentaciones de la piel y pacientes con baja perfusión. [21]



**Fig. 2.13 Nonin Onyx Vantage 9590 [21]**

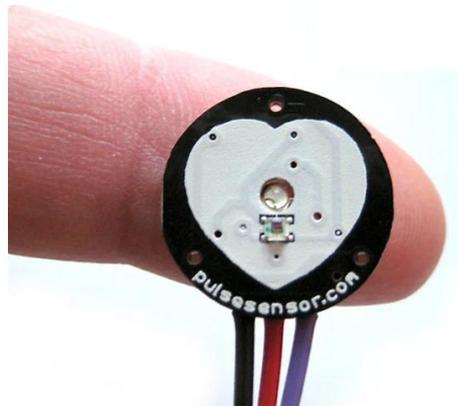
## Kits de desarrollo

### *Pulse sensor*

El PulseSensor es un transductor óptico de bajo costo basado en fotoplethismografía (PPG), desarrollado para su integración con plataformas de prototipado como Arduino, ESP32 y micro:bit. Su diseño consta de una interfaz de tres pines (alimentación, tierra y señal) que simplifica su conexión. El principio de operación se basa en la emisión de luz hacia el lecho capilar del dedo y la detección de las variaciones de intensidad resultantes de los cambios de volumen sanguíneo pulsátil. Esta señal permite derivar en tiempo real métricas cardiovasculares como: frecuencia cardíaca (LPM), variabilidad del pulso (HRV) e intervalos interlatido (IBI). Su arquitectura abierta y la documentación técnica disponible (ejemplos de código, librerías y guías) facilitan su adopción en proyectos educativos, artísticos y de bio-hacking, posicionándolo como una herramienta versátil para experimentación en biorretroalimentación en cualquier plataforma de creación. [22]

**Tabla 2.1 Parámetros de Funcionamiento del Pulse sensor. [23]**

<b>PARÁMETROS</b>	<b>Min</b>	<b>Max</b>	<b>Unidades</b>
Temperatura de funcionamiento	-40	+85	°C
Voltaje de Entrada	3	5.5	V
Voltaje de Salida	0.3	Vdd	V
Suministro de corriente	3	4	mA



**Fig. 2.14 Pulse Sensor [22]**

### ***Oxímetro de pulso y sensor de frecuencia cardíaca MAX30101***

Este módulo sensor análogo integrado combina un oxímetro de pulso de alta precisión y un monitor de frecuencia cardíaca, diseñado específicamente para su implementación en dispositivos wearables de salud. El sistema incorpora internamente emisores LED, fotodetectores optimizados, componentes ópticos especializados y circuitos de acondicionamiento de señal con supresión de ruido ambiental. Ofrece una solución de hardware lista para usar, simplificando significativamente el desarrollo de prototipos y productos finales en el ámbito de la tecnología médica portable, dispositivos de seguimiento de actividad y wearables clínicos. [24]

El integrado MAX30101 ofrece un factor de forma minimizado sin comprometer su eficiencia óptica ni eléctrica. Su diseño requiere una cantidad mínima de componentes externos, facilitando su implementación en sistemas portátiles. La configuración operacional del sensor se gestiona mediante registros software, proporcionando flexibilidad en su operación. Los datos digitalizados se almacenan en un búfer FIFO de 32 bits dentro del circuito integrado (CI), permitiendo su conexión mediante un bus compartido con microcontroladores o unidades de procesamiento, donde la lectura de datos se realiza de forma no bloqueante y esporádica, optimizando el consumo energético y el ancho de banda del sistema.

La señal de salida del sistema presenta una baja sensibilidad a las variaciones en la longitud de onda del LED infrarrojo (IR), mientras que la precisión en la longitud de onda del LED rojo resulta crucial para garantizar la exactitud en la correcta apreciación de los datos. Los algoritmos de cálculo de SpO<sub>2</sub> diseñados para procesar la señal del MAX30101 incorporan compensaciones automáticas que corrigen los errores inducidos por fluctuaciones en la temperatura ambiental. [25]

A diferencia del Pulse sensor, el MAX30101 dispone de más herramientas óptimas para la medición de SpO<sub>2</sub> en diferentes actividades, con sus LEDs integrados verde, rojo, IR.



**Fig. 2.15 Oxímetro de pulso y sensor de frecuencia cardiaca MAX30101 [26]**

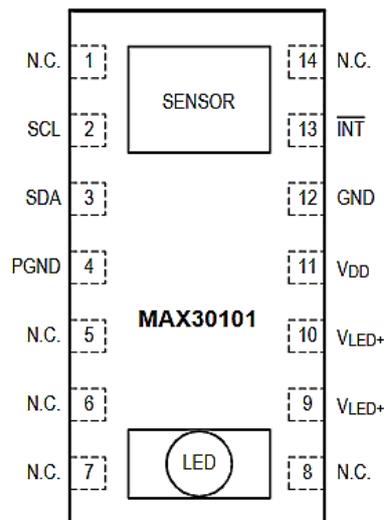
### *Subsistema de SpO<sub>2</sub>*

Incluye supresión de luz ambiental (ALC), un convertidor analógico-digital, configuración sigma-delta de tiempo continuo y también con un filtro de tiempo discreto patentado. El conversor analógico-digital (ADC) de SpO<sub>2</sub> proporciona rangos programables de escala a partir de 2  $\mu$ A a 16  $\mu$ A. El ALC es capaz de suprimir corrientes parásitas de hasta 200  $\mu$ A. La etapa de digitalización incorpora un convertidor analógico-digital (ADC) sigma-delta de operación continua, que emplea técnicas de sobremuestreo temporal para alcanzar una resolución de 18 bits. Operando a una frecuencia de reloj de 10,24 MHz, este ADC permite configurar su tasa de muestreo de salida en un rango programable entre 50 y 3200 muestras por segundo (sps). [25]

### *Controlador de LED*

El circuito integrado MAX30101 incorpora drivers específicos para diodos emisores de luz (LEDs) en longitudes de onda roja, verde e infrarroja, permitiendo la generación de pulsos luminosos modulados para aplicaciones de oximetría (SpO<sub>2</sub>) y monitorización de

frecuencia cardíaca. La intensidad de corriente de operación de los LEDs es configurable en un rango de 0 a 50 mA, siempre que se disponga de una fuente de alimentación compatible con los requisitos de voltaje del sistema. El tiempo de encendido del LED puede ajustarse en un rango de 69 a 411 microsegundos, lo que posibilita que el sistema optimice automáticamente la exactitud en la medición del oxígeno en sangre (SpO2) y frecuencia cardíaca, así como el consumo de energía, según los casos de uso. [25]



**Fig. 2.16 Configuración de los pines del sensor MAX30101 [25]**

**Tabla 2.2 Función Pines sensor MAX30101 [25]**

PIN	NOMBRE	FUNCIÓN
1, 5, 6, 7, 8, 14	N.C.	Conexión a placa de circuito impreso
2	SCL	Entrada de reloj I2C
3	SDA	Datos de reloj I2C, bidireccional
4	PGND	Conexión a tierra de los bloques de controlador LED
9	VLED+	Fuente de alimentación LED
10	VLED+	
11	VDD	Entrada de fuente de alimentación analógica

12	GND	Conexión a tierra analógica
13	INT	Conectar alimentación externa

### ***Dispositivos de vestimenta***

En los últimos años, la tecnología PPG se ha utilizado ampliamente en rastreadores de actividad comerciales, donde se utiliza para obtener la frecuencia cardíaca y la SpO2. Estos rastreadores de actividad se llevan principalmente en la muñeca y el usuario puede visualizar y almacenar información de FC y SpO2 sin tener acceso a los datos sin procesar. Si bien son una buena aplicación para el público en general, estos dispositivos portátiles siguen siendo una "caja negra", donde las etapas de acondicionamiento y algoritmos de procesamiento de señales que están fuera del alcance del usuario. Por lo tanto, no son de gran interés para los estudiantes de ingeniería que deseen comprender el proceso de adquisición de PPG. [2]



**Fig. 2.17 Xiaomi Smart Band [27]**

## **2.1 PPG EDUKIT**

EduKit es un sistema diseñado específicamente para adquirir la señal PPG de los dedos con fines académicos y de investigación científica. El PPG EduKit ofrece a los usuarios control y comprensión integral sobre todas las etapas involucradas en la adquisición, acondicionamiento, visualización y procesamiento de señales PPG brutas, las cuales son la base para la obtención de información fisiológica relevante. Su arquitectura modular permite una adaptación sencilla para soportar diversos sistemas embebidos, como la plataforma Arduino [3], para realizar operaciones de procesamiento de señales digitales necesarias para las múltiples aplicaciones PPG. [2]

El creciente interés en la tecnología PPG exige herramientas educativas novedosas que facilitan el aprendizaje, la comprensión y la exploración de esta tecnología. Las soluciones comerciales, si bien cubren importantes aplicaciones de la tecnología PPG, no son suficientes como herramientas educativas. El PPG EduKit es una plataforma educativa destinada a abordar las necesidades de los estudiantes de ingeniería y medicina, con especial enfoque en ingeniería biomédica. El PPG EduKit es la primera tecnología PPG reportada en la literatura con un enfoque educativo exclusivo. El sistema ha sido concebido para proporcionar al usuario un conocimiento integral y un control absoluto sobre todas las etapas implicadas en la captura, el acondicionamiento, la visualización y el procesamiento de señales PPG en bruto, que posteriormente se utilizan para obtener información fisiológica de valor clínico. Gracias a su arquitectura modular, la plataforma admite de manera flexible la integración con diversos sistemas embebidos, permitiendo ejecutar las operaciones de procesamiento digital de señales requeridas para cualquier aplicación basada en fotopleitismografía.

La investigación científica ha demostrado cómo trabajos con PPG han ido en crecimiento como se puede visualizar en la tabla [2.3], al ser un método no invasivo de adquisición de parámetros fisiológicos, admite múltiples configuraciones para extraer parámetros fisiológicos relevantes, como la frecuencia cardíaca y la extracción de SpO2. [2]

**Tabla 2.3 Número de publicaciones de PPG por década. [20]**

<b>DÉCADA</b>	<b>NÚMERO DE PUBLICACIONES</b>
1980 – 1989	50
1990 – 1999	120
2000 – 2009	300
2010 – 2019	750
2020 – 2025	600

En el último casillero se aprecia una cantidad inferior a la década anterior, ya que solamente contiene cinco años, pero se debe considerar que tiene una tendencia al alza.

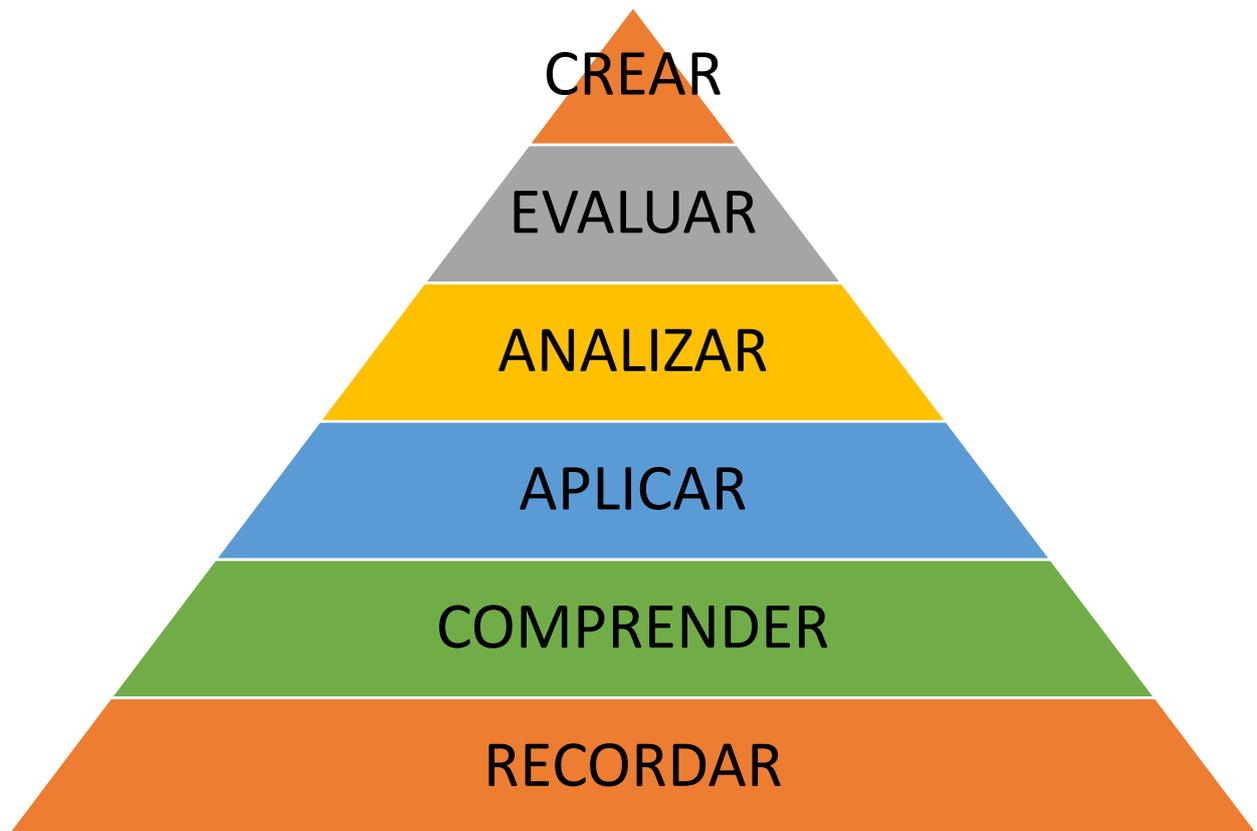
## **2.2 Sustento pedagógico**

La ejecución de las prácticas de laboratorio se enmarca en un proceso de enseñanza-aprendizaje mediado y supervisado por el instructor, quien debe estructurar entornos formativos tanto en su dimensión temporal como espacial. Esta organización permite abordar la solución de problemas desde un enfoque interdisciplinar-profesional.

Se evidencia así la crucial importancia del trabajo práctico en la formación estudiantil, orientado a desarrollar simultáneamente la comprensión teórica ("saber") y la aplicación procedural ("saber hacer"). La incompreensión de conceptos científicos por parte del alumnado frecuentemente deriva de metodologías docentes inadecuadas o de implementaciones didácticas deficientes, problemática particularmente visible en el uso de laboratorios para construir conocimiento científico escolar, donde la limitada formación científica de muchos educadores a menudo los condiciona a reproducir ejercicios estandarizados en lugar de facilitar verdaderos procesos de indagación. [28]

### *La Taxonomía de Bloom*

La taxonomía de Bloom ubica de forma jerárquica y progresiva las operaciones cognitivas que intervienen en el desarrollo educativo de enseñanza aprendizaje, además permite evaluar la adquisición, la asimilación de estos conocimientos y aptitudes. De tal forma los verbos en la parte inferior de la pirámide son en donde el estudiante tiene más apoyo por parte del docente, y conforme sigue escalando a niveles superiores el acompañamiento gradualmente baja, hasta dejar que el estudiante sea capaz de crear algún tema en específico. [29]



1. Recordar: Nivel más básico de la taxonomía de Bloom, aquí se puede pedir a los estudiantes memorizar contenido y evaluar mediante preguntas.
2. Comprender: Los estudiantes son capaces de recordar y explicar temas específicos. Aplicar: Los alumnos, tomaran lo aprendido y aplicar en temas de la cotidianidad.
3. Analizar: Establecen conexiones entre las ideas, utilizando el pensamiento crítico.
4. Evaluar: Valoración crítica del material que ha aprendido.
5. Crear: Demuestra pleno conocimiento, puede construir algo tangible o conceptual.

### Evaluación para mejorar los resultados del aprendizaje

La evaluación se concibe como un procedimiento continuo al ser aplicable en todas las fases del proceso formativo. Un ejemplo de ello es la valoración de la práctica docente, la cual se lleva a cabo antes, durante y después de la instrucción, permitiendo al educador profundizar en el conocimiento de su grupo estudiantil, identificar tanto los logros como las áreas de mejora, y realizar los ajustes metodológicos pertinentes para optimizar el aprendizaje. [30]

A nivel individual, los docentes realizan una valoración continua de la comprensión, las necesidades formativas y el avance académico de los estudiantes durante lecciones, módulos o cursos, con el objetivo de recabar datos específicos que permitan optimizar tanto la enseñanza como el aprendizaje mientras estos ocurren (evaluación formativa). Paralelamente, se ejecuta una evaluación al concluir un ciclo instruccional definido como un proyecto, módulo, semestre, programa o año académico, destinada a valorar los resultados y el progreso alcanzado (evaluación sumativa). [31]

### **TIPOS DE EVALUACIÓN**

- **Diagnóstica**. – Es aquella valoración que se realiza previo a una intervención educativa, centrándose en la apreciación de los objetivos y efectos de aprendizaje previstos. La finalidad principal es identificar las condiciones iniciales, conocimientos previos y competencias de los estudiantes antes de empezar un proceso de enseñanza formal.
- **Formativa**. – Es aquella evaluación que se implementa de manera continua durante el desarrollo del proceso de enseñanza-aprendizaje. Su función central es monitorear la eficacia de las estrategias pedagógicas empleadas y proporcionar información oportuna para la toma de decisiones orientadas a la optimización de los resultados académicos.
- **Sumativa**. – La evaluación sumativa constituye un mecanismo fundamental para valorar el aprendizaje alcanzado al finalizar un ciclo formativo. Además, proporciona criterios objetivos para determinar la aprobación o reprobación del estudiante, basándose en resultados obtenidos a través de instrumentos de medición aplicados a fases específicas del proceso. [30]

Las estrategias, metodologías e instrumentos de evaluación presentan una amplia diversidad, pudiendo clasificarse según su carácter formal o informal, el nivel de riesgo asociado (alto o bajo), el anonimato o publicidad de los resultados, y su enfoque individual o colectivo. Estas opciones suelen estar condicionadas, además, por las

capacidades técnicas y restricciones presupuestarias de los responsables de implementar los procesos evaluativos.

La información obtenida mediante los procesos de evaluación del aprendizaje genera evidencia crucial, perspectivas analíticas y datos fundamentales que sustentan la toma de decisiones en áreas como: la certificación y validación de competencias, la optimización de los diseños curriculares y estrategias pedagógicas, así como la distribución de recursos educativos. Estos insumos son relevantes para diversos actores del sistema, entre ellos estudiantes, familias, docentes y gestores institucionales. [32]

### **CLASIFICACIÓN DE LOS ESTILOS DE APRENDIZAJE**

La evolución de la pedagogía ha dado lugar a diferentes propuestas teóricas y marcos conceptuales orientados a categorizar las modalidades de apropiación del conocimiento.

- **Matemático.** – facilidad para comprender planteamientos lógicos y razonamiento.
- **Interpersonal.** – facilidad de trabajar en equipo.
- **Intrapersonal.** – personas que prefieren la soledad y la tranquilidad para estudiar
- **Visual.** – asimilan los conceptos con mayor eficacia mediante recursos visuales como imágenes, gráficos, videos, mapas mentales.
- **Auditivo.** – aprende a través de la escucha comprensiva
- **Lingüístico o Verbal.** – asimilan mejor la información mediante la lectura de apuntes estructurados y la elaboración de sus propios resúmenes.
- **Kinestésico.** – estas personas aprenden mejor cuando tocan, mueven o hacen cosas prácticas. Les ayuda a realizar experimentos y actividades con las manos.

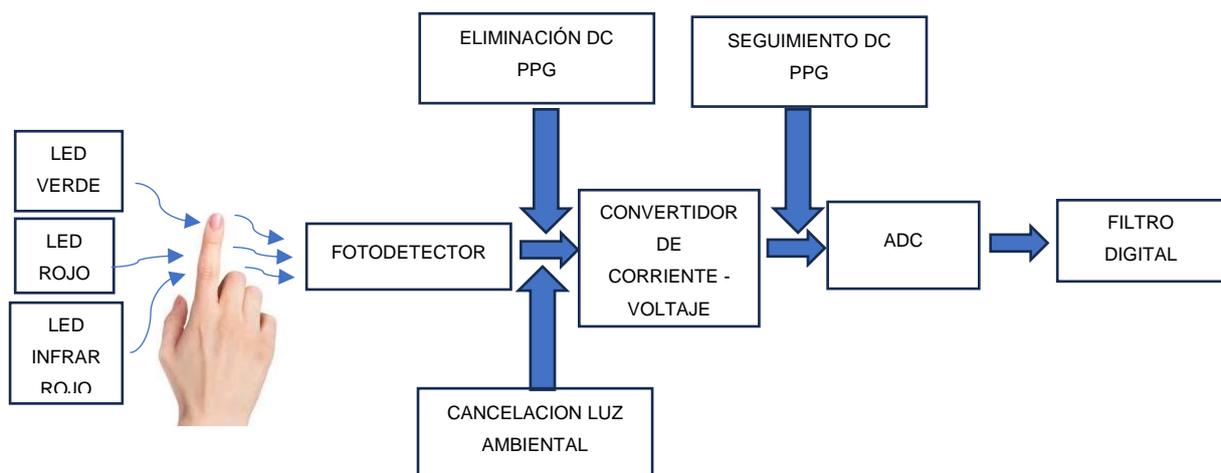
La mayoría de los estudiantes aprenden de diferentes maneras, combinando varios estilos, sin usar siempre el mismo. [33]

### **2.3 Electrónica**

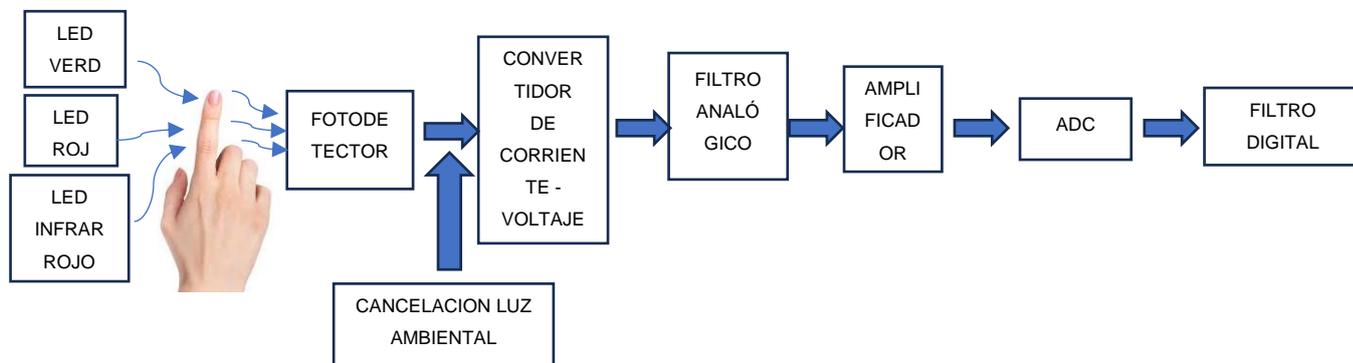
Para obtener señales PPG de calidad, primero deben procesarse para limpiarlas y hacerlas útiles. Estas señales mejoradas son comunes en muchos dispositivos PPG. Las

operaciones de acondicionamiento de señal implican conversión de la corriente en voltaje, filtrar interferencias, amplificar la señal y reducir el ruido, estos pasos son esenciales para limpiar la señal y poder extraer de ella información fisiológica útil.

Las Figuras 2.18 y 2.19 representan los dos grupos principales de topologías de acondicionamiento de señales basadas en el uso final de la señal PPG. Aquellas aplicaciones que requieren componentes de AC y DC de la señal PPG, como es el caso de los oxímetros de pulso para los cálculos de SpO<sub>2</sub>, utilizan principalmente la topología representada en la Figura 2.18. Por el contrario, si la aplicación sólo necesita la Componente de AC, normalmente se observa la topología representada en la Figura 2.19.



**Fig. 2.18 Bloques de construcción que representan las etapas de acondicionamiento de señales más comunes que se encuentran en dispositivos PPG en caso de que la aplicación necesite la señal PPG completa (componentes AC y DC).**



**Fig. 2.19 Bloques de construcción que representan las etapas de acondicionamiento de señales más comunes que se encuentran en PPG.**

**Tabla 2.4 Elementos electrónicos de la placa PPG EduKit [2]**

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN/ ELEMENTO	CARACTERISTICAS
LED	Osram SFH 7013 IC	Fuente de LED, incluye longitudes de onda tanto verde (~530 nm), como roja (~655 nm) e IR (~940 nm) [34]
CONTROLADOR LED	TLC5925	Regula el pulso y la corriente del LED hasta 60 mA.  Canales de salida: 16 salidas de corriente.  Rango de corriente de salida: 3mA a 45mA, ajustable mediante una resistencia externa. [35]
FOTODETECTOR	Osram SFH2703	Rango espectral de sensibilidad de 40 nm a 1100nm. La fotocorriente

		generada puede alcanzar hasta 1 $\mu$ A. [36]
AMPLIFICADOR DE TRANSIMPEDANCIA	TL9741N	Amplificador operacional cuádruple de propósito general fabricado por Texas Instruments, perteneciente a la familia TL97x. Este componente es ideal para aplicaciones que requieren bajo ruido, bajo consumo de energía y un amplio rango dinámico, como en sistemas de instrumentación y dispositivos portátiles alimentados por batería. [37]
SEGUIMIENTO/ELIMINACIÓN DE DC DE PPG	En las aplicaciones de PPG donde se necesita el componente DC fisiológico de la señal, se debe realizar un seguimiento cuidadoso de dicha DC.	Una vez calculado, el componente DC (hasta un 80-90% de la señal PPG) se puede filtrar permitiendo utilizar una mayor parte del rango dinámico ADC disponible.
CONVERTIDOR ANALÓGICO A DIGITAL (ADC)	Convierte la señal PPG a una señal digital	El PPG EduKit utiliza un ADC de 22 bits. Interno: Atmel SAM3X8E Externo: ADS1115
FILTRO ANALÓGICO	TL9741N Filtra componentes de ruido no deseados (Movimientos, luz externa, presión variable, baja perfusión sanguínea). Las señales fisiológicas son analógicas.	<b>Ancho de banda:</b> Típicamente alrededor de 3 MHz (dependiendo de las condiciones de operación). [37]

		<p>Los filtros pasa banda activos de primer y segundo orden se utilizan a menudo para filtrar componentes de DC (con frecuencias de corte tan bajas como 0,15 Hz que corresponden a ruidos fisiológicos como respiración, vasomoción, actividad muscular [38]), así como señales de ruido de frecuencias altas (frecuencias de corte de 5 Hz a 50/60 Hz obtenidas por ruido de la red eléctrica, interferencia de equipos médicos [39]).</p>
<p>AMPLIFICADOR INVERSOR</p>	<p>TL9741N</p> <p>Con valores de amplificación ajustables por medio de las resistencias pasantes (ajuste grueso) y un potenciómetro (ajuste fino)</p>	<p><b>TL9741N</b> suele venir en un encapsulado <b>PDIP-14</b> (Dual In-line Package, 14 pines) o <b>SOIC-14</b> para montaje superficial. [37]</p> <p>Optimizar aún más el rango dinámico del ADC.</p> <p><b>Mínima ganancia:</b> 1X (si <math>R_f = R_{in}</math>)</p> <p><b>Máxima ganancia estable:</b> 100X - 1000X (si <math>\frac{R_f}{R_{in}}</math>)</p> $A_v = -\frac{R_f}{R_{in}}$



La placa PPG EduKit cuenta con un filtro pasa banda de primer orden, implementado mediante cascada de dos circuitos: un filtro pasa altas (filtro 1) y un filtro pasa bajas (filtro 2).

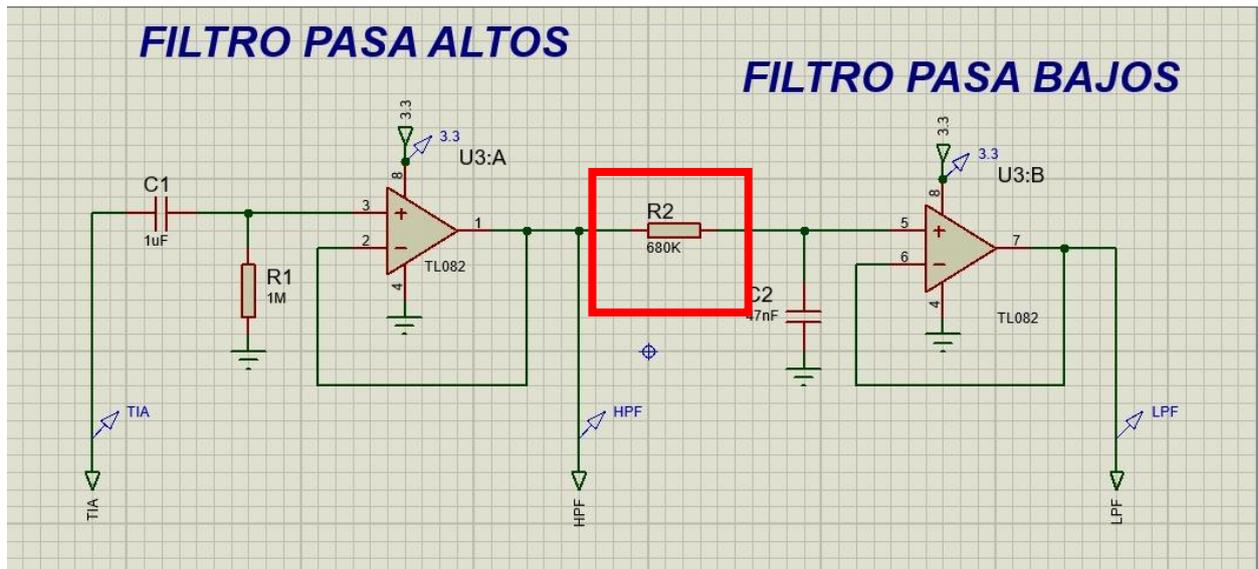


Fig. 2.21 Etapas de filtrado analógico en el PPG

La frecuencia de corte del filtro viene dada por:

$$f_c = \frac{1}{2 * R * C}, \quad (2.3)$$

Reemplazando valores de los elementos electrónicos en la placa PPG en (2.3) obtenemos los valores de las frecuencias de corte:

Filtro pasa Altos:

- C1=1µF
- R2=1MΩ

$$f_c = \frac{1}{2 * 1000000 * 1 \times 10^{-6}} = 0.1592 \text{ Hz}$$

Filtro pasa Bajos:

- C2=47nF
- R3=680KΩ

$$f_c = \frac{1}{2 * 680000 * 47 \times 10^{-9}} = 4.98 \text{ Hz}$$

El PPG EduKit incluye un módulo analógico ajustable. En la Tabla 2.5, se muestran dos ejemplos de posibles implementaciones de filtros analógicos para el acondicionamiento de señales. La diferencia entre ambos circuitos corresponde al ancho de banda del filtro paso banda, el cual se ajusta con el cambio de la resistencia R3 en la placa PPG EduKit que determina la respuesta en frecuencia del filtro paso bajo presentado en la Figura 2.22.

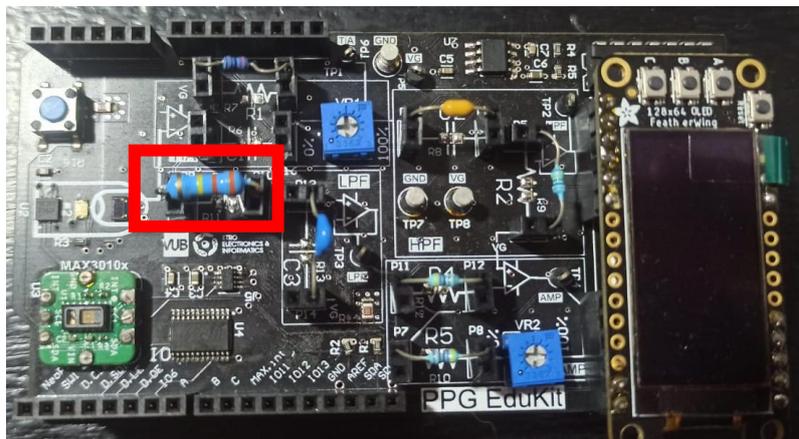


Fig. 2.22 Referencia de Resistencia R3 en la placa PPG

**Tabla 2.5 Componentes pasivos necesarios para generar dos filtros análogos en el front end. [2]**

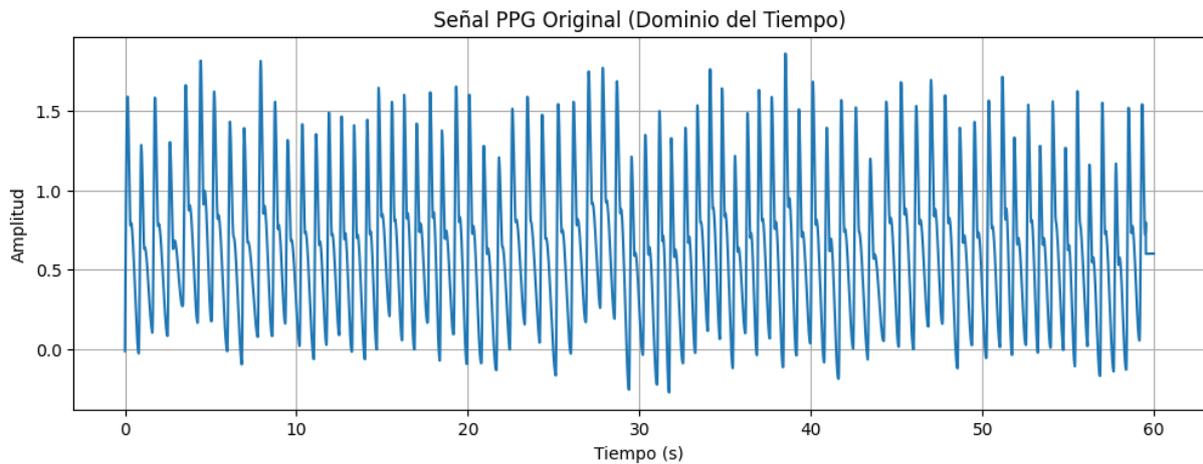
FILTRO	Frecuencias de corte	R1 [ $\Omega$ ]	C1[f]	R2 [ $\Omega$ ]	R3 [ $\Omega$ ]	C2 [f]	R4 [ $\Omega$ ]	R5 [ $\Omega$ ]
ANALÓGICO 1	(0.5 – 5 HZ)	22 K	1 $\mu$	1 M	680 K	47 n	4.7 K	4.7 K
ANALÓGICO 2	(0.5–10 HZ)	22K	1 $\mu$	1 M	330 K	47 n	4.7 K	4.7 K

El primer filtro que se implementará es un filtro pasa banda con una banda de paso entre 0,5 Hz y 5 Hz. Para tal efecto, se puede mantener el valor de C1 en 1  $\mu$ F, mientras determinamos el valor de R mediante la fórmula (2.3) mencionada anteriormente. Para que el filtro paso alto tenga una frecuencia de corte de 5 Hz, la resistencia R2 debe tener un valor de 1 M $\Omega$ . Para que el filtro paso bajo tenga una frecuencia de corte de 0,5 Hz, podemos mantener el valor de C2 en 47 nF y la resistencia R2 en 680 k $\Omega$ .

El segundo filtro que se implementará es un filtro paso banda con una banda de paso entre 0,5 Hz y 10 Hz. Para lograrlo, solo se debe modificar el filtro paso bajo. Para establecer la frecuencia de corte a 10 Hz, podemos mantener el mismo valor del condensador y modificar solo la resistencia. Con un valor estándar de 330 k $\Omega$ , la frecuencia de corte del filtro se establece a 10 Hz.

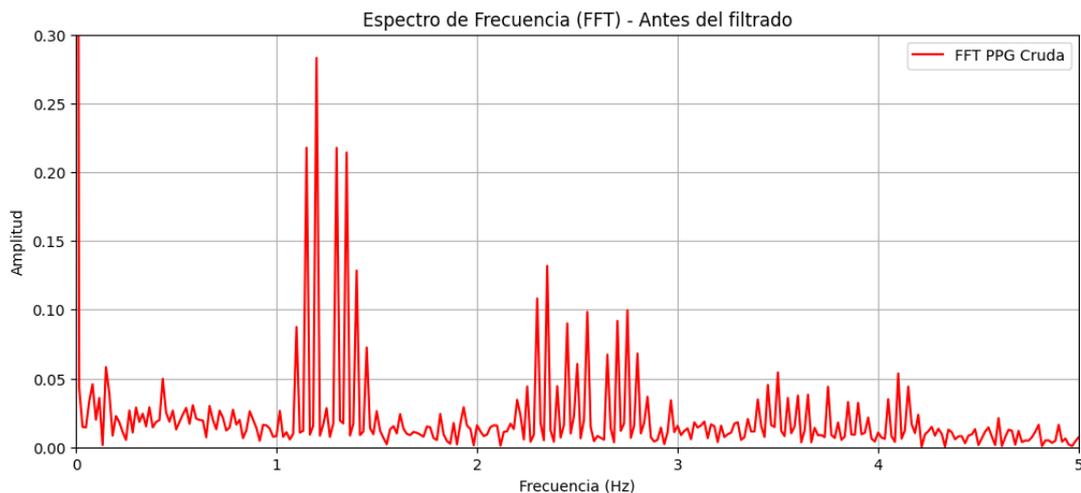
Los filtros de paso de banda son lo suficientemente buenos para la obtención de la frecuencia de corte, de esta manera es posible eliminar el ruido de alta frecuencia no deseado y al mismo tiempo mantener los componentes AC de la señal PPG.

A continuación, se describe el proceso de filtrado. En la figura 2.23 muestra la señal original de PPG en el dominio del tiempo.



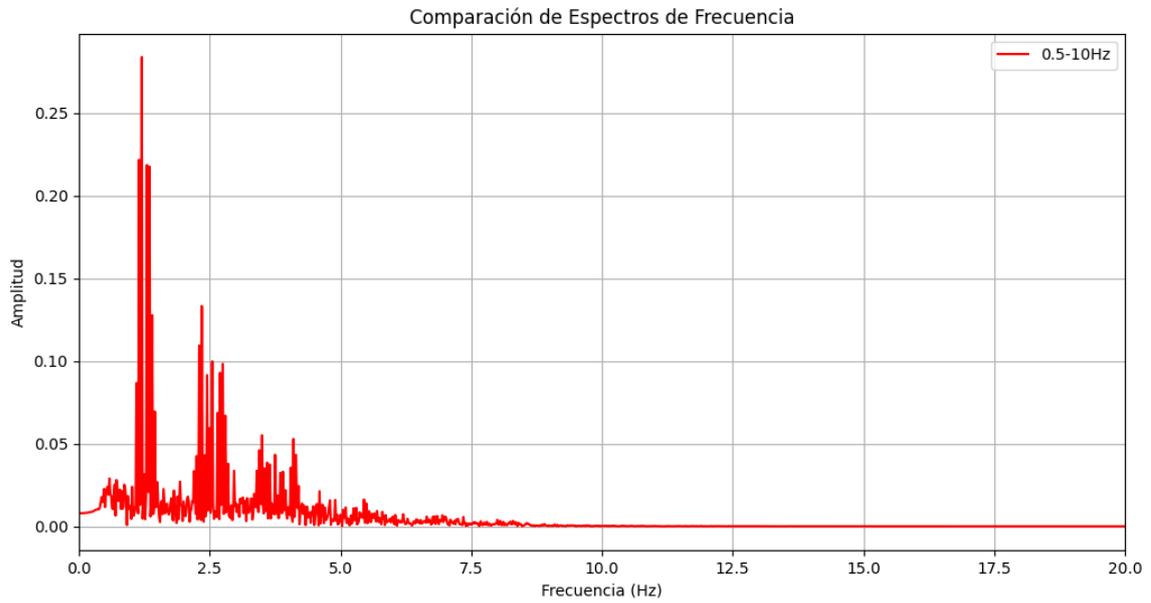
**Fig. 2.23 Señal PPG en dominio del tiempo**

Se puede observar en la figura 2.24, se le ha realizado un acercamiento al eje y, para poder visualizar la amplitud y frecuencia de la señal original aplicando la transformada rápida de Fourier, este procedimiento facilita la aplicación de filtros.



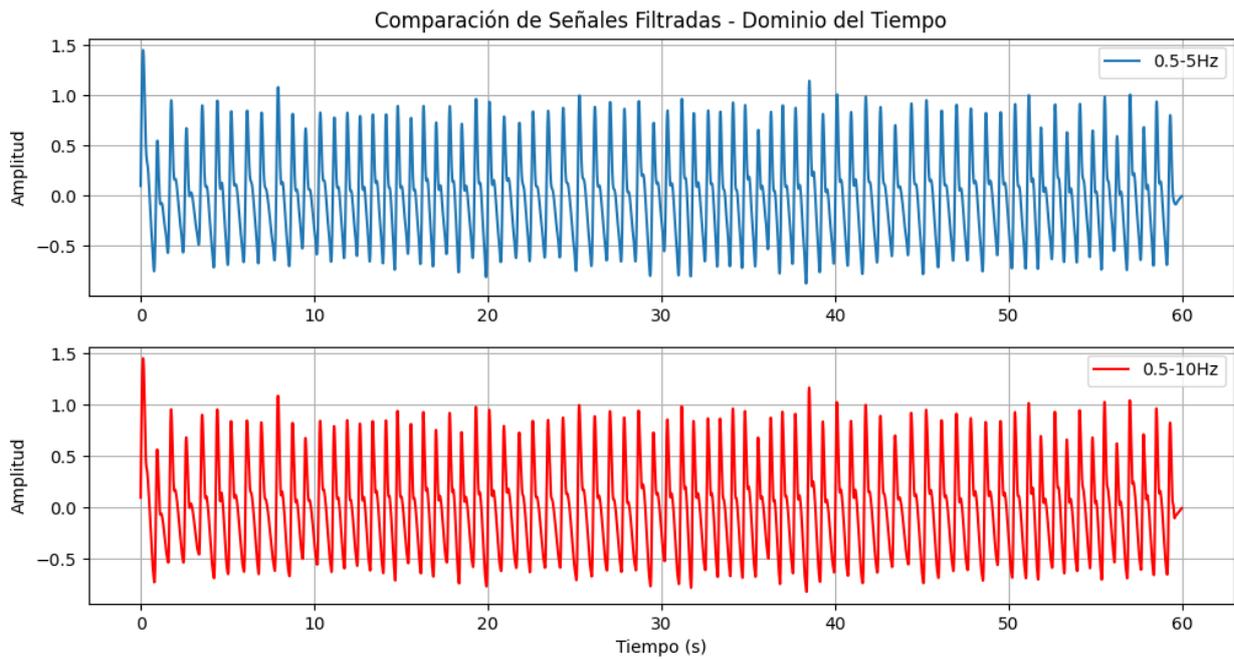
**Fig. 2.24 Transformada rápida de Fourier**

En la figura. 2.25 se presenta el espectro de frecuencia, que se obtiene mediante la transformada rápida de Fourier y permite apreciar el trabajo de los filtros excluyendo señales superiores a los 10 Hz.



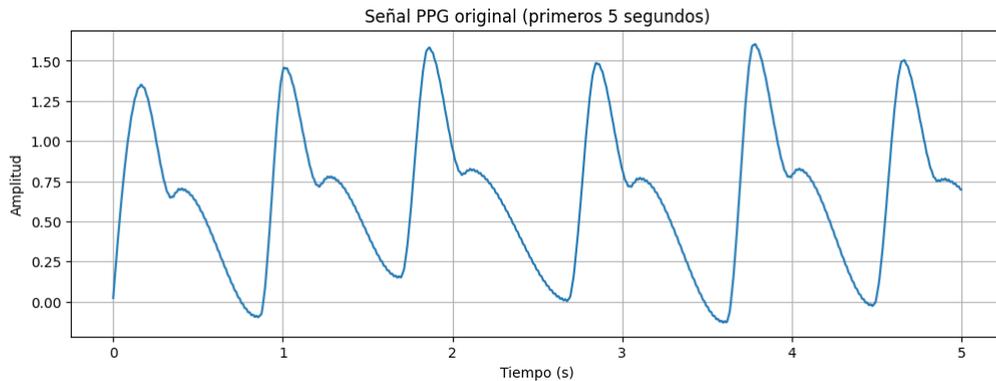
**Fig. 2.25 Espectro de frecuencia**

En la figura. 2.26, se comparan los dos filtros el filtro 1 que corresponde a un filtro pasa altos, y el filtro 2 correspondiente a un filtro pasa bajos.



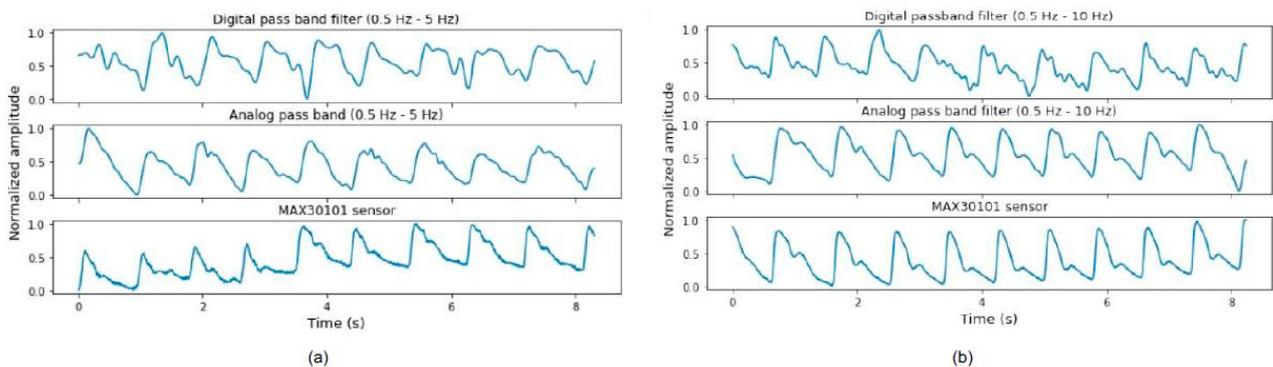
**Fig. 2.26 Comparación de señales filtradas**

La figura. 2.27 representa la señal que el programa permite visualizar por pantalla.



**Fig. 2.27 Señal fotopleletismografía**

La figura 2.28 se presenta las salidas del PPG EduKit a) Filtro 1 correspondiente al filtro pasa alto y de b) Filtro 2 correspondiente del filtro pasa bajo, tanto en su modalidad analógica como digital.



**Fig. 2.28 Señales PPG adquiridas con el PPG EduKit utilizando las modalidades analógica y digital de las configuraciones Filtro 1 y Filtro 2. Todas las señales en (a,b) se adquieren, respectivamente, simultáneamente. [2]**

El filtro 1 opera en el rango de 0,5 Hz y 5 Hz, y el filtro 2 de 0,5 Hz y 10 Hz. La tasa de muestreo utilizada para ambos es de 100 Hz.

Ambos filtros tienen un número de 396 coeficientes, bandas de transición de 0,5 Hz, una atenuación de 40 dB en la primera banda suprimida, respectivamente, 60 dB para la segunda banda suprimida.

**Tabla 2.6 Comparación entre filtro digital y analógico**

ASPECTO	FILTRO ANALÓGICO	FILTRO DIGITAL
<b>Ventajas</b>		
Velocidad	Procesamiento en tiempo real sin retraso	Depende de la velocidad de procesamiento del microcontrolador
Consumo de energía	Bajo consumo si se usa componentes pasivos (R, L, C)	Puede consumir más energía si el procesamiento es intensivo
Ruido	Menor susceptibilidad a ruido de cuantización.	Puede introducir ruido digital (aliasing)
<b>Desventajas</b>		
Flexibilidad	Parámetros físicos (depende de los componentes físicos)	Parámetros ajustables mediante software
Precisión	Sensible a la tolerancia de componentes.	Mayor precisión y estabilidad
Implementación	Ocupan espacio físico en la placa	Requiere microcontrolador con suficiente capacidad
Costo	Puede ser costosos por ciertos componentes.	Bajo costo en implementación (solo software)

## 2.5 ADC

El ADC utilizado en la placa PPG EduKit es el AFE4490, un front end analógico (AFE) integrado para aplicaciones de oximetría. [40]

**Tabla 2.7 Características ADC**

<b>Característica</b>	<b>Especificación</b>
Número de bits (ADC)	22 bits (Sigma-Delta)
Rango de alimentación	2.7 V - 5.25 V
Consumo de corriente	~4 mA (modo activo)
Frecuencia de trabajo (LED)	Hasta 1kHz
Frecuencia de muestreo (ADC)	Hasta 1kMPS (kilo-muestras por segundo)
Interfaz de comunicación	SPI (4 hilos, hasta 20MHz)
Rango de entrada (analógica)	0V a 3.3V

La muestra del ADC se toma alternativamente durante la mitad del período de pulso de cada LED, evitando así agregar un período de banda muerta entre los pulsos de conmutación de los LED. Como se describió anteriormente, la SpO<sub>2</sub> se puede calcular obteniendo la relación R en dos longitudes de onda: uno rojo y otra infrarroja (que no se aprecia). Esto se puede lograr de dos maneras: analizando los componentes de AC y DC de la señal en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. [2]

## **2.6 Adquisición de datos**

Para la captación de señales de fotopletoxiografía (PPG), se utilizó el dispositivo PPG EduKit junto con el software MATLAB Runtime R2021a [41]. Esto permitió registrar las señales fisiológicas de los participantes, generando una base de datos con los estudiantes de la asignatura “Sistemas Biomecatrónicos” de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción FIMCP, de la Escuela Politécnica del Litoral

(ESPOL). El estudio incluyó un grupo de 27 alumnos, cuyos datos fueron recolectados durante las clases entre el lunes 13 y viernes 31 de enero de 2025.

Después del proceso de adquisición de datos, se utiliza Google Colab [42], también con las librerías, Neurokit [43], PhysioNet [44] y HeartPy [45] que contiene un conjunto de herramientas especializadas y desarrolladas para analizar la frecuencia cardíaca utilizando datos PPG, junto con una herramienta de etiquetado personalizada.

Una característica notable de HeartPy es la capacidad de definir un intervalo de frecuencia cardíaca normal y marcar picos específicos que se consideran incorrectos durante el proceso de análisis. Se aplica un filtro que elimina el ruido agudo de la señal, dejando pasar solo las frecuencias bajas hasta 10 Hz. Un fragmento de señal se considera visualmente anómalo si contiene artefactos de movimiento significativos, formas de onda irregulares o una calidad de señal baja a partir de la cual no se puede calcular la frecuencia cardíaca. [46]

## **2.7 Aprendizaje Automático**

La inteligencia artificial se ha involucrado en varios campos de la medicina y en la fotopleitismografía no ha sido la excepción, con los datos obtenidos de una persona se puede aplicar algoritmos de aprendizaje automático sobre clasificación o regresión.

Algunos algoritmos que son utilizados en la medicina, ya sea en diagnóstico o tratamiento son los siguientes:

Árboles de decisión, son un método que clasifica o predice valores dividiendo los datos en grupos mediante reglas de if-then. Utiliza métricas de división de datos como Ganancia de información (Information Gain), Índice de Gini. [47]

Aplicaciones biomédicas:

- Detección de arritmias. [48]
- Clasificación de señales EEG/ECG. [49]

Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), Clasificador que encuentra el hiperplano óptimo para dividir grupos de datos en un espacio multidimensional mediante un kernel, maximiza el margen entre clases. [50]

Aplicaciones biomédicas:

- Clasificación de estados de estrés. [51]
- Detección de apnea del sueño. [52]

Regresión Logística, Modelo lineal para la clasificación binaria/multiclase mediante una función sigmoide que estima probabilidades. [53]

Aplicaciones biomédicas:

- Predicción de hipotensión intraoperatoria. [54]
- Detección de fibrilación auricular. [55]

K-Vecinos Más cercanos, clasificación basada en la mayoría de votos de los “K” puntos de datos próximos en su espacio de características. [56]

Aplicaciones biomédicas:

- Identificación de actividad física. [57]
- Detección de deshidratación. [58]

Redes Neuronales con arquitecturas reducidas, como redes neuronales convolucionales capas convolucionales para extraer características locales (cómo morfología del pulso) y capas full connected para la clasificación. [59]

Aplicaciones biomédicas:

- Estimación de SpO2. [60]
- Procesamiento de imágenes. [61]

**Tabla 2.8 Métodos de aprendizaje, sus ventajas y desventajas [62]**

<b>ALGORITMO</b>	<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Árboles de Decisión	Comprensión sencilla, alta velocidad computacional, alta velocidad de aprendizaje, alta velocidad de clasificación, gestión de valores faltantes.	La complejidad de diseñar árboles grandes, la falta de capacidad para gestionar el sobreajuste, la baja capacidad para gestionar datos ruidosos, la baja capacidad para gestionar datos con alta correlación y precisión media.
Máquinas de Vectores de Soporte	Capacidad para gestionar datos con separabilidad lineal y no lineal, alta precisión, alta velocidad de clasificación, capacidad para gestionar datos con alta correlación.	Suponiendo separabilidad lineal para el conjunto de datos, baja capacidad para gestionar sobreajuste, baja velocidad de aprendizaje, baja capacidad para gestionar valores faltantes, baja capacidad para gestionar datos ruidosos.
K- Vecinos más Cercanos	Algoritmo simple, rendimiento estable, alta velocidad de aprendizaje, capacidad para gestionar el sobreajuste.	Alta sobrecarga computacional, sensibilidad a las estructuras de datos locales, precisión media, baja velocidad de clasificación, baja capacidad para gestionar valores faltantes, incapacidad para gestionar datos ruidosos, incapacidad para gestionar datos con alta correlación.
Redes Neuronales	Alta flexibilidad, alta precisión, alta velocidad de clasificación, capacidad de gestionar datos con alta correlación, adecuado para	Implementación difícil, baja velocidad de aprendizaje, incapacidad para gestionar valores faltantes, incapacidad para gestionar datos ruidosos,

	bases de datos no lineales y complejas.	falta de capacidad para gestionar el sobreajuste.
Máquinas de Vectores de Soporte	Capacidad para gestionar datos con separabilidad lineal y no lineal, alta precisión, alta velocidad de clasificación, capacidad para gestionar datos con alta correlación.	Suponiendo separabilidad lineal para el conjunto de datos, baja capacidad para gestionar sobreajuste, baja velocidad de aprendizaje, baja capacidad para gestionar valores faltantes, baja capacidad para gestionar datos ruidosos.
Regresión Logística	Simplicidad y facilidad de interpretación, Eficiencia en el entrenamiento, Buena para clasificación binaria.	Dificultad con relaciones no lineales, limitada a resultados binarios o categóricos.

# CAPÍTULO 3

## 3. DISEÑO DE PRÁCTICAS

### 3.1 Análisis del contenido del capítulo

En este capítulo se explica acerca del desarrollo de la realización de las prácticas de la Maestría en Ingeniería Biomédica, garantizando los aprendizajes efectivos, integrales y significativos de los estudiantes, fortaleciendo sus competencias, entre el componente teórico y práctico.

La metodología experimental empleada en cada práctica integró los componentes teórico y práctico. A continuación, se detalla el enfoque específico de cada una para garantizar su correcto desarrollo.

Una breve descripción general de cada una de las prácticas que constan de:

- Prepráctica la cual se envía días antes (dos semanas) de la fecha en la que se vaya a ejecutar la práctica, conjuntamente se desarrolla una evaluación diagnóstica.
  - El preparatorio o prepráctica se considera un requisito necesario para realizar la práctica. Cada una de las preprácticas consta de los objetivos a tratar, marco teórico, cuestionario y ayudas en línea para una mejor comprensión y aprendizaje autónomo.
- Guía de laboratorio es en donde consta los pasos para ejecutar la práctica y los datos a obtener.
  - La guía práctica contiene la introducción a la práctica, marco teórico, el procedimiento, cuestionario, conclusiones y recomendaciones.
  - En el apartado de procedimiento consta del paso a paso de la ejecución de la práctica, adicional se deja un apartado para que el estudiante pueda realizar la modificación y pueda manipular los valores y datos, de esta manera también se aborda el tipo de aprendizaje kinestésico.

- El apartado de cuestionario consta de cuatro preguntas que los estudiantes deben responder.
- Instrumento de evaluación que son rúbricas de evaluación en cada una de las prácticas
  - Cómo instrumento de evaluación en las prácticas se utilizó la rúbrica del tipo analítica o de criterio, la cual permite medir de forma explícita el desempeño y suma el puntaje de estos criterios para obtener un puntaje total. En esta práctica se califica el informe que los estudiantes presentaron, con cada uno de los puntos solicitados.

En la sección de ANEXOS se encuentra el ANEXO A, correspondiente a las preprácticas, ANEXO B corresponde a cada una de las prácticas, y ANEXO C contiene las rúbricas utilizadas en cada práctica de laboratorio.

### **3.2 Nuevas guías para los estudiantes en la Maestría en Ingeniería Biomédica**

Las nuevas guías de laboratorio se desarrollaron desde la evaluación diagnóstica. Con este componente se prepararon pruebas para conocer el grado de conocimiento sobre los alumnos en los temas a estudiar, esta manera tener una medida cuantitativa de conocimiento de los alumnos.

Se realizaron pensando en un enfoque pedagógico, hacia la Maestría en Ingeniería Biomédica, la cual abarca varios estudiantes de la parte médica, y que les agrada la tecnología. De tal manera que las prácticas tienen que poseer cierto grado de acercamiento tanto del lado médico y tecnológico.

Las preprácticas fueron diseñadas para familiarizar a los estudiantes con los temas relacionados, de modo que, al investigar previamente, pueda adquirir experiencia y desenvolverse con soltura durante las sesiones experimentales.

Por su parte, las guías de laboratorio han sido diseñadas para que los estudiantes puedan ejecutar las prácticas de manera clara y sencilla. Para ello, incorporan instrucciones paso a paso que detallan minuciosamente los procedimientos. Además, su diseño considera específicamente las necesidades de los técnicos responsables de impartir las sesiones en los laboratorios, facilitando así su labor de apoyo y supervisión.

Finalmente, se ha implementado una rúbrica de evaluación que permite cuantificar el progreso académico mediante la valoración objetiva del desempeño en los parámetros establecidos para cada práctica. Este instrumento no solo sistemiza la calificación, sino que también proporciona retroalimentación individualizada sobre la comprensión de los contenidos abordados, funcionando como una herramienta dual de evaluación y aprendizaje.

Con estos antecedentes se explica el formato y contenido de las prácticas sobre fotopleletismografía.

### **3.2.1 Práctica 1: Principio Básicos de Señales PPG**

Este laboratorio inicia con el preparatorio, los estudiantes tienen una breve introducción a la fotopleletismografía, la frecuencia cardiaca, que comportamiento físico y matemático es relacionado a la fotopleletismografía, y tipos de sensores utilizados para la PPG.

Conjuntamente con la prepráctica se habilita el cuestionario el cuál consta de diez preguntas que se enfocan en los principios y características tanto físicas y fisiológicas de la fotopleletismografía y elementos electrónicos pertenecientes a la placa PPG Edukit. No se realizan otras preguntas ya que no se relacionan con el enfoque de la práctica a realizarse, las preguntas de evaluación diagnóstica y su respectiva respuesta subrayada son las siguientes:

En un sistema de PPG, la luz reflejada o transmitida depende principalmente de:

- La frecuencia cardiaca.
- La cantidad de oxígeno que lleva la sangre.
- El diámetro del vaso sanguíneo.

- La temperatura en la piel.

¿Qué principio físico utiliza la PPG para medir el flujo sanguíneo?

- Emisión de ultrasonido.
- Absorción de luz por la hemoglobina.
- Campos electromagnéticos.
- Conductividad térmica.

¿Cuál es el componente típico de un sistema de PPG?

- Un condensador electrolítico.
- Un diodo LED y un fotodetector.
- Un transformador de alta frecuencia.
- Un generador de señales.

¿Qué parámetro del ciclo cardiaco puede estimarse a partir de la señal PPG?

- Volumen sistólico.
- Presión arterial media.
- Resistencia vascular periférica.
- Frecuencia Cardiaca.

¿Cuál de estos componentes de la señal PPG corresponde a la eyección de sangre por el corazón?

- Onda dicrotica.
- Línea base.
- Onda de pulso principal (sistólica).
- Artefactos por movimiento.

¿Cuál de estos dispositivos utiliza PPG de manera rutinaria?

- Electrocardiógrafo.
- Resonancia magnética.

- Esfigmomanómetro.
- Oxímetro de pulso.

¿Qué información adicional puede derivarse de la forma de onda PPG además de la frecuencia cardíaca?

- Niveles de glucosa presentes en la sangre.
- Índices de perfusión y rigidez arterial.
- Actividad cerebral (EEG).
- Temperatura corporal central.

¿Cuál es la función principal de un amplificador de transimpedancia?

- Convertir corriente en voltaje.
- Incrementar la ganancia de voltaje.
- Convertir voltaje en corriente.
- Reducir ruido en señales de alta frecuencia.

En un diseño de transimpedancia, un resistor de retroalimentación grande implica:

- Mayor sensibilidad para corrientes pequeñas.
- Mayor distorsión en la señal de salida.
- Reducción del rango dinámico.
- Incremento del ruido térmico.

¿Cuál es la ley que relaciona corriente, voltaje y resistencia en un circuito eléctrico?

- Ley de Faraday.
- Ley de Coulomb.
- Ley de Ohm.
- Ley de Kirchhoff.

¿Cuál es un uso común de los datos de PPG en el aprendizaje automático?

- Identificación de enfermedades musculares.

- procedimiento para tratar arritmias.
- Diagnóstico de enfermedades cardíacas.
- Mejora de la resolución del ECG.

La guía práctica está enfocada al manejo del PPG EduKit, resaltando la electrónica, para que los estudiantes aprecien las etapas de adquisición de una señal fotopletimográfica, también para que manipulen y se familiaricen con el hardware y software PPG EduKit.

En el apartado de procedimiento, se explica el paso a paso de la práctica mediante gráficas descriptivas, desde la conexión y software que se debe utilizar, la plataforma del Edukit permite cambiar los LEDs para obtener diferente longitud de onda y también la intensidad LED de tal forma que pueden adquirir diferentes datos de PPG.

En la rúbrica de evaluación se califica capturas de pantalla de la práctica, diagramas de bloques, configuración de parámetros, gráficas y tablas de resultados, análisis, preguntas contestadas correctamente, conclusiones, recomendaciones.

### **3.2.2 Práctica 2: Filtros Aplicados a las Señales Biomédicas**

En este preparatorio los estudiantes tienen una breve introducción a circuitos de filtrado, que incluye: Filtros pasivos que constan de elementos como resistores y capacitores (pasa bajos, pasa altos, pasa banda, rechazo de banda), filtros activos se incluye amplificador operacional para mejorar su rendimiento y pueden ser de primer orden, segundo orden, o superior. Entre los filtros de orden superior, destacan arquitecturas como Butterworth, Chevyshev, y filtros digitales como son FIR, IIR.

En la práctica se ha utilizado los filtros pasa baja y pasa altos, de manera que al cambiar los elementos electrónicos en la placa puedan visualizar el cambio del filtro y permitir conocer si los elementos seleccionados son efectivos para el diseño de un correcto filtro.

El cuestionario en esta prepráctica consta de 10 preguntas en las cuales se tratan temas acerca de filtros en electrónica, los tipos y características de los filtros, que elementos

electrónicos componen filtros activos y pasivos. No se realiza otras preguntas que no procedan con el tema de filtros en la placa PPG Edukit. Las preguntas de la evaluación diagnóstica y sus respectivas respuestas están subrayadas, y son las siguientes:

¿Qué es un filtro en electrónica?

- Un dispositivo para cambiar colores.
- Un circuito que facilita el paso de señales con ciertas frecuencias y bloquea otras.
- Una herramienta para medir voltaje.
- Un componente que almacena energía.

¿Cuál es una de las principales diferencias entre un filtro activo y un filtro pasivo?

- Los filtros activos usan amplificadores, mientras que los pasivos no.
- Los filtros pasivos solo funcionan con corriente alterna.
- Los filtros activos son más grandes.
- Los filtros pasivos no necesitan resistencias.

¿Qué componentes principales se encuentran en un filtro pasivo?

- Transistores y diodos.
- Capacitores, resistores e inductores.
- Amplificadores operacionales y transformadores.
- Relés y motores.

¿Qué ventaja tienen los filtros activos sobre los pasivos?

- Son simples para construir.
- No necesitan fuente de alimentación.
- Ofrecen ganancia en la señal.
- Son más baratos en todos los casos.

¿Qué tipo de filtro elimina las frecuencias altas y permite pasar las bajas?

- Filtro paso alto.
- Filtro paso bajo.
- Filtro de banda.

- Filtro paso banda.

¿Cuál de las siguientes opciones NO es una desventaja de los filtros pasivos?

- Pérdida de señal.
- Limitación de ganancia.
- Necesidad de fuente de alimentación.
- Tamaño grande para bajas frecuencias.

¿Qué dispositivo se utiliza comúnmente en un filtro activo para amplificar la señal?

- Resistor.
- Capacitor.
- Amplificador operacional.
- Inductor.

¿Qué significa la frecuencia de corte en un filtro?

- La frecuencia más baja que puede medir el filtro.
- La frecuencia máxima que el filtro puede bloquear.
- La frecuencia donde la ganancia cae a -3 dB.
- La frecuencia en la que se detiene el filtro.

¿Cuál de las siguientes opciones describe mejor un filtro paso banda?

- Permite pasar frecuencias altas y bloquea las bajas.
- Bloquea todas las frecuencias.
- Permite el paso de un rango específico de frecuencias y bloquea las otras.
- Amplifica todas las frecuencias por igual.

¿Qué sucede con un filtro pasivo si se usa con señales de muy baja frecuencia?

- Funciona perfectamente sin cambios.
- Puede ser muy grande físicamente.
- Se convierte en un filtro activo.

- No necesita más componentes.

La Guía de la segunda práctica está realizada para que los estudiantes puedan intercambiar los componentes electrónicos de la placa PPG EduKit, como lo son resistencias y capacitores, de esta manera visualizar el efecto que tienen los filtros en la adquisición y presentación de las señales PPG, se entregaron los componentes prácticos en el laboratorio para que los estudiantes no tengan que llevarlos, ya que se puede dificultar la búsqueda de estos elementos.

La rúbrica de evaluación califica ítems como lo son filtros pasa alto, filtro pasa bajo, filtro pasa banda, cambio de componentes electrónicos, simulación de filtros, análisis de resultados, cuestionario, conclusiones recomendaciones.

### **3.2.3 Práctica 3: Inteligencia Artificial con Fotopletismografía**

En este preparatorio los estudiantes tienen una breve introducción acerca de la inteligencia artificial, los tipos de inteligencia artificial, tipos de aprendizaje de Machine Learning, tipos de modelos de Deep Learning, redes neuronales convolucionales (CNN). Un ítem de ayudas en donde se tiene enlaces de videos didácticos, acerca de Machine learning, tutoriales sobre análisis de datos, aplicaciones biomédicas con el uso de la inteligencia artificial.

La evaluación diagnostica consta de diez preguntas sobre conceptos básicos de inteligencia artificial, como manipulación de datos, modelos de clasificación o regresión, métricas de desempeño de los algoritmos. Las preguntas de evaluación y sus respectivas respuestas están subrayadas, y son las siguientes:

¿Qué es el aprendizaje automático?

- Un sistema que genera datos aleatorios.
- Un enfoque para programar computadoras manualmente.
- Un método que permite al software aprender modelos de datos y mejorar automáticamente.

- Una técnica para diseñar hardware.

¿Qué se utiliza en aprendizaje supervisado?

- Datos etiquetados.
- Datos no estructurados.
- Datos sin etiquetas.
- Datos generados aleatoriamente.

¿Cuál es el característica principal de un modelo de clasificación?

- Calcular el promedio de un conjunto de datos.
- Predecir una categoría o clase.
- Determinar valores continuos.
- Optimizar una función lineal.

¿Qué significa "sobreajuste" (overfitting)?

- Cuando el modelo no se entrena lo suficiente.
- Cuando el modelo tiene un desempeño perfecto sobre datos nuevos.
- Cuando el modelo no captura patrones complejos.
- Cuando un modelo se encaja perfecto a los datos de entrenamiento y no generaliza bien.

¿Qué hace la regularización L2 en un modelo?

- Anula los pesos mayores para reducir la complejidad del modelo.
- Agrega ruido aleatorio a los datos de entrenamiento.
- Maximiza la precisión de los datos de prueba.
- Reduce el tamaño del conjunto de datos.

¿De las siguientes técnicas cuál se utiliza en aprendizaje no supervisado?

- Regresión lineal.
- Análisis de clúster (clustering).

- Validación cruzada.
- Redes neuronales convolucionales.

¿Qué es un hiperparámetro en aprendizaje automático?

- Una característica calculada automáticamente durante el entrenamiento.
- Una variable que define la complejidad de un modelo.
- Un parámetro que se configura antes del entrenamiento del modelo.
- Un peso ajustado durante la optimización.

¿Cuál de las siguientes funciones de activación tiene mejor velocidad de entrenamiento?

- Identidad (linear).
- ReLU (Rectified Linear Unit).
- Tanh.
- Sigmoid.

¿Qué es el "truco del kernel" en las máquinas de soporte vectorial (SVM)?

- Un método para minimizar la función de pérdida.
- Una forma de proyectar datos en un espacio de mayor dimensión para resolver problemas no lineales.
- Una técnica para simplificar cálculos lineales.
- Un algoritmo de optimización para gradiente descendente.

¿Cuál es el propósito de la validación cruzada?

- Reducir el tamaño del modelo.
- Mejorar la velocidad de entrenamiento.
- Crear nuevas características para el modelo.
- Evaluar el rendimiento del modelo en subconjuntos diferentes de datos.

Esta práctica está enfocada en el aprendizaje automático, en donde los estudiantes programan una red neuronal, mediante los datos obtenidos en la práctica 1, en la guía se detalla el procedimiento para realizar en Google Colab, de esta manera no necesitan instalar ningún software en sus computadores y la programación es en línea.

La rúbrica de evaluación consta de los ítems como lo son: precisión del modelo, optimización, interpretabilidad del modelo, conclusiones y recomendaciones.

### **3.3 Recursos necesarios para ejecutar la guía**

De manera General se necesita un computador, la placa PPG EduKit y su cable de conexión tipo micro USB, componentes electrónicos, MATLAB RUNTIME 2021a, PsoC Creator 4.4 [63], cuenta de Google Colab, estos como recursos principales para la ejecución de cualquier práctica de laboratorio.

#### **3.3.1 Electrónica Básica**

La placa PPG EduKit, al ser modular de sistema plug and play permite intercambiar componentes básicos como resistores y capacitores de tecnología de agujero pasante (through-hole technology – THT), para que el usuario, que en este caso son los estudiantes, puedan cambiar los valores de estos elementos electrónicos fácilmente y así apreciar las variaciones en los filtros y la salida de la señal PPG.

#### **3.3.2 Ingeniería Biomédica**

A partir de los conocimientos fisiológicos los estudiantes pueden determinar parámetros cómo la frecuencia cardiaca, presión arterial sistólica y diastólica, también comparar un ECG con un PPG, todo esto con la placa PPG EduKit. Esto permite, visualizar las señales y conocer acerca de los elementos de instrumentación necesarios que permiten a un equipo biomédico trabajar en óptimas condiciones.

#### **3.3.3 Adquisición de Señales**

Para la captar las señales fisiológicas, los estudiantes utilizaron el sensor incorporado en la placa PPG EduKit. Se debe tomar en cuenta que el tipo de fotodiodo que se esté utilizando, el cual se configura en la aplicación, es rojo para situaciones de inactividad y

verde para situaciones de movimiento, esto debido a la longitud de onda que producen al penetrar la piel.

#### **3.3.4 Inteligencia Artificial**

Las señales fisiológicas pueden ser analizadas mediante algoritmos de inteligencia artificial para detectar diversas enfermedades. Se busca que los estudiantes estén en la capacidad de identificar y aplicar un algoritmo adecuado. Se ha utilizado la herramienta gratuita de Google Colab para el procesar datos y aplicar métodos computacionales.

#### **3.4 Procedimiento para evaluar la efectividad de la práctica**

La evaluación debe ser parte fundamental de todo proceso educativo. Utilizando criterios debidamente contrastados, esto sirve para tomar decisiones de mejora.

Cada práctica cuenta con su respectiva rúbrica de evaluación para que la persona encargada de revisar los informes tenga la facilidad de calificar mediante los puntajes asignados en la rúbrica.

# CAPÍTULO 4

## 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Para evaluar la efectividad de las guías prácticas de laboratorio, se obtuvieron datos de entre 27 y 28 estudiantes de la materia sistemas biomecátrónicos de la carrera de Ingeniería en Mecatrónica de la ESPOL. Esto se realizó durante los horarios asignados como horas prácticas.

A continuación, se detallan los resultados de cada práctica realizada.

### 4.1.1 Práctica 1: Principio Básicos de Señales PPG

El grupo evaluado fue de 27 estudiantes.

El porcentaje de aprobación de la evaluación fue: 62.8/100 en un tiempo promedio de 09:19 minutos. El porcentaje de aprobación de cada pregunta es la siguiente tabla.

**Tabla 4.1 Porcentaje de aprobación en las preguntas del cuestionario de la prepráctica 1.**

NÚMERO DE PREGUNTA	% APROBACIÓN
1	63 %
2	93 %
3	67 %
4	100 %
5	96 %
6	78 %

7	96 %
8	89 %
9	93 %
10	70 %

El análisis de la tabla 4.1 sobre el porcentaje de aprobación de las preguntas revela que tres de ellas obtuvieron un puntaje igual o inferior al 70%. Estas corresponden a la primera, tercera y décima pregunta, las cuales evalúan conceptos nuevos para los estudiantes. Por el contrario, el resto de los ítems, relacionados con electrónica médica básica, superaron un 75% de aprobación.

Para la evaluación sumativa se empleó una rúbrica diseñada para medir la comprensión y aplicación sobre los conocimientos, tanto en la parte teórica y práctica, adquiridos en el laboratorio. El puntaje promedio obtenido por los estudiantes en esta rúbrica fue de 72,78 sobre 100.

**Tabla 4.2 Porcentaje de aprobación de la rúbrica de evaluación la práctica 1.**

NÚMERO ALUMNO	DE	% CALIFICACIÓN
1		85 %
2		0 %
3		85 %
4		80 %
5		80 %
6		75 %
7		75 %
8		75 %
9		100 %

Como se puede apreciar en la tabla 4.2 el promedio del curso es superior al 70% que es el necesario para aprobar la actividad de la práctica. El caso del estudiante número dos, no presentó su informe en el tiempo permitido, así que su calificación fue de cero.

Adicionalmente, se analizaron los datos usando métodos estadísticos como la prueba de t de Student para muestras relacionadas, el cual evidenció una diferencia estadísticamente no significativa entre el desempeño en la prueba diagnóstica previa al laboratorio (media = 84,5%, DE = 13,7) y los resultados de los informes posteriores (media = 75,5 %, DE = 27,9;  $p = 0.288$ ). Donde el 40% de los estudiantes presentó mejorías moderadas, el 30% mantuvo desempeños similares y el 30 % presentó decrementos considerables.

En general se puede hacer un ajuste a la herramienta de evaluación para obtener mejores resultados en los alumnos.

#### **4.1.2 Práctica 2: Filtros Aplicados a las Señales Biomédicas**

El grupo evaluado fue de 27 estudiantes.

El porcentaje de aprobación de la evaluación fue: 85,2/100 en un tiempo promedio de 04:26 minutos. El porcentaje de aprobación de cada una de las preguntas se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 4.3 Porcentaje de aprobación en las preguntas del cuestionario de la prepráctica 2.**

NÚMERO PREGUNTA	DE	% APROBACIÓN
1		96 %
2		96 %
3		93 %
4		93 %
5		100 %
6		70 %

7	100 %
8	48 %
9	93 %
10	63 %

En el caso específico de la octava pregunta en la cual no supera el 50% de aprobación, posiblemente sean dificultades conceptuales que pueden mejorarse, otra pregunta que no supera el 70 % de aprobación es la décima que posiblemente sea por problemas de conceptos sobre filtrado de señales. Las demás preguntas superan el 70 % de aprobación, esto significa que poseen bases de conocimiento acerca de los filtros.

En la evaluación sumativa se utilizó una rúbrica que permitió medir la comprensión y la aplicación de los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en el laboratorio. El puntaje promedio obtenido por los estudiantes en esta evaluación fue de 72,22 sobre 100.

**Tabla 4.4 Porcentaje de aprobación de la rúbrica de evaluación de la práctica 2.**

NÚMERO ALUMNO	DE	% CALIFICACIÓN
1		100 %
2		75 %
3		95 %
4		65 %
5		0 %
6		95 %
7		90 %
8		65 %
9		65 %

Las calificaciones de cuatro alumnos son inferiores al 70 %, una de ellas es una nota nula, ya que el estudiante no presentó su informe. Las otras calificaciones bajas, se

deben a que no presentaron ciertas secciones necesarias en el informe para su respectiva calificación. Los demás alumnos poseen calificaciones superiores a 75 %.

Como se puede visualizar en la tabla 4.4 el promedio del curso es superior al 70% que es el necesario para aprobar la actividad de la práctica.

Adicionalmente, se analizaron los datos usando métodos estadísticos como la prueba de t de Student para muestras relacionadas, el cual no evidenció diferencias estadísticamente significativas entre el desempeño en la prueba diagnóstica previa al laboratorio (media = 75,5%, DE = 27,9) y los resultados de los informes posteriores (media = 75,0%, DE = 25,2;  $p = 0,955$ ). En términos de evolución individual, el 40% de los estudiantes mostró mejoría, el 50% presentó una disminución en su desempeño y el 10% mantuvo el mismo nivel.

Se sugiere que la intervención del laboratorio tuvo efectos heterogéneos, posiblemente mediados por diferencias en los prerrequisitos conceptuales o la transferencia de conocimientos prácticos a la elaboración del informe.

#### **4.1.3 Práctica 3: Inteligencia Artificial con Fotopletismografía**

El grupo evaluado fue de 28 estudiantes.

El porcentaje total de aprobación de la evaluación fue: 81,4/100 en un tiempo promedio de 05:47 minutos. El porcentaje de aprobación por pregunta está en la siguiente tabla.

**Tabla 4.5 Porcentaje de aprobación en las preguntas del cuestionario de la prepráctica 3.**

NÚMERO PREGUNTA	DE	% APROBACIÓN
1		100 %
2		93 %
3		100 %

4	100 %
5	79 %
6	71 %
7	71 %
8	18 %
9	82 %
10	96 %

La octava pregunta, que aborda el tema nuevo y específico de las funciones de activación en inteligencia artificial, presenta un bajo porcentaje de aprobación. Por el contrario, tres preguntas obtuvieron un porcentaje excelente, mientras que el resto, relacionadas con conocimientos básicos de aprendizaje automático, se ubicaron entre el 70% y el 90 % de aprobación.

Para la evaluación sumativa se utilizó una rúbrica que permitió evaluar tanto la comprensión como la aplicación de los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en el laboratorio. El puntaje promedio obtenido fue de 84,44 sobre 100.

**Tabla 4.6 Porcentaje de aprobación de la rúbrica de evaluación de la práctica 3.**

NÚMERO DE ALUMNO	% CALIFICACIÓN
1	80 %
2	80 %
3	80 %
4	80 %
5	100 %
6	80 %
7	100 %
8	70 %

9	80 %
---	------

Las calificaciones de los alumnos son superiores al 80%, solamente un alumno obtuvo una calificación de 70 %, los demás tienen superior a 80%. De esta manera se puede visualizar el promedio del curso es superior al 70% que es el necesario para aprobar la actividad de la práctica.

Adicionalmente, se analizaron los datos usando métodos estadísticos como la prueba de t de Student para muestras relacionadas, el cual reveló una diferencia estadísticamente significativa en el desempeño académico. En la prueba diagnóstica previa al laboratorio se obtuvo una media de 81,0% (DE = 23,8), mientras que en los informes posteriores la media fue de 83,0% (DE = 10,5;  $p = 0,035$ ). A nivel individual, el 60% de los estudiantes presentó una disminución en su desempeño, el 30% mostró mejoría y el 10% mantuvo su calificación. Estos hallazgos señalan la necesidad de implementar estrategias de diferenciación pedagógica que garanticen un desafío cognitivo adecuado para todos los estudiantes durante las actividades prácticas.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

- Se han diseñado las prácticas de laboratorio utilizando la placa PPG EduKit, para la Maestría en Ingeniería Biomédica, fortaleciendo su conocimiento teórico y práctico. Sin embargo, al aplicarse en alumnos de pregrado, se identificó la necesidad de ajustar el nivel de complejidad para adaptarse a su formación previa.
- Se adaptaron proyectos y actividades prácticas para la placa PPG EduKit, dependiendo del nivel de comprensión teórica y destrezas de los maestrantes, de manera que están experimentando con este tipo de dispositivos que permiten la adquisición de señales fisiológicas.
- Se diseñaron las guías detallando las instrucciones, paso a paso para que los estudiantes logren completar la práctica sin dificultades, adquiriendo señales fisiológicas, procesando esta información y aplicando tecnologías emergentes como Inteligencia Artificial en la medicina.
- Se evaluó la efectividad de las prácticas mediante un instrumento de medición como es la rúbrica de evaluación, que permite saber el conocimiento adquirido de los estudiantes al final de la práctica. Se pueden reforzar la evaluación de conocimientos, ajustando los criterios de evaluación según el nivel académico.
- Los alumnos de pregrado adquirieron conocimientos fundamentales sobre fotopleletismografía, de esta manera se familiarizan con el flujo de trabajo en biomédica, que comprende, adquisición, filtrado y visualización de señales. Si los estudiantes de pregrado lograron comprender estos conceptos iniciales, los estudiantes de posgrado, con mayor preparación, no solo los asimilarán, si no que pueden avanzar hacia aplicaciones más complejas.

Lo que un alumno de pregrado logra aprender en un nivel introductorio, un alumno de posgrado lo mejora y lo expande.

- Una limitación con el dispositivo y en las prácticas fue con la adquisición de las señales fisiológicas, el movimiento de las personas no permite obtener datos correctos, por lo tanto, tener la precaución de colocar en el lugar indicado el dedo índice. Otra limitante fue la conectividad del dispositivo, ya que en versiones inferiores a MATLAB Runtime 2021a, no es compatible con el dispositivo y genera un error.
- El número de estudiantes es un factor crítico que incide directamente en la logística de la práctica. Un grupo numeroso puede generar los siguientes desafíos: dificultad para garantizar que todos los alumnos sigan las instrucciones de manera homogénea, necesidad de una mayor supervisión por parte del instructor y una extensión significativa del tiempo requerido para completar la actividad.

## **RECOMENDACIONES**

- Para tener una mejor comprensión del back end sobre la tarjeta PPG EduKit, se debe motivar la lectura de los manuales de funcionamiento, en donde incluyen las hojas técnicas de los componentes que utiliza la placa.
- Los estudiantes deben desarrollar los preparatorios como requisito indispensable antes de que se les permita el manejo de las placas e instrumentos del laboratorio.
- Se recomienda tratar máximo con un número de diez a catorce estudiantes, ya que, con mayor número de personas, la práctica no va a resultar óptima.
- No conectar la placa PPG EduKit, a fuentes de alimentación superiores a 3.3V, ya que puede quemar el regulador de voltaje de la placa.

- Las métricas de evaluación pueden modificarse dependiendo de la perspectiva del docente encargado, siempre y cuando mantengan los objetivos de cada práctica.
- Antes de entregar las placas PPG EduKit a los estudiantes, se debe proporcionar la información sobre su manipulación, conexiones, y elementos electrónicos.
- El encargado del laboratorio debe proporcionar todo el material como multímetro, y elementos electrónicos, para que el alumno pueda realizar su práctica de manera precisa.
- Tener en cuenta que las computadoras del laboratorio en el que se vaya a trabajar dispongan del software Matlab RUNTIME 2021a, que los dispositivos PPG EduKit estén cargados con el programa Laboratorio de Matlab.
- La persona que proporcione el laboratorio debe proporcionar la instrucción o las instrucciones, esperar un momento, preguntar y verificar que todos estén siguiendo la guía práctica.

# BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Celi, M. Yapur y Rocha A, «Mediciones Fotopletismografía,» *Centro de Investigación Científica y Tecnológica*, vol. 1, nº 1, p. 8, 2011.
- [2] A. Morillo, L. Cause, E. Baciú y B. Da Silva, «PPG Edukit: An Adjustable Photoplethysmography Evaluation System for Educational Activities,» *Sensors MDPI*, vol. 1, nº <https://doi.org/10.3390/s22041389>, p. 22, 2022.
- [3] Arduino, «Arduino Home,» Arduino R3, 05 julio 2023. [En línea]. Available: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>. [Último acceso: 17 octubre 2024].
- [4] R. Chaudhry, J. Miao y A. Rehman, «Physiology, Cardiovascular,» *National Library of Medicine*, p. 16, 2022.
- [5] Sociedad Galega de Cardiología, «Sociedad Galega de Cardiología,» Sociedad Galega de Cardiología, 24 enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.sogacar.com/el-sistema-cardiovascular/>. [Último acceso: 5 abril 2025].
- [6] I. Rehman y A. Rehman, «National Library of Medicine,» StatPearls Publishing LLC, 28 agosto 2023. [En línea]. Available: [https://www.ncbi.nlm.nih.gov/translate.google/books/NBK470256/?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=es&\\_x\\_tr\\_hl=es&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/translate.google/books/NBK470256/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc). [Último acceso: 9 abril 2025].
- [7] Medline Plus, «Medline Plus Información Para Usted,» ADAM, 9 abril 2024. [En línea]. Available: [https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp\\_imagepages/19612.htm](https://medlineplus.gov/spanish/ency/esp_imagepages/19612.htm). [Último acceso: 30 mayo 2025].
- [8] J. Pollock y A. Makaryus, «NIH NATIONAL LIBRARY OF MEDICINE,» Physiology, Cardiac Cycle, 3 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK459327/>. [Último acceso: 30 mayo 2025].
- [9] R. Medrán y R. Tortosa, «Medición del ritmo cardíaco mediante Fotopletismografía,» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [10] Vygon Value Life, «VYGON VALUE LIFE,» Vygon España, 23 septiembre 2020. [En línea]. Available: <https://campusvygon.com/es/onda-de-presion-arterial-dr-alonso/>. [Último acceso: 30 abril 2025].

- [11] P. Kyriacou y J. Allen, «PHOTOPLETHYSMOGRAPHY,» de *Photoplethysmography, Technology, Signals Analysis and Applications.*, London, Academic Press, 2021, p. 487.
- [12] R. Cabrera, «PROBLEMAS DE BIOFÍSICA,» 12 junio 2022. [En línea]. Available: [https://ricuti.com.ar/no\\_me\\_salen/hidrodinamica/G20\\_Fludin\\_r\\_52.html](https://ricuti.com.ar/no_me_salen/hidrodinamica/G20_Fludin_r_52.html). [Último acceso: 9 abril 2025].
- [13] N. Pinho y B. Massot, «A Review of Methods for Non-Invasive Heart Rate Measurement on Wrist,» *Institut des Nanotechnologies de Lyon*, p. 23, 2020.
- [14] Enfermería Buenos Aires, «Enfermería Buenos Aires,» Buenos Aires, 03 junio 2023. [En línea]. Available: <https://enfermeriabuenosaires.com/saturacion-de-oxigeno-normal/>. [Último acceso: 08 abril 2025].
- [15] D. Paz, «Análisis de la onda de presión arterial en Anestesiología y Cuidados Intensivos I. Revista Electrónica AnestesiaR,» ANESTESIAR, 16 enero 2020. [En línea]. Available: <https://anestesiario.org/2020/analisis-de-la-onda-de-presion-arterial-en-anestesiologia-y-cuidados-intensivos-i/>. [Último acceso: 06 abril 2025].
- [16] Academy, Fibricheck, «Fibricheck,» FIBRICHECK, 30 enero 2025. [En línea]. Available: <https://academy.fibricheck.com/hc/en-be/articles/6383411711260-Chapter-3-Photoplethysmography-PPG-the-new-kid-on-the-block>. [Último acceso: 12 abril 2025].
- [17] J. Moraes, M. Rocha, G. Vasconcelos y J. Vasconcelos, «Avances en el análisis de señales de fotoplethysmografía para aplicaciones biomédicas,» *SENSORS*, vol. 6, nº 18, p. 26, 2018.
- [18] A. Hermida y L. José, «Medida no invasiva de la presión arterial central mediante tonometría por aplanamiento. Análisis de la onda de pulso,» *Sociedade Galega de Medicina Interna*, Santiago de Compostela, 2012.
- [19] EuroWiss, «¿Qué es un oxímetro de pulso y cómo interpretar sus valores?,» AB Project, 3 abril 2022. [En línea]. Available: <https://www.euroswiss.com.ar/blog/que-es-un-oximetro-de-pulso-y-como-interpretar-sus-valores>. [Último acceso: 5 mayo 2025].

- [20] Masimo, «Masimo Signal Extraction Technology (SET®) Masimo.,» 10 Noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.masimo.com/technology/co-oximetry/>. [Último acceso: 06 abril 2025].
- [21] Nonin, «Nonin Onyx® Vantage 9590 NONIN.,» 12 Noviembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.nonin.com/products/9590/>. [Último acceso: 6 abril 2025].
- [22] P. Sensor, «PULSESENSOR,» 10 marzo 2012. [En línea]. Available: <https://pulsesensor.com/>. [Último acceso: 22 febrero 2025].
- [23] Y. Joel, «Pulse sensor,» World Famous Electronics llc, 2012. [En línea]. Available: <https://pulsesensor.com/>. [Último acceso: 27 Noviembre 2024].
- [24] Digikey, «Oxímetro de pulso y sensor de frecuencia cardíaca MAX30101,» Digikey, 06 junio 2017. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com.mx/es/product-highlight/m/maxim-integrated/max30101-pulse-oximeter?srsltid=AfmBOoqPn-srY8SR1-xEleAwolV0pLtdmzCMqtdEYGk0GNsXHdo7ZGOP>. [Último acceso: 27 Noviembre 2024].
- [25] Maxim Integrated, «Hoja de datos MAX30101 High-Sensitivity Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health,» Máxima Integrada, 20 febrero 2018. [En línea]. Available: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX30101.pdf>. [Último acceso: 16 abril 2025].
- [26] Electronics Mouser, «Mouser Electronics,» Analog Devices / Maxim Integrated MAX30101 Pulse Oximeter & Heart-Rate Sensor, 11 febrero 2021. [En línea]. Available: <https://www.mouser.ec/new/analog-devices/maxim-max30101-sensor/>. [Último acceso: 20 junio 2025].
- [27] Xaomi, «Xiaomi Smart Band 8 Pro,» 08 agosto 2024. [En línea]. Available: [https://www.mi.com/es/product/xiaomi-smart-band-8-pro/?srsltid=AfmBOoqUSf2ydpIDM\\_WONaytWSKwgBS1zmpcMxdA4jHfesJvO2hQWpn-](https://www.mi.com/es/product/xiaomi-smart-band-8-pro/?srsltid=AfmBOoqUSf2ydpIDM_WONaytWSKwgBS1zmpcMxdA4jHfesJvO2hQWpn-). [Último acceso: 22 febrero 2025].
- [28] E. Espinosa y K. González, «Las prácticas de laboratorio: una estrategia didáctica en la construcción de conocimiento científico escola,» Entramado, 09 octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/2654/265447025017/html/>. [Último acceso: 14 diciembre 2024].

- [29] Voca Editorial, «La taxonomía de Bloom, una herramienta imprescindible para enseñar y aprender,» Voca Editorial, 20 septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.vocaeditorial.com/blog/taxonomia-de-bloom/>. [Último acceso: 10 febrero 2025].
- [30] Centro de Investigaciones y Servicios Educativos, «Tipos de Evaluación Educativa,» *Programa Básico de Formación Docente*, vol. 1, nº 1, p. 2, 2020.
- [31] UNESCO, «UNESCO,» Unesco, 17 septiembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.unesco.org/es/learning-assessments>. [Último acceso: 7 enero 2025].
- [32] Organización de Naciones Unidas, «ONU,» ONU, 14 diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/education/#:~:text=Adem%C3%A1s%20de%20la%20educaci%C3%B3n%20primaria,una%20educaci%C3%B3n%20superior%20de%20calidad..> [Último acceso: 28 marzo 2025].
- [33] Universidad Europea, «Universidad Europea,» 11 agosto 2023. [En línea]. Available: <https://universidadeuropea.com/blog/estilos-aprendizaje/>. [Último acceso: 14 mayo 2025].
- [34] Octopart, «Octopart,» OSRAM-OS, 14 agosto 2015. [En línea]. Available: [https://octopart.com/es/sfh+7013-osram+opto-80822717?gad\\_source=1&gbraid=0AAAAAqOd8CEUXYZGrzWgOaiOuTpyzodJG&gclid=Cj0KCQjw\\_JzABhC2ARIsAPe3ynqYQthMwXCQrBKPNv3GFoaNJ2DyHEdezgDKsZtUB3kmxigRIXHDwwaAmXbEALw\\_wcB](https://octopart.com/es/sfh+7013-osram+opto-80822717?gad_source=1&gbraid=0AAAAAqOd8CEUXYZGrzWgOaiOuTpyzodJG&gclid=Cj0KCQjw_JzABhC2ARIsAPe3ynqYQthMwXCQrBKPNv3GFoaNJ2DyHEdezgDKsZtUB3kmxigRIXHDwwaAmXbEALw_wcB). [Último acceso: 20 abril 2025].
- [35] TEXAS INSTRUMENT, «TLC5925,» Texas Instrument Incorporated, Dallas, 2010.
- [36] Osram, «SFH 2706,» OSRAM AG, PREMSTAETTEN, AUSTRIA, 2022.
- [37] I. Texas, «Texas Instruments,» 19 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl971.pdf?ts=1745360253720>. [Último acceso: 12 Abril 2025].
- [38] J. Fernandez y A. Fiz, «Sonidos Respiratorios,» Servicio de Neumología Hospital Germans Trias, 21 agosto 1995. [En línea]. Available:

www.elsevier.es/index.php?p=revista&pRevista=pdf-simple&pii=S0300289615309388&r=308. [Último acceso: 26 abril 2025].

- [39] HumSilencer, «Molecular Devices,» Molecular Devices, 12 agosto 2019. [En línea]. Available: <https://es.moleculardevices.com/technology/humsilencer#:~:text=Zumbido%20el%20C3%A9ctrico%20un%20problema%20frecuente,%20Universidad%20de%20California%20Davis..> [Último acceso: 26 abril 2025].
- [40] Instruments Texas;, «AFE4490 FRONT END ANALOGIC,» 9 julio 2014. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/product/es-mx/AFE4490>. [Último acceso: 10 mayo 2025].
- [41] MathWorks, «MATLAB Runtime». USA Patente R2021a (9.10), 2025.
- [42] Google., «Google Colaboratory,» 18 abril 2017. [En línea]. Available: <https://colab.research.google.com/>. [Último acceso: 13 mayo 2025].
- [43] Makowski, D., Pham, T., Lau, Z. J., Brammer, J. C., Lespinasse, F., Pham, H., Schölzel, C., & Chen,, «NeuroKit2,» *Behavior Research Methods*, vol. 53, nº 4, pp. 1689--1696, 2021.
- [44] A. Goldberger, L. Amaral y L. Glass, «PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet,» *Circulation*, vol. 101, nº 23, pp. e215--e220, 2000.
- [45] Gent, Paul Van;, «HeartPy - Python Heart Rate Analysis,» 7 marzo 2018. [En línea]. Available: <https://python-heart-rate-analysis-toolkit.readthedocs.io/en/latest/index.html>. [Último acceso: 3 julio 2025].
- [46] V. Baciú, L. Cause, Á. García, S. Morillo y B. Da Silva, «Anomaly Detection in Multi-Wavelength Photoplethysmography Using Lightweight Machine Learning Algorithms,» *MDPI*, vol. 15, nº 6947, p. 23, 2023.
- [47] E. Vocaturo, D. Perna y E. Zumpano, «Decision Tree For Biomedical Data Analysis a Case Study in Melanoma Detection,» *IEEE/ACM*, p. 9, 2022.
- [48] A. Montiel, n. Cruz, L. Rodriguez y L. Reyes, «Detección Temprana de Enfermedades cardiovasculares a través de análisis y modelos de predicción,» *CONACYT*, vol. 5, nº 150, p. 13, 2021.

- [49] M. Fira, H. Costin y L. Goras, «On Classification of ECG and EEG Signals with Various Degrees of Dimensionality Reduction,» *Biosensors*, vol. 5, n° 121, p. 11, 2021.
- [50] S. Elzeiny y M. Qaraqe, «Stress Classification Using Photoplethysmogram-Based,» *SENSORS*, vol. 20, n° 5312, p. 19, 2020.
- [51] M. Kang, S. Siho y G. Zhang, «Mental Stress Classification Based on a Support Vector Machine and Naive Bayes Using Electrocardiogram Signals,» *Sensors*, vol. 23, n° 7916, p. 21, 2021.
- [52] S. Nader, M. Masoud y K. Habibolah, «Detection of sleep apnea using Machine learning algorithms based on ECG Signals: A comprehensive systematic review,» *Science Direct*, vol. 1, n° 180, p. 14, 2021.
- [53] K. Maheshwari, T. Shimada, D. Yang, Khanna, S y J. Cywinski, «Hypotension Prediction Index for Prevention of Hypotension during Moderate- to High-risk Noncardiac Surgery. Anesthesiolo,» *American Society of Anesthesiologists*, pp. p 1214-1222, 2020.
- [54] A. Y. Serap, D. Lerzan, G. Bulent y U. Halim, «Arterial Elastance: A Predictor of Hypotension Due to Anesthesia Induction,» *Clinical Medicine*, vol. 9, n° 3155, p. 12, 2023.
- [55] T. Pereira, N. Tran, K. Gadhoumi y M. Pelter, «Photoplethysmography based atrial fibrillation detection: a review,» *Digital Medicine*, vol. 3, n° 3, p. 12, 2020.
- [56] A. Aguikera, R. Brena, O. Mayora y E. Minero, «Multi-Sensor Fusion for Activity Recognition,» *Sensors*, vol. 19, n° 3808, p. 17, 2019.
- [57] L. Mo, Y. Zhu y L. Zeng, «A Multi-Label Based Physical Activity Recognition via Cascade Classifier,» *Sensors*, vol. 5, n° 25963, p. 23, 2023.
- [58] F. Sabry, T. Eltaras, L. Wadha y F. Hamza, «Towards On-Device Dehydration Monitoring Using Machine Learning from Wearable Device's Data,» *Sensors*, vol. 5, n° 1887, p. 22, 2022.
- [59] A. Reiss, I. Indlekofer, P. Schmidt y K. Van Laerhoven, «Deep PPG: Large-Scale Heart Rate Estimation with Convolutional Neural Networks,» *Sensors*, vol. 19, n° 3079, p. 14, 2019.

- [60] A. Cabanas, N. Saez, P. Collao y J. Pagán, «Evaluating AI Methods for Pulse Oximetry: Performance, Clinical Accuracy, and Comprehensive Bias Analysis,» *Bioengineering*, vol. 11, nº 1061, p. 11, 2024.
- [61] S. Karimijafarbigloo, R. Weiss, D. Roggenbuck y S. Rödiger, «Applications of Neural Networks in Biomedical Data Analysis,» *Biomedicines*, vol. 10, nº 1469, p. 30, 2022.
- [62] A. Masoud, E. Yousefpoor, M. Sadegh y Z. Mehmood, «Machine Learning (ML) in Medicine: Review, Applications,» *MDPI*, vol. 9, nº 2970, p. 52, 2021.
- [63] AG, Infineon Technologies, «Infineon,» Infineon Technologies AG, 5 septiembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.infineon.de/>. [Último acceso: 1 julio 2025].

# **ANEXOS**

## **ANEXO A:**

## **PREPRACTICAS**

**Maestría en Ingeniería Biomédica**

### **PREPARATORIO**

# **Práctica PPG: PRINCIPIO BÁSICOS DE SEÑALES PPG**

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

- Estudiar las etapas de electrónica y adquirir datos de fotopletimografía de la placa PPG EduKit

### **Objetivos específicos:**

- Examinar la placa del dispositivo PPG
- Separar las etapas de acondicionamiento de señal
- Detallar los filtros utilizados en la PPG

## **MARCO TEÓRICO**

La fotopletimografía es una prueba médica no invasiva que mide los cambios en el volumen sanguíneo de las venas. Se realiza con un sensor PPG que envía luz infrarroja a la piel, la cual absorbe parte de la luz y refleja el resto hacia los sensores de detección. La PPG es una herramienta esencial en los exámenes fisiológicos vasculares.



Fig. 1 Invasivo y no invasivo

En cierto modo, la fotopletismografía es una especie de interpretación de la coloración sanguínea, que dependerá de la saturación de oxígeno ( $SpO_2$ ). Este cambio de color de la sangre al oxigenarse o desoxigenarse es debido a las propiedades ópticas de la hemoglobina.

Cuando la hemoglobina está unida al oxígeno se denomina oxihemoglobina (o hemoglobina oxigenada), y es la causante del color rojo intenso de la sangre arterial. Una vez perdido el oxígeno, se denomina hemoglobina reducida, La hemoglobina oxigenada y la hemoglobina reducida absorben y transmiten determinadas longitudes de onda del espectro luminoso: para la luz roja, en torno a los 660 nm, y para la luz infrarroja, en torno a 940 nm,

Esta absorción óptica se define en la ley de Beer, también conocida como ley de Beer-Lambert; relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado El tejido biológico es un medio heterogéneo complejo que comprende múltiples absorbentes como (sangre, agua, melanina, etc.) y dispersores (colágeno, queratina, etc.). En la PPG, se examina un volumen de tejido profundo con la luz a una longitud de onda objetivo a lo largo de cada ciclo cardiaco. Con el cambio volumétrico en los componentes pulsátiles del tejido entre la sístole y la diástole, la absorbancia de la luz dentro del tejido también varía con el tiempo, lo que conduce a una onda PPG continua. Se puede expresar de la siguiente manera

$$A_{s\lambda} = \ln \left( \frac{I_{0\lambda}}{I_{s\lambda}} \right) = \epsilon_{\lambda} * C_s * L_{s\lambda} + G_{\lambda}$$

$$A_{d\lambda} = \ln \left( \frac{I_{0\lambda}}{I_{d\lambda}} \right) = \epsilon_{\lambda} * C_d * L_{d\lambda} + G_{\lambda}$$

En las ecuaciones (2.1a) y (2.1b)  $I_{s\lambda}$  y  $I_{d\lambda}$  son la intensidad de luz transmitida durante la sístole y la diástole;  $C_s$  y  $C_d$  son las concentraciones variables de la absorbancia;  $L_{s\lambda}$  y  $L_{d\lambda}$  son las longitudes de onda de la luz a través del tejido durante los estados de sístole y diástole

La curva pletismográfica obtenida por las variaciones de la luz absorbida no sólo permite calcular la frecuencia cardíaca, también resulta útil para determinar el porcentaje de saturación de oxígeno de la sangre arterial, la viscosidad de la sangre o la presión arterial.

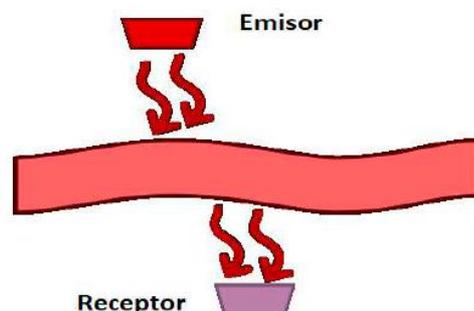
### **MEDIDA DE LAS PULSACIONES MEDIANTE PPG**

Para adquirir la variación de volumen de sangre y su influencia en la absorción de la luz se utiliza un transductor fotopletismografico, este consiste en un diodo emisor y uno receptor de luz, transistor o fotodiodo selectivo para la frecuencia emitida, ubicados sobre la extremidad donde se quiera tomar la medición.

Los circuitos para la polarización del receptor son los habituales: transistor emisor común o conversor Corriente - Voltaje para el fotodiodo. Existen dos tipos de PPG, sensores por transmisión y sensores por reflexión.

#### **Sensores por transmisión**

El emisor y el receptor tiene que ubicarse opuestos, con el tejido u órgano sobre el que se quiere medir.



**Fig. 2 PPG por transmisión**

### Sensores por reflexión

El receptor se coloca junto al emisor, de manera que capte la luz que se refleja en los tejidos. Dadas las limitaciones del método de transmisión, es el más usual puesto que pueden ser colocados sobre cualquier superficie vascular pulsátil.

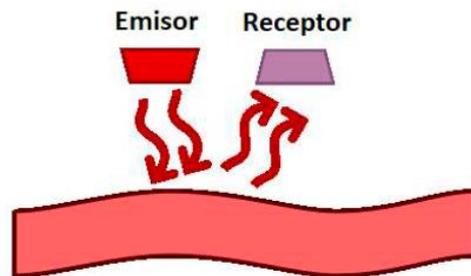


Fig. 3 PPG por reflexión

La onda PPG, tiene una componente continua (DC) se produce debido a la absorción aproximadamente constante del sistema venoso periférico, capilares, tejidos y huesos, que absorben la mayor parte de la luz, esta debe ser despreciada, porque no aporta información útil para calcular el pulso, así que se puede filtrar utilizando un pasa alta. La otra componente alterna (AC), es causada por la variación del flujo sanguíneo (componentes pulsátiles) y representa alrededor de un 5% de la absorción total.

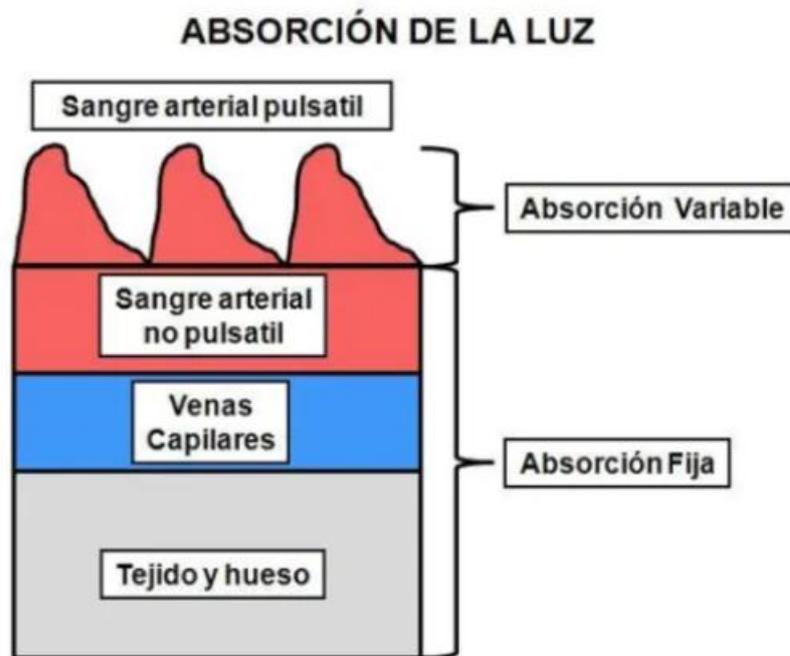


Fig. 4 Absorción Variable (AC) y Absorción Fija (DC) de la señal PPG

## FRECUENCIA CARDIACA

La medida del pulso es exactamente igual a la de la frecuencia cardíaca, porque son las contracciones del corazón las que lo producen. Así pues, al tomar el pulso de una persona se mide directamente su frecuencia cardíaca. La frecuencia cardíaca se expresa en latidos por minuto, mientras que se usa el término pulsaciones por minuto en arterias periféricas. valores normales para un adulto los situados entre 60-100 pulsaciones por minuto

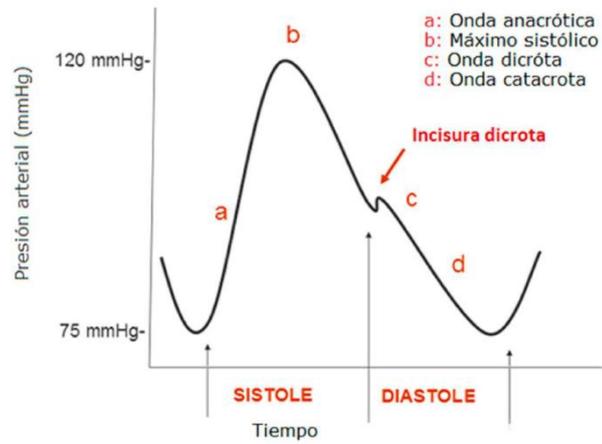
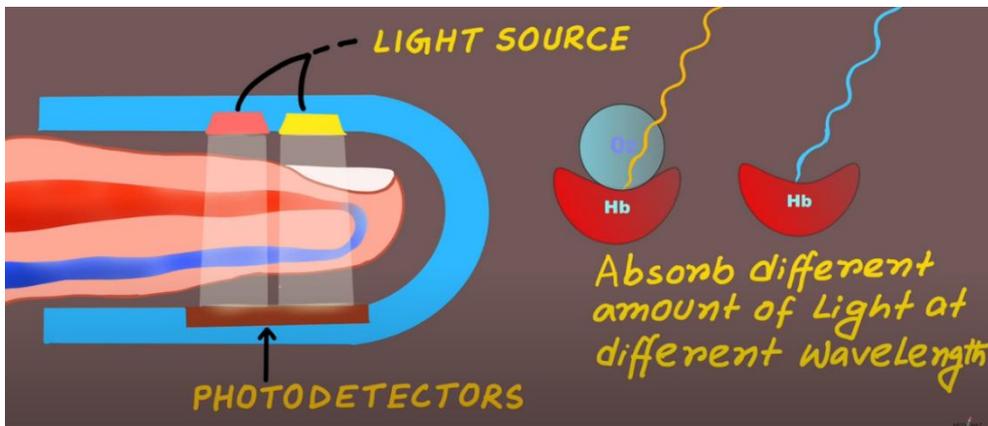


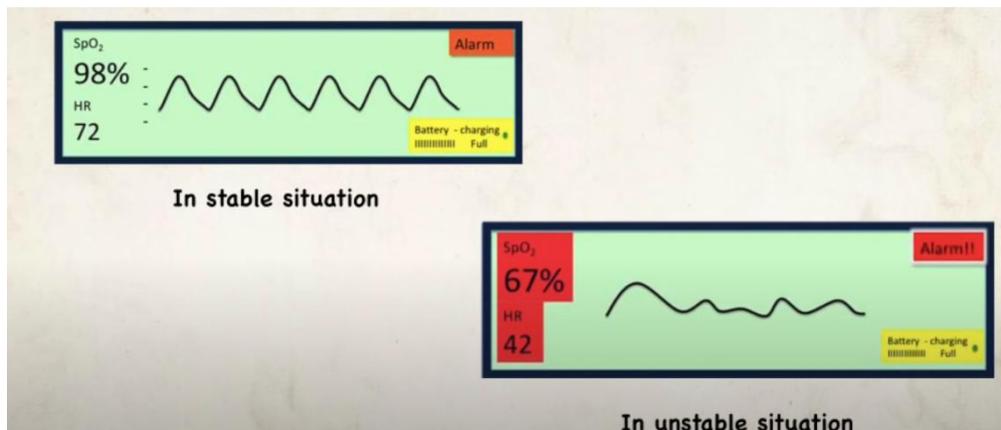
Fig. 5 Representación teórica del pulso. Variación de presión arterial en el tiempo

## AYUDAS

<https://www.youtube.com/watch?v=N3MCvREORVA>



<https://www.youtube.com/watch?v=HXmovMb4ELs&t=170s>



## CUESTIONARIO

1. RESPONDA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS
  - a. ¿Qué es la fotopletismografía?
  - b. ¿Qué es la presión sanguínea?
  - d. Indique los fundamentos matemáticos acerca de la obtención de la señal de presión sanguínea
  - e. Consultar que señales se obtiene aplicando la PPG (Fotopletismografía)

PREPARATORIO

# Práctica PPG: FILTROS APLICADOS A LAS SEÑALES BIOMÉDICAS

## OBJETIVOS

### Objetivo general:

- Explicar el funcionamiento e importancia de los filtros en la adquisición de señales.

### Objetivos específicos:

- Identificar los tipos de filtros pasivos y activos.
- Explicar los filtros utilizados en la Placa PPG EduKit
- Definir filtros digitales

## MARCO TEÓRICO

Los filtros son circuitos eléctricos que dejan pasar o bloquean frecuencias específicas en una señal de entrada. El objetivo del filtro es cambiar la respuesta de frecuencia de una señal, permitiendo que solo pasen ciertas frecuencias mientras atenúa o rechaza otras. Los filtros se utilizan con frecuencia en una variedad de aplicaciones, como audio, comunicaciones, fuentes de alimentación y equipos médicos.

Los filtros se dividen en dos tipos: filtros pasivos y filtros activos. Los filtros pasivos están compuestos enteramente de componentes pasivos como resistencias, condensadores e inductores. Los filtros activos, por otro lado, utilizan componentes activos como amplificadores operacionales además de resistencias y capacitores, pero no inductores.

## TIPOS DE FILTROS

- FILTROS PASIVOS
  - Filtro de paso bajo
  - Filtro de paso alto
  - Filtro de paso de banda
  - Filtro de paso rechazo de banda
- FILTROS ACTIVOS
  - Filtro de primer orden
  - Filtro de segundo orden
  - Filtro de orden superior
- APLICACIONES

## FILTROS PASIVOS

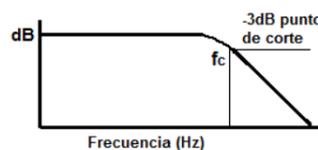
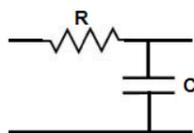
### FILTRO PASABAJO

Solo permite el paso de frecuencias bajas y atenúa las frecuencias altas. Está compuesto por dos elementos, una resistencia y un condensador.

#### Calculadora de Filtro Paso Bajo



#### Filtro RC Paso Bajo



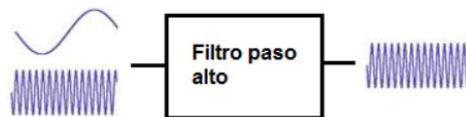
$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Fig. 6 Filtro pasa bajo

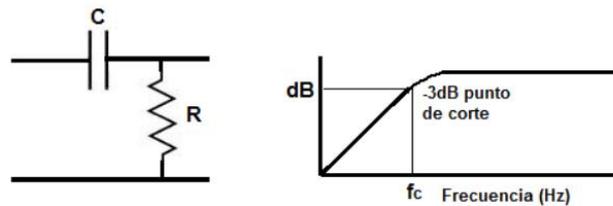
## FILTRO PASA ALTO

Permite el paso de las frecuencias altas, y atenúa todas las bajas frecuencias a partir de una frecuencia de corte  $f_c$ .

### Calculadora de Filtro Paso Alto



### Filtro RC Paso Alto

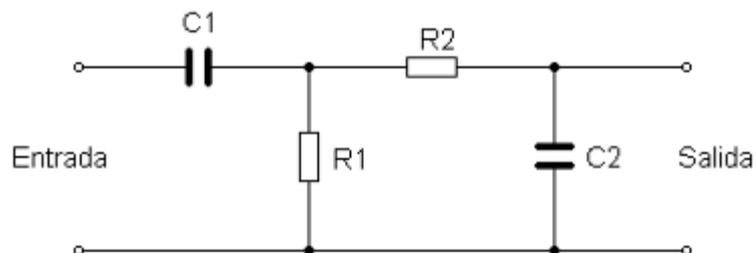


$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

*Fig. 7 Filtro paso alto*

## FILTRO PASABANDA

Un filtro pasa banda como su nombre lo dice permite el paso de una banda de frecuencias y atenúa todas las demás.



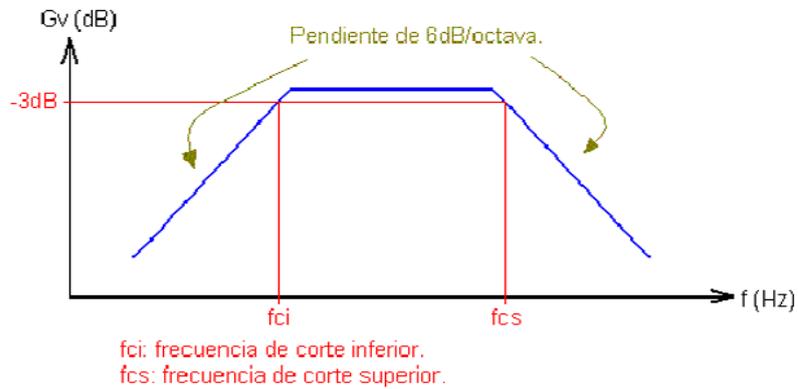
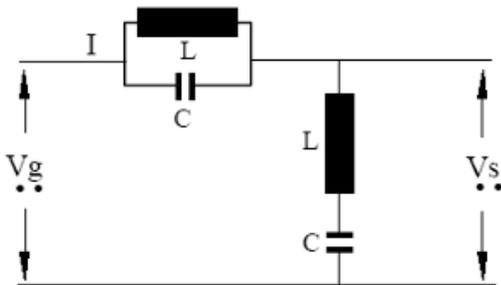


Fig. 8 Filtro pasa banda

### FILTRO RECHAZA BANDA

También denominado "filtro elimina banda" o "filtro notch" atenúa una banda de frecuencias determinada, y permite el paso de todas las demás.

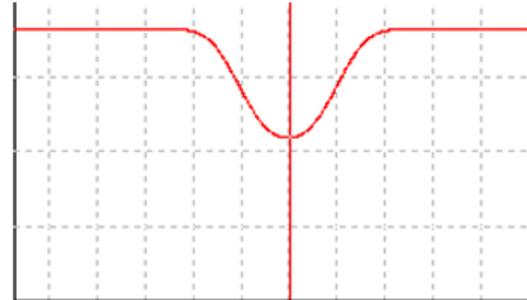
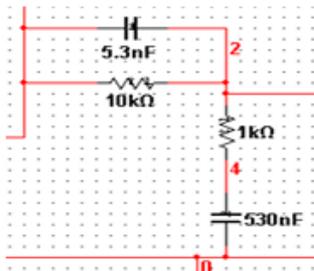


Las frecuencias de corte las determinan las Frecuencias de resonancia de las dos asociaciones LC:

$$F_{cs} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$$

$$F_{ci} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$$

Máxima atenuación  $G_{vm} = R_2/R_1$ .  
 Frecuencia de corte superior  $= 1/(20 \cdot \pi \cdot C_1 R_1)$   
 Frecuencia de corte inferior  $= 1/(20 \cdot \pi \cdot C_2 R_2)$



En el ejemplo:  $f_{cs} = 1/(2 \cdot \pi \cdot 5,3n \cdot 10k) = 3KHz$   
 $f_{ci} = 1/(2 \cdot \pi \cdot 530n \cdot 1k) = 300Hz$   
 $G_{vm} = 20 \log(R_2/R_1) = 20 \log(1k/10k) = -20dB$

*Fig. 9 Filtro Rechaza banda*

## FILTROS ACTIVOS

Los filtros activos se emplean a menudo para mejorar la selectividad y la flexibilidad en sistemas de audio, médicos y de comunicación. El orden de la respuesta del filtro, que está controlado por la cantidad de componentes reactivos en el circuito del filtro, clasifica aún más los filtros activos.

### FILTRO DE PRIMER ORDEN

Un filtro activo de primer orden es un circuito eléctrico que filtra una señal utilizando un componente activo, como un amplificador operacional (op-amp), así como un componente reactivo y una resistencia. Los filtros activos, a diferencia de los filtros pasivos, utilizan un amplificador operacional para proporcionar ganancia y dar forma a la respuesta del filtro.

La idea principal detrás de un filtro activo de primer orden es que controla la respuesta de la señal con un amplificador operacional en una configuración de retroalimentación. El amplificador operacional amplifica la señal de entrada, que luego es filtrada en el bucle de retroalimentación por el componente reactivo y la resistencia. El bucle de

retroalimentación del amplificador operacional permite ajustar la frecuencia de corte y la ganancia del filtro.

Los filtros activos de primer orden se clasifican en dos tipos: filtros de paso bajo y filtros de paso alto. En un filtro de paso bajo, las señales con frecuencias superiores a la frecuencia de corte se atenúan, mientras que las señales con frecuencias inferiores a la frecuencia de corte pueden pasar.

En un filtro de paso alto, las señales con frecuencias inferiores a la frecuencia de corte se atenúan, mientras que las señales con frecuencias superiores a la frecuencia de corte pueden pasar.

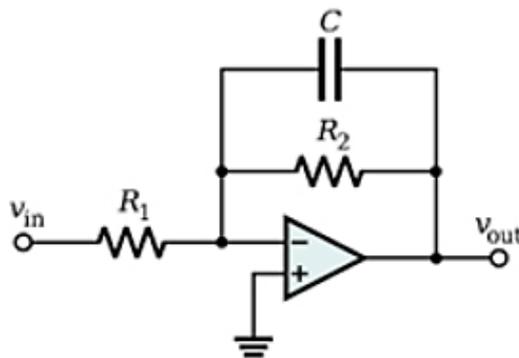
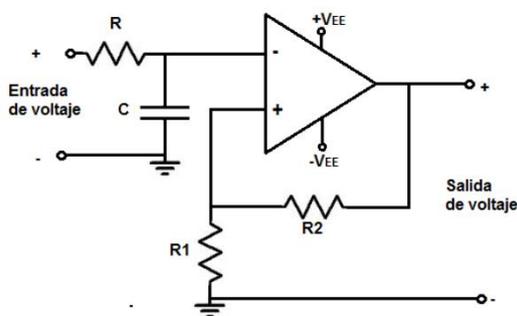


Fig. 10 Filtro Activo Paso Bajo

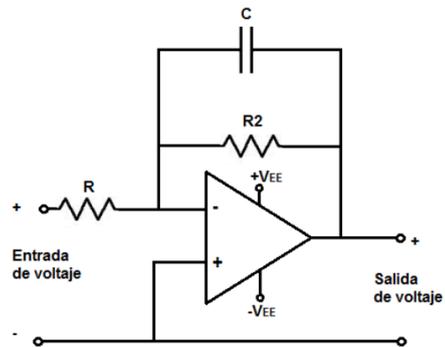
Filtro Activo Paso Bajo con un Amplificador No Inversor



$$\text{Frecuencia de corte} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{Ganancia} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Filtro Activo Paso Bajo con Un Amplificador Operacional Inversor



$$\text{Frecuencia de corte} = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

$$\text{Ganancia} = -\frac{R_2}{R}$$

Fig. 11 Configuraciones Filtro Activo Paso Bajo

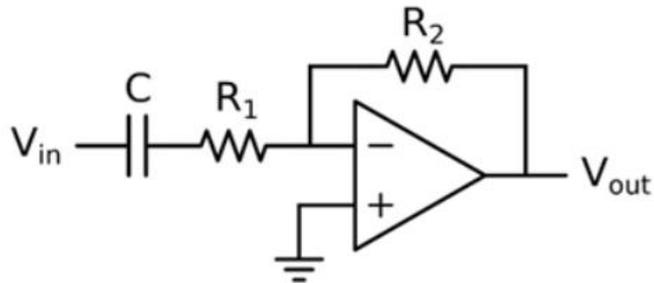
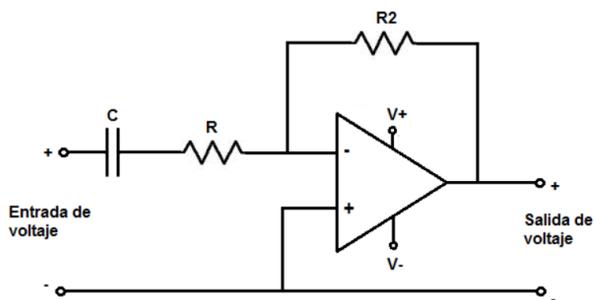


Fig. 12 Filtro Activo Paso Alto

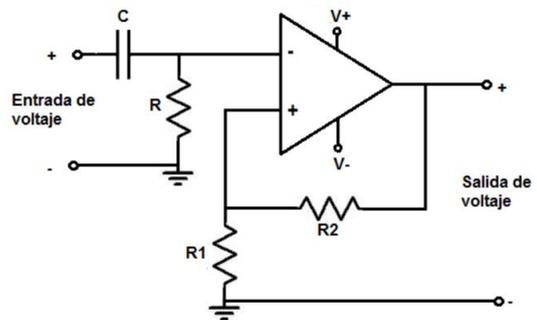
Filtro Activo Paso Alto con Un Amplificador Operacional Inversor



$$\text{Frecuencia de corte} = \frac{1}{2\pi R_2 C}$$

$$\text{Ganancia} = -\frac{R_2}{R}$$

Filtro Activo Paso Alto Con Amplificador No Inversor



$$\text{Frecuencia de corte} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{Ganancia} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Fig. 13 Configuraciones Filtro Activo Paso Alto

## FILTRO DE SEGUNDO ORDEN

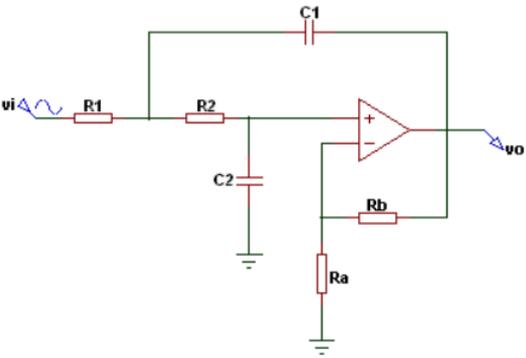
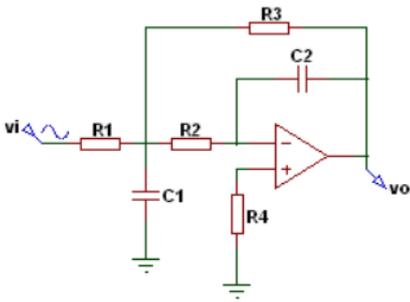
Un filtro activo de segundo orden es un tipo de filtro electrónico que filtra una señal combinando dos componentes reactivos, como condensadores o inductores, con una resistencia y un componente activo, como un amplificador operacional (op-amp). Los filtros de segundo orden tienen una tasa de caída más pronunciada que los filtros de primer orden, lo que les permite atenuar frecuencias no deseadas de manera más eficiente.

Los filtros activos de segundo orden se clasifican en tres tipos: filtros de paso bajo, filtros de paso alto y filtros de paso de banda.

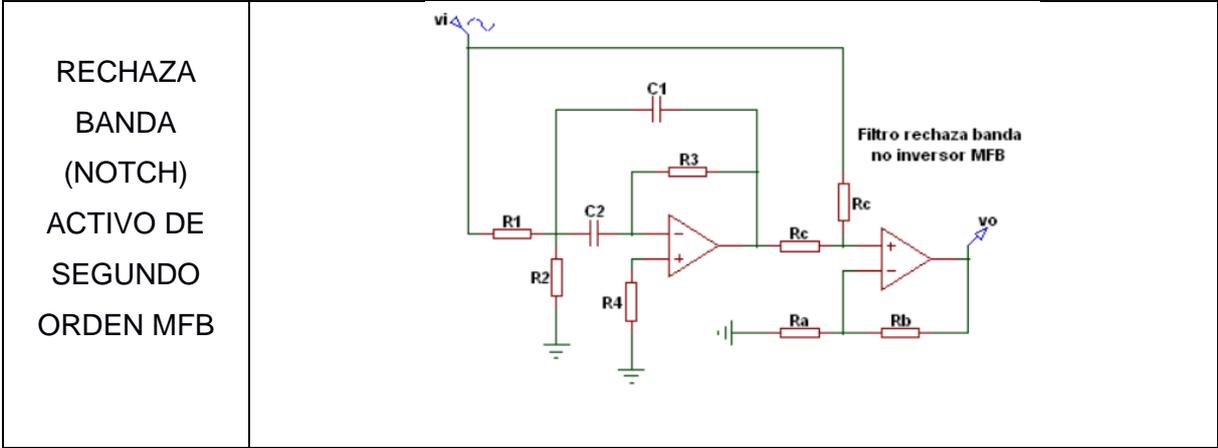
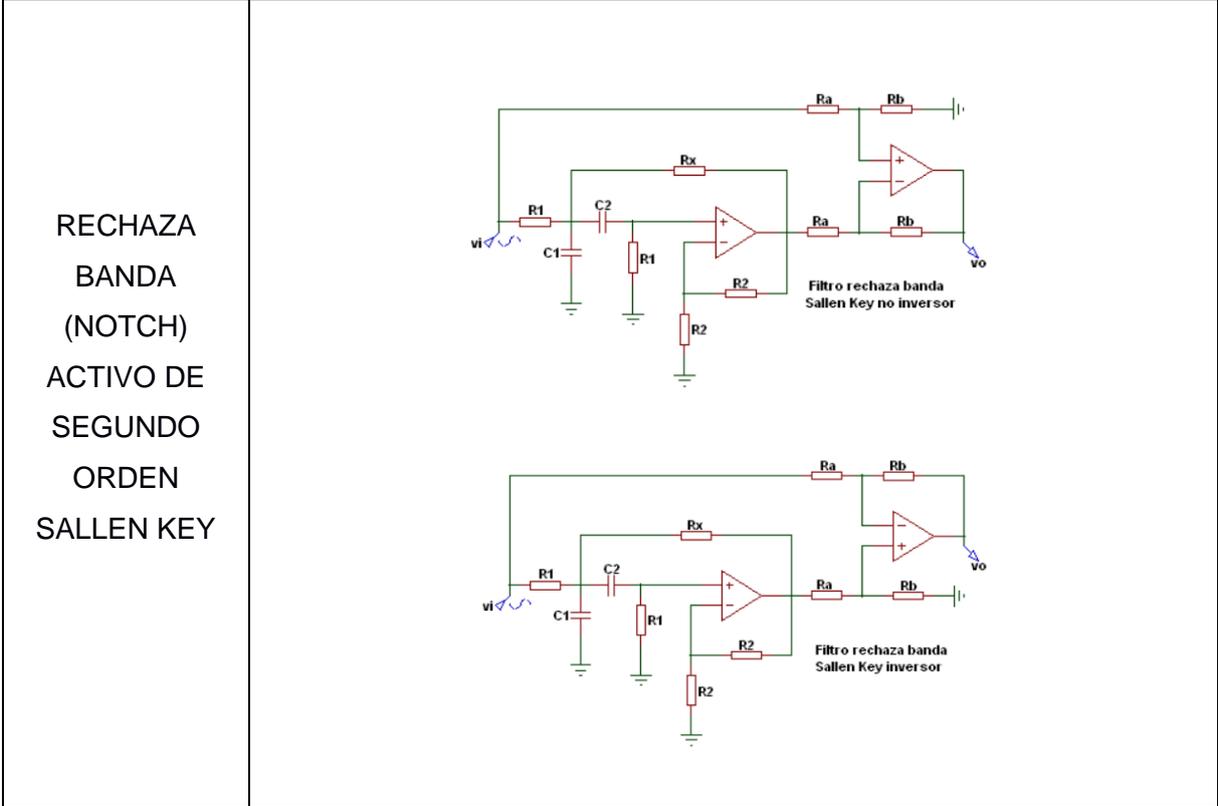
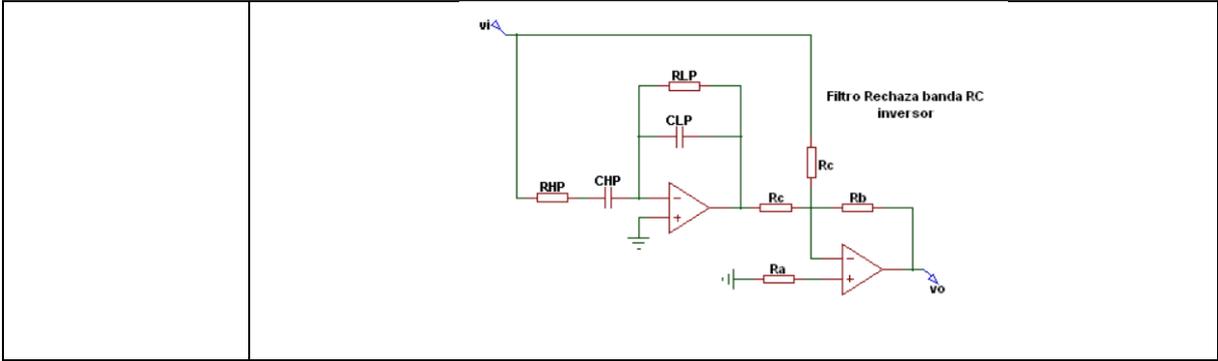
El componente reactivo, los valores de la resistencia y la ganancia del amplificador operacional determinan la frecuencia de corte de un filtro activo de segundo orden. La ganancia del amplificador operacional determina la ganancia del filtro, y el bucle de retroalimentación permite ajustar la frecuencia de corte del filtro y el factor Q.

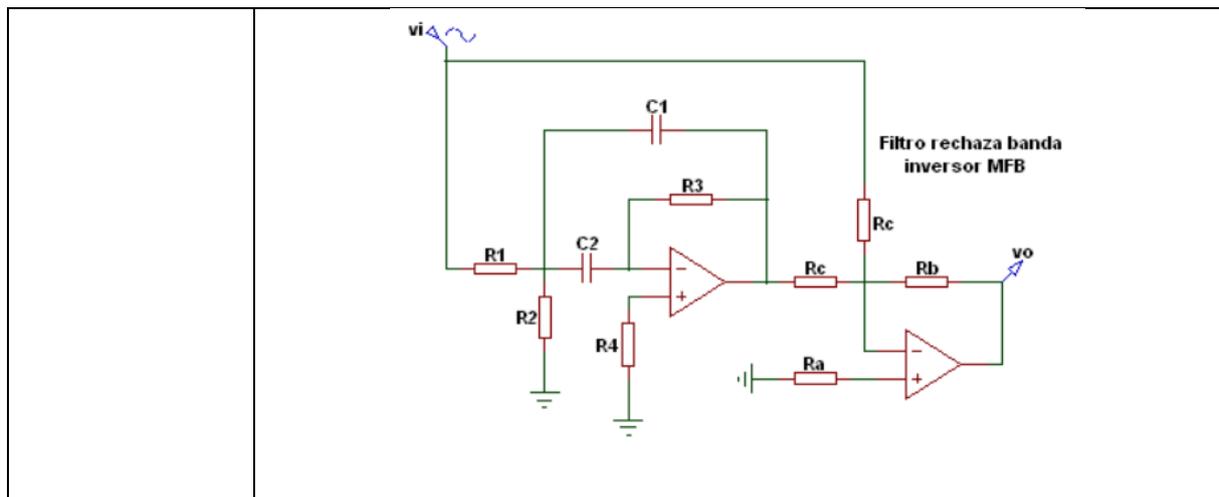
La resonancia o nitidez de un filtro de segundo orden se mide por su factor Q. El factor Q controla qué tan abruptamente cae la respuesta del filtro en la frecuencia de corte y qué tan estrecha o ancha es la banda de paso del filtro. Los valores Q más altos sugieren una banda de paso más estrecha y una resonancia más nítida, mientras que los factores Q más bajos indican una resonancia más baja y una banda de paso más amplia.

**TABLA DE FILTROS DE SEGUNDO ORDEN Y SUS RESPECTIVAS CONFIGURACIONES**

<u>FILTRO</u>	<u>REPRESENTACIÓN</u>
PASA BAJOS ACTIVO DE SEGUNDO ORDEN SALLEN KEY	
PASA BAJOS ACTIVO DE SEGUNDO ORDEN MFB(MULTIPLE FEEDBACK)	

<p>PASA ALTOS ACTIVO DE SEGUNDO ORDEN SALLEN KEY</p>	
<p>PASA BANDA ACTIVO DE SEGUNDO ORDEN SALLEN KEY</p>	
<p>PASA BANDA ACTIVO DE SEGUNDO ORDEN MFB</p>	
<p>RECHAZA BANDA (NOTCH) ACTIVO DE SEGUNDO ORDEN RC</p>	





## FILTRO DE ORDEN SUPERIOR

Los filtros activos de orden superior son circuitos electrónicos que filtran una señal utilizando varios componentes reactivos, resistencias y componentes activos como amplificadores operacionales. Estos filtros tienen un factor Q mayor y una tasa de caída más rápida que los filtros de segundo orden, lo que los hace ideales para aplicaciones que requieren un filtrado de frecuencia preciso.

Los filtros Butterworth y los filtros Chebyshev son dos formas de filtros activos de orden superior. Los filtros Butterworth tienen una respuesta de frecuencia de banda de paso que es máximamente plana, lo que significa que la respuesta es lo más plana posible mientras cumple con la frecuencia de corte prevista. Los filtros Chebyshev tienen una tasa de caída más pronunciada que los filtros Butterworth pero, dependiendo del tipo de filtro, tienen ondulación en la banda de paso o en la banda de supresión.

Los filtros Butterworth generalmente se construyen utilizando una frecuencia normalizada, donde la frecuencia de corte se define como la frecuencia en la que la respuesta del filtro cae al 70,7% de su valor máximo. El número de componentes reactivos en el circuito está representado por el orden del filtro. Un filtro Butterworth de tercer orden, por ejemplo, tiene tres componentes reactivos, como condensadores o inductores.

El tipo I y el tipo II son los dos subtipos de filtros Chebyshev. La ondulación de la banda de paso y la caída monótona son características de los filtros tipo I. Los filtros tipo II

tienen una caída monótona en la banda de paso y una ondulación en la banda de supresión. El factor de ondulación del filtro, que se basa en el orden del filtro y el nivel de ondulación deseado, regula la cantidad de ondulación en la banda de paso o banda de supresión.

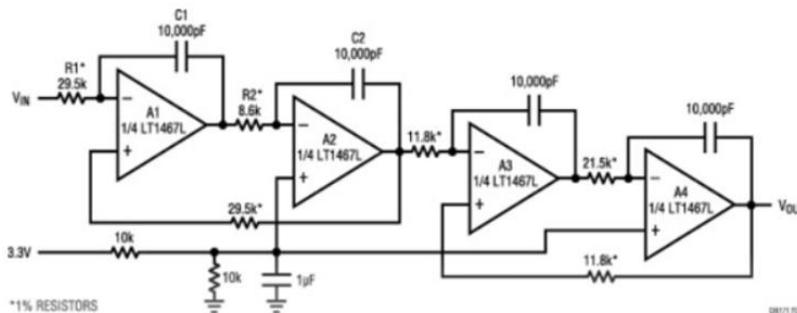


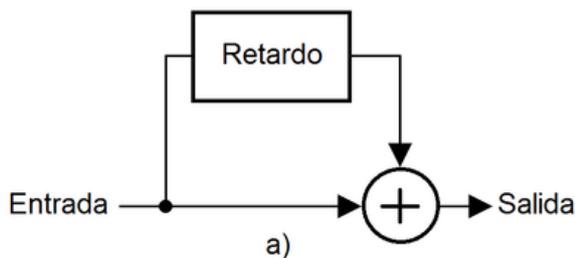
Fig. 14 Filtro Butterworth de cuarto orden

APROXIMACIÓN	Factor de calidad Q	Constante K
Butterworth	0.7071	1.000
Chebyshev (cresta de 0.01db)	0.7247	1.0231
Chebyshev (cresta de 0.1db)	0.7673	1.0674
Chebyshev (cresta de 0.25db)	0.8093	1.0991
Chebyshev (cresta de 0.5db)	0.8639	1.1286
Chebyshev (cresta de 1db)	0.9564	1.1596
Bessel	0.5771	0.7840

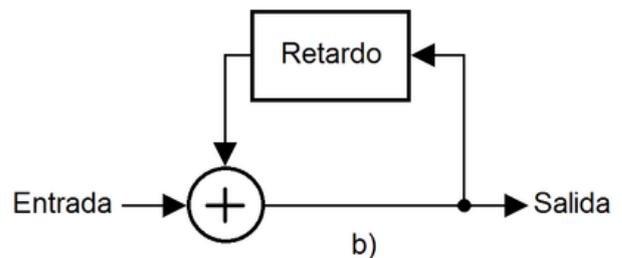
## FILTROS DIGITALES

Los filtros digitales se construyen con dos bloques elementales: los retrasos y las ganancias.

- **FIR (Finite Impulse Response).** – consiste en conectar la entrada del filtro a una serie de retardos. El primero con sólo una muestra de retraso, el segundo con dos, el tercero con tres y así sucesivamente. n seguida se amplifica o atenúa cada retraso con un factor de ganancia específico y finalmente se suman las salidas. Al organizar estas ganancias una detrás de otra obtenemos la respuesta impulso del filtro.
- **IIR (Infinite Impulse Response).** - Un filtro IIR, además de utilizar retrasos para los valores a la entrada del filtro, toma también los valores de la salida, les aplica una nueva cadena de retrasos y retroalimenta esta señal a la entrada del filtro.



a) Filtro digital tipo FIR

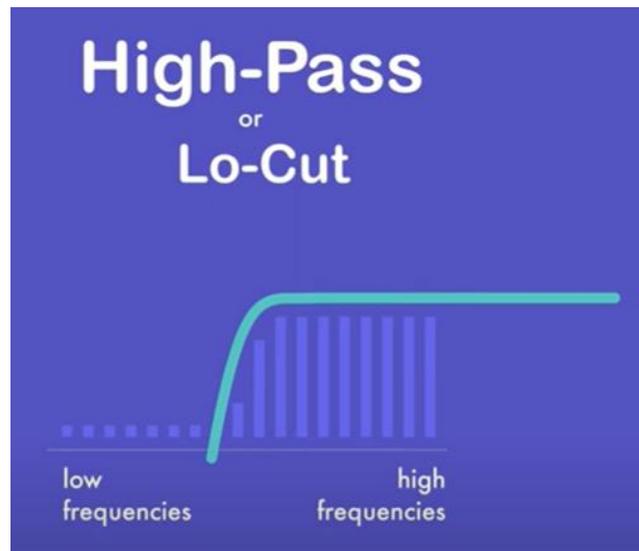


b) Filtro digital tipo IIR

## AYUDAS

Explicación de filtros pasivos

<https://www.youtube.com/watch?v=RAhcsDwp7iA>

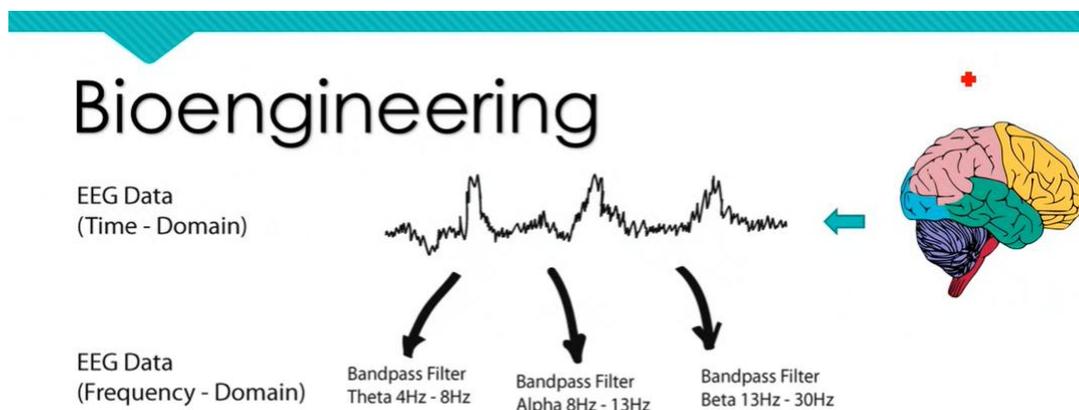


### Explicación de filtros activos

[https://www.youtube.com/watch?v=5zYG36Y\\_AiU](https://www.youtube.com/watch?v=5zYG36Y_AiU)

<https://www.youtube.com/watch?v=-OpCMBLqhyM>

<https://www.youtube.com/watch?v=wL3NiY7Ac-I&t=63s>



### Explicación de filtros digitales

<https://www.juansaudio.com/post/iir-vs-fir-entendiendo-realmente-sus-diferencias>

### WILAEBA Electrónica

<https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2017/03/indice-de-contenido.html>

## **CUESTIONARIO**

### **2. RESPONDA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS**

- b. ¿Para qué sirve un filtro en un circuito de adquisición de datos?
- c. ¿Los filtros pasivos poseen un amplificador operacional en su circuito?
- f. ¿Cuál es la principal diferencia entre un filtro pasivo y activo?
- g. ¿Para qué sirven los filtros Chebyshev y Butterworth?

## **ANEXOS**

Fuentes bibliográficas (correctamente citadas usando estilo APA, si se ha usado para el análisis de resultados)

Capturas de documentos adicionales y opcionales (imágenes, diagramas, otras capturas, catálogos, etc.)

**Maestría en Ingeniería Biomédica**

**PREPARATORIO**

# **Práctica PPG: INTELIGENCIA ARTIFICIAL CON FOTOPLETISMOGRAFÍA**

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general:**

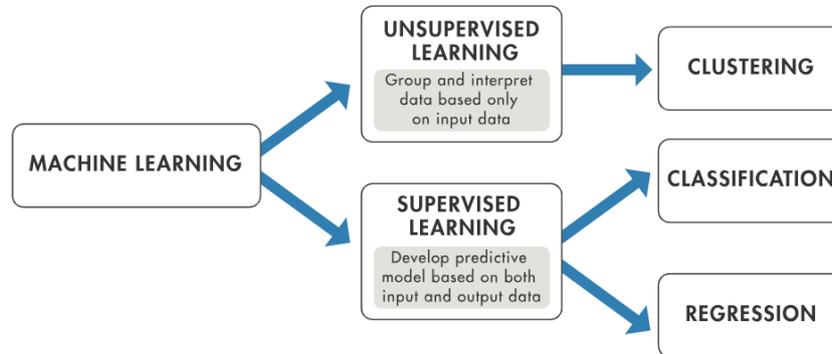
- Aplicar la inteligencia artificial con los datos de fotopleletismografía de la placa PPG EduKit, para detectar resultados anómalos.

### **Objetivos específicos:**

- Preprocesar datos adquiridos con la placa PPG EduKit.
- Analizar los datos de PPG.
- Implementar algoritmos de inteligencia artificial para el análisis de datos.

## **MARCO TEÓRICO**

Machine Learning emplea dos tipos de técnicas: aprendizaje supervisado que entrena un modelo con datos de entrada y salida conocidos para predecir salidas futuras, y aprendizaje no supervisado, que identifica patrones ocultos o estructuras intrínsecas en los datos de entrada.



*Fig. 15 Machine Learning*

## **APRENDIZAJE SUPERVISADO**

Un algoritmo de aprendizaje supervisado toma un conjunto conocido de datos de entrada y respuestas conocidas sobre esos datos (salidas), y entrena un modelo para generar predicciones razonables como respuesta a datos nuevos. Se recomienda utilizar el aprendizaje supervisado si dispone de datos conocidos para la salida que desea predecir.

El aprendizaje supervisado emplea técnicas de clasificación y regresión para desarrollar modelos de Machine Learning.

**Técnicas de clasificación:** Estas técnicas predicen respuestas discretas; por ejemplo, si un email es genuino o spam, o si un tumor es maligno o benigno.

**Técnicas de regresión:** Estas técnicas predicen respuestas continuas; por ejemplo, cantidades físicas difíciles de medir, tales como estado de carga de una batería, carga eléctrica de la red o precios de activos financieros. Entre sus aplicaciones típicas se incluyen sensorización virtual, predicción de carga eléctrica y trading algorítmico.

## **APRENDIZAJE NO SUPERVISADO**

El aprendizaje no supervisado identifica patrones ocultos o estructuras intrínsecas en los datos. Se emplea para sacar conclusiones sobre conjuntos de datos de entrada sin respuestas etiquetadas.

La agrupación de clústeres es la técnica de aprendizaje no supervisado más común. Se emplea para análisis de datos exploratorio, a fin de identificar patrones o grupos ocultos en los datos. Entre sus aplicaciones típicas se incluyen análisis de secuencias genéticas, estudios de mercado y reconocimiento de objetos.

Por ejemplo, si una empresa de telefonía móvil desea optimizar la ubicación de torres de telefonía, puede recurrir a Machine Learning para estimar el número de grupos de personas que utilizan las torres. Un teléfono solo puede comunicarse con una torre a la vez, de modo que se emplean algoritmos de agrupación en clusters para diseñar la mejor ubicación de las torres y optimizar la recepción de la señal para grupos - clusters - de clientes.

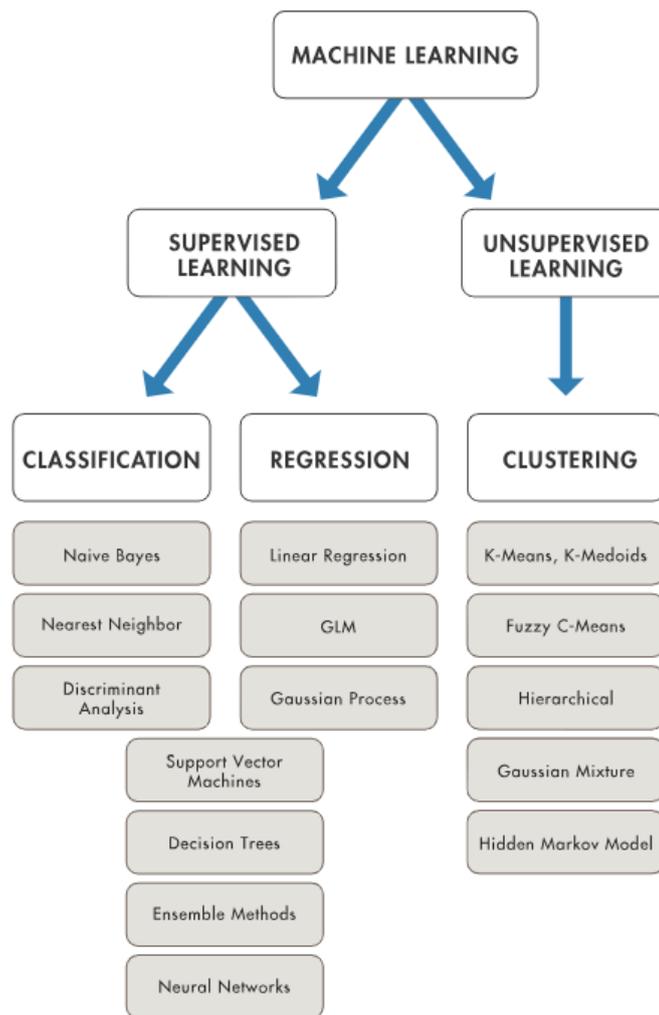


*Fig. 16 Aprendizaje no Supervisado*

## **CÓMO ELEGIR EL ALGORITMO DE MACHINE LEARNING ADECUADO**

No existe un método universal que se aplique a todas las situaciones. Encontrar el algoritmo adecuado es una cuestión de prueba y error; ni los analistas de datos más experimentados pueden saber si un determinado algoritmo funcionará sin probarlo antes.

Pero seleccionar el algoritmo también depende del tamaño y tipo de datos con que se trabaje, la información que se desee obtener de los datos y cómo se vaya a emplear la información.



*Fig. 17 Tipos de Machine Learning*

Utilice estas pautas para elegir entre Machine Learning supervisado y no supervisado:

- Seleccione el aprendizaje supervisado si necesita entrenar un modelo para realizar una predicción. Por ejemplo, el valor futuro de una variable continua, tal como los grados de temperatura o la cotización de acciones, o bien una clasificación, tal como identificar marcas de automóviles en un vídeo de webcam.
- Seleccione el aprendizaje no supervisado si necesita explorar datos y desea entrenar un modelo para obtener una representación interna; por ejemplo, dividir datos en clusters.

## **TIPOS DE MODELOS DE DEEP LEARNING**

Los algoritmos de deep learning son increíblemente complejos y hay diferentes tipos de redes neuronales para abordar problemas o conjuntos de datos específicos.

Un posible punto débil de todos ellos es que los modelos de deep learning suelen ser "cajas negras", lo que dificulta la comprensión de su funcionamiento interno y plantea problemas de interpretabilidad. Pero esto se puede equilibrar con los beneficios generales de la alta precisión y escalabilidad.

### **CNN**

Las redes neuronales convolucionales (CNN) Pueden detectar características y patrones dentro de imágenes y videos, lo que permite tareas como la detección de objetos, el reconocimiento de imágenes, el reconocimiento de patrones y el reconocimiento facial. Estas redes aprovechan principios del álgebra lineal, en particular la multiplicación de matrices, para identificar patrones dentro de una imagen.

Las CNN son un tipo específico de red neuronal, que se compone de capas de nodos, que contienen una capa de entrada, una o más capas ocultas y una capa de salida. Cada nodo está conectado a otro y tiene un peso y un umbral asociados. Si la salida de cualquier nodo individual está por encima del valor umbral especificado, ese nodo se activa y envía datos a la siguiente capa de la red. De lo contrario, no se pasa ningún dato a la siguiente capa de la red.

Hay al menos tres tipos principales de capas que componen una CNN: una capa convolucional, una capa de agrupación y una capa totalmente conectada (FC). Para usos complejos, una CNN puede contener hasta miles de capas, cada una de las cuales se basa en las capas anteriores. Mediante la "convolución" (trabajar y reelaborar la entrada original) se pueden descubrir patrones detallados. Con cada capa, la CNN aumenta su complejidad, identificando mayores porciones.

Sin embargo, las CNN ofrecen ahora un enfoque más escalable para las tareas de clasificación y reconocimiento, procesan datos de alta dimensión. Y las CNN pueden

intercambiar datos entre capas, para ofrecer un procesamiento de datos más eficiente. Si bien la información puede perderse en la capa de agrupación, esto podría verse compensado por los beneficios de las CNN, que pueden ayudar a reducir la complejidad, mejorar la eficiencia y limitar el riesgo de sobreajuste.

Las CNN tienen otras desventajas, que son muy exigentes desde el punto de vista computacional, ya que cuestan tiempo y presupuesto, ya que requieren muchas unidades de procesamiento gráfico (GPU). También requieren expertos altamente cualificados con conocimientos de distintos ámbitos y pruebas minuciosas de configuraciones, hiperparámetros y configuraciones.

## AYUDAS

### Curso Machine Learning

<https://www.youtube.com/playlist?list=PLJjOveEiVE4Cbbx1dVjydfmPPpjI0pg86>



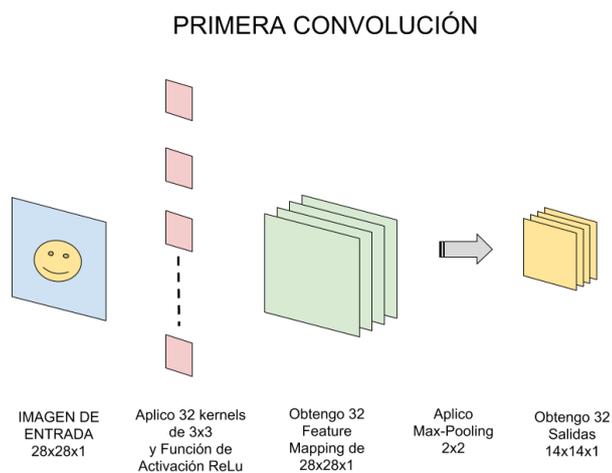
Pasos para realizar un preprocesamiento de datos

<https://es.linkedin.com/advice/0/what-steps-should-you-take-preprocess-your-data-machine-e6ane?lang=es>



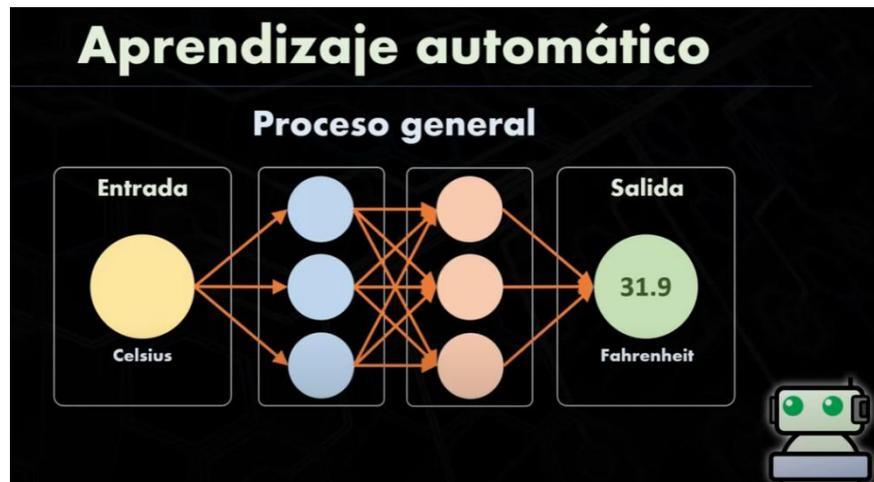
## Historia de las CNN

<https://www.aprendemachinelearning.com/como-funcionan-las-convolutional-neural-networks-vision-por-ordenador/>



## Deep Learning: Tu primera Neuron Artificial

[https://www.youtube.com/watch?v=iX\\_on3VxZzk&t=8s](https://www.youtube.com/watch?v=iX_on3VxZzk&t=8s)



## CUESTIONARIO

3. RESPONDA LAS SIGUIENTES PREGUNTAS
  - a. ¿Qué es la inteligencia artificial?
  - b. ¿Qué realiza la convolución en las redes neuronales artificiales?
  - c. ¿Por qué es importante normalizar los datos antes de entrenar un modelo de IA?
  - d. Defina que es overfitting y cómo se puede evitar en un modelo de IA

## ANEXOS

Fuentes bibliográficas (correctamente citadas usando estilo APA, si se ha usado para el análisis de resultados)

Capturas de documentos adicionales y opcionales (imágenes, diagramas, otras capturas, catálogos, etc.)

## **ANEXO B:**

### **GUÍAS DE LABORATORIO**

#### **LABORATORIO DE BIOMÉDICA**

##### **TÍTULO DE LA PRÁCTICA**

**día-mes-año, XX Término 20XX- 20XX**

**Nombres y apellidos**

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Guayaquil – Ecuador

[Correo espol](mailto:correo@espol.edu.ec)

#### **1. PRÁCTICA: PRINCIPIO BÁSICOS DE SEÑALES PPG**

##### **1.1. OBJETIVOS**

Estudiar las etapas de electrónica y adquirir datos de fotopleletismografía de la placa PPG EduKit

###### **1.1.1. ESPECIFICO**

- Examinar la placa del dispositivo PPG.
- Separar las etapas de acondicionamiento de señal.
- Detallar los filtros utilizados en la PPG.

##### **1.2. RESUMEN**

Escriba un resumen de la práctica indicando brevemente cuáles fueron los objetivos, el procedimiento o método usado, equipos, resultados relevantes y las principales conclusiones

##### **1.3. CAPTURAS DE PANTALLA**

Adjunte las capturas de los diferentes diagramas usados en la correspondiente práctica.

## 1.4. TABLAS Y GRÁFICOS

Adjunte las gráficas o *plots*, y tablas de datos y resultados requeridos.

## 1.5. INTRODUCCIÓN

Este laboratorio ayuda al usuario comprender los conceptos básicos de medición de SpO<sub>2</sub> y como implementar un algoritmo basado en el uso de transformada rápida de Fourier (FFT) para determinar SpO<sub>2</sub> a partir de la una señal PPG.

## 1.6. MARCO TEÓRICO

### FRECUENCIA CARDIACA

Por tanto, la medida del pulso es exactamente igual a la de la frecuencia cardíaca, porque son las contracciones del corazón las que lo producen. Así pues, al tomar el pulso de una persona se mide directamente su frecuencia cardíaca. La frecuencia cardíaca se expresa en latidos por minuto, mientras que se usa el término pulsaciones por minuto en arterias periféricas. valores normales para un adulto los situados entre 60-100 pulsaciones por minuto

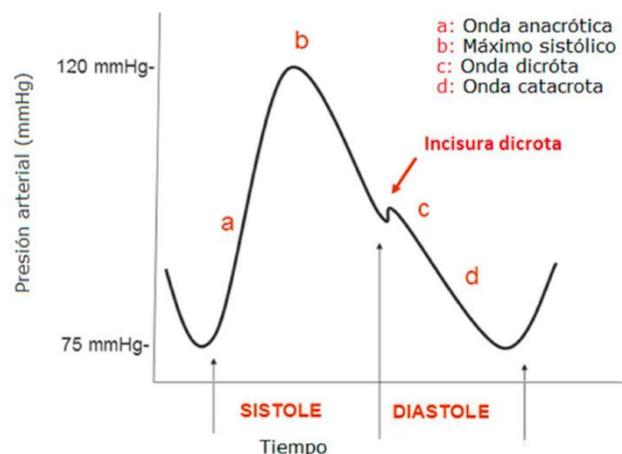


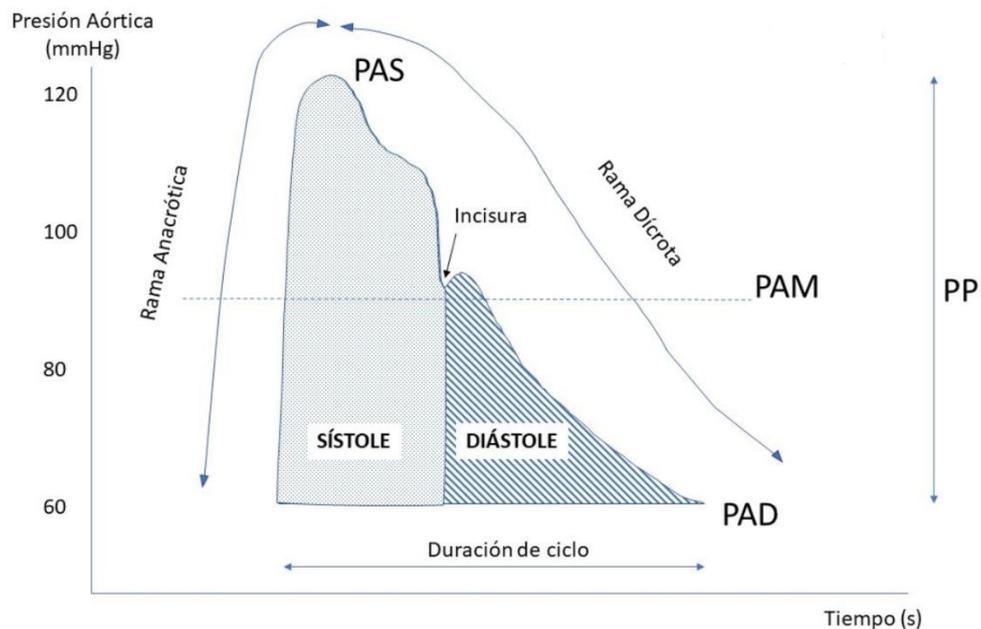
Fig. 18 Representación teórica del pulso. Variación de presión arterial en el tiempo

### FOTOPLETISMOGRAFIA

La fotopletismografía (PPG) es una técnica no invasiva para la detección de ondas cardiovasculares propagadas alrededor del cuerpo humano, recogiendo las variaciones

que se producen en el flujo o volumen sanguíneo que ocurre con cada contracción cardíaca. El procedimiento consiste en irradiar el tejido de una zona con luz, típicamente proveniente de un diodo emisor LED, y medir a continuación la intensidad de la señal a la salida (reflejada si el receptor es adyacente al emisor, transmitida si el receptor es opuesto al emisor) mediante un fotodetector selectivo para la frecuencia emitida, que amplificará y convertirá en diferencial de voltaje la luz recibida. Por tanto, lo que se registra es la variación del volumen de sangre en relación con la absorbancia de la luz en los vasos subcutáneos, que dependerá de la densidad de glóbulos rojos en su interior.

En cierto modo, la fotopleletismografía es una especie de interpretación de la coloración sanguínea, que dependerá de la saturación de oxígeno ( $SpO_2$ ). Este cambio de color de la sangre al oxigenarse o desoxigenarse es debido a las propiedades ópticas de la hemoglobina.



**Fig. 19 Representación esquemática de la onda de pulso con los distintos parámetros obtenidos a partir del análisis de la misma**

## 1.7. PROCEDIMIENTO

### ELECTRÓNICA PPG

PPG EduKit es una plataforma de evaluación que tiene como objetivo adquirir la señal PPG de los dedos con fines educativos y de investigación. PPG EduKit ofrece al usuario un control y una comprensión total de los diferentes pasos necesarios para adquirir, condicionar, visualizar y procesar las señales PPG sin procesar que luego se utilizan para extraer información fisiológica significativa. El enfoque modular de la plataforma facilita la compatibilidad con diferentes dispositivos integrados, como Arduino y la plataforma PSoC 4, para realizar las operaciones de procesamiento de señales digitales necesarias para las múltiples aplicaciones PPG. Los componentes de PPG EduKit se agrupan en dos bloques principales: el front-end analógico y el back-end digital

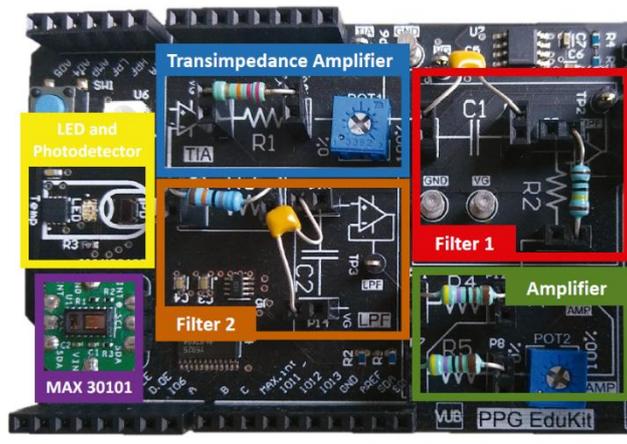


Fig. 20 PPG EduKit

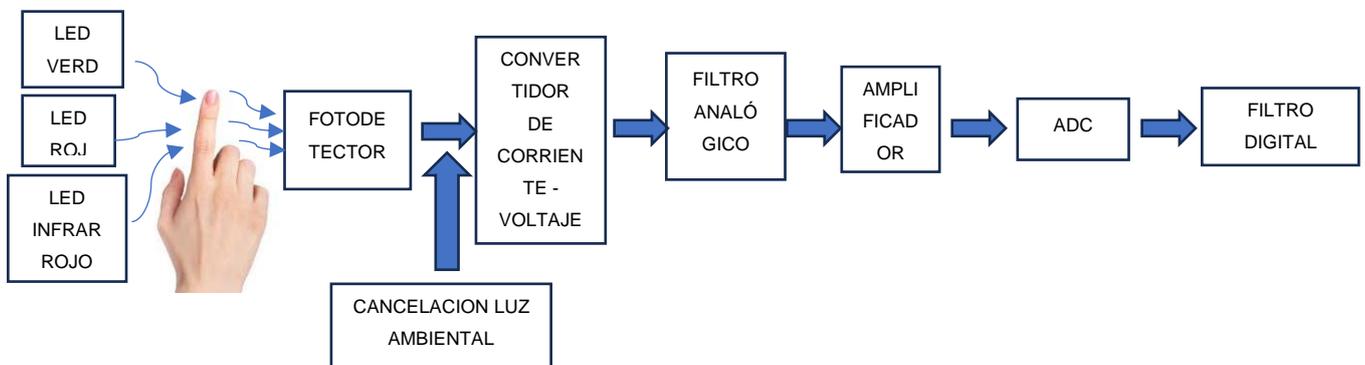
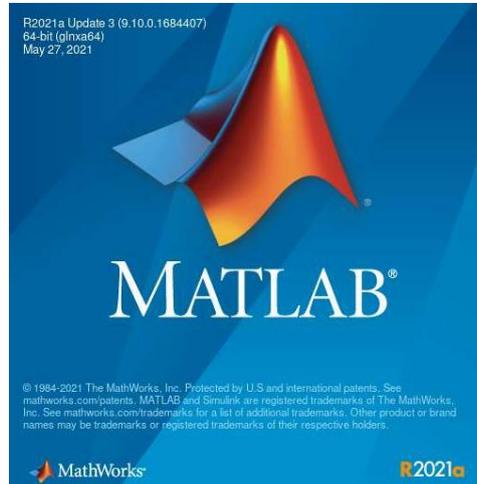


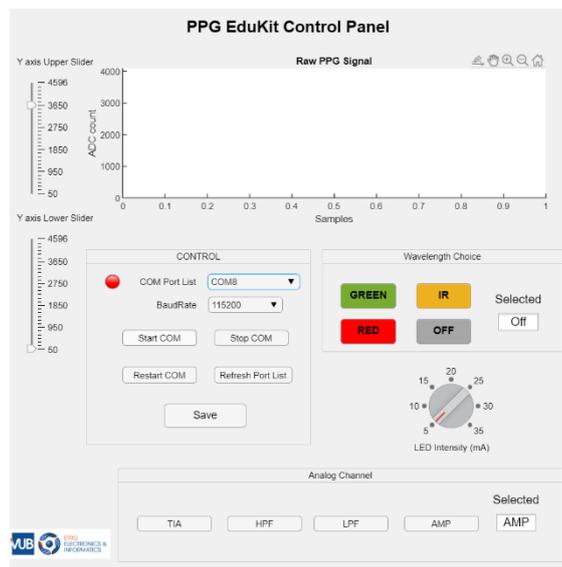
Fig. 21 Etapas del PPG EduKit

1. Abra el archivo `RUNTIME` de Matlab 2021<sup>a</sup>



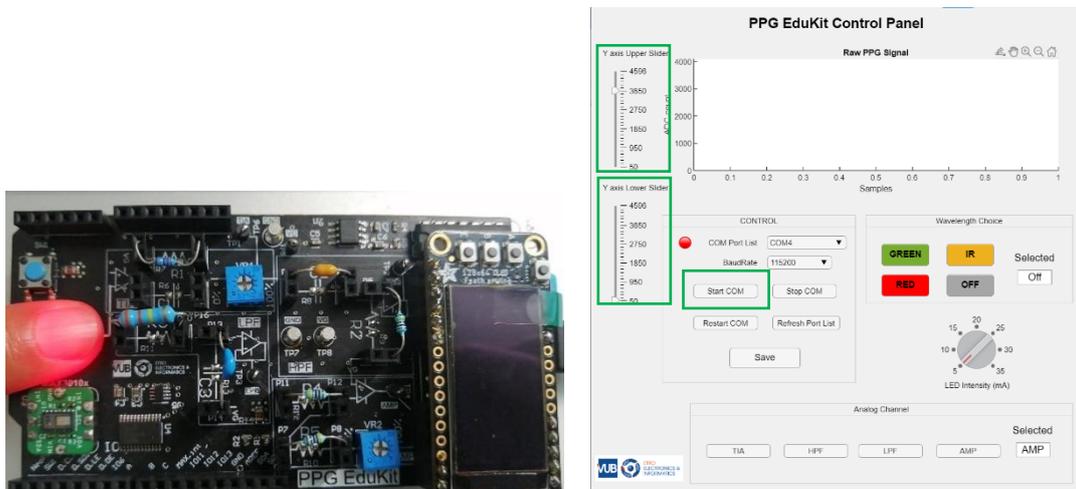
**Fig. 5 Matlab Run Time 2021a**

2. Abra el ejecutable `PPGEDUKIT_GUI`, se presentará la siguiente imagen. Conectar el PPG EduKit mediante cable microUSB a USB, seleccionar el respectivo COM de la placa



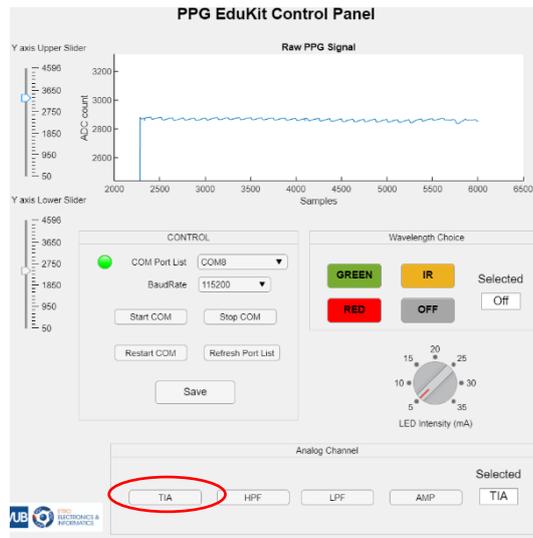
**Fig. 6 Pantalla principal del PPGEDUKIT\_GUI**

3. Presionar en `START COM`, colocar el dedo índice para obtener la señal y ajustar los ejes hasta obtener la gráfica de la señal PPG.



**Fig. 7 Placa PPG\_EduKit y Pantalla principal del Programa**

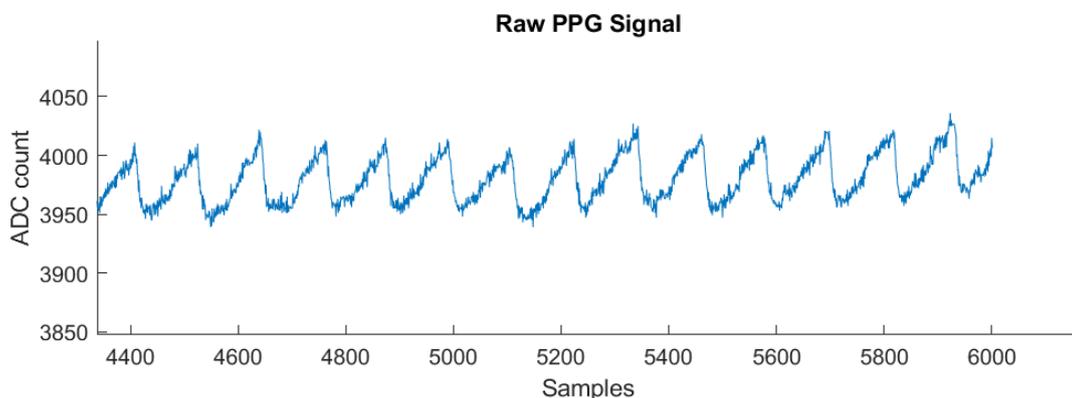
- Diodos emisores de luz (LED): las aplicaciones PPG utilizan principalmente verde (~550 nm), rojo (~660 nm) y/o longitudes de onda de luz IR (~940 nm). El rojo y el IR son las longitudes de onda clínicamente estándar utilizadas en los oxímetros de pulso para el cálculo de la saturación de oxígeno. mientras que la longitud de onda verde se utiliza a menudo en dispositivos portátiles.
  - Controlador LED: La actividad del LED normalmente está controlada por un controlador, que modula los pulsos y la corriente del LED, mientras que los anchos de pulso del LED generalmente están en el rango de unos pocos kHz, la corriente puede llegar hasta 50 mA
  - Fotodetector (PD): PD de amplio espectro que cubren las tres longitudes de onda mencionadas. Los anteriores se utilizan normalmente para mediciones PPG. La sensibilidad espectral puede ir desde 400 nm a más de 1000 nm. La fotocorriente generada puede alcanzar hasta 1  $\mu$ A.
4. Presionar el botón de TIA, que corresponde al amplificador de transimpedancia



**Fig. 8 Botón Trans Impedancia**

Al hacer un zoom de la gráfica se obtiene una imagen similar a la siguiente imagen.

TIA



**Fig. 9 Señal obtenida del PPG EduKit**

- Convertidor de corriente a voltaje: La PD debe ir seguida de una conversión de corriente a voltaje (IV) convertidor. El circuito más utilizado es un amplificador de transimpedancia, donde La corriente de entrada se convierte en un voltaje apropiado a través de una resistencia que también amplifica la señal. Se puede colocar un capacitor en paralelo a la resistencia para estabilizar el circuito y/o formar un filtro de paso bajo para la corriente de la señal de entrada.
- Filtrado analógico: muchas aplicaciones PPG utilizan módulos de filtrado analógico para filtrar componentes de ruido no deseados. Los filtros de paso de banda activos

de primer y segundo orden se utilizan a menudo para filtrar componentes de CC (con frecuencias de corte tan bajas como 0,15 Hz), así como señales de ruido de alta frecuencia (frecuencias de corte de 5 Hz a 60 Hz).

Al hacer un zoom de la gráfica se obtiene una imagen similar a la siguiente imagen.

HPF

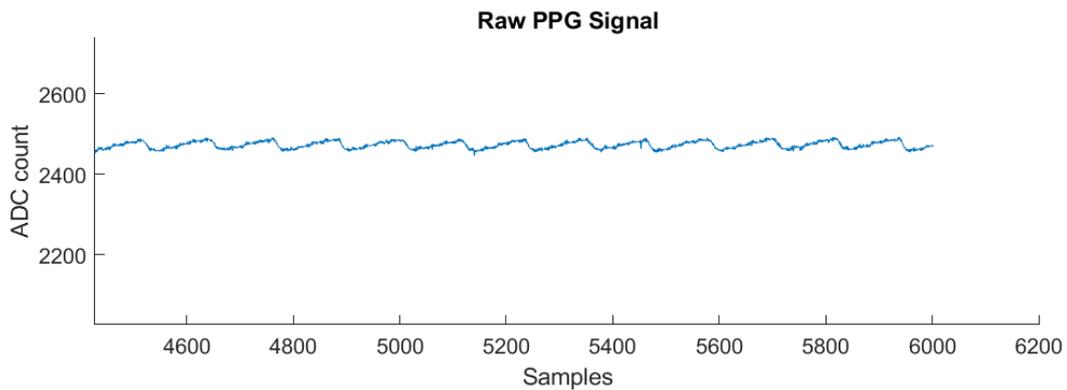


Fig. 10 Señal obtenida del PPG EduKit con modificación en la amplitud

## 5. Amplificador

- Amplificador inversor: comúnmente se coloca una etapa de amplificación adicional entre la etapa de filtrado analógico y antes del ADC con el objetivo de optimizar aún más el rango dinámico del ADC.

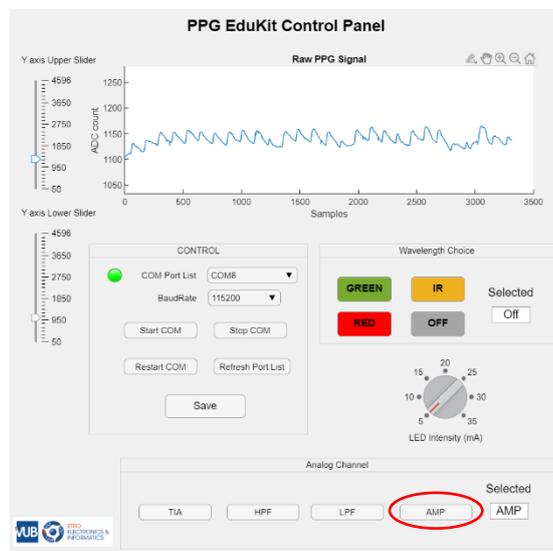
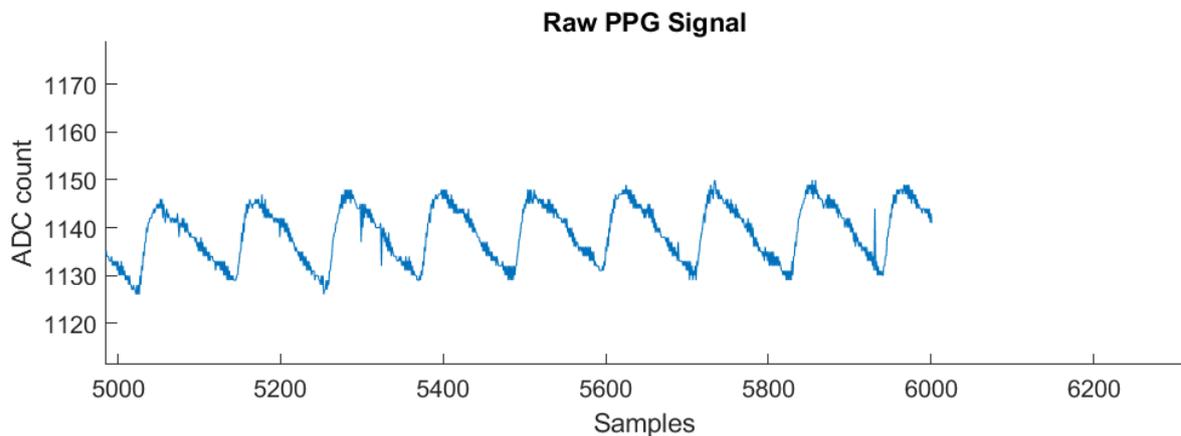


Fig. 11 Botón de amplificación.

Al hacer un zoom de la gráfica se obtiene una imagen similar a la siguiente imagen.

AMP



**Fig. 12 Señal obtenida del PPG EduKit aumentando la amplificación.**

6. Configurar para obtener datos con los led rojo e infrarrojo, configurar la intensidad del LED de ser necesaria para obtener una mejor apreciación.

## **1.8. PREGUNTAS**

- ¿Qué sucede cuando aumenta la intensidad del LED?
- ¿Qué diferencia pudo percatar al cambiar entre LED`S (verde,rojo,infrarrojo)?
- ¿Cómo cambia la gráfica cuando realiza actividad física?
- ¿Qué pasa con los filtros al cambiar de resistencias?

## **1.9. CONCLUSIONES**

Al menos 3 conclusiones en viñetas:

- Conclusión 1
- Conclusión 2
- Conclusión 3

## **1.10. RECOMENDACIONES**

Al menos 3 recomendaciones en viñetas:

- Recomendación 1

- Recomendación 2
- Recomendación 3

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Presente un reporte que incluya lo siguiente:

1. Caratula
2. Resumen
3. Objetivos generales y específicos de la práctica
4. Capturas de pantalla
5. Código utilizado
6. Análisis de resultados
7. Preguntas
8. Comentarios de las gráficas obtenidas
9. Respuestas a las preguntas presentadas
10. Conclusiones y Recomendaciones.

## LABORATORIO DE BIOMÉDICA

### TÍTULO DE LA PRÁCTICA

día-mes-año, XX Término 20XX- 20XX

#### Nombres y apellidos

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Guayaquil – Ecuador

[Correo espol](#)

## 2. PRÁCTICA II: FILTROS APLICADOS A LAS SEÑALES BIOMÉDICAS

### 2.1. OBJETIVOS

Explicar el funcionamiento e importancia de los filtros en la adquisición de señales.

#### 2.1.1. ESPECIFICOS

- Identificar los tipos de filtros pasivos y activos.
- Explicar los filtros utilizados en la Placa PPG EduKit.
- Definir filtros digitales.

### 2.2. RESUMEN

Escriba un resumen de la práctica indicando brevemente cuáles fueron los objetivos, el procedimiento o método usado, equipos, resultados relevantes y las principales conclusiones

### 2.3. CAPTURAS DE PANTALLA

Adjunte las capturas de los diferentes diagramas usados en la correspondiente práctica.

### 2.4. TABLAS Y GRÁFICOS

Adjunte las gráficas o *plots*, y tablas de datos y resultados requeridos.

### 2.5. INTRODUCCIÓN

Este laboratorio guía al usuario comprender los conceptos de los tipos de filtros analógicos, que han sido utilizados en la tarjeta PPG EduKit, y filtros digitales aplicados a las señales PTT-PPG

## 2.6. MARCO TEÓRICO

### 2.6.1. FILTROS

Un filtro de bioseñales es un dispositivo o algoritmo utilizado para procesar señales biológicas eliminando el ruido o las interferencias no deseadas con el fin de mejorar la calidad del dato para su análisis. Estos filtros pueden ser analógicos o digitales, y son esenciales en aplicaciones médicas, como el monitoreo del electrocardiograma (ECG) o el electroencefalograma (EEG). Optimizar la comprensión de los filtros de bioseñales ayuda en la ingeniería biomédica y en la mejora de dispositivos de diagnóstico preciso.

#### Características de los Filtros de Bioseñales

- **Reducción de Ruido:** Una de las funciones principales del filtro es eliminar el ruido externo para mantener la pureza de la señal biológica.
- **Rango de Frecuencia:** Los filtros se diseñan para centrarse en rangos de frecuencia específicos, permitiendo la observación de ciertos fenómenos biológicos.
- **Adaptabilidad:** Es posible ajustar los parámetros del filtro según la señal específica que se desea analizar.

#### Aplicaciones de los Filtros de Bioseñales

- **Electrocardiograma (ECG):** Los filtros ayudan a identificar las características clave de la señal cardíaca eliminando el ruido muscular y ambiental.
- **Electroencefalograma (EEG):** Se recurren a los filtros para destacar las distintas ondas cerebrales, como las alfa, beta y delta.
- **Electromiografía (EMG):** Los filtros permiten aislar las señales eléctricas generadas por la contracción muscular.

### 2.6.2. IMPORTANCIA DEL FILTRO DE BIOSEÑALES EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

En el campo de la ingeniería biomédica, los filtros de bioseñales son herramientas indispensables para el análisis de señales

fisiológicas <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-biomedica/analisis-de-senales-fisiologicas/>. Estas herramientas permiten extraer información relevante de los datos obtenidos de los organismos vivos, mejorando tanto la precisión diagnóstica como la fiabilidad de los sistemas de monitoreo.

### **Funciones Principales**

- **Filtrado de Ruido:** Los filtros se utilizan para eliminar interferencias no deseadas en las señales captadas, como las producidas por el movimiento muscular o el ruido ambiental.
- **Detección de Patrones:** Permiten aislar y analizar patrones específicos en las señales, lo que es crucial para detectar enfermedades o realizar estudios clínicos.

### **Aplicaciones en la Medicina**

Los filtros de bioseñales tienen múltiples aplicaciones en el ámbito médico:

- **Monitoreo Continuo:** Utilizados en dispositivos de monitoreo continuo, como marcapasos y monitores de sueño.
- **Investigación Neurológica:** Facilitan el análisis de EEG para estudiar trastornos del sueño, epilepsia y enfermedades neurodegenerativas.
- **Análisis Cardíaco:** Ayudan en la evaluación de enfermedades cardíacas a través del análisis de ECG.

En un estudio reciente sobre el uso de filtros en EEG, se demostró que los filtros de banda estrecha son esenciales para identificar las ondas del cerebro que corresponden a estados específicos de alerta o relajación. La capacidad para ajustar estos filtros permite a los investigadores diferenciar mejor entre las señales cerebrales derivadas de actividades específicas, tales como resolver problemas matemáticos o escuchar música. Sin estos filtros, las correlaciones entre actividad cerebral y comportamiento serían mucho menos claras y precisas.

### 2.6.3. Métodos de Filtrado Más Utilizados

Existen varios métodos de filtrado que se utilizan para tratar bioseñales, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones:

- **Filtros FIR (Finite Impulse Response):** Son lineales y su salida depende solo de los datos de entrada, sin recurrir a valores previos de la salida.
- **Filtros IIR (Infinite Impulse Response):** Emplean tanto los datos de entrada como los valores pasados de salida, lo que permite una respuesta de fase no lineal.
- **Filtros Adaptativos:** Ajustan sus características en tiempo real para acomodar cambios en las señales o en el entorno.

Analizar las señales de ECG con filtros avanzados puede proporcionar información más detallada sobre la salud cardíaca. Por ejemplo, un estudio indicó que utilizando filtros de onda continua (CWT), es posible detectar con mayor precisión arritmias sutiles que pasarían desapercibidas con métodos tradicionales. Al aplicar CWT, las señales temporales se descomponen en una serie de oscilaciones de frecuencia modulada lo que permite un análisis más detallado de la morfología de la señal cardíaca, potenciando diagnósticos más tempranos y precisos.

## HERRAMIENTAS Y SOFTWARE EN INGENIERÍA BIOMÉDICA

Los ingenieros biomédicos disponen de una variedad de herramientas y software para analizar y procesar señales biomédicas.

- **Matlab:** Amplio uso en análisis de datos, filtrado en tiempo real y simulación de bioseñales.
- **Python con bibliotecas como SciPy y NumPy:** Herramientas versátiles para procesamiento avanzado de señales.
- **LabVIEW:** Plataforma de desarrollo para crear sistemas de medición y control.

## POSTERIOR

Una de las soluciones más innovadoras en el campo es el uso de aprendizaje automático para mejorar el filtrado de señales biomédicas. Los algoritmos de aprendizaje automático pueden ser entrenados para distinguir entre ruido y señal real, mejorando la precisión del filtrado. Un ejemplo de esto es el uso de redes neuronales convolucionales (CNN) que han demostrado ser eficaces en la clasificación de segmentos de EEG para identificar patrones de sueño y estados de alerta.

## 2.7. PROCEDIMIENTO

Con la siguiente tabla verificar los tipos de señales obtenidas en el programa

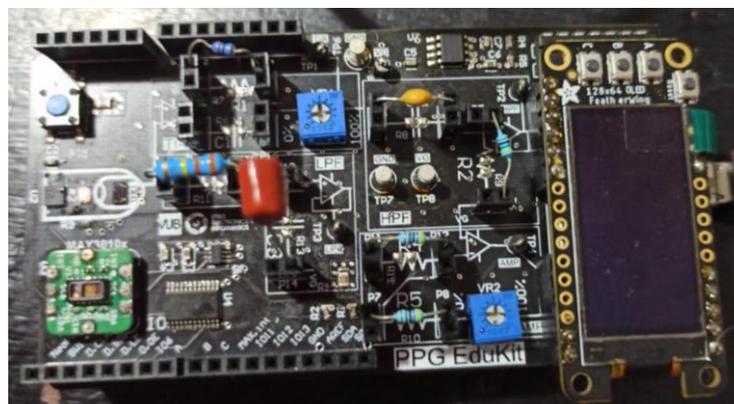
**Tabla 1.1 Configuración de elementos electrónicos para filtros**

FILTRO	R1 [ $\Omega$ ]	C1[f]	R2 [ $\Omega$ ]	R3 [ $\Omega$ ]	C2 [f]	R4 [ $\Omega$ ]	R5 [ $\Omega$ ]
ANALÓGICO 1	22 K	1 u	1 M	680 K	47 n	4.7 K	4.7 K
ANALÓGICO 2	22K	1 u	1 M	330 K	47 n	4.7 K	4.7 K
ANALÓGICO 3	1 K	0.1u	100 K	680 K	22 n	22 K	22 K
ANALÓGICO 4	1 K	10 u	100 K	330 K	1000 n	22 K	22 K

### 1. FILTROS ANALÓGICOS

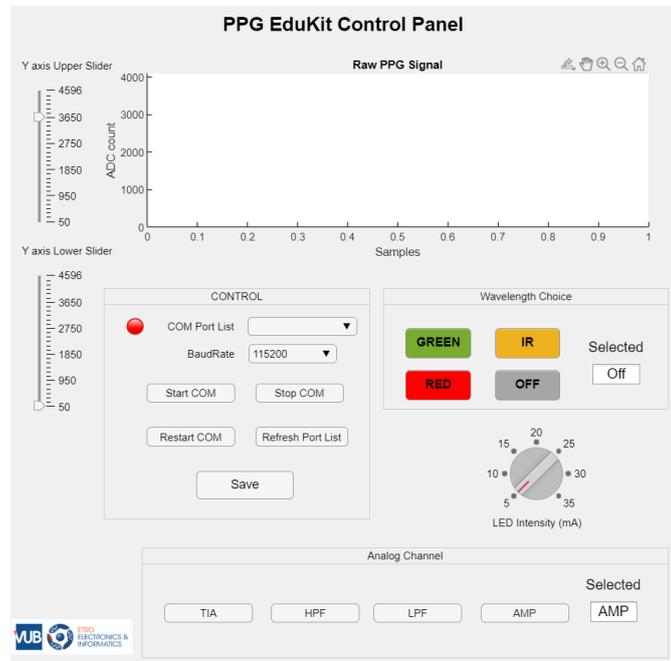
1.1. Con el primer filtro analógico verificar que se tenga una señal PPG

1.1.1. Verificar las resistencias y capacitores correspondientes para el primer filtro, realizar las capturas correspondientes para las etapas.



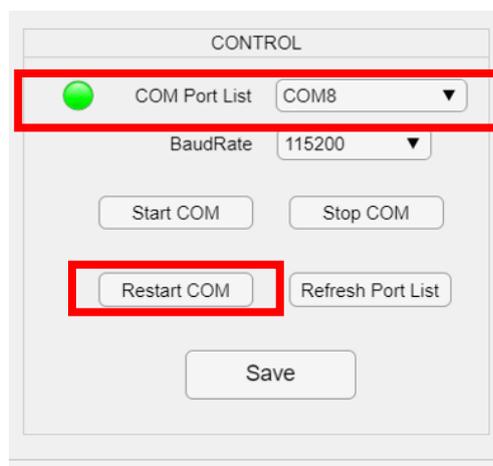
**Fig. 22 Placa PPG EduKit**

- Ejecutar el programa PPG\_EduKit\_GUI, compatible con MATLAB versiones desde 2021a



**Fig. 23 Interfaz de Usuario**

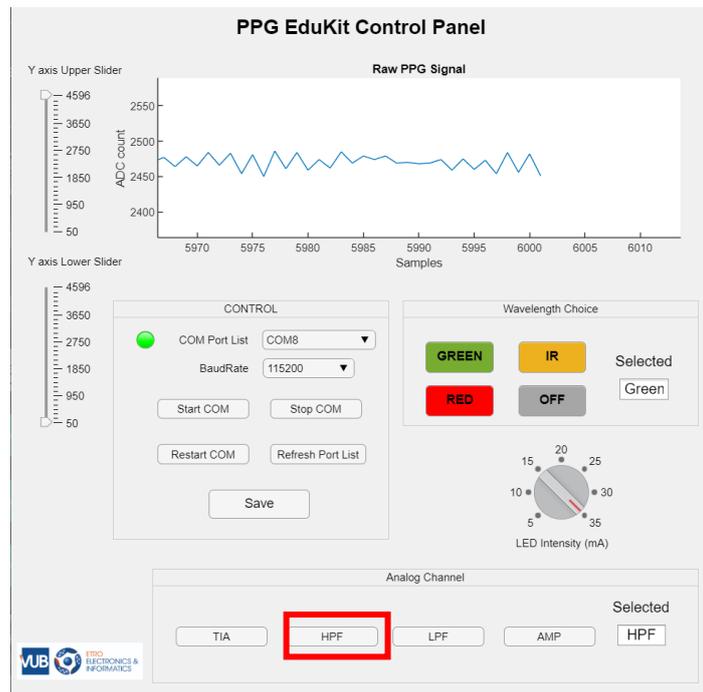
- Verificar el puerto y presionar en el botón de “Start COM”



**Fig. 24 Comunicación con el puerto COM**

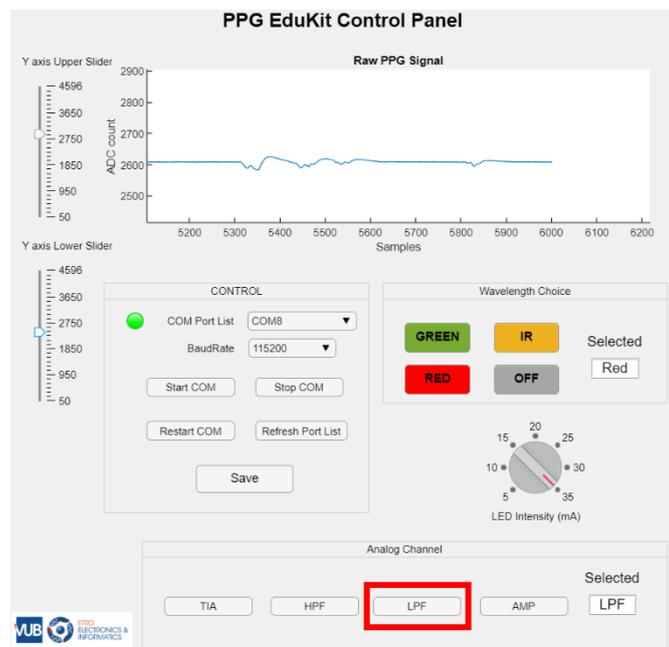
De esta manera la comunicación entre la placa y el computador empezará.

- Presione el botón de HPF, que es el filtro pasa altos de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



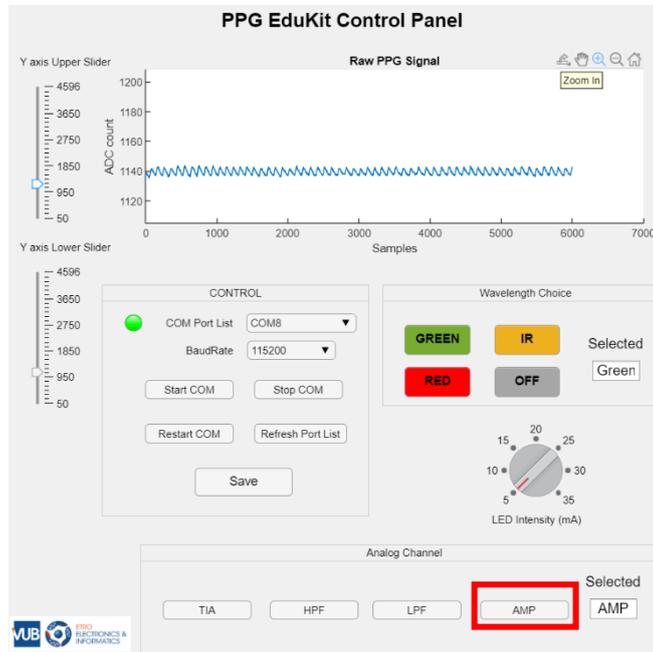
**Fig. 25 Aplicación de filtro pasa altos**

- Presione el botón de LPF, que es el filtro pasa bajos de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 26 Filtro pasa bajos**

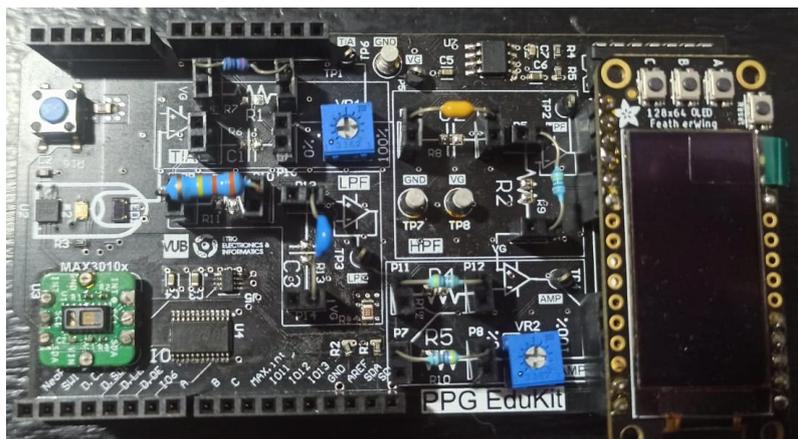
Presione el botón de AMP, para obtener la señal amplificada con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 27 Señal amplificada**

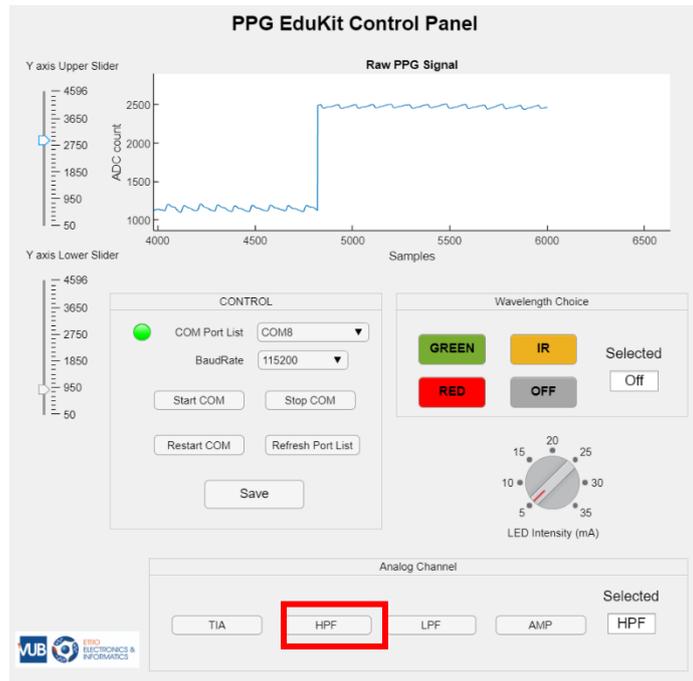
## 1.2. Con el segundo filtro analógico adquirir datos

### 1.2.1. Verificar los valores de los elementos

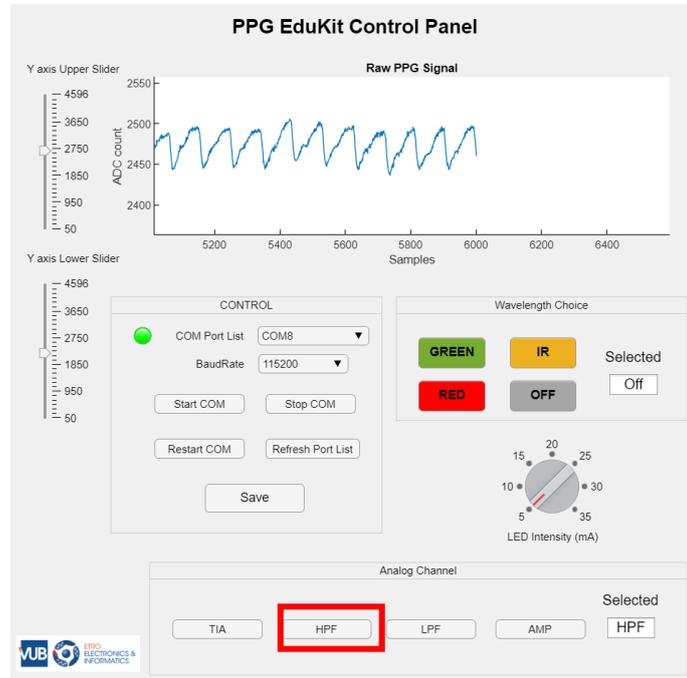


**Fig. 28 Placa PPG EduKit**

- Presione el botón de HPF, que es el filtro pasa altos de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.

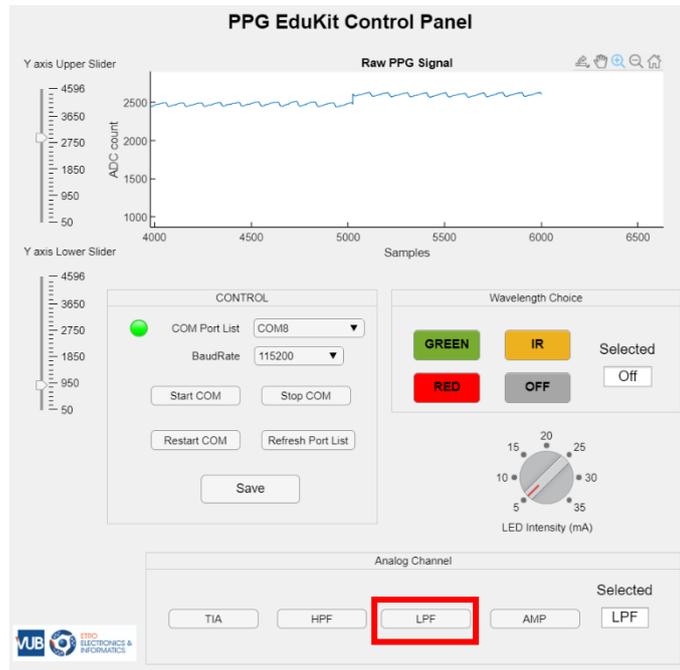


**Fig. 29 Cambio de función de la placa**

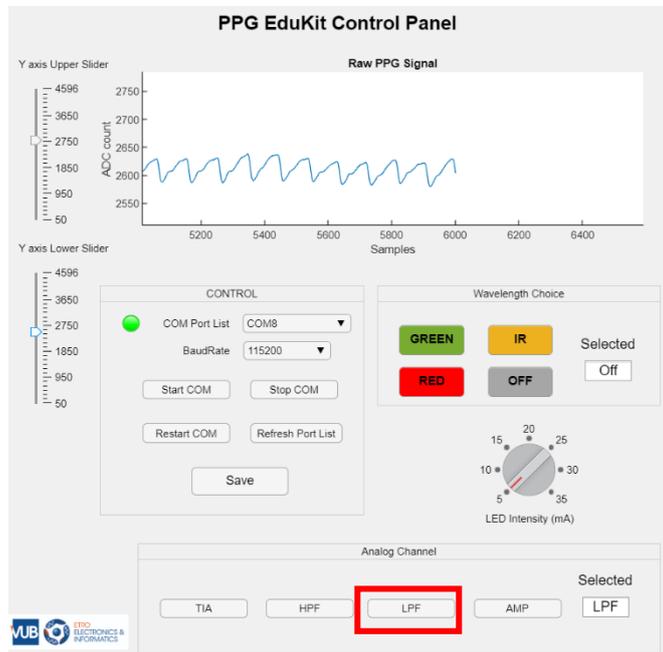


**Fig. 30 Filtro pasa altos**

- Presione el botón de LPF, que es el filtro pasa bajos de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.

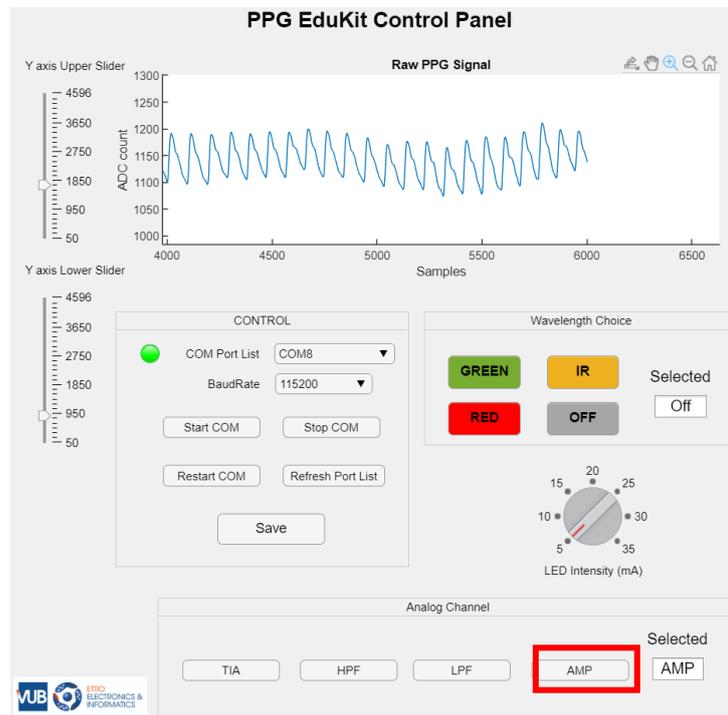


**Fig. 31 Filtro pasa bajos**



**Fig. 32 Filtro pasa bajos**

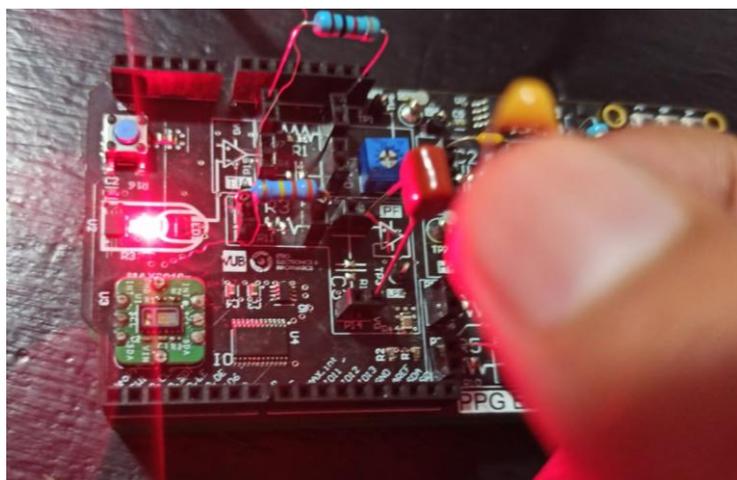
- Presione el botón de AMP, que es la amplificación de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 33 Amplificador de la señal de salida**

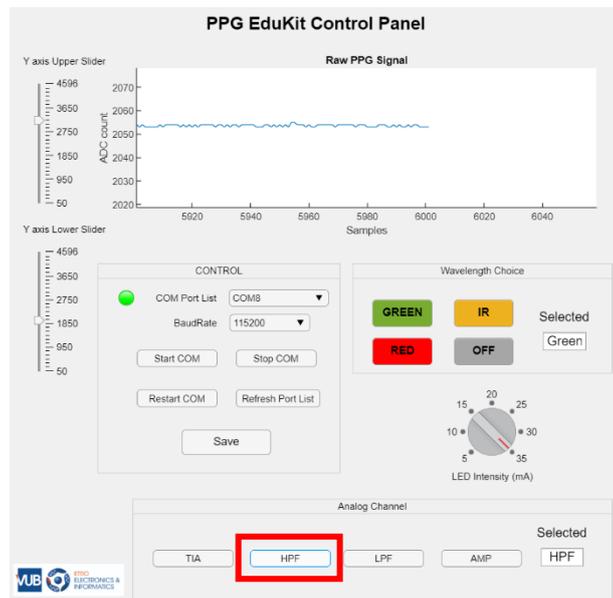
### 1.3. Probar con el tercer filtro analógico

#### 1.3.1. Verificar las resistencias y capacitores correspondientes.



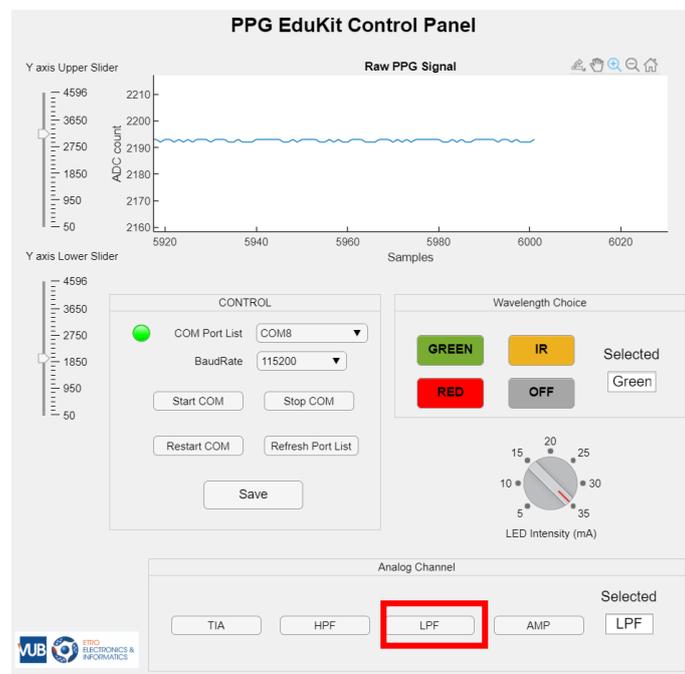
**Fig. 34 Placa PPG EduKit con diferentes elementos electrónicos**

- Presione el botón de HPF, que es el filtro pasa alto de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



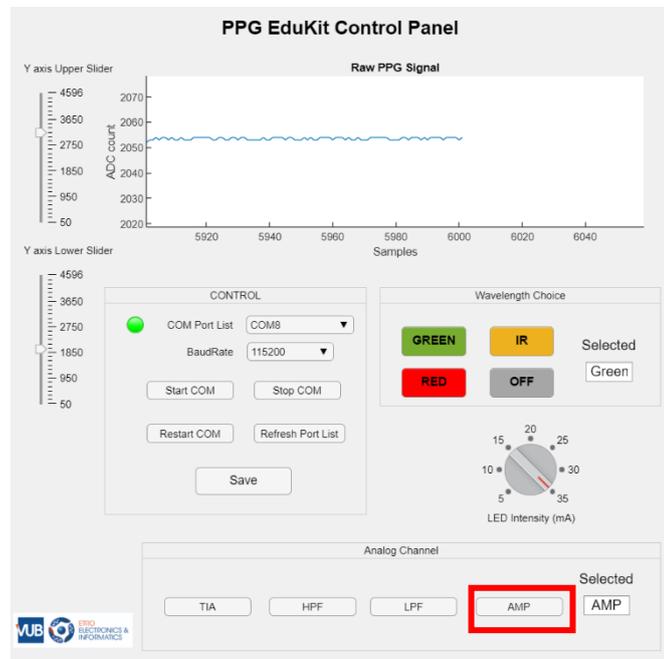
**Fig. 35 Botón HPF**

- Presione el botón de LPF, que es el filtro pasa bajo de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 36 Botón LPF**

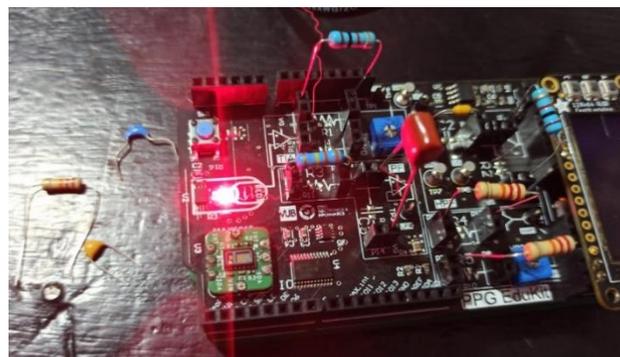
- Presione el botón de AMP, que es amplificación de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 15 Amplificación de la señal PPG**

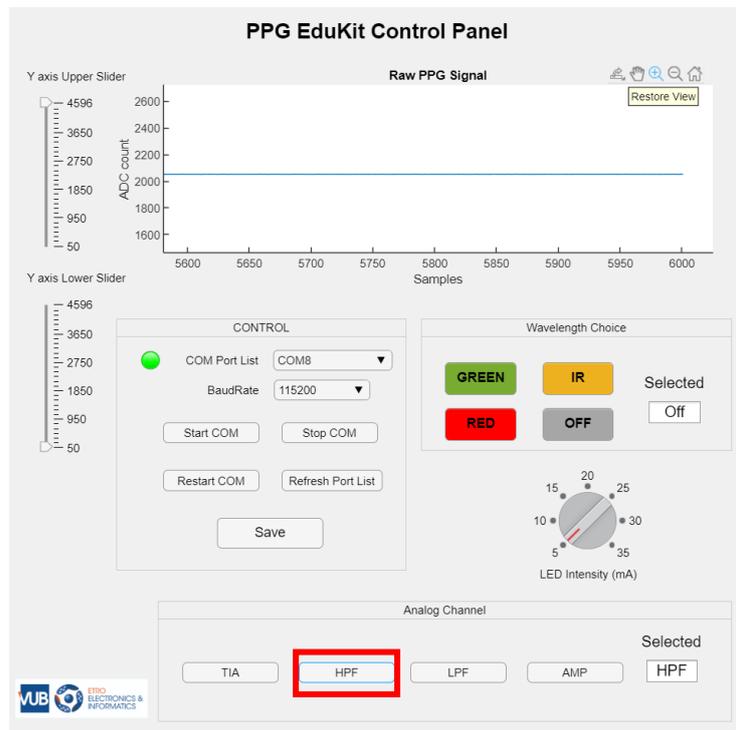
#### 1.4. Probar con el cuarto filtro analógico

##### 1.4.1. Verificar las resistencias y capacitores correspondientes



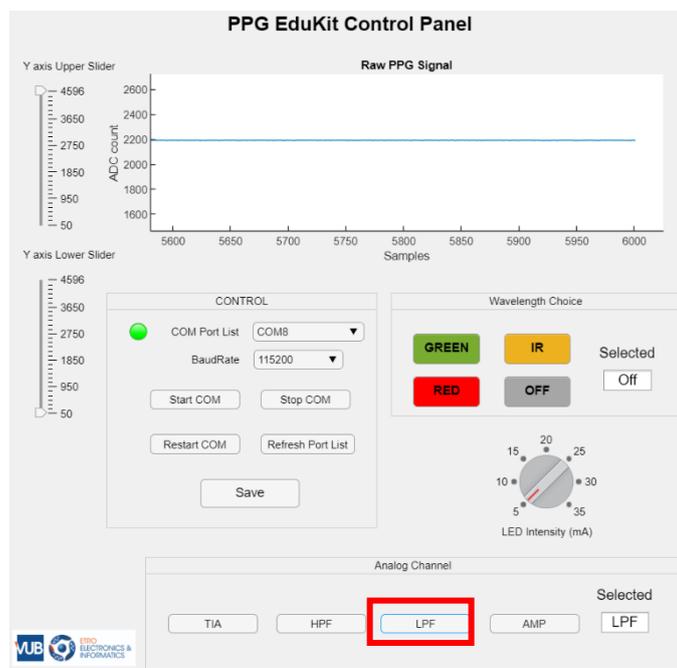
**Fig. 376 Placa PPG EduKit**

- Presione el botón de HPF, que es el filtro para alto de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



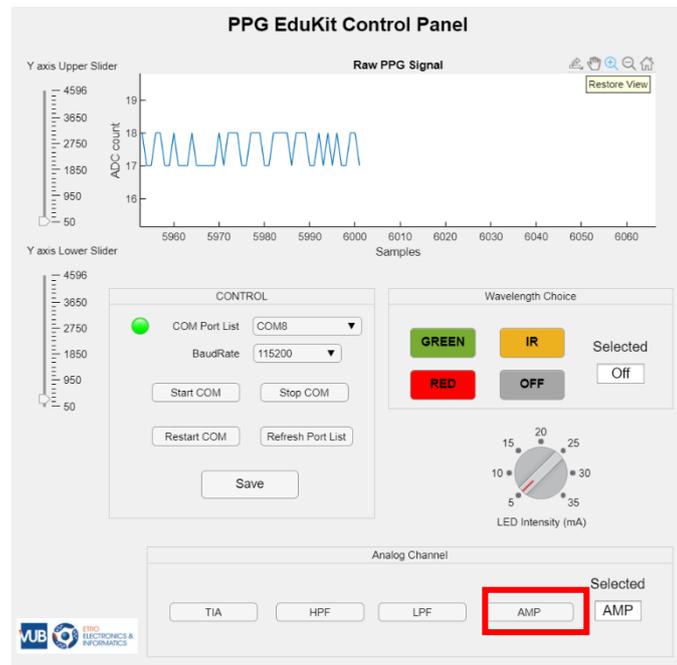
**Fig. 387 Filtro pasa altos**

- Presione el botón de LPF, que es el filtro pasa bajo de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 18 Filtro pasa bajos**

- Presione el botón de AMP, que es amplificación de ejemplo con los componentes presentados en la tabla 1, se obtiene una imagen como la siguiente.



**Fig. 19 Etapa de Amplificación**

- 2. REALICE LOS PASOS ANTERIORES CAMBIANDO LA INTENSIDAD DEL LED, Y EL COLOR DEL LED COMO ROJO O IR.**
- 3. FILTROS DIGITAL**

3.1. Realizar el siguiente código para utilizar filtros digitales

[https://colab.research.google.com/drive/1ZaNTD4Q\\_sESiAeA47CA0I\\_Z5t8Sgbl2p?usp=sharing](https://colab.research.google.com/drive/1ZaNTD4Q_sESiAeA47CA0I_Z5t8Sgbl2p?usp=sharing)

## **2.8. PREGUNTAS**

- ¿Para qué sirve un filtro en un circuito de adquisición de datos?
- ¿Cuál es la principal diferencia entre un filtro pasivo y activo?
- ¿Para qué sirven los filtros Chebyshev y Butterworth?
- ¿Qué consideraciones se debe tener en cuenta para encontrar una frecuencia de corte?

## **2.9. CONCLUSIONES**

Al menos 3 conclusiones en viñetas:

- Conclusión 1
- Conclusión 2
- Conclusión 3

## **2.10. RECOMENDACIONES**

Al menos 3 recomendaciones en viñetas:

- Recomendación 1
- Recomendación 2
- Recomendación 3

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Presente un reporte que incluya lo siguiente:

1. Caratula
2. Resumen
3. Objetivos generales y específicos de la práctica
4. Capturas de pantalla
5. Código utilizado
6. Análisis de resultados
7. Preguntas
8. Respuestas a las preguntas presentadas
9. Conclusiones y Recomendaciones.

# LABORATORIO DE BIOMÉDICA

## TÍTULO DE LA PRÁCTICA

día-mes-año, XX Término 20XX- 20XX

### Nombres y apellidos

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación (FIEC)

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Guayaquil – Ecuador

[Correo espol](mailto:correo@espol.edu.ec)

## 3. PRÁCTICA: INTELIGENCIA ARTIFICIAL

### 3.1. OBJETIVOS

Aplicar la inteligencia artificial con los datos de fotopleitismografía de la placa PPG EduKit, para detectar resultados anómalos.

#### 3.1.1. ESPECIFICOS

- Preprocesar datos adquiridos con la placa PPG EduKit.
- Analizar los datos de PPG.
- Implementar algoritmos de inteligencia artificial para el análisis de datos.

### 3.2. RESUMEN

Escriba un resumen de la práctica indicando brevemente cuáles fueron los objetivos, el procedimiento o método usado, equipos, resultados relevantes y las principales conclusiones.

### 3.3. CAPTURAS DE PANTALLA

Adjunte las capturas de los diferentes diagramas usados en la correspondiente práctica.

### 3.4. CÓDIGO

Adjunte capturas de su código o *script* utilizado.

### 3.5. TABLAS Y GRÁFICOS

Adjunte las gráficas o *plots*, y tablas de datos y resultados requeridos.

### 3.6. INTRODUCCIÓN

Este laboratorio guía al usuario comprender los conceptos de inteligencia artificial, en dónde se analizan los datos obtenidos con la placa PPG EduKit. Para construir un algoritmo que pueda predecir enfermedades cardiacas.

### 3.7. MARCO TEÓRICO

#### INTELIGENCIA ARTIFICIAL

La inteligencia artificial es un campo de la ciencia relacionado con la creación de computadoras y máquinas que pueden razonar, aprender y actuar de una manera que normalmente requeriría inteligencia humana o que involucra datos cuya escala excede lo que los humanos pueden analizar.

A nivel operativo para el uso empresarial, la IA es un conjunto de tecnologías que se basan principalmente en el aprendizaje automático y el aprendizaje profundo, que se usan para el análisis de datos, la generación de predicciones y previsiones, la categorización de objetos, el procesamiento de lenguaje natural, las recomendaciones, la recuperación inteligente de datos y mucho más.

Es un conjunto de algoritmos informáticos que permiten procesar datos analizarlos de la mejor manera para obtener de forma estadística estimaciones y tomar decisiones.

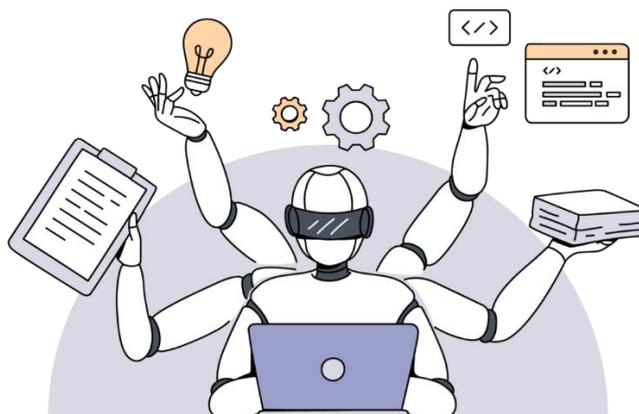


Fig. 39 Representación de la inteligencia artificial

#### ¿CÓMO FUNCIONA LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL?

Si bien los detalles varían según las diferentes técnicas de IA, el principio central gira en torno a los datos. Los sistemas de IA aprenden y mejoran a través de la exposición a grandes cantidades de datos, lo que permite identificar patrones y relaciones que las personas pueden pasar por alto.

Este proceso de aprendizaje suele implicar algoritmos, que son conjuntos de reglas o instrucciones que guían el análisis y la toma de decisiones de la IA. En el aprendizaje automático, un subconjunto popular de la IA, los algoritmos se entrenan con datos etiquetados o no etiquetados para hacer predicciones o categorizar información.

El aprendizaje profundo, una especialización adicional, utiliza redes neuronales artificiales con varias capas para procesar información, imitando la estructura y la función del cerebro humano. A través del aprendizaje y la adaptación continuos, los sistemas de IA se vuelven cada vez más hábiles en la realización de tareas específicas, desde el reconocimiento de imágenes hasta la traducción de idiomas y más.

## **MODELOS DE ENTRENAMIENTO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

El aprendizaje automático es un subconjunto de la inteligencia artificial que usa algoritmos para entrenar datos y obtener resultados. A grandes rasgos, suelen usarse tres tipos de modelos de aprendizaje en el aprendizaje automático:

**El aprendizaje supervisado** es un modelo de aprendizaje automático que asigna una entrada específica a un resultado mediante datos de entrenamiento etiquetados (datos estructurados). En términos simples, para entrenar un algoritmo que reconozca imágenes de gatos, se lo alimenta con imágenes etiquetadas como gatos.

**El aprendizaje no supervisado** es un modelo de aprendizaje automático que aprende patrones en función de datos no etiquetados (datos no estructurados). A diferencia del aprendizaje supervisado, el resultado final no se conoce con anticipación. En cambio, el algoritmo aprende de los datos y los clasifica en grupos en función de diversos atributos. Por ejemplo, el aprendizaje no supervisado es bueno para identificar patrones y realizar modelado descriptivo.

Además del aprendizaje supervisado y no supervisado, suele emplearse un enfoque mixto llamado aprendizaje semisupervisado, en el que solo se etiquetan algunos de los datos. En el aprendizaje semisupervisado, se conoce un resultado final, pero el algoritmo debe determinar cómo organizar y estructurar los datos para lograr los resultados deseados.

**El aprendizaje por refuerzo** es un modelo de aprendizaje automático que se puede describir en términos generales como “aprender haciendo”. Un "agente" aprende a realizar una tarea definida mediante prueba y error (un bucle de reacción) hasta que su rendimiento está dentro de un rango deseado. El agente recibe un refuerzo positivo cuando realiza la tarea de forma correcta y un refuerzo negativo cuando tiene bajo rendimiento. Un ejemplo de aprendizaje por refuerzo sería enseñarle a una mano robótica a recoger una pelota.

## **TIPOS COMUNES DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES**

Un tipo común de modelo de entrenamiento en la IA es una red neuronal artificial, que se basa a grandes rasgos en el cerebro humano.

Una red neuronal es un sistema de neuronas artificiales (a veces llamadas perceptrones), que son nodos de procesamiento que se usan para clasificar y analizar datos. Los datos se ingresan en la primera capa de una red neuronal, y cada perceptrón toma una decisión y, luego, pasa esa información a varios nodos de la siguiente capa. Los modelos de entrenamiento con más de tres capas se denominan "redes neuronales profundas" o "aprendizaje profundo". Algunas redes neuronales modernas tienen cientos o miles de capas. La salida de los perceptrones finales permite realizar la tarea impuesta a la red neuronal, como clasificar un objeto o encontrar patrones en los datos.

Estos son algunos de los tipos más comunes de redes neuronales artificiales que puedes encontrar:

- Redes Neuronales Prealimentadas

- Redes Neuronales Recurrentes
- Memoria a Largo y Corto Plazo (LSTM)
- Redes Neuronales Convolucionales
- Redes Generativas Adversarias

Las que se utilizarán en esta práctica, son las redes neuronales convolucionales, incluyen algunas de las redes neuronales más comunes en la inteligencia artificial moderna. Las CNN suelen usarse en el reconocimiento de imágenes y emplean varias capas distintas (una capa convolucional y, luego, una capa de agrupación) que filtran diferentes partes de una imagen antes de volver a unirla (en la capa completamente conectada). Es posible que las capas convolucionales anteriores busquen características simples de una imagen, como colores y bordes, antes de buscar características más complejas en capas adicionales.

Actualmente, las funciones más comunes de la IA en entornos médicos son el apoyo a las decisiones clínicas y el análisis de imágenes. Las herramientas de apoyo a la toma de decisiones clínicas ayudan a los proveedores a tomar decisiones sobre tratamientos, medicamentos, salud mental y otras necesidades de los pacientes al proporcionarles un acceso rápido a información o investigaciones relevantes para sus pacientes. En imágenes médicas, las herramientas de IA se emplean para analizar tomografías computarizadas, radiografías, resonancias magnéticas y otras imágenes en busca de lesiones u otros hallazgos que un radiólogo humano podría pasar por alto.

### **3.8. PROCEDIMIENTO**

1. Cargar el dataset, este conjunto de datos acerca de fotopleitismografía fueron obtenidos con la placa PPG EduKit, el archivo csv.

Este tipo de archivos de texto que guarda datos en filas y columnas separadas por comas. La abreviatura CSV proviene del inglés comma separated value.

#### **2. PREPROCESAMIENTO**

- 2.1. Agregamos la librería Pandas, esta librería la especializada en manejo y análisis de datos del csv. Para aquello importamos **pandas** con la abreviatura **pd**

```
import pandas as pd
#CARGAR DATASET
datasetPPG = pd.read_csv('EspinPPG.csv', header=None)
datasetPPG
```

Asignamos una variable, que en este caso es datasetPPG

Con la función pd.read\_csv, estamos permitiendo que esta variable pueda leer el archivo csv

```

0      1146
1      1146
2      1146
3      1146
4      1146
...      ...
23559  1143
23560  1143
23561  1143
23562  1143
23563  1143
23564 rows x 1 columns
```

Visualizamos las estadísticas de los datos

```
#Estadísticas del dataset por columna
datasetPPG.describe()
```

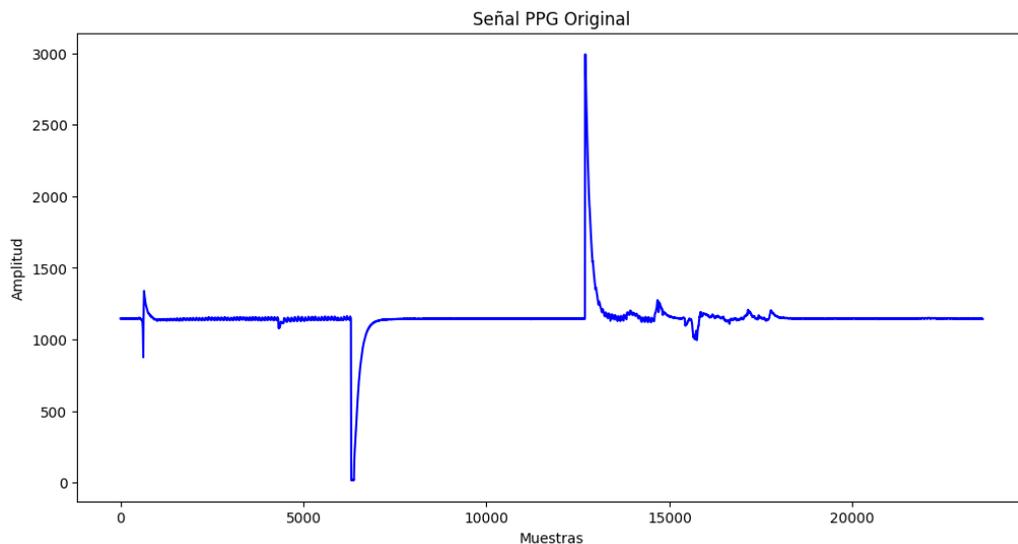
	0
count	23564.000000
mean	1147.296045
std	138.566546
min	18.000000
25%	1143.000000
50%	1146.000000
75%	1148.000000
max	2993.000000

2.2. La función describe permite visualizar de forma rápida estadísticas del dataset como la media, el conteo de elementos, el 50%, la desviación estándar entre otros,

2.3. Agregar la librería de matplotlib que permite crear gráficos y visualizaciones de datos

```
import matplotlib.pyplot as plt
signal = datasetPPG[0].values
# Graficar la señal original
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(signal, color="blue")
plt.title("Señal PPG Original")
plt.xlabel("Muestras")
plt.ylabel("Amplitud")
plt.show()
```

Agregamos título de la gráfica, título de los ejes, color, etc.



**Fig. 40 Ploteo de la señal adquirida de PPG**

2.4. Aplicamos la transformada rápida de Fourier para analizar su contenido en frecuencia. Esto tiene varias aplicaciones como:

- Extracción de la frecuencia cardiaca
- Análisis de variabilidad de la frecuencia cardiaca
- Filtrado y eliminación de ruido
- Identificación de señales respiratorias
- Detección de anomalías cardiovasculares

Importamos la librería numpy con el diminutivo de np, que nos ayuda con los cálculos numéricos y análisis de datos.

```
import numpy as np
# Aplicar FFT
```

```
sampling_rate = 1000 # Suponiendo que la frecuencia de muestreo es 1000 Hz
fft_values = np.fft.fft(signal)
frequencies = np.fft.fftfreq(len(signal), d=1/sampling_rate)
```

Para obtener más ejemplos acerca de la FFT lo podemos encontrar en el siguiente enlace: <https://numpy.org/doc/2.1/reference/routines.fft.html>

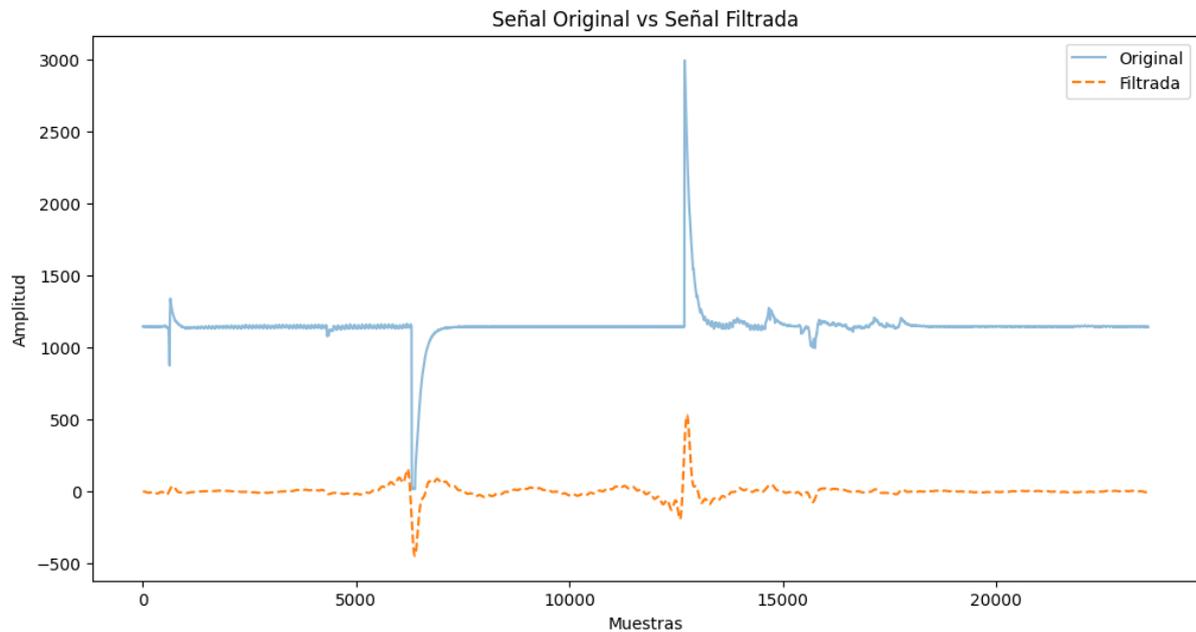
```
# Filtrar frecuencias fuera del rango de interés
fft_filtered = fft_values.copy()
fft_filtered[(frequencies < 0.5) | (frequencies > 5)] = 0
```

Este comando sirve para seccionar parte de los datos en un rango de interés, ya que las señales ppg se aprecian mejor a frecuencias entre 0.5 y 5 Hz.

```
# Transformar de vuelta al dominio del tiempo
signal_filtered = np.fft.ifft(fft_filtered).real
```

Graficamos las dos señales, al original y la filtrada para apreciar los datos transformados

```
# Graficar señal original y filtrada
plt.figure(figsize=(12, 6))
plt.plot(signal, label="Original", alpha=0.5)
plt.plot(signal_filtered, label="Filtrada", linestyle="--")
plt.title("Señal Original vs Señal Filtrada")
plt.xlabel("Muestras")
plt.ylabel("Amplitud")
plt.legend()
plt.show()
```



**Fig. 41 Ploteo de la señal filtrada de PPG**

## 2.5. Extracción de características por ventanas

Aplicamos este tipo de extracción de características antes de aplicar algoritmos de aprendizaje automático, este tipo de procesamiento también se lo puede utilizar para analizar señales de ECG y EEG.

```
# Función para extraer características
def extract_features(signal, window_size, sampling_rate):
    features = []
    for i in range(0, len(signal) - window_size, window_size):
        window = signal[i:i + window_size]
        mean = np.mean(window)
        std = np.std(window)
        fft_vals = np.fft.fft(window)
        freqs = np.fft.fftfreq(len(window), d=1/sampling_rate)
        power_band = np.sum(np.abs(fft_vals[(freqs >= 0.5) & (freqs <= 5.0)]))
        features.append([mean, std, power_band])
    return np.array(features)

# Parámetros
window_size = 256 # Tamaño de ventana (256 muestras por ventana)
features = extract_features(signal_filtered, window_size, sampling_rate)
```

Divide la señal en segmentos del tamaño de `window_size`, y con pasos de `window_size`, que en este caso se ha colocado 256

Aplica la FFT, para pasar la señal al dominio de la frecuencia.

Filtra los valores absolutos de la FFT en la banda de 05 y 5 Hz, que es nuestra banda de interés.

Para cada ventana almacena `[mean, std, power_band]`

```
# Calcular umbrales para determinar normalidad
global_mean = np.mean(features[:, 0]) # Media global
global_std = np.std(features[:, 0]) # Desviación estándar global
threshold_upper = global_mean + 2 * global_std
threshold_lower = global_mean - 2 * global_std

# Crear etiquetas
labels = np.array([1 if (threshold_lower <= feat[0] <=
threshold_upper) else 0 for feat in features])

# Contar clases
print("Ventanas normales (1):", np.sum(labels == 1))
print("Ventanas anómalas (0):", np.sum(labels == 0))
```

Para separar las clases (normal o anómalo), se utilizó la media de cada ventana como referencia. Se calculó la media global y la desviación estándar global de las medias de todas las ventanas. Con estos valores, se definió un rango de normalidad, que va desde  $(\text{global\_mean} - 2 * \text{global\_std})$  hasta  $(\text{global\_mean} + 2 * \text{global\_std})$ . Si la media de una ventana cae dentro de este rango, se clasifica como **normal (1)**; de lo contrario, como **anómala (0)**. Este criterio se basa en que la mayoría de los datos (95.4%) deben estar dentro de este rango si siguen una distribución aproximadamente normal

```
Ventanas normales (1): 85
Ventanas anómalas (0): 7
```

```
plt.hist(features[:, 0], bins=50, alpha=0.7, label="Media de ventanas")
plt.axvline(threshold_upper, color="red", linestyle="--", label="Umbral superior")
plt.axvline(threshold_lower, color="red", linestyle="--", label="Umbral inferior")
plt.title("Distribución de medias de ventanas")
plt.legend()
```

```
plt.show()
```

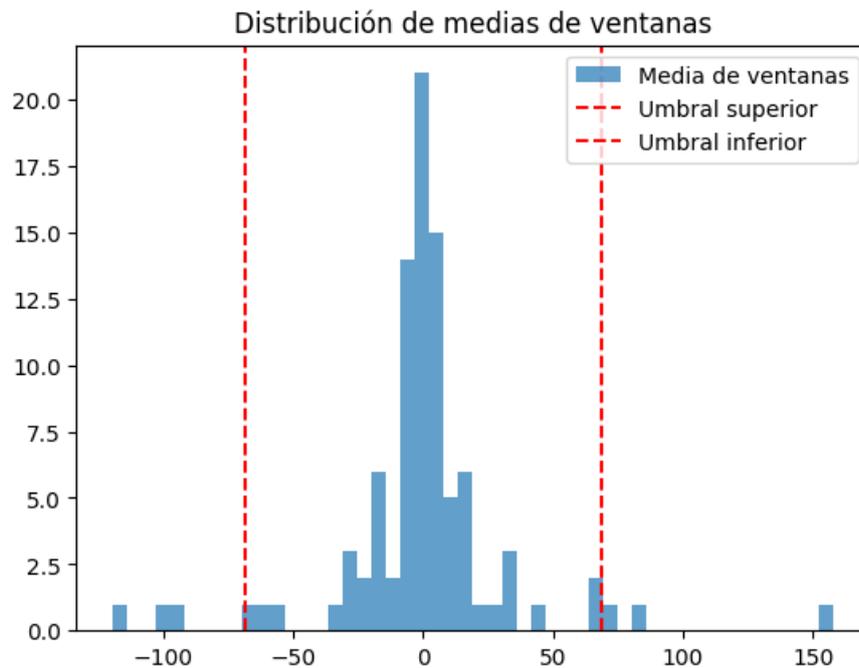


Fig. 42 Distribución de datos

Estos datos están muy desbalanceados. Se procede a reajustar los valores con SMOTE

```
# Revisión del balance de las clases
import numpy as np
unique, counts = np.unique(labels, return_counts=True)
print("Distribución de las clases en las etiquetas:", dict(zip(unique, counts)))
```

```
Distribución de las clases en las etiquetas: {0: 7, 1: 85}
```

El algoritmo SMOTE es uno de los primeros y aún el más popular enfoque algorítmico para generar nuevas muestras de conjuntos de datos.

```
from imblearn.over_sampling import SMOTE
from sklearn.model_selection import train_test_split

# Sobremuestrear la clase minoritaria usando SMOTE
smote = SMOTE(random_state=42)
X_resampled, y_resampled = smote.fit_resample(features, labels)

# Verificar la nueva distribución
unique, counts = np.unique(y_resampled, return_counts=True)
```

```
print("Distribución de clases después de SMOTE:", dict(zip(unique, counts)))

# Dividir los datos balanceados
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_resampled, y_resampled,
test_size=0.25, random_state=42)
```

```
Distribución de clases después de SMOTE: {0: 85, 1: 85}
```

3. Se utiliza una Red Neuronal Artificial Multicapa (MLP) para clasificación binaria

- **NumPy**: Para operaciones matemáticas.
- **scikit-learn**: Para preprocesamiento (normalización) y métricas de evaluación.
- **Keras**: Para construir, entrenar y optimizar la red neuronal.
- **Matplotlib**: Para visualizar resultados.

```
import numpy as np
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
from sklearn.metrics import classification_report, roc_auc_score, confusion_matrix,
ConfusionMatrixDisplay
from keras.models import Sequential
from keras.layers import Dense, Dropout
from keras.optimizers import Adam
from keras.regularizers import l2
from keras.callbacks import EarlyStopping, ReduceLROnPlateau
import matplotlib.pyplot as plt

# Asegurar reproducibilidad
np.random.seed(42)

# Normalizar o estandarizar las características
scaler = StandardScaler()
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)

# Definir el modelo con regularización L2 y Dropout
model = Sequential([
    Dense(128, activation='relu', kernel_regularizer=l2(0.02),
input_shape=(X_train_scaled.shape[1],)),
    Dropout(0.4),
    Dense(64, activation='relu', kernel_regularizer=l2(0.02)),
    Dropout(0.3),
    Dense(1, activation='sigmoid') # Salida binaria
])
```

### Capa 1:

- Dense(128, activation='relu') → **128 neuronas con activación ReLU.**
- kernel\_regularizer=l2(0.02) → **Regularización L2** para reducir sobreajuste.
- Dropout(0.4) → Apaga **40% de las neuronas** aleatoriamente en cada iteración para evitar sobreajuste.

### Capa 2:

- Dense(64, activation='relu') → **64 neuronas con activación ReLU.**
- Dropout(0.3) → Apaga **30% de las neuronas.**

### Capa de salida:

- Dense(1, activation='sigmoid') → **1 neurona con activación sigmoide** para salida binaria (0 o 1).

```
# Compilar el modelo con optimizador Adam
model.compile(optimizer=Adam(learning_rate=0.001), loss='binary_crossentropy',
metrics=['accuracy'])
```

- **Optimizador:** Adam(learning\_rate=0.001), que ajusta los pesos automáticamente.
- **Función de pérdida:** binary\_crossentropy, usada en **clasificación binaria.**
- **Métrica:** accuracy para medir precisión del modelo.

```
# Configurar callbacks: EarlyStopping y ReduceLROnPlateau
early_stop = EarlyStopping(monitor='val_loss', patience=10, restore_best_weights=True,
verbose=1)
reduce_lr = ReduceLROnPlateau(monitor='val_loss', factor=0.5, patience=5, min_lr=1e-6,
verbose=1)
```

### EarlyStopping:

- Detiene el entrenamiento si val\_loss **no mejora en 10 épocas.**
- Restaura los mejores pesos obtenidos.

### ReduceLROnPlateau:

- Reduce el learning\_rate si val\_loss **no mejora en 5 épocas.**
- **Reduce el learning\_rate a la mitad** (factor=0.5), con un mínimo de 1e-6.

```
# Entrenar el modelo
history = model.fit(
    X_train_scaled, y_train,
    validation_split=0.2, # Aumentar el conjunto de validación
    epochs=100,
    batch_size=64,
    callbacks=[early_stop, reduce_lr],
    verbose=1
)
```

```
# Evaluar el modelo en el conjunto de prueba
loss, accuracy = model.evaluate(X_test_scaled, y_test)
print(f"Loss: {loss}, Accuracy: {accuracy}")
```

```
# Predicciones y métricas
y_pred = (model.predict(X_test_scaled) > 0.5).astype("int32")
```

```
Epoch 1/100
/usr/local/lib/python3.11/dist-packages/keras/src/layers/core/dense.py:87: UserWarning: Do not pass an `input_shape`/`input_dim` argument to
super().__init__(activity_regularizer=activity_regularizer, **kwargs)
2/2 |-----| 2s 352ms/step - accuracy: 0.3064 - loss: 2.5524 - val_accuracy: 0.4615 - val_loss: 2.4751 - learning_rate: 0.0010
Epoch 2/100
2/2 |-----| 0s 44ms/step - accuracy: 0.4220 - loss: 2.4848 - val_accuracy: 0.6923 - val_loss: 2.3917 - learning_rate: 0.0010
Epoch 3/100
2/2 |-----| 0s 57ms/step - accuracy: 0.7054 - loss: 2.3781 - val_accuracy: 0.8462 - val_loss: 2.3139 - learning_rate: 0.0010
Epoch 4/100
2/2 |-----| 0s 62ms/step - accuracy: 0.6992 - loss: 2.3240 - val_accuracy: 0.8462 - val_loss: 2.2399 - learning_rate: 0.0010
Epoch 5/100
2/2 |-----| 0s 50ms/step - accuracy: 0.7398 - loss: 2.2565 - val_accuracy: 0.8462 - val_loss: 2.1693 - learning_rate: 0.0010
Epoch 6/100
2/2 |-----| 0s 66ms/step - accuracy: 0.8305 - loss: 2.1773 - val_accuracy: 0.8462 - val_loss: 2.1018 - learning_rate: 0.0010
Epoch 7/100
2/2 |-----| 0s 54ms/step - accuracy: 0.8357 - loss: 2.1236 - val_accuracy: 0.8077 - val_loss: 2.0375 - learning_rate: 0.0010
Epoch 8/100
2/2 |-----| 0s 52ms/step - accuracy: 0.8409 - loss: 2.0570 - val_accuracy: 0.8077 - val_loss: 1.9761 - learning_rate: 0.0010
Epoch 9/100
2/2 |-----| 0s 68ms/step - accuracy: 0.8961 - loss: 2.0073 - val_accuracy: 0.8077 - val_loss: 1.9174 - learning_rate: 0.0010
Epoch 10/100
2/2 |-----| 0s 95ms/step - accuracy: 0.8583 - loss: 1.9337 - val_accuracy: 0.8846 - val_loss: 1.8608 - learning_rate: 0.0010
Epoch 11/100
2/2 |-----| 0s 56ms/step - accuracy: 0.9041 - loss: 1.8827 - val_accuracy: 0.8846 - val_loss: 1.8063 - learning_rate: 0.0010
Epoch 12/100
2/2 |-----| 0s 55ms/step - accuracy: 0.8739 - loss: 1.8475 - val_accuracy: 0.8846 - val_loss: 1.7538 - learning_rate: 0.0010
Epoch 13/100
2/2 |-----| 0s 65ms/step - accuracy: 0.8857 - loss: 1.7950 - val_accuracy: 0.8846 - val_loss: 1.7032 - learning_rate: 0.0010
Epoch 14/100
2/2 |-----| 0s 34ms/step - accuracy: 0.8909 - loss: 1.7214 - val_accuracy: 0.8846 - val_loss: 1.6545 - learning_rate: 0.0010
Epoch 15/100
2/2 |-----| 0s 43ms/step - accuracy: 0.9093 - loss: 1.6726 - val_accuracy: 0.8846 - val_loss: 1.6075 - learning_rate: 0.0010
```

```
Loss: 0.36119544506073, Accuracy: 0.9534883499145508
```

```
# Matriz de confusión
```

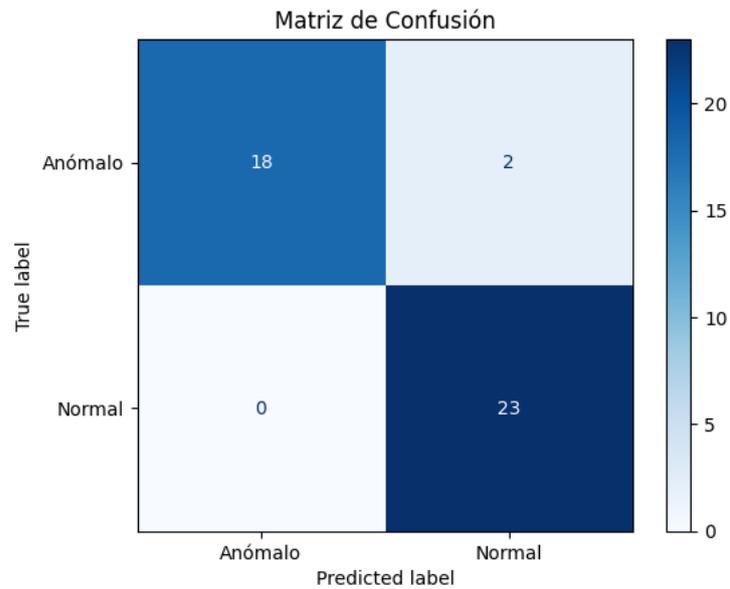
```
conf_matrix = confusion_matrix(y_test, y_pred)
```

```
disp = ConfusionMatrixDisplay(confusion_matrix=conf_matrix,
display_labels=["Anómalo", "Normal"])
```

```

disp.plot(cmap="Blues", values_format="d")
plt.title("Matriz de Confusión")
plt.show()

```



**Fig. 43 Matriz de confusión**

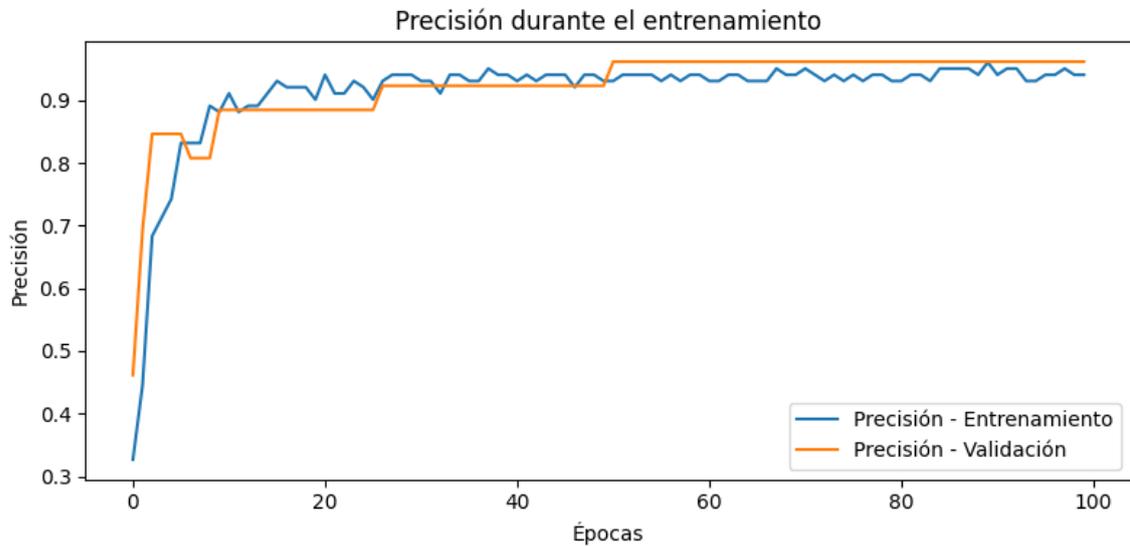
```

# Visualizar curvas de entrenamiento
plt.plot(history.history['accuracy'], label='Precisión - Entrenamiento')
plt.plot(history.history['val_accuracy'], label='Precisión - Validación')
plt.title('Precisión durante el entrenamiento')
plt.xlabel('Épocas')
plt.ylabel('Precisión')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()

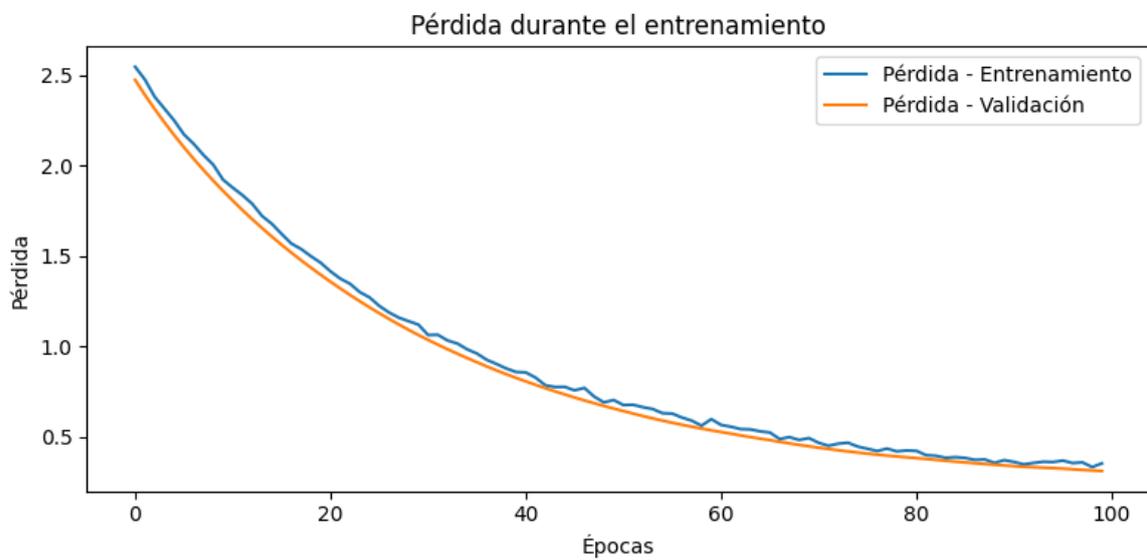
plt.figure(figsize=(8, 4))
plt.plot(history.history['loss'], label='Pérdida - Entrenamiento')
plt.plot(history.history['val_loss'], label='Pérdida - Validación')
plt.title('Pérdida durante el entrenamiento')
plt.xlabel('Épocas')
plt.ylabel('Pérdida')
plt.legend()
plt.tight_layout()

```

```
plt.show()
```



**Fig. 44 Precisión durante el entrenamiento**



**Fig. 45 Pérdida durante el entrenamiento**

### 3.9. PREGUNTAS

- ¿Qué es la inteligencia artificial y para qué se usa en la medicina?
- ¿Cómo se diferencia una IA que reconoce imágenes de una IA que predice valores numéricos?

- ¿Cuál es el propósito de la red neuronal utilizada en el código?
- ¿Qué es una matriz de confusión y cómo nos ayuda a evaluar un modelo?

### **3.10. CONCLUSIONES**

Al menos 3 conclusiones en viñetas:

- Conclusión 1
- Conclusión 2
- Conclusión 3

### **3.11. RECOMENDACIONES**

Al menos 3 recomendaciones en viñetas:

- Recomendación 1
- Recomendación 2
- Recomendación 3

## **RESULTADOS ESPERADOS**

Presente un reporte que incluya lo siguiente:

1. Caratula
2. Resumen
3. Objetivos generales y específicos de la práctica
4. Capturas de pantalla
5. Código utilizado
  - a. Precisión del modelo
  - b. Optimización del modelo
6. Análisis de resultados
7. Preguntas
8. Interpretabilidad de la Red Neuronal
9. Respuestas a las preguntas presentadas
10. Conclusiones y Recomendaciones.

## ANEXO C:

### RÚBRICAS DE EVALUACIÓN

#### LABORATORIO PPG

Valoración	Observaciones	NIVELES			
		EXCELENTE	DESARROLLADO	EN DESARROLLO	INICIAL
5	<b>Resumen</b>	Realiza una síntesis integral y consistente del reporte, escrito en tiempo pasado impersonal y bien redactado, incluyendo: objetivos, alcance, método, principales resultados y conclusiones importantes. Entre 10 a 15 líneas. 5 puntos.	Realiza una síntesis integral y consistente del reporte, pero o no lo ha escrito en tiempo pasado impersonal completamente, o ha olvidado incluir al menos uno de los cinco puntos a mencionar (objetivos, alcance, método, principales resultados y conclusiones importantes) 4 puntos.	Realiza una síntesis del reporte, aunque menciona temas que no son necesarios incluir y la información importante es insuficiente. La redacción podría mejorarse, no usa tiempo pasado impersonal y ha olvidado incluir al menos tres de los cinco puntos a mencionar (objetivos, alcance, método, principales resultados y conclusiones importantes) 2 puntos.	Presenta resumen, pero o este es muy corto (5 o menos líneas), o no ha incluido la mayoría de los puntos a mencionar (objetivos, alcance, método, principales resultados y conclusiones importantes). Adicionalmente no usa tiempo pasado impersonal y tiene problemas de redacción. 1 puntos.
5	<b>Captura de pantalla de diagramas de bloques, configuración de bloques y otras herramientas.</b>	Presenta todas las capturas requeridas, con diagramas correctamente conectados y ordenados, con bloques y señales etiquetados notas adicionales, uso de colores en bloques para distinguirlos. Bloques configurados de forma correcta y ordenada, con notas indicativas cuando aplique. 5 puntos.	Presenta todas las capturas requeridas, con diagramas correctamente conectados y ordenados con bloques y señales etiquetados. Bloques configurados de forma correcta y ordenada. O presenta capturas de nivel excelente pero falta al menos una captura requerida. 4 puntos.	Presenta todas las capturas requeridas, con conexiones y bloques desordenados y no etiquetados, con cruces y extensiones de conexiones evitables e innecesarios. Al menos un bloque configurado incorrectamente. O presenta capturas de nivel excelente/desarrollado, pero faltan al menos la mitad de las	Presenta las capturas requeridas, pero los diagramas tienen conexiones incorrectas e inconsistentes, con conexiones y bloques desordenados y no etiquetados. Más de la mitad de los bloques están mal configurados o no se han colocado. O ha presentado menos del 25% de las capturas requeridas a nivel excelente/desarrollado.

				requeridas. <b>2 puntos.</b>	<b>1 punto.</b> En caso de falta o copia: <b>0 puntos.</b>
<b>10</b>	<b>Gráficas y tablas de resultados.</b>	Se han realizado todas las gráficas correctamente, incluyendo adecuado rotulado de ejes con variable y unidades, título, y pie de gráfico, organizadas correctamente, haciendo uso de diferentes colores y formas de punto de dato cuando se tengan más de una curva en una sola gráfica. Las tablas tienen datos correctos y ordenados, con cabeceras de columnas etiquetadas con sus variables y unidades y pie de tabla. <b>10 puntos.</b>	Se han realizado todas las gráficas correctamente, pero olvida incluir al menos una de las siguientes características: adecuado rotulado de ejes con variable y unidades, título, y pie de gráfico, uso de diferentes colores/formas de punto de datos en gráficas de más de una curva, correcta organización. Las tablas tienen datos correctos y ordenados, olvida etiquetar las cabeceras de columnas etiquetadas con sus variables y unidades o el pie de tabla. O lo presentado es de nivel excelente pero falta al menos una de las gráficas o tablas requeridas. <b>8 puntos.</b>	Se han realizado todas las gráficas correctamente, pero solo cumple con una de las siguientes características: adecuado rotulado de ejes con variable y unidades, título, y pie de gráfico, uso de diferentes colores/formas de punto de datos en gráficas de más de una curva, correcta organización. Las tablas tienen datos correctos, pero sin etiquetas o pie de tabla. O lo presentado es de nivel excelente o desarrollado, pero faltan al menos la mitad de las gráficas y tablas requeridas. <b>6 puntos.</b>	Las gráficas presentan datos incorrectos, sin rotulado de ejes, títulos, pie de gráfico, etc. las tablas tienen datos incorrectos, sin etiquetas o pie de tabla. o lo presentado es de nivel desarrollado/en desarrollo, pero faltan más del 50% de las gráficas y tablas requeridas. <b>2 puntos.</b> En caso de copia o falta total. <b>0 puntos.</b>
<b>20</b>	<b>Preguntas de las guías correctamente contestadas.</b>	Todas las preguntas se han contestado y las respuestas son correctas. <b>20 puntos.</b>	Se han contestado las preguntas, pero una o más respuestas son incorrectas. <b>15 puntos.</b>	Al menos la mitad de las preguntas están mal contestadas o no han sido presentadas. <b>10 puntos.</b>	Más del 75% de las preguntas están mal contestadas o no han sido presentadas. <b>5 puntos</b> Reprobado/Plagio; No se han contestado las preguntas o se ha realizado plagio en el reporte. <b>0 puntos.</b>
<b>30</b>	<b>Análisis</b>	Sintetiza datos y proporciona un análisis e interpretación adecuados de los datos medidos / recopilados, tomando en cuenta lo visto en las clases teóricas, método, equipos, instrumentación, etc.	Sintetiza datos y proporciona un análisis e interpretación adecuados de los datos medidos / recopilados, tomando en cuenta lo visto en las clases teóricas, método, equipos, instrumentación, etc.	Sintetiza datos, pero el análisis o la interpretación son incompletos, muy breves o insuficientes. O no son completamente precisos/parcialmente incorrectos (no están bien respaldados por	Sintetiza los datos medidos / recopilados, pero no los analiza ni los interpreta (se limita a enunciar/mencionar los resultados). O el análisis es completamente incorrecto, o extremadamente corto.

		Además, incluye análisis relevantes adicionales o establece comparaciones/vínculos con resultados disponibles en la literatura científica o de ingeniería correctamente citados. <b>30 puntos.</b>	Sin herramientas estadísticas ni comparaciones o vínculos con resultados disponibles en la literatura científica o de ingeniería. <b>24 puntos.</b>	los datos medidos/recopilados). <b>16 puntos.</b>	<b>8 puntos.</b> <b>Si hubo plagio en esta sección la nota DE TODO EL REPORTE será de 0 puntos.</b>
<b>15</b>	<b>Conclusiones</b>	Extrae al menos 3 conclusiones basadas en juicios de ingeniería, es decir, las conclusiones están correctamente respaldadas por principios, estándares y prácticas científicas / de ingeniería apropiados. Además, identifica e informa sobre limitaciones de lo que se puede interpretar a partir de los datos obtenidos. <b>15 puntos.</b>	Extrae conclusiones basadas en juicios de ingeniería, es decir, las conclusiones están correctamente respaldadas por principios, estándares y prácticas científicas o de ingeniería apropiadas, sin considerar las limitaciones de los datos obtenidos. O solo presenta 2 conclusiones que cumplen con criterios de excelencia. <b>12 puntos.</b>	Saca conclusiones, pero aplica incorrectamente el juicio de ingeniería, es decir, las conclusiones no están totalmente respaldadas por principios, estándares y prácticas científicas o de ingeniería apropiadas. O solo presenta 1 conclusión que cumple con criterios de excelencia. <b>8 puntos.</b>	No saca conclusiones o no usa el juicio de ingeniería para sacarlas. Poca o nula relación con el análisis de resultados. <b>4 puntos.</b> <b>Si hubo plagio en esta sección la nota DE TODO EL REPORTE será de 0 puntos.</b>
<b>15</b>	<b>Recomendaciones</b>	Elabora al menos 3 recomendaciones relevantes, en las que se proponen mejoras o soluciones para problemas relacionados con limitaciones del equipo o el procedimiento. <b>15 puntos.</b>	O presenta solo 2 recomendaciones relevantes que cumplen con los requisitos de excelencia. O presenta las 3 pero con problemas de redacción, o al menos una es una recomendación ya dada en la guía o clase, o es irrelevante a la práctica. <b>12 puntos.</b>	O solo presenta 1 recomendación que cumple con los requisitos de excelencia. O presenta las 3 pero son genéricas (similares a las ya dadas en la guía o clase) y con problemas de redacción. <b>8 puntos.</b>	Las recomendaciones guardan poca o nula relación con la práctica, o son todas recomendaciones ya dadas en la guía o clase, no se ha tomado en cuenta problemas del procedimiento o equipo. <b>4 puntos.</b> <b>Si hubo plagio en esta sección la nota DE TODO EL REPORTE será de 0 puntos.</b>
<b>100</b>					

## LABORATORIO FILTROS

Valoración	Observaciones	NIVELES			
		EXCELENTE	DESARROLLADO	EN DESARROLLO	INICIAL
20	Filtro pasa alto	Explica con precisión su funcionamiento, ecuaciones y aplicaciones prácticas. <b>20 puntos</b>	Explica su funcionamiento, pero con algunos errores menores. <b>15 puntos</b>	Presenta una descripción general sin detalles técnicos claros. <b>10 puntos</b>	No comprende o describe incorrectamente el filtro. <b>5 puntos</b>
20	Filtro pasa bajo	Explica con precisión su funcionamiento, ecuaciones y aplicaciones prácticas. <b>20 puntos</b>	Explica su funcionamiento, pero con algunos errores menores. <b>15 puntos</b>	Presenta una descripción general sin detalles técnicos claros. <b>10 puntos</b>	No comprende o describe incorrectamente el filtro. <b>5 puntos</b>
20	Filtro pasa banda	Describe correctamente su principio de operación, ecuaciones y aplicaciones. <b>20 puntos</b>	Explica su funcionamiento con errores menores. <b>15 puntos</b>	Muestra una comprensión limitada del concepto. <b>10 puntos</b>	No comprende o describe incorrectamente el filtro. <b>5 puntos</b>

<b>10</b>	<b>Cambio de componentes electrónicos</b>	Realiza cambios adecuados en los componentes para modificar el filtro correctamente. <b>10 puntos</b>	Modifica componentes con algunas imprecisiones en su selección. <b>8 puntos</b>	Realiza cambios, pero sin una justificación clara o errónea. <b>5 puntos</b>	No logra modificar los componentes adecuadamente. <b>2 puntos</b>
<b>20</b>	<b>Simulación de filtros</b>	Usa correctamente software de simulación, interpreta resultados con precisión. <b>20 puntos</b>	Usa simulación, pero con algunos errores en la interpretación. <b>16 puntos</b>	Presenta simulaciones sin análisis adecuado. <b>10 puntos</b>	No usa simulación o presenta errores graves en su ejecución. <b>5 puntos</b>
<b>10</b>	<b>Aplicaciones prácticas</b>	Relaciona los filtros con casos reales, explicando sus aplicaciones y ventajas. <b>10 puntos</b>	Identifica aplicaciones, pero con explicaciones limitadas. <b>8 puntos</b>	Muestra poca relación con aplicaciones prácticas. <b>5 puntos</b>	No identifica aplicaciones prácticas de los filtros. <b>2 puntos</b>
<b>100</b>					

## LABORATORIO INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Valoración	Criterio	Observaciones	NIVELES			
			EXCELENTE	DESARROLLADO	EN DESARROLLO	INICIAL
25	PRECISIÓN DEL MODELO	Métricas de desempeño como F1 score, curvas de aprendizaje, accuracy	Precisión superior al 95% con alta sensibilidad y especificidad <b>25 puntos.</b>	Precisión entre 90% y 95%, con resultados consistentes. <b>20 puntos.</b>	Precisión entre 80% y 90%, pero con margen de mejora en sensibilidad o especificidad. <b>15 puntos.</b>	Precisión inferior al 80%, con resultados inconsistentes. <b>10 puntos.</b>
		Programación				
25	OPTIMIZACIÓN	Optimizar el modelo para obtener mejoras.	Uso eficiente de recursos computacionales y tiempos de entrenamiento mínimos (excelente escalabilidad). <b>25 puntos.</b>	El modelo está optimizado, pero requiere más recursos o tiempo que lo ideal. <b>20 puntos.</b>	Optimización limitada; tiempos de entrenamiento largos o uso excesivo de recursos. <b>15 puntos.</b>	No se ha optimizado; uso ineficiente de recursos computacionales. <b>10 puntos</b>
		INTERPRETABILIDAD	Interpretación del modelo de Red Neuronal Artificial	Resultados bien explicados con análisis detallado de las características relevantes del PPG. <b>25 puntos.</b>	Se interpretan correctamente los resultados, pero se necesitan detalles adicionales. <b>20 puntos.</b>	Interpretación básica; faltan análisis o conclusiones claras. <b>15 puntos.</b>
	Resultados					

25	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	Conclusiones sobre el modelo implementado	Conclusiones claras y bien fundamentadas; incluye recomendaciones viables y relevantes para mejorar el modelo. <b>25 puntos.</b>	Conclusiones claras pero con recomendaciones generales o poco específicas. <b>20 puntos.</b>	Conclusiones limitadas o superficiales; recomendaciones vagas. <b>15 puntos.</b>	Conclusiones confusas o incompletas, sin recomendaciones. <b>10 puntos.</b>
100						

