



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO:  
CIRCUITOS DIDÁCTICOS PARA ELECTRÓNICA  
BIOMÉDICA

Autor: Juan Ramírez-Montesinos Furones

Director: Romano Giannetti

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Circuitos didácticos para la electrónica biomédica

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2023/2024 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Juan Ramírez-Montesinos Furones

Fecha:05/07/2024

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**



Fdo.: Romano Giannetti

Fecha: 7 / 7 / 2024





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS  
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO  
CIRCUITOS DIDÁCTICOS PARA LA ELCTRÓNICA  
BIOMÉDICA

Autor: Juan Ramírez-Montesinos Furones

Director: Romano Giannetti

Madrid



# CIRCUITOS DIDÁCTICOS PARA LA ELECTRÓNICA BIOMÉDICA

**Autor: Ramírez-Montesinos Furones, Juan.**

Director: Giannetti, Romano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto se ha basado en el diseño de dos circuitos para realizar las técnicas de electromiografía y fotopleletismografía y explicarlas de manera didáctica. Con ello se ha ido buscando obtener la mejor señal y se han realizado comparaciones que ayuden, en un futuro, al entendimiento y la fácil realización de estas dos técnicas mediante circuitos realizados en el laboratorio.

**Palabras clave:** Didáctica, electromiografía, fotopleletismografía, circuitos.

### 1. Introducción

La electrónica e instrumentación biomédica se ocupa principalmente del diseño y la implementación de los circuitos para que técnicas como la electromiografía (técnica usada para evaluar la salud de los músculos y las neuronas motoras que los controlan, mediante la disposición de electrodos en la piel[2][3]) y la fotopleletismografía (técnica usada para medir el pulso cardíaco en el dedo gracias a una luz led y un fotosensor[4]) se puedan llevar a cabo de manera correcta y obteniendo los mejores resultados posibles. En este proyecto fin de carrera, se busca realizar el diseño de los circuitos para conseguir aplicar de manera efectiva estas dos técnicas mediante los recursos que ofrecía la universidad en los laboratorios. Además de diseñar los circuitos, con la obtención de las señales, se ha realizado un análisis de estos resultados con el que se ha llegado a conclusiones. Estas conclusiones ayudarán a tener en cuenta detalles para el mejor diseño posible de estos circuitos, y con ello, una mejor explicación de manera didáctica que ayude a comprenderlos mejor.

### 2. Definición y descripción del Proyecto

Como se ha descrito anteriormente, el trabajo se divide en dos partes, cada una centrada en una técnica. Para cada una de estas partes se ha diseñado un circuito que luego se ha ido probando y mejorando para ver los fallos que podía tener ese diseño. Después de tener el circuito y habiendo tomado bien las señales necesarias, se ha realizado un análisis de los resultados. En este trabajo no ha habido parte de simulación, ya que las pruebas de diseño se realizaban en el laboratorio directamente.

La parte de electromiografía se realiza gracias a tres electrodos superficiales que van pegados a la piel. Uno hace la función de tierra y los otros dos de entradas de tensión positiva y negativa. Mediante un filtro paso alto se conecta cada una de las entradas a un amplificador INA826, con lo que se obtiene la primera señal deseada. Después de eso, se usará un filtro Notch a 50 Hz para poder quitar el ruido generado por la red eléctrica europea y seguido de un amplificador de ganancia para poder observar la señal de una manera más visible y fácil.

Por otro lado, el circuito de la fotopleletismografía conllevó más trabajo, mediante el uso de un led y un fotosensor, se consiguió medir el pulso cardíaco gracias a los cambios de volumen en la sangre que pasaba por el dedo. Con esa señal, filtrándola y amplificándola de manera que se quitara todo el posible ruido de la luz natural y artificial de la sala, se consiguió

un resultado con el que se veía el pulso y se realizó un posterior análisis. En ese análisis, se comparan los resultados de tres leds de diferentes colores usados para analizar cuál es el más efectivo para medir el pulso. Además, para cada uno de los leds usados, se necesita un sensor determinado.

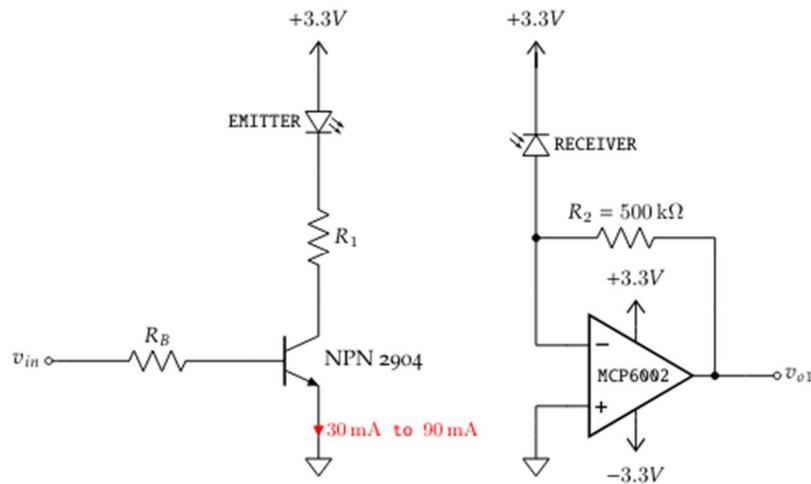


Ilustración 1: Diseño inicial fotoplethysmografía[21]

### 3. Resultados

Los resultados obtenidos en la parte de la electromiografía, se han basado únicamente en las señales obtenidas del osciloscopio. Después de realizar distintas pruebas a la hora de diseñar cada etapa del circuito, se obtuvieron unos resultados con distintas posibilidades de análisis cada uno. En un principio se probó lo que podría resultar con o sin el electrodo que ejercía de conexión a tierra, observando que afectaba en gran parte al ruido que llegaba al final del circuito. Además, por otro lado, se observó que al aplicar el filtro Notch se obtenía una señal mucho más limpia y fácil de leer, lo que facilitaba su análisis. Hay que tener en cuenta que para todas las señales de esta prueba se han colocado los electrodos en la disposición para medir los músculos del pulgar de la mano izquierda. Se podrían haber puesto con otra disposición para medir otro tipo de señales. Al existir el posible error humano, la disposición de los electrodos a lo largo de los diferentes días puede variar haciendo pequeñas modificaciones en las señales.

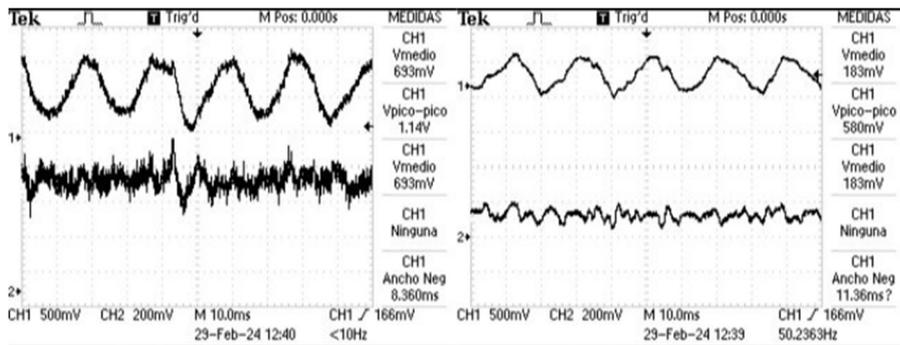


Ilustración 2: Señal electromiografía sin tierra(izquierda) y con tierra(derecha)

Por otro lado, los resultados de la técnica de fotopleletismografía se han analizado también en MATLAB buscando toda la información posible de la señal. Se han contrastado los tres colores diferentes usados como led emisor y se ha llegado a la conclusión de cuál era el más efectivo a la hora de medir el pulso. Para cada color de led se ha modificado el circuito para que se adaptase de la mejor manera posible a la señal buscada. De la misma forma que en el caso anterior, las señales se han visto afectadas por el ruido lumínico de la sala dependiendo del día y por la posición distinta del dedo en cada muestra. Pero gracias al diseño del circuito se ha podido reducir cómo afectaban esas variables y se han obtenido señales con las que se ha podido realizar un buen análisis.

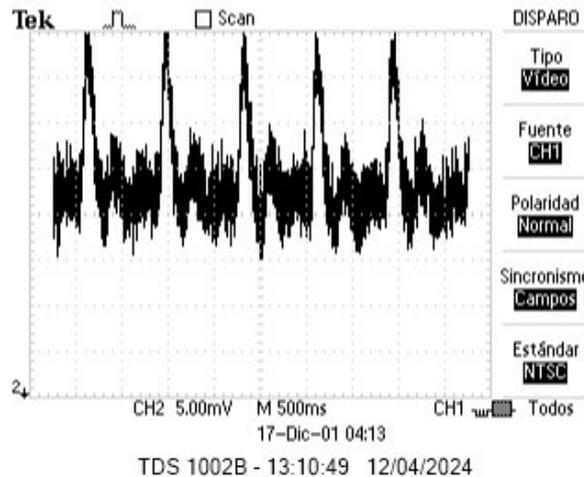


Ilustración 3 : Señal osciloscopio fotopleletismografía con led rojo

#### 4. Conclusiones

En este proyecto se ha observado cómo el efecto tanto del operador como de las circunstancias de la sala afectan a los resultados y por medio del diseño se ha conseguido que afecten de la menor manera posible. Siendo el objetivo último explicar de manera didáctica estas técnicas y diseños, la conclusión principal es que el diseño es esencial y, por tanto, un buen diseño acompañado de los medios ideales puede resultar en la mejor obtención de señales y que faciliten el posterior análisis.

# DIDACTIC CIRCUITS FOR ELECTRONIC BIOINSTRUMENTATION

**Author: Ramírez-Montesinos Furones, Juan.**

Supervisor: Giannetti, Romano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## ABSTRACT

The project has been based on the design of two circuits to perform the techniques of electromyography and photoplethysmography and their explanation a didactic way. In doing so, the best signal has been sought and comparisons have been made to help, in the future, the understanding and easy realization of these two techniques by means of circuits made in the laboratory

**Keywords:** electromyography, photoplethysmography, didactic, circuits.

## 1. Introduction

Electronics and biomedical instrumentation are mostly focused on the design and implementation of circuits so that techniques such as electromyography (a technique used to evaluate the health of the muscles and motor neurons that control them, by placing electrodes in the skin[2][3]) and photoplethysmography (a technique used to measure the heart rate in the finger thanks to a led light and a photosensor[4]) can be performed correctly and obtaining the best possible results. In this end-of-career project, the design of the circuits is sought to effectively apply these two techniques through the resources offered by the university in the laboratories. In addition to designing the circuits, with the signals, an analysis of these results has been carried out and conclusions have been reached. These conclusions will help to consider details for the best possible design of these circuits, and with this, a better explanation in a didactic way that will helps to understand them better.

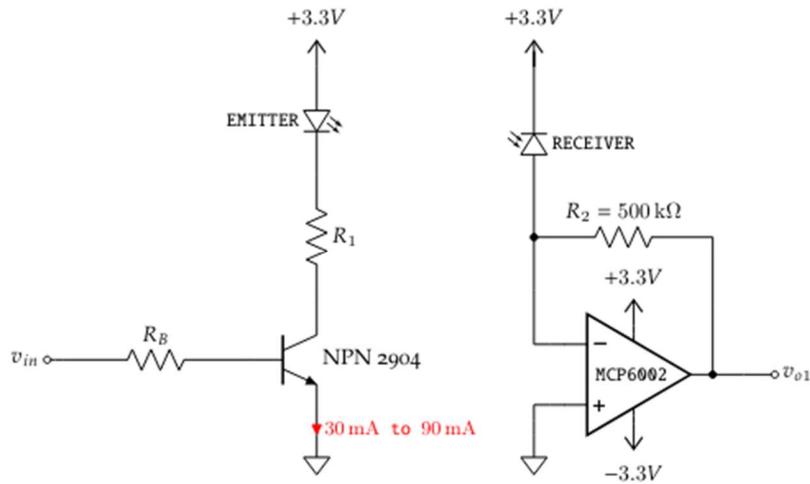
## 2. Project definition and description

As described above, the work is divided into two parts, each one focused on a technique. For each of these parts, a circuit has been designed and has then been tested and improved to see the flaws that could have that design. After having the circuit and getting the necessary signals, an analysis of the results has been carried out. In this work there has been no part of simulation, as the design tests were carried out in the laboratory directly.

The electromyography part is done thanks to superficial electrodes that are stuck to the skin. One does the function of being the ground of the circuit and the other two of positive and negative voltage inputs. Through a high step filter, each of the inputs is connected to the same INA826 amplifier, with which the first desired signal is obtained. After that, a Notch filter at 50 Hz will be used to remove the noise generated by the European power grid and followed by a gain amplifier to be able to observe the signal in a more clear and easy way.

On the other hand, the photoplethysmography circuit involved more work, using a led and a photosensor, it was possible to measure the heart rate thanks to the volume changes in the blood passing through the finger. After filtering the signal and amplifying it in a way that all possible noise from the natural and artificial light of the room was removed, a result was

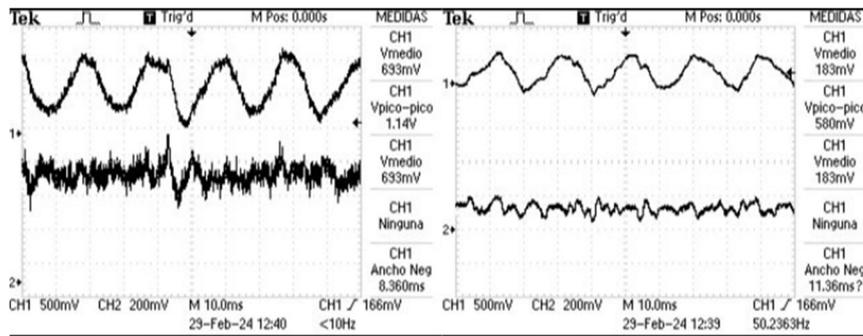
obtained with which the pulse was noted, and a subsequent analysis was carried out. In that analysis, the results of three leds of different colours are compared to analyse which of them is the most effective to measure the pulse. In addition, for each of the leds used, a specific sensor is required.



*Illustration 1: Initial photoplethysmography design[21]*

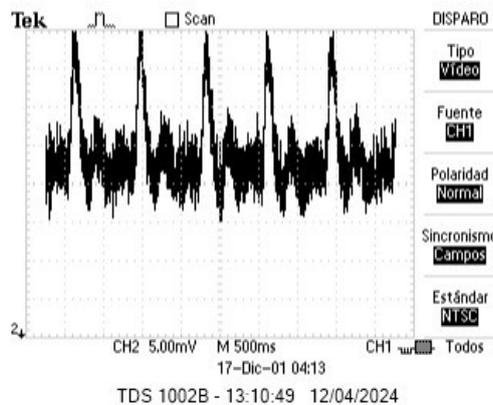
### 3. Results

The results obtained in the part of the electromyography, have been based on the signals received from the oscilloscope. After performing different tests while designing each stage of the circuit, results were obtained with different possibilities of analysis. At first it was tested what could result with or without the electrode that worked as a ground connection, noting that it affected largely the noise that appeared at the end of the circuit. Furthermore, it was observed that the application of the Notch filter produced a much cleaner and easier to read signal, which facilitated the analysis. It should be noted that for all the signals of this test, electrodes have been placed in the position to measure the muscles of the thumb of the left hand. There could have been a different arrangement for measuring other types of signals. As there is a possible human error, the arrangement of the electrodes over the different days can make small variations in the signals.



*Illustration 2: Electromyography signal with ground electrode (right) and without the ground electrode (left)*

On the other hand, the results of the photoplethysmography technique have also been analysed in MATLAB, looking for all possible information of the signal. The three different colours used as emitter led have been compared and the conclusion has been reached, deciding which was the most effective led when measuring the pulse. For each led colour the circuit has been modified to adapt as best as possible to the desired signal. In the same way as in the previous case, the signals have been affected by the noise generate by the light of the room depending on the day and by the different position of the finger in each sample. But thanks to the design of the circuit, it has been possible to reduce how these variables affected, and signals have been obtained to, at the end, make a good analysis.



*Illustration 3: Oscilloscope signal for red led in photoplethysmography*

#### 4. Conclusions

In this project, it has been observed how the effect of both the operator and the circumstances of the room affects the results, and through the design it has been possible to reduce how they affect the signal. As the principal objective is to explain these techniques and designs in a didactic way, the main conclusion is that design is essential and, therefore, a good design accompanied by the ideal means can result in the better obtaining of signals that would facilitate the subsequent analysis.

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
1.1 Motivación del proyecto.....	6
<b>Capítulo 2. Estado de la Cuestión.....</b>	<b>8</b>
2.1 Evolución de la enseñanza de electrónica biomédica y metodologías didácticas .....	8
2.2 Importancia de las señales biomédicas.....	9
2.3 Fundamentos electromiografía .....	9
2.4 Fundamentos fotopletismografía .....	10
2.5 Aplicación y relación con este trabajo.....	11
2.6 Alineación del trabajo con los ODS .....	12
<b>Capítulo 3. Definición del Trabajo .....</b>	<b>14</b>
3.1 Justificación.....	14
3.1.1 Electromiografía (EMG) .....	14
3.1.2 Fotopletismografía (PPG).....	16
3.2 Objetivos .....	16
<b>Capítulo 4. Diseño y Procesado EMG .....</b>	<b>18</b>
4.1 Diseño General.....	18
4.2 Filtro Paso Alto .....	19
4.3 Amplificador INA 826 .....	20
4.4 Filtro Notch 50Hz.....	23
4.5 Implementación.....	24
<b>Capítulo 5. Análisis Resultados EMG .....</b>	<b>26</b>
<b>Capítulo 6. Diseño y Procesado Fotopletismografía.....</b>	<b>30</b>
6.1 Diseño general.....	30
6.2 Led.....	31
6.3 Circuito Diodo Receptor .....	33
6.4 Filtro Paso Banda .....	36

6.5	Amplificador de ganancia .....	40
6.6	Implementación.....	41
<b>Capítulo 7. Análisis de Resultados PPG.....</b>		<b>42</b>
7.1	Led Rojo.....	45
7.2	Led Verde.....	47
7.3	Led Infrarrojo .....	50
<b>Capítulo 8. Conclusiones y Trabajos Futuros.....</b>		<b>53</b>
8.1	Trabajos Futuros Y Planificación Económica.....	53
8.2	Conclusiones .....	54
8.2.1	Conclusiones Electromiografía.....	54
8.2.2	Conclusiones Fotopletismografía.....	55
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>57</b>

## *Índice de figuras*

Ilustración 1: Diseño inicial fotopleletismografía .....	8
Ilustración 2: Señal electromiografía sin tierra(izquierda) y con tierra(derecha).....	9
Ilustración 3 : Señal osciloscopio fotopleletismografía con led rojo .....	9
Ilustración 4 : Esquema sístole y diástole [15].....	11
Ilustración 5 : ODS número 3.....	12
Ilustración 6 : ODS número 4.....	13
Ilustración 7 : Resultados de electromiografía reales de diferentes músculos [17].....	15
Ilustración 8 : Imagen del diseño general de electromiografía.....	18
Ilustración 9 : Filtro paso alto EMG.....	20
Ilustración 10 : Distribución Pines INA826 [19] .....	21
Ilustración 11 : Esquema alimentación amplificador INA826 .....	22
Ilustración 12 : Filtro Notch utilizado en EMG.....	23
Ilustración 13: Comparación dos capturas osciloscopio con y sin tierra de señales tomadas antes y después del filtro Notch.....	24
Ilustración 14: Comparación dos señales a la salida del amplificador INA826 (Izquierda brazo relajado, derecha haciendo fuerza) .....	26
Ilustración 15: Comparación dos capturas osciloscopio con y sin tierra de señales tomadas antes y después del filtro Notch.....	27
Ilustración 16: Comparación EMG sin fuerza (izquierda) y con fuerza (derecha) .....	28
Ilustración 17 : Esquema circuito fotopleletismografía.....	30
Ilustración 18 : Esquema circuito led emisor .....	33
Ilustración 19 : Diseño Circuito Receptor .....	33
Ilustración 20 : Distribución de pines del MCP 6002 [22].....	34
Ilustración 21: Esquema filtro paso alto [26] .....	38
Ilustración 22: Esquema filtro paso bajo [26] .....	39
Ilustración 23 : Circuito Paso Banda 0.5Hz-20Hz .....	40
Ilustración 24 : Esquema circuito amplificador.....	41
Ilustración 25 : Señal de led rojo .....	42

Ilustración 26 : Señal de Led infrarrojo .....	43
Ilustración 27 : Señal de led verde .....	43
Ilustración 28 : Ejemplo de como deberían ser las señales de PPG (perfecta, contaminada y filtrada) [23].....	44
Ilustración 29 : Comparación señal osciloscopio y MATLAB led rojo.....	45
Ilustración 30 : Espectro de frecuencias del led rojo.....	46
Ilustración 31 : Señal led rojo después del filtro paso banda(eje x tiempo, eje y amplitud) .....	47
Ilustración 32 :Comparación señal osciloscopio y MATLAB led verde.....	48
Ilustración 33 : Espectro de frecuencias del led verde.....	49
Ilustración 34 : Señal led verde después del filtro paso banda(eje x tiempo, eje y amplitud) .....	49
Ilustración 35 : Comparación señal osciloscopio y MATLAB led infrarrojo.....	50
Ilustración 36 : Espectro de frecuencias led infrarrojo .....	51
Ilustración 37 : Señal led infrarrojo después del filtro paso banda .....	52

## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La electrónica e instrumentación biomédica es la rama de la ingeniería electrónica que se ocupa del desarrollo de dispositivos y sistemas electrónicos para la aplicación en la medicina y la biología. [1] Forma parte de todos los instrumentos que se ven en el día a día en los hospitales. Algunas de las señales medibles más importantes están en la sangre y en los músculos, es en estas señales en las que se centrará el trabajo. Se han elegido debido a que a la hora de su obtención no son las más complejas y pueden ser un buen inicio para la comprensión del diseño de circuitos con finalidades biomédicas. Al elegir estas señales, el trabajo se centra en realizar un desarrollo de la manera más didáctica posible y que facilite la comprensión a la hora del diseño de los circuitos para realizar una electromiografía y una fotopleletismografía. Siendo otro objetivo a su vez la posibilidad de analizar estas señales tomadas en el laboratorio.

La electromiografía es un procedimiento de diagnóstico que consiste en la disposición de electrodos en los músculos para qué, mediante la actividad eléctrica, se pueda evaluar la salud de ellos y las neuronas motoras que los controlan. [2] Las neuronas motoras transmiten señales eléctricas que hacen que los músculos se contraigan, y los electrodos sirven para traducir estas señales en entradas del circuito [3]. Esta técnica también se usa en otros campos de la medicina como la fisiología, la rehabilitación y la kinesiología. Para la realización de esta técnica existen distintos tipos de electrodos; en este proyecto solo se tendrán en cuenta dos, superficiales e intramusculares. Los intramusculares suelen consistir en una aguja. Son insertados directamente en el músculo y cuentan con una mayor precisión en la detección de la actividad de unidades motoras individuales, además de proporcionar una señal más clara y en la que interfieren menos los músculos colindantes. Por otro lado, los electrodos superficiales se caracterizan por adherirse a la piel y proporcionan un área más grande de trabajo. Son utilizados por su fácil movilidad y recolocación, teniendo como consecuencia el posible ruido que se genera por su menor precisión. Estos son los que se usarán en los ensayos de laboratorio correspondientes a este trabajo.

La fotopleletismografía es una técnica óptica no invasiva (el dispositivo que emite la luz no se introduce en el cuerpo y no afecta tejidos musculares) de bajo coste utilizada para medir cambios en el volumen de la sangre en alguna parte determinada del cuerpo humano. [4] Algunas de las partes donde mejor se puede medir esto y que más se suelen utilizar son: el dedo (parte en base a la cual se realiza esta parte del trabajo), el lóbulo de la oreja (debido a que la oreja es delgada y tiene una gran cantidad de vasos sanguíneos), en la muñeca (debido a que la arteria radial está muy próxima a la piel y hay vasos sanguíneos más grandes) y por último la sien [5]. La técnica consiste en la utilización de un diodo led y un fotosensor para observar cómo varía la absorción de luz cuando cambia el flujo en la sangre, con lo que se puede medir, entre otras cosas, el pulso cardíaco. En este estudio, se trabajará con leds de

diferentes colores, y diferentes tipos de sensores dependiendo del led. Lo que servirá para comparar señales y sacar conclusiones del mejor diseño de circuito. [6]

## ***1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO***

La motivación a realizar este trabajo surge del interés que se ha desarrollado en mi persona desde que empecé a estudiar esta carrera por la posible aplicación a la ayuda a los demás. Una de las cosas que más me atrae es el poder aplicar la tecnología de una manera que solucione problemas que pueden estar presentes en la vida. Una de las mayores fuentes de problemas en las personas es la salud, y el realizar el trabajo centrado en la electrónica e instrumentación biomédica me parece que es un buen primer paso para familiarizarme más con este mundo que me atrae pero que sigue siendo algo desconocido para mí. Si hoy tuviese que elegir a qué dedicarme como ingeniero, creo que una de las primeras opciones sería poder aplicar mi especialización a algo relacionado con las prótesis biónicas. Es un gran paso desde este trabajo hasta eso, pero por algún punto hay que empezar y pienso que esto me ayudará a entender mejor el cuerpo humano desde una visión más técnica y relacionada con la electrónica para que en un futuro si es posible, poder dedicarme a ello.

Esto es más en cuanto a la motivación personal por la que seleccioné el trabajo pero también hay una motivación más técnica. Se van a intentar solucionar los problemas que hayan podido surgir con el diseño de los circuitos y explicar de una forma didáctica cómo se han ido tomando las diferentes decisiones. Todo esto siempre dentro de las herramientas que proporciona la universidad y gracias a lo aprendido durante el grado, además de un trabajo de investigación. Se buscará conseguir así la medición de señales mediante electromiografías, por un lado, buscando el diseño óptimo para que las señales se vean con el menor ruido posible y faciliten su estudio. Y, por otro lado, conseguir también medir el pulso cardíaco de una persona gracias al propio diseño del circuito, realizando el mismo análisis y procedimiento que con la otra práctica. Por último, otro de los objetivos y motivaciones es que, después de realizar estas pruebas y prácticas, se presenten de una

manera que sean de fácil entendimiento para los posibles alumnos que cursen la asignatura de electrónica e instrumentación biomédica.

## **Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

En este trabajo se busca conseguir replicar los dispositivos usados en la electrónica biomédica mediante circuitos que puedan ser realizados en un laboratorio de la universidad. Mediante dos prácticas de laboratorio que se realizan en la asignatura de electrónica e instrumentación biomédica. Así se intentarán conseguir los mejores resultados posibles y los más parecidos a los dispositivos avanzados ya existentes en el mercado. Se busca comprender el diseño y así tener la capacidad de analizar los resultados.

### ***2.1 EVOLUCIÓN DE LA ENSEÑANZA DE ELECTRÓNICA BIOMÉDICA Y METODOLOGÍAS DIDÁCTICAS***

A lo largo de la historia, la enseñanza de la electrónica biomédica ha experimentado una transformación considerable, esto es debido a los avances tecnológicos que han aparecido en el sector sanitario. Siempre ha sido una disciplina basada en la teoría, pero con gran importancia en los laboratorios, con lo que ha ido evolucionando hacia un enfoque más práctico y centrado en el estudiante. Durante los últimos años, se han podido incorporar nuevas metodologías de trabajo gracias a simulaciones y experiencias de laboratorio inmersivas. [7]

Hasta la década de 1980 la enseñanza se impartía en aulas tradicionales y no se contaba con equipos sofisticados para realizar las prácticas de laboratorio, por lo que la asignatura se basaba en un enfoque más teórico. Además, había muchos menos avances tecnológicos. Durante las siguientes décadas, hasta los 2000, aparecieron las primeras simulaciones por computadora y software de análisis de datos, lo que permitía a los alumnos un avance más profundo en la práctica y poder comprender conceptos más complejos a la vez que visualizar fenómenos fisiológicos de manera interactiva. Ahora, con los avances electrónicos que hay, aparecen laboratorios virtuales y simulaciones más precisas que ayudan a tener mejores experiencias de aprendizaje sin riesgos. Como siguen existiendo retos del sector sanitario,

se espera que el sector de la electrónica e instrumentación biomédica siga mejorando y con ello la enseñanza de esta. [8] [9]

## ***2.2 IMPORTANCIA DE LAS SEÑALES BIOMÉDICAS***

Las señales obtenidas por la electrónica biomédica son fundamentales para el diagnóstico, tratamiento y estudios de enfermedades o anomalías. Como estas señales están generadas por los sistemas biológicos, nos aportan información valiosa sobre cómo funciona el cuerpo humano. [10]

Más concretamente, las señales biomédicas tienen mucha importancia en el tratamiento de enfermedades. En primer lugar, estas señales pueden servir como guías para la administración de medicamentos y terapias médicas, para poder analizar cuáles son los más efectivos basándonos en lo que se necesita en cada caso. También ayudarán a poder ver las reacciones que tiene un paciente a un tratamiento y así estudiar y ajustar la terapia como sea necesario [11]. Por último, algo que coincide con mi propia motivación en este proyecto, las señales ayudan al desarrollo de prótesis y dispositivos de asistencia que pueden mejorar la calidad de vida de los pacientes.

## ***2.3 FUNDAMENTOS ELECTROMIOGRAFÍA***

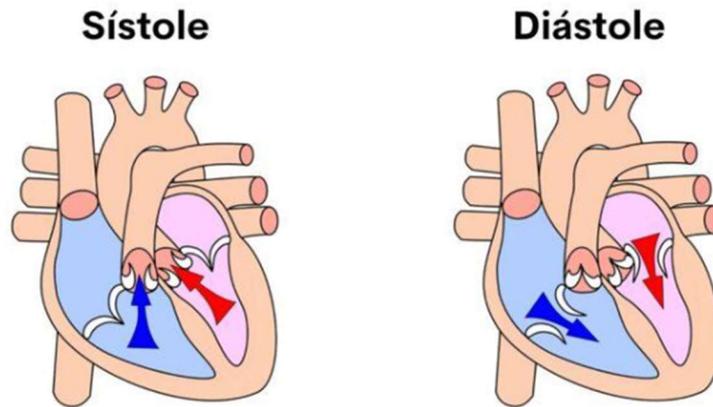
Como se ha explicado en la introducción, la electromiografía se basa en detectar y analizar la señal eléctrica que se genera cuando un músculo se contrae. Según se explica en el artículo de revisión de la revista Salud Uninorte llamado “Electromiografía en las ciencias de Rehabilitación”, [12] la señal recogida en la electromiografía se basa en los potenciales de acción de la fibra muscular que resultan de los procesos de despolarización y repolarización en la membrana celular. En el estudio de esta señal se destacan dos parámetros principales que son la amplitud y la frecuencia de la señal, mediante los cuales se pueden determinar el nivel de activación del músculo y el tiempo que demora en activarse respectivamente. Pero este trabajo, como se verá en la parte de análisis de resultados, se basará en la parte de amplitud de la onda. En general, la electromiografía se ha usado principalmente en la

rehabilitación, ya que ayuda a comprender las causas y posibles consecuencias de las lesiones. Por tanto, ayuda a orientar la planificación de los programas de entrenamiento muscular. [12]

## **2.4 FUNDAMENTOS FOTOPLETISMOGRAFÍA**

Esta técnica surge de la evolución del estudio de algunas técnicas de medición de cambios volumétricos en el cuerpo. En un principio se usaban métodos como la pletismografía de volumen de pulso y de anillos de mercurio, que se basaban en principios físicos de resistencia eléctrica. A lo largo de los últimos años, estas técnicas se han ido perfeccionando para ser menos invasivas y más precisas. También se ha ido integrando en los monitores médicos y equipos de diagnóstico, aplicándose en la monitorización de la frecuencia cardíaca y la saturación de oxígeno en la sangre, entre otros métodos. [13] [14]

Como la fotopletismografía mide el pulso cardíaco, se debería comprender cómo funciona el corazón y en concreto el ciclo cardíaco. El término de ciclo cardíaco describe la relajación y la contracción producidas en el corazón, cada repetición de ciclo cardíaco se entiende como latido, y el conjunto de latidos como pulso cardíaco, que es lo que se mide al realizar esta técnica en el laboratorio. El ciclo cardíaco consiste en tres etapas: **sístole auricular** (aurículas se contraen y se expulsa la sangre a los ventrículos y después de esto se cierran), **sístole ventricular** (Se contraen los ventrículos y después se produce la eyección, en la que se expulsa la sangre al sistema circulatorio) y la última etapa es la **diástole cardíaca completa** (En primer lugar se produce la relajación ventricular isovolumétrica y después pasa al llenado auricular pasivo). [5]



*Ilustración 4 : Esquema sístole y diástole [15]*

## **2.5 APLICACIÓN Y RELACIÓN CON ESTE TRABAJO**

Como se ha explicado anteriormente, la asignatura de electrónica biomédica, si no se cuenta con los medios necesarios en los laboratorios, se suele tratar desde un punto de vista más teórico, llegando a entender de manera extendida todos los tipos de técnicas que pueden poner en riesgo al usuario. En este caso, las dos técnicas a realizar son de bajo riesgo y se toman las respectivas medidas para que el peligro se reduzca y así poder complementar el estudio con la parte práctica, lo que ayuda a entenderlo de manera más didáctica. Esta asignatura no suele ser sencilla, ya que es muy fácil quedarse atascado cuando el diseño del circuito no es el correcto y sin saber cómo avanzar. El análisis y explicación del diseño de los circuitos se realizará de manera didáctica y fácil de entender para que pueda ayudar a resolver cualquier tipo de duda que pueda surgir a la hora de realizar las prácticas o a la hora de analizar los resultados.

## **2.6 ALINEACIÓN DEL TRABAJO CON LOS ODS**

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) forman parte de un plan en el que se busca acabar con la pobreza para proteger el planeta y mejorar las vidas de todos. En el año 2015, los países que forman parte de las Naciones Unidas aprobaron 17 objetivos que formarían parte de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, que se buscaba conseguirlos en un rango de 15 años. Defienden que es importante que no se deje a nadie atrás y que se deberían cumplir todos los objetivos. [16] En este proyecto se puede observar cómo, además de existir motivaciones personales para realizarlo y el fin académico que conlleva, también se puede analizar su alineación con algunos de estos objetivos ya mencionados.

El primer objetivo con el que se alinea es el número 3, Salud y Bienestar. [16] Como es lógico, al tratarse de un tema que tiene que ver con la medicina, este trabajo podría beneficiar a este objetivo. Aunque no sea con maquinaria complicada ni muy desarrollada como deben ser las innovaciones, se ha estudiado cómo realizar técnicas de biomedicina con materiales de los laboratorios de electrónica para buscar un resultado claro y útil para el estudio. Esto puede ayudar a detectar algún tipo de anomalía manifiesta en las partes del cuerpo estudiadas.



*Ilustración 5 : ODS número 3*

Otro objetivo con el que se alinea este trabajo es el número 4, Educación de calidad. [16] En este trabajo se han realizado las técnicas de electromiografía y fotopletiografía de una manera didáctica y basándose en unas prácticas de laboratorio. Intentando explicar los posibles fallos que se tienen y desarrollando un informe para entender de manera sencilla el diseño de estos circuitos y buscando siempre la máxima calidad en los resultados con los recursos dados. Al ser el último objetivo del trabajo realizar esto de una manera fácil de comprender para unos posibles futuros alumnos que cursen la asignatura, hace este objetivo de la ONU el principal del trabajo. Por otro lado, también se basa principalmente en el análisis de resultados de las prácticas y comparación con los posibles resultados de técnicas realizadas en un hospital, por lo que se puede encontrar un nexo entre este objetivo y el anterior.



*Ilustración 6 : ODS número 4*

## **Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

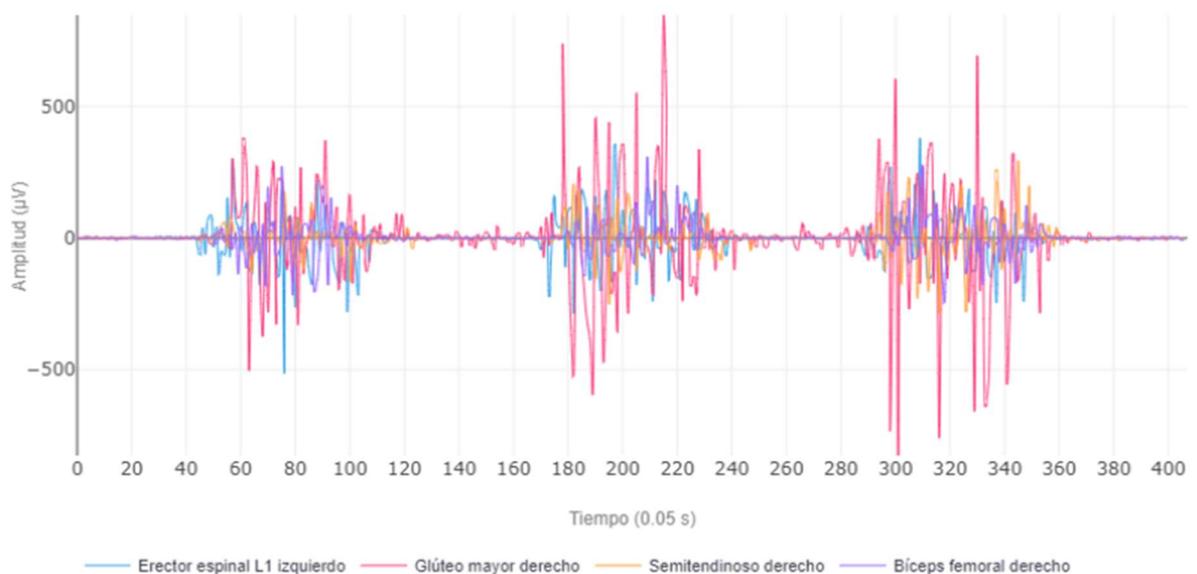
### **3.1 JUSTIFICACIÓN**

Después de la lectura de los apartados anteriores, se debe comprender que con este trabajo no se pretende crear algo que no existiera antes, sino poder explicar de manera didáctica cómo se han tomado las decisiones sobre el diseño de los circuitos y con qué objetivos. También se buscará poder analizar bien los resultados, aprender a tomar las medidas que se necesiten de los músculos o de la sangre y comprender cómo funcionan por dentro algunos de los dispositivos usados en la electrónica biomédica. Todo lo anterior se realizará con el objetivo de poder hacer un símil a un informe de laboratorio en el que se explique todo de manera clara y didáctica.

#### **3.1.1 ELECTROMIOGRAFÍA (EMG)**

Al realizar esta técnica en el laboratorio, se utilizan electrodos superficiales. Estarán dispuestos de tal manera que haya uno que ejerce de tierra en la parte superior del antebrazo, y los que hacen la función de entradas positivas y negativas, en los músculos que forman el pulgar. Esta decisión se tomó después de probarlo en diversas partes del antebrazo y llegando a la conclusión de que esta era una de las señales que mejor se apreciaba en el osciloscopio. Ambas señales percibidas por los electrodos, al pasarse al circuito, necesitarán pasar por un filtro paso alto cada una y unirse en un primer amplificador. El filtro paso alto se necesita debido al ruido en bajas frecuencias que puede surgir por el movimiento de los electrodos o la respiración del paciente, entre otras razones. Este filtro, como se explicará más adelante, hará que las intensidades de polarización sean de modo común. A la salida del amplificador se empezó a ver la señal y a comparar entre los músculos para elegir sobre cuál se realizaría el estudio. Esta no iba a ser la señal final, pero era lo mínimo necesario para verificar que funcionaban las disposiciones.

Una vez comprobada la primera señal, el trabajo prosigue con modificarla para conseguir un resultado analizable. Para ello, se tendrán que utilizar diferentes tipos de filtros que ayuden a eliminar el ruido que ha ido apareciendo. Se buscará documentar los cambios que se han ido realizando, enseñando a su vez algunas imágenes obtenidas del osciloscopio para que faciliten su análisis. Al terminar con la obtención de señales, se comprobará si estos resultados fueran válidos como si de una electromiografía real se tratase y se verá en qué se puede mejorar comparando con unos resultados que sean reales.



*Ilustración 7 : Resultados de electromiografía reales de diferentes músculos [17]*

En la ilustración 7 se pueden observar numerosos resultados de esta técnica realizada en distintos músculos, se ha introducido para saber que se puede esperar de manera aproximada en los resultados de este trabajo y ver si durante el avance con el circuito se iba bien encaminado o necesitaba modificaciones.

### **3.1.2 FOTOPLETISMOGRAFÍA (PPG)**

Para esta técnica, se han usado diferentes leds y fotosensores para poder llevarla a cabo. Gracias a las distintas características de cada led, se han podido observar numerosas diferencias no solo en el diseño para usar cada uno sino también en los resultados que se analizarán más adelante.

El diseño tiene dos partes en las que se indagará más adelante, pero una es para el encendido del led, donde se puede modificar su intensidad en función de lo necesario, y la otra se centra en el fotosensor y las modificaciones a la señal para obtener un resultado más claro y válido. Las pruebas de esta técnica se han realizado en el dedo índice. A lo largo de las diferentes pruebas, se llegó a la conclusión de que se contaba con muchas posibles variables a la hora de realizar esta técnica, por lo que no se espera una precisión similar a la de un pulsioxímetro (aparato que es usado cotidianamente para realizar este tipo de técnica). Entre las variables observadas resaltan la contaminación lumínica del momento del día, el número de personas en la sala que podían pasar entre la luz y el sensor a la hora de la prueba, si la luz de la habitación se encontraba encendida o apagada y la posible modificación de posicionamiento tanto del dedo como del led o del fotosensor. El diseño del circuito se ha realizado intentando tener esto en cuenta para poder eliminar el posible ruido y obteniendo las señales en los momentos idóneos.

A lo largo de las pruebas surgieron también otros inconvenientes como el cambio de tipo de led, que cada uno, a pesar de tener el mismo color, podía tener diferentes características, pero se fue modificando el circuito con base en estos contratiempos y se han obtenido resultados con los que se ha podido realizar el estudio de manera correcta y la comparación entre colores para alcanzar las futuras conclusiones.

## **3.2 OBJETIVOS**

Los objetivos de este trabajo se han explicado de manera superficial en los capítulos anteriores, pero en este apartado se entrará más en detalle. Se buscará conseguir los siguientes objetivos:

El primer objetivo es diseñar dos circuitos que consigan hacer la función de las dos técnicas explicadas anteriormente. Logrando esto con los elementos y herramientas que se pueden conseguir en el laboratorio de la universidad.

El segundo objetivo es realizar un buen análisis de los resultados obtenidos por ambos circuitos, realizando una comparación con unos resultados que darían aparatos usados en el día a día de los hospitales.

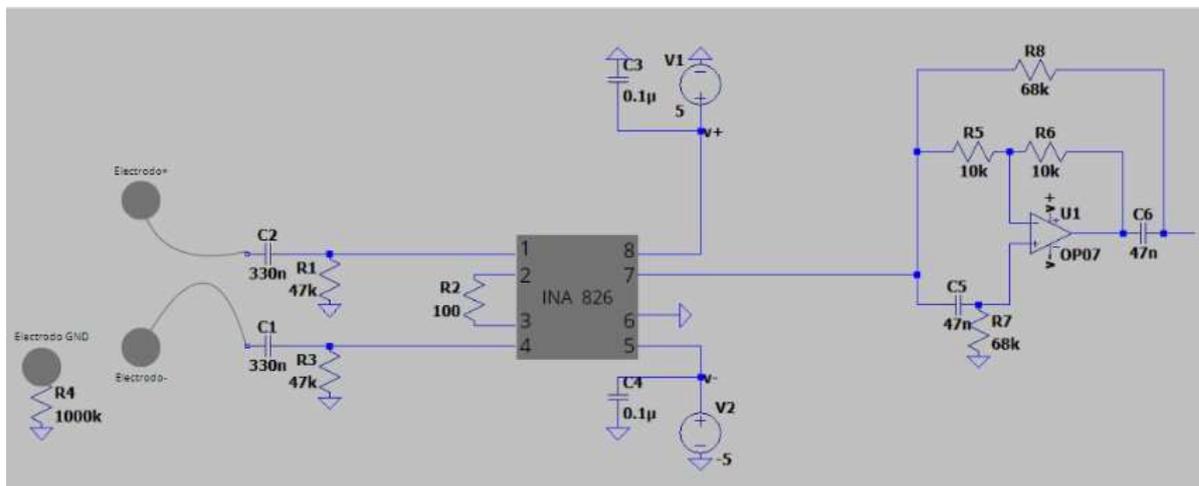
El objetivo número tres del proyecto es explicar las dos prácticas de forma didáctica y fácil de entender, de modo que cuando el lector analice los diseños y resultados, pueda entender los motivos y el razonamiento tras las decisiones tomadas. Ya que el trabajo tiene un gran fin académico, hace de este objetivo el principal y en el que se basará la redacción de la última parte del proyecto. Además, ayudará a dar mayor visibilidad a una rama de la ingeniería bastante desconocida en términos generales.

## Capítulo 4. DISEÑO Y PROCESADO EMG

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, la primera parte de este proyecto se basa en el diseño del circuito electrónico que sirve para realizar la técnica de electromiografía. Este diseño se ha realizado buscando obtener la mejor señal para después explicar las decisiones tomadas y que pueda quedar un informe de laboratorio lo más didáctico posible.

### 4.1 DISEÑO GENERAL

El diseño final de esta técnica es el que se enseñará a continuación. Esta imagen es el resultado de lo explicado anteriormente. Mediante la toma de señales en las distintas etapas de la realización del diseño, se pudo ir comprobando que cada una de las etapas ejercían su función como era debido. En los siguientes apartados se concretará más la función de cada una de las partes y las razones por las que se han puesto.



*Ilustración 8 : Imagen del diseño general de electromiografía*

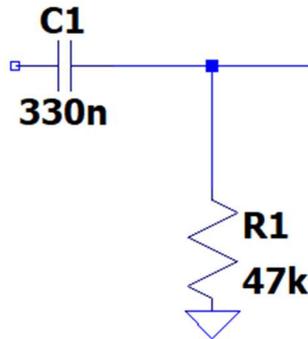
En los capítulos anteriores se explicaba el funcionamiento de los electrodos, en este apartado se puede ver cómo funcionan. Se tiene el electrodo que ejerce de tierra, que es esencial para garantizar precisión y seguridad a la hora de hacer la práctica. A pesar de que en esta práctica no se trabaja con voltajes ni intensidades altas que puedan poner en riesgo al operador que la ejerce, se ha decidido como factor de seguridad conectar el electrodo de tierra a la tierra del circuito mediante una resistencia de 1 MΩ. En caso de que hubiese contratiempos durante la ejecución de la práctica, limita la intensidad que podría fluir por el cuerpo reduciendo el riesgo de choque eléctrico.

## 4.2 FILTRO PASO ALTO

La conexión de los electrodos con el circuito se realiza mediante un filtro paso alto con frecuencia de corte 10 Hz. Esta decisión se ha tomado ya que se quiere eliminar todo el potencial de contacto posible, esto es, las fluctuaciones que aparecen debido al movimiento del electrodo, del ruido que pueda existir en el ambiente y por cambios que se produzcan en la impedancia entre el electrodo y la piel. Sabiendo que las electromiografías suelen funcionar en los músculos como el que se trata en el proyecto entre 10 Hz aproximadamente (no se ha encontrado el músculo en concreto) y 500 Hz. [18] Esto ayudará a que la señal que le llega al amplificador esté más limpia y sea más fácil de modificar luego para buscar el tipo de resultado que se espera.

Los parámetros de este filtro se han calculado mediante la fórmula:

$$F_c = \frac{1}{2\pi \times RC} \text{ (Ecuación 1)}$$

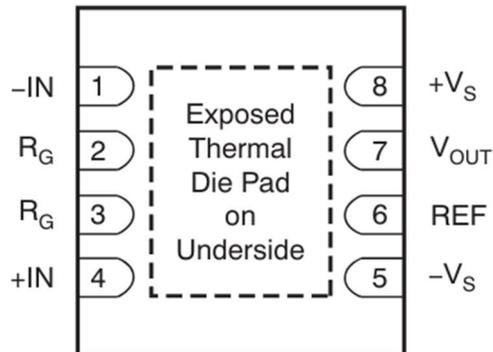


*Ilustración 9 : Filtro paso alto EMG*

Fijando en la ecuación 1 el valor del condensador a 330nF, que son los condensadores de papel que se tenían disponibles en el laboratorio, se calcula la resistencia que habría que poner, en este caso 48,23K $\Omega$ . Se buscó la más aproximada a este valor que se encontraba en el laboratorio. Un detalle importante a tener en cuenta para esta parte es el uso de condensadores de papel. En un principio se utilizaban condensadores electrolíticos, pero esto lo que hacía era generar un offset en la señal resultante que variaba la salida, haciendo muy difícil detectar los detalles importantes en la señal.

### **4.3 AMPLIFICADOR INA 826**

Para realizar esta práctica, se indicaba que había que usar el amplificador INA 826, que se diferencia de los amplificadores operacionales normalmente utilizados en el laboratorio en que son ampliamente utilizados para aplicaciones de medición y adquisición de datos. Este amplificador tiene una alta precisión y gran capacidad de amplificación de señales, mientras que rechaza el ruido común, lo que lo hace idóneo para este circuito.

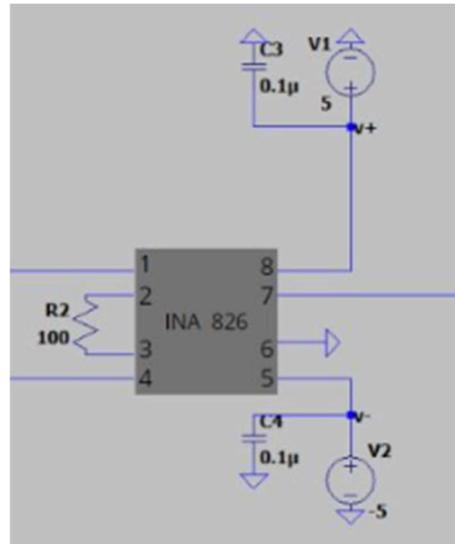


*Ilustración 10 : Distribución Pines INA826 [19]*

Con esta distribución de pines, se entienden como entrada positiva y entrada negativa los dos electrodos después de pasar por los filtros paso alto (ambos filtros tienen que ser simétricos para que la señal debida a las intensidades de polarización sea de modo común). Gracias a estos filtros, se minimizarán los artefactos que generan ruidos en la señal de estudio. Entre los pines 2 y 3 se encuentra la resistencia que aporta la ganancia al amplificador. Esta se calcula mediante la siguiente ecuación que se ha encontrado en la hoja de datos del amplificador[19]:

$$Ganancia = 1 + \frac{49,4K}{R_G} \text{ (Ecuación 2)}$$

En esta ecuación, se ha buscado una ganancia de 500 (aunque podría haber variado una vez terminado el circuito, esta se mantuvo) y despejando la  $R_G$  salía un valor de aproximadamente  $100\Omega$ .

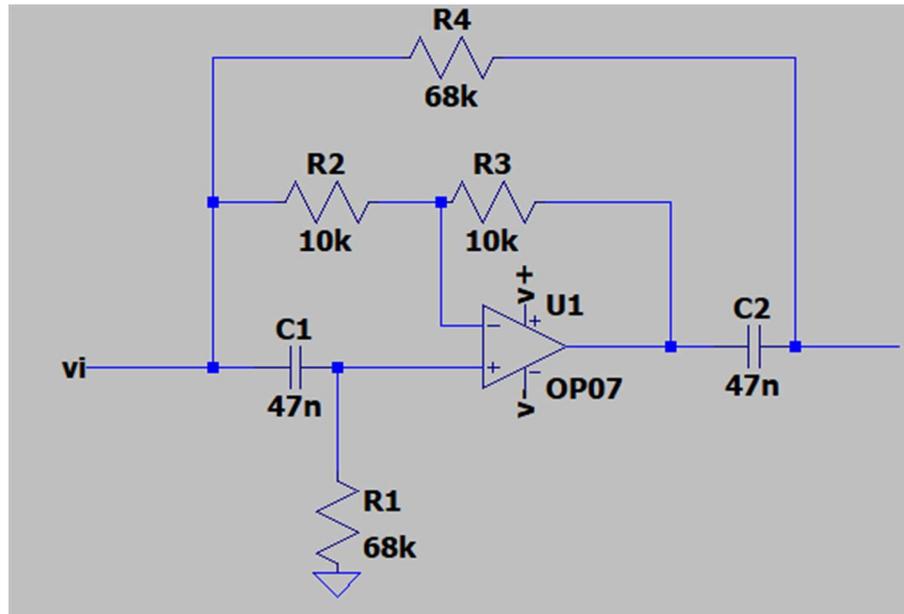


*Ilustración 11 : Esquema alimentación amplificador INA826*

Por otro lado, hay que completar la alimentación del amplificador. En el pin 8 se conecta la fuente de tensión por la parte positiva y en el pin 5 por la parte negativa. Ambas tienen que estar a 5 voltios en módulo. Más tarde, como parte opcional, se puede poner un condensador en paralelo con cada cable de alimentación para eliminar el posible ruido que llega por la fuente y así conseguir una señal a la salida más limpia. En el pin 6, necesita la referencia de tierra, que sería conectar con la tierra que se haya puesto en el circuito.

Por último, en el pin 7, como se observa en el esquema, está la salida del amplificador.

#### 4.4 FILTRO NOTCH 50HZ

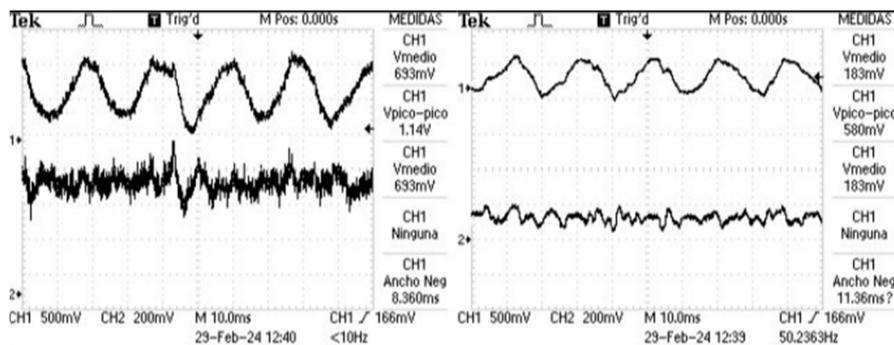


*Ilustración 12 : Filtro Notch utilizado en EMG*

Como se verá en la parte de análisis de resultados, a la salida del amplificador INA826, ya se podía apreciar la variación en la señal cuando se hace fuerza en el músculo estudiado. Pero el problema es que salía como una senoidal de frecuencia 50 Hz, que se conoce como ruido de línea, esta es la frecuencia que se corresponde con la red eléctrica europea. Por lo tanto, se tiene que eliminar esa senoidal a frecuencia 50 Hz para que se pueda analizar de manera óptima el resultado y que se parezca más al resultado buscado. Para ello se usa un filtro Notch con frecuencia 50 Hz. Al ser lo mismo que un filtro elimina banda, desaparecerá de los resultados la senoidal a 50 Hz. Para ello se usa el filtro que aparece propuesto en las prácticas. [20] Se comprobó que funcionase de tal manera en el mismo laboratorio y se pudo observar que era correcto el diseño, por lo que se usaría para el circuito final de la electromiografía.

## 4.5 IMPLEMENTACIÓN

La implementación de este circuito se ha ido explicando por encima en los apartados y capítulos anteriores, pero se ampliará en este apartado. Para empezar, cada día que se realizaba la práctica de nuevo, la distribución de electrodos era parecida, pero no la misma. Resultaba muy difícil obtener la misma señal dos días seguidos, además de que los electrodos se veían afectados por el uso y en ocasiones había que cambiarlos por otros nuevos. Después de unir todas las partes del circuito ya montadas, se procedió a tomar las medidas que se usarían para el análisis. Esto se realizó mediante el osciloscopio disponible en el laboratorio. Con los dos canales se podían hacer contrastes entre diferentes puntos del circuito para ver las diferencias que sufría la señal en base al diseño del circuito. Esto se puede observar a continuación en la ilustración 13, que también se analizará más adelante en la parte de los resultados. Esta ilustración consiste en la comparación de 4 señales a la vez. Cada canal del osciloscopio se corresponde a la entrada y salida del filtro Notch y cada captura del osciloscopio a una comparación de señales con y sin el electrodo de tierra.



*Ilustración 13: Comparación dos capturas osciloscopio con y sin tierra de señales tomadas antes y después del filtro Notch*

En esta ilustración se puede ver la función del filtro Notch, que elimina el ruido que aportaba la red como se ha explicado anteriormente. Con esta dinámica se pueden comprobar las distintas etapas del diseño de los circuitos para verificar su adecuado funcionamiento.

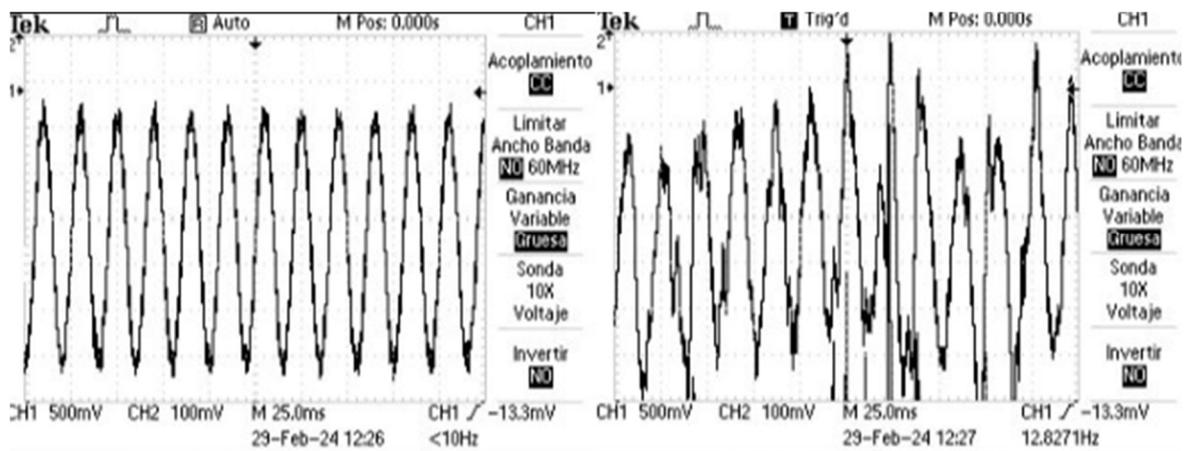
Pero la señal que se utilizará más adelante para el análisis es la que se mide a la salida del filtro Notch ya explicado anteriormente. En esta salida se espera ver una señal constante en

0, con el ruido esperado que puede provocar el músculo y los electrodos en sí, pero que al hacer fuerza en el brazo se modifique y adopte una amplitud mayor con la que se pueda realizar el estudio. Se probaron las diferentes combinaciones disponibles en los músculos, llegando a la conclusión de que la señal más diferencial se conseguía con el músculo del pulgar.

## Capítulo 5. ANÁLISIS RESULTADOS EMG

Durante este capítulo se mostrarán los resultados obtenidos durante los días que se realizó la técnica de electromiografía con comparaciones y ampliaciones de algunas de las señales con la finalidad de mejorar su estudio. Además, se comparará con resultados reales de la técnica.

Se han ido tomando señales para ver que se necesitaba en las diferentes etapas del circuito. Para comenzar, había que comprobar que funcionaban los electrodos y que la disposición era la correcta. Para ello, una vez montados los filtros paso alto y el amplificador INA 826 se tomaron medidas para ver si funcionaba el circuito.

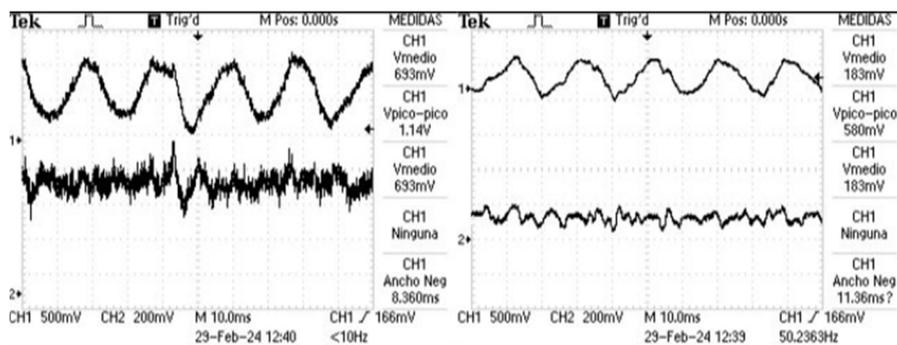


*Ilustración 14: Comparación dos señales a la salida del amplificador INA826 (Izquierda brazo relajado, derecha haciendo fuerza)*

En la ilustración 14 se pueden observar dos señales. Ambas han sido tomadas a la salida del amplificador INA 826, pero en dos situaciones distintas, con los electrodos dispuestos de la manera que se ha explicado a lo largo del trabajo. La imagen de la izquierda es el resultado de tener el brazo sin tensión y extendido, es decir, sin hacer ningún tipo de fuerza. Por otro lado, en la imagen de la derecha, se aprieta el puño con lo que se pone en tensión todo el brazo, por ello se puede ver que aparecen modificaciones en la señal y se llega a la conclusión de que a pesar de que no se aprecie mucho, se ven variaciones en la amplitud, por lo tanto, el circuito parece correcto y se podrá proseguir con el diseño de las demás etapas. Como se

aprecia, aparece una senoidal y al igual que se ha explicado antes, hay que eliminarla y por eso se introducen las demás etapas del circuito para continuar con el análisis.

Una vez se ha completado el esquema entero del circuito, se vuelven a tomar medidas esta vez a la salida del filtro Notch, y la señal que se obtiene de ahí ya sirve para el análisis. Como se ha explicado en el resumen, también se realizaron pruebas para comprobar la función de la tierra en el circuito, para comprenderlo mejor, se vuelve a adjuntar la imagen de las señales de comparación entre el circuito con electrodo que ejerce de tierra y sin él. La siguiente ilustración se corresponde con la número 13 del capítulo anterior.



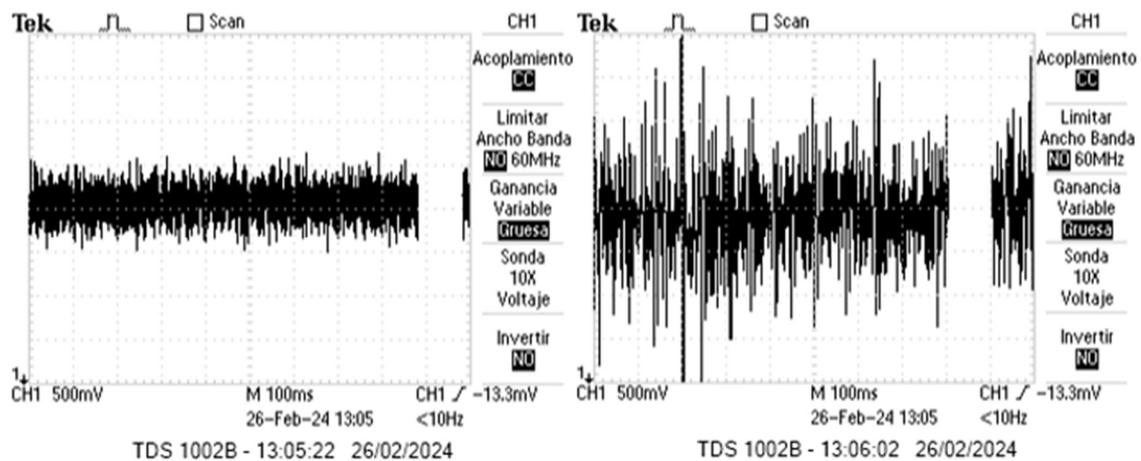
*Ilustración 15: Comparación dos capturas osciloscopio con y sin tierra de señales tomadas antes y después del filtro Notch*

Como se ha explicado en los capítulos anteriores, el electrodo de tierra es esencial, y se puede apreciar en esta foto la razón. Aparte de existir la diferencia de que una de las ilustraciones es con el electrodo de tierra y otra sin él, las dos señales que aparecen en cada imagen son: la de arriba, poniendo la sonda del osciloscopio a la salida del INA 826 y la de abajo a la salida del circuito completo ya montado, lo que también ayuda a ver la diferencia de forma más clara. Por otro lado, el electrodo de tierra se puede ver de manera manifiesta que aporta mayor precisión cuando se usa, ya que en las señales que no existe este electrodo, aparece mucho más ruido y resulta más complicado utilizarlas para un futuro análisis.

Una de las posibilidades sería suavizar la señal de tal forma que se viese de manera más clara, además se pueden hacer varios músculos a la vez para comparar. En el caso de este trabajo, solo se contaba con el uso de tres posibles electrodos. Pero se podría haber realizado

de la misma forma otra electromiografía al mismo tiempo en el otro brazo y en la misma posición para comparar las dos señales y sacar conclusiones. Esto podría ser un posible futuro trabajo que se explicará en el capítulo final.

El análisis que se llevará a cabo se basa en la amplitud que se haya obtenido en la señal, ya que a mayor amplitud, más actividad muscular. Se pueden comparar las señales de tener el brazo sin tensión y luego haciendo fuerza, como se ve en la siguiente ilustración:



*Ilustración 16: Comparación EMG sin fuerza (izquierda) y con fuerza (derecha)*

Como se ha indicado antes, para un mejor análisis habría que tener otros músculos también conectados para realizar la comparación, pero aun así se puede realizar un pequeño análisis de estos resultados. Este análisis se basará en la amplitud y la frecuencia. En primer lugar, la amplitud que se puede observar es de aproximadamente 13 mV, utilizando las dimensiones que hay dispuestas en el osciloscopio. Normalmente en una EMG los valores de amplitud varían entre 50  $\mu$ V a 5 mV, por lo tanto, en este caso se aprecia un valor demasiado grande, esto es debido a que no se ha quitado la ganancia aportada por el filtro Notch, para que se pudiesen ver de manera más significativa los cambios en la señal. De todos modos, al trabajar con valores de milivoltios, se considera que se tiene una buena actividad muscular. Por otro lado, se puede observar que tiene componentes de alta frecuencia, lo que hace ver que los resultados de la EMG son los esperados, esto se debe a la rápida activación y desactivación de las fibras musculares. Por último, el rango de la señal,

se puede ver que las amplitudes varían bastante por lo tanto se podría asumir una actividad muscular de baja intensidad intercalada con actividad muscular de alta.

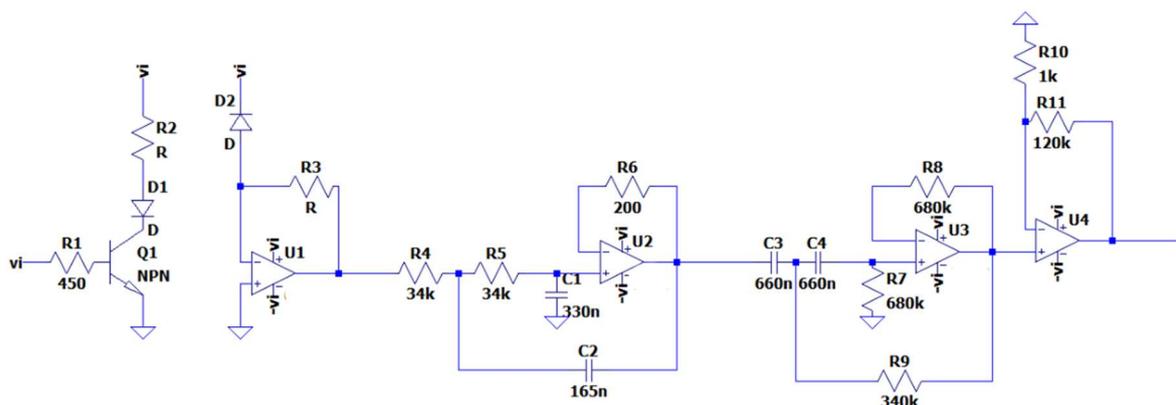
## Capítulo 6. DISEÑO Y PROCESADO

### FOTOPLETISMOGRAFÍA

La segunda parte del proyecto consiste en un circuito de fotopletismografía. Durante este capítulo se explica el desarrollo y la evolución de las diferentes etapas del diseño del circuito en cuestión. Se debe tener en cuenta que en este caso se tienen tres leds emisores distintos y dos receptores distintos también (el led rojo y el led verde funcionan con el mismo receptor), esto hará que el circuito varíe basándose en el led que se esté usando.

#### 6.1 DISEÑO GENERAL

Para el diseño del circuito de esta práctica se usará de nuevo la protoboard y constará de distintas etapas que durante los siguientes apartados se explicarán más a fondo. Durante el desarrollo del diseño completo, se fue comprobando cada una de las partes para verificar que cumplieran con su función de manera efectiva, hasta que se ha conseguido el diseño que se ve en la ilustración inferior.



*Ilustración 17 : Esquema circuito fotopletismografía*

El detalle más importante es que, a la hora del montaje, el led y el fotosensor tienen que estar enfrentados con espacio entre medias. Este espacio tiene que ser suficiente para meter el dedo índice, que en el caso de este proyecto, es donde se mide el pulso cardíaco. Las demás partes no tienen importancia en su distribución a lo largo de la protoboard.

Por otro lado, que algunas resistencias no aparezcan con valor en el esquema general es debido a que su valor es variable y más adelante se explicará por qué y qué valores tomará en cada caso.

## 6.2 LED

El diseño de la parte del circuito en la que estará el led que emitirá luz a través del dedo consiste en un transistor NPN 2904. Después de realizar algunas pruebas, y cálculos se decide que, para conseguir el mejor rendimiento, tendrá que estar trabajando siempre en saturación, con esta condición se demuestran ahora los cálculos. La  $I_c$  máxima se puede mirar en la datasheet del transistor, al igual que la Beta mínima [25]. Estos valores son: la  $I_{cmax}=200mA$  y la Beta mínima=100. Con esto se coge el caso más limitante para poder sacar la  $I_B$  que sea más restrictiva. Para que este transistor trabaje en saturación, se necesita que se cumpla la siguiente fórmula (pero se usan los valores de  $I_c$  máxima y de Beta mínima para obtener como se ha dicho antes el valor más restrictivo):

$$I_B > \frac{I_c}{\beta} = \frac{200mA}{100} \approx 2mA \text{ (Ecuación 3)}$$

Con este resultado, se puede calcular el valor de la resistencia de la base, sabiendo que hay una caída de  $V_{on}=0.7V$  en el transistor en sí. Hay que despejar los voltajes para poder sacar el valor de resistencia máxima que se puede poner mediante la siguiente ecuación:

$$V_{in} - I_B * R_B - V_{on} = 0 \text{ (Ecuación 4)}$$

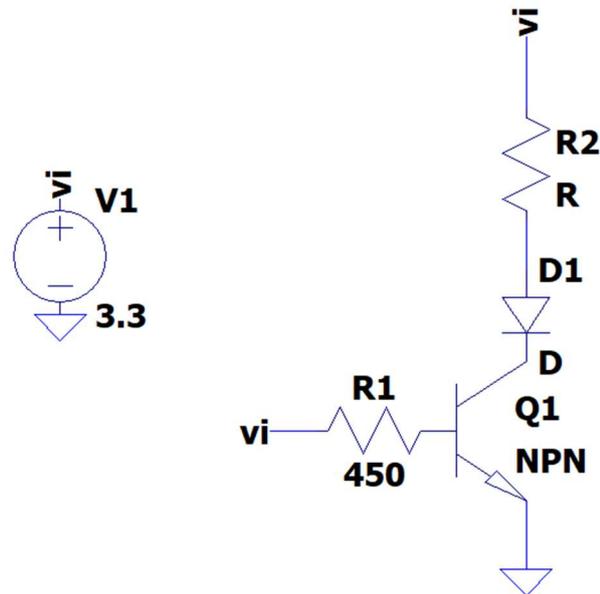
Con esta ecuación, y sustituyendo el  $V_{in}$  por 3.3V, la  $I_B$  por el caso calculado con la ecuación anterior y poniendo el  $V_{on}$  de caída, se puede despejar la resistencia. Resultando en un valor máximo  $R_B=1,33K\Omega$ . Se aplica un factor de seguridad de 3, lo que resultaría en valor de resistencia de  $443,33\Omega$ , y la resistencia del laboratorio que más se aproxima a este

valor es de  $450\Omega$ . Esto para asegurar que el transistor esté en saturación y funcione el circuito de la manera esperada.

El valor de la resistencia que está en el colector junto con el led es variable dependiendo del led que se esté usando. La función de esta resistencia es variar la intensidad a la que luce dicho led. Cada uno de los colores de led tiene sus propias características. El led rojo emite una luz que oscila entre 620-750nm y suele tener un voltaje de funcionamiento de alrededor de 2 voltios. La luz que emite el led verde oscila entre 495-570 nm y funciona a voltajes más altos. Por último, el led infrarrojo emite una luz entre 850-900 nm y funciona a voltajes más bajos que el rojo, además no es apreciable por el ojo humano. Con base en estas características se iba variando la resistencia mientras se observaban los diferentes resultados y cómo se recibía mejor la señal. En un principio, se usaba la misma resistencia para el rojo que para el verde, pero debido a un contratiempo se cambió el led verde a otro, el cual necesitaba más intensidad para lucir, por ello se redujo la resistencia para obtener mejores resultados.

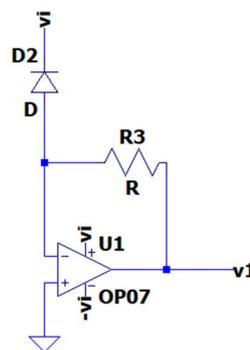
<b>LED</b>	<b>RESISTENCIA</b>
ROJO	$30\Omega$
VERDE	$10\Omega$
INFRARROJO	$45\Omega$

Tabla 1: Comparación resistencias para alimentación Leds



*Ilustración 18 : Esquema circuito led emisor*

### 6.3 CIRCUITO DIODO RECEPTOR

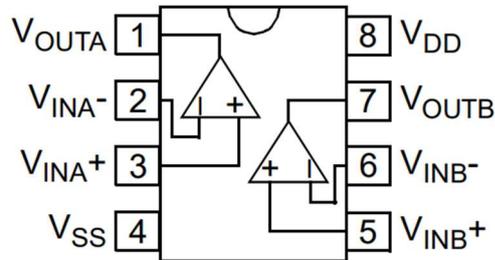


*Ilustración 19 : Diseño Circuito Receptor*

Entre el led de la etapa del circuito anterior y el diodo receptor de esta, se debería encontrar el dedo a la hora de tomar las señales y realizar la práctica. La parte del receptor se basa en el diseño que aparece en el enunciado de la práctica directamente [21]. Consiste en un diodo receptor, una resistencia y un amplificador trans resistivo MCP 6002.

## MCP6002

8-Lead PDIP, SOIC, MSOP



*Ilustración 20 : Distribución de pines del MCP 6002 [22]*

El valor de la resistencia R3 que aparece en el esquema dependerá del tipo de diodos led emisor y receptor que se estén usando. Habrá que tener en cuenta las características de cada led.

El valor de la intensidad que aporta el receptor es esencial para la elección de la resistencia, ya que esta intensidad varía en función de dos factores. Uno de los factores es constante, y consiste en la suma del valor de la luz ambiental con la parte de la luz absorbida por el tejido. El otro, es variable en función del tiempo, y depende de la variación de volumen de la sangre en el dedo. Este último es en el que se encuentra la información que se estudia con este trabajo.

El valor del voltaje que se ve a la salida del amplificador es el valor medio de la señal que mostrará el pulso más adelante. Este valor se va a mantener constante para los tres tipos de led con el objetivo de que el posterior diseño de circuito sea el mismo y permita las comparaciones a la hora del análisis. Este valor surge de la aplicación de la Ley de Ohm. Esta ley impondrá que el valor de la salida del amplificador se base en la siguiente ecuación:

$$V_1 = R_3 \cdot I_{ph} \text{ (Ecuación 5)}$$

El valor de la intensidad  $I_{ph}$  depende del diodo receptor como se ha explicado anteriormente. Tanto el diodo verde como el rojo usan el mismo receptor, por lo que las características de este son las mismas.

Se necesitarán los siguientes datos del diodo receptor: La sensibilidad  $\varepsilon$  (A/W) y la intensidad de luz que le llega PL (W). Para saber la intensidad de luz, al no contar con un luxómetro, se va a tomar un valor de 400 luxes. Esto es el valor medio entre 200 y 600 luxes, que corresponde a los valores para este tipo de pruebas considerando el ambiente en el que se hacen.

La ecuación que da el valor de  $I_{ph}$  es la siguiente:

$$I_{ph} = \varepsilon * PL \text{ (ecuación 6)}$$

Los valores de  $\varepsilon$  y PL se dan en A/W y W respectivamente. Se ha decidido trabajar con Watios en vez de luxes para facilitar los cálculos.

En el caso del led rojo, considerando los valores de luz que emite, tiene un valor aproximado de 660 nm.[27]. Para las condiciones en las que se ha realizado la práctica y con los datos encontrados en la datasheet del receptor [28] ( $\varepsilon=0,4$  A/W y  $PL=900nW$ ), se calcula que la  $I_{ph}$  tendrá un valor de  $\approx 360nA$ . Sustituyendo este valor en la ecuación 5, y tomando para  $R3$   $500K\Omega$ , que es el valor que aparece en el enunciado de la práctica[21], resulta un valor  $V1$  a la salida del amplificador de 180mV. Este valor ( $V1$ ) se considera bajo para lo que se buscaba, no obstante, lo más importante era evitar la saturación y con este valor, se conseguía. Este valor de  $V1$  es bajo pero se puede contrarrestar con la ganancia en la última etapa del circuito que dejará la señal en condiciones adecuadas para el análisis.

La optimización de esta parte del circuito ( $V1$  más elevado y que siga sin saturar) podría ser un punto a considerar en futuros trabajos.

Se realiza el mismo procedimiento con el led verde. La luz de este led tendrá un valor aproximado de 550 nm[27]. Usa el mismo receptor que el led rojo, por lo que los valores fijos no varían y lo único que cambia es la longitud de onda y con ella la intensidad lumínica que llega al receptor  $PL=662nW$ . Con este valor resulta en una  $I_{ph}\approx 265nA$ . Para buscar el mismo potencial en  $V1$  que en el caso anterior, y así poder realizar comparaciones en las mismas condiciones, mediante la ecuación 5 se calcula el valor de la resistencia, que en este caso resulta ser  $R3=680k\Omega$ .

Por último, al usar el led infrarrojo también se varía el receptor. Se buscó la datasheet del receptor infrarrojo [29], del que se sacaron los valores de la sensibilidad  $\varepsilon=0,62$  A/W. Por

otro lado, la intensidad lumínica que llega al receptor se puede aproximar a  $PL=3 \mu W$ . Con estos dos valores y utilizando la ecuación 6, se llega al valor de  $I_{ph}=1,86 \mu W$ . Con esta  $I_{ph}$  y buscando de nuevo el mismo potencial  $V_1$  a la salida del amplificador, se puede calcular el valor de la resistencia gracias a la ecuación 5, en este caso resulta en  $R_3=100k\Omega$ .

LED	RESITENCIA	FOTODIODO
ROJO	500 $K\Omega$	VISIBLE
VERDE	680 $K\Omega$	VISIBLE
INFRARROJO	100 $K\Omega$	INFRARROJO

Tabla 2: Comparación resistencias de receptor

Como se ha indicado anteriormente, había que comprobar que la señal saturase cuando el led apuntaba directamente al receptor. La saturación cuando no está el dedo es buen indicador de que el circuito funciona correctamente, ya que se busca que empiece a medir cuando se está ejecutando la técnica. Servirá para comprobar que las condiciones establecidas son las correctas. Por último, la saturación cuando no se está realizando la práctica asegura que a la hora de realizarla se contará con una gran sensibilidad para detectar los cambios de flujo sanguíneo en el dedo.

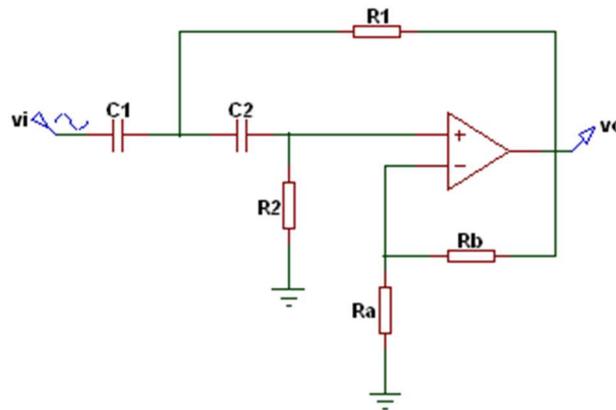
#### **6.4 FILTRO PASO BANDA**

Las frecuencias entre las que se va a trabajar están entre 0.1 Hz y 20 Hz, por ello, se tendrá que diseñar un filtro paso banda para que se elimine todo el ruido exterior a esas frecuencias que afecte a la señal y, por lo tanto, a los resultados. Se debe tener en cuenta que este ruido se genera por lo que recibe el fotosensor, al no estar aislado. Al realizar la práctica en un

laboratorio de la universidad, tiende a haber mucho ruido lumínico que eliminar. De manera teórica, el filtro paso banda estará formado a su vez por un filtro paso alto con frecuencia de corte en 0.1 de orden 2 y por un filtro paso bajo también de orden 2 y con frecuencia de corte en 20Hz. Ambos serán filtros Butterworth. Se eligió este tipo de filtro frente a otros como el Bessel o el Chebyshev, ya que al poner filtros resonantes, es capaz de mantener la misma amplitud para todas las frecuencias en la banda de paso, lo que es importante para ver los resultados de manera clara. Con estas características, se procedió a diseñar el circuito. Para el filtro paso bajo no hubo problema ya que es una frecuencia medianamente grande (para el tipo de circuitos con los que se trabaja en electrónica biomédica) y se pueden conseguir los condensadores y resistencias en el laboratorio, pero, en cambio, para el paso alto surgieron problemas ya que si se hacía de 0.1 Hz, se necesitaban unos condensadores y resistencias de valores que no se pueden obtener en el laboratorio, además, los condensadores tendrían que ser electrolíticos, lo que afectaría a la señal directamente por el offset que suelen aportar. Por lo tanto, se decidió realizar el circuito, pero cambiando la frecuencia de corte a 0.5 Hz del paso alto. Las consecuencias de esta decisión se analizarán en el capítulo de los resultados.

También es un detalle importante que estos filtros están diseñados para que la ganancia sea de 1, ya que la ganancia final que se necesite en el circuito irá por el lado de la última etapa que consiste en el amplificador de ganancia. Por otro lado, los amplificadores usados para completar estos filtros son también el mismo modelo que el amplificador usado anteriormente, el MCP 6002.

El cálculo del filtro paso alto se basará en el siguiente diseño:



*Ilustración 21: Esquema filtro paso alto [26]*

Con los valores de la frecuencia que se necesita e imponiendo los condensadores a 660nF, se puede despejar los valores de las resistencias gracias a las siguientes ecuaciones[26]:

$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 * Q^2 * (A - 1)}}{4 * Q} \quad (\text{ecuación 7})$$

$$R1 = \frac{m}{2 * \pi * k * fc * C} \quad (\text{ecuación 8})$$

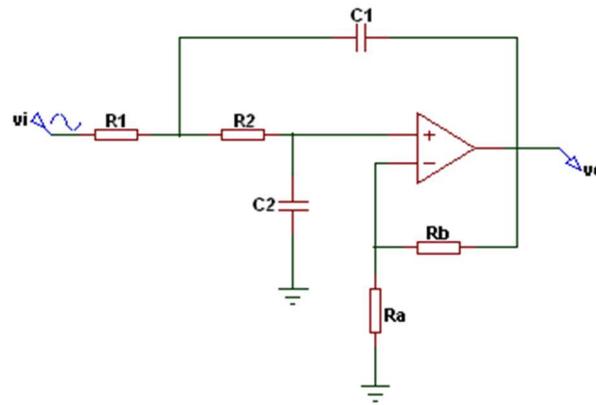
$$R2 = \frac{R1}{m^2} \quad (\text{ecuación 9})$$

$$Ra = \frac{A * R2}{A - 1} \quad (\text{ecuación 10})$$

$$Rb = A * R2 \quad (\text{ecuación 11})$$

Para poder resolver estas ecuaciones también se necesita saber el valor de Q y K, que se consigue al haber impuesto que el filtro será Butterworth, con lo que se tendrá un valor de 0.7071 para Q y un valor de 1 para K. El valor A se corresponde con la ganancia que aporta el filtro, que en el caso de este diseño será 1, ya que la ganancia que se desea se impone en el siguiente apartado. Con todo esto salen los resultados que aparecen más adelante en la ilustración 23.

Del mismo modo se realiza el diseño del filtro paso bajo, que se basará en el siguiente diseño:



*Ilustración 22: Esquema filtro paso bajo [26]*

En este caso hay que imponer el valor del condensador C1 únicamente, que se pone a 330nF. Se despejarán los valores de las resistencias y del condensador C2 gracias a las siguientes ecuaciones[26]:

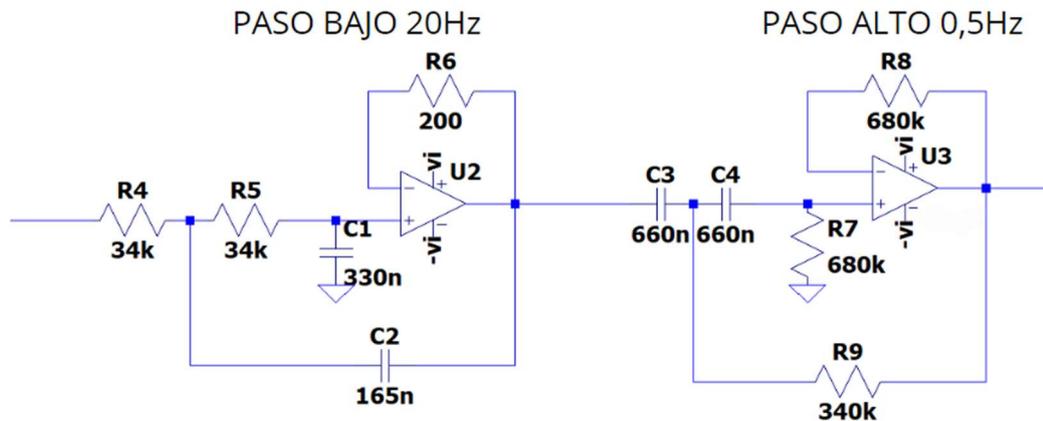
$$m = \frac{1 + \sqrt{1 + 8 * Q^2 * (A - 1)}}{4 * Q} \quad (\text{ecuación 12})$$

$$R = \frac{1}{2 * \pi * k * fc * m * C1} \quad (\text{ecuación 13})$$

$$Ra = \frac{2 * A * R}{A - 1} \quad (\text{ecuación 14})$$

$$C2 = m^2 * C1 \quad (\text{ecuación 15})$$

Del mismo modo que para el filtro anterior, al usar un Butterworth, los valores de Q y K serán 0,7071 y 1 respectivamente. El valor de A vuelve a ser 1. De nuevo, los resultados se verán en la ilustración 23.



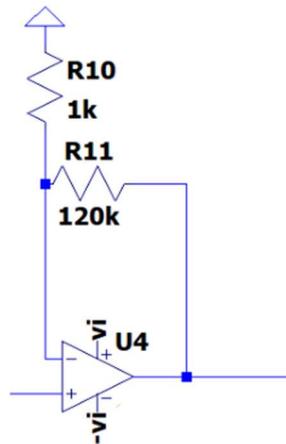
*Ilustración 23 : Circuito Paso Banda 0.5Hz-20Hz*

## 6.5 AMPLIFICADOR DE GANANCIA

Después de ver la señal en la salida del filtro paso banda, se aprecian posibles buenos resultados, pero con una amplitud muy pequeña y difícil de observar bien. Para ello, se decide meter en el circuito un amplificador simple, pero de forma que aporte una ganancia suficiente para que a la salida de este se pueda medir la señal final que se busca con esta práctica. Para ello se usarán dos resistencias de modo que se cumpla la siguiente ecuación:

$$k(\text{ganancia}) = 1 + \frac{R1}{R2} \text{ (Ecuación 16)}$$

Para aportar la ganancia necesaria, se impuso el valor de R1 en 1KΩ para así poder poner el valor de R2 como la ganancia deseada. En un principio se puso a 100 la ganancia usando R2=100KΩ, pero después se llegó a la conclusión de que se verían mejor los resultados con una ganancia ligeramente superior, por lo que se decidió poner R2=120KΩ y así resultar en una ganancia de ≈120. Se decidió poner esta ganancia después de realizar pruebas hasta conseguir una señal que fuese fácil de leer y que ayudase al análisis posterior. De la misma manera que en los casos anteriores, el amplificador usado para este diseño corresponde con el MCP 6002.



*Ilustración 24 : Esquema circuito amplificador*

## **6.6 IMPLEMENTACIÓN**

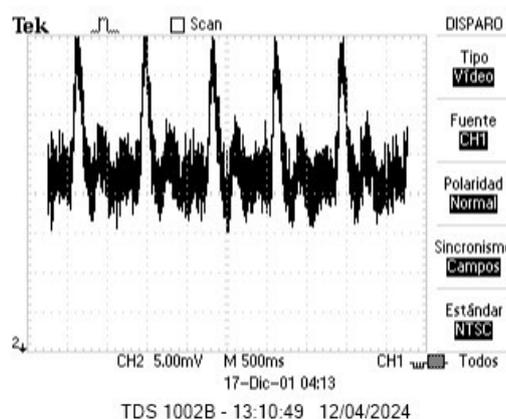
La implementación de este circuito a la hora de realizar la práctica es sencilla, como se ha explicado anteriormente. Consiste en disponer enfrentados el led y el fotosensor correspondientes y poner el dedo en medio. Había que ir ajustando la posición hasta que la señal que aparezca sea la óptima y sirva para el análisis posterior. En esta parte surgieron varios problemas ya que el dedo tenía que mantenerse todo lo quieto posible y cualquier cambio de luz afectaría a la señal directamente. Para poder conseguirlo, se paraba la imagen del osciloscopio cuando se observase la óptima y así se conseguían pasar los datos del ordenador obtenidos al realizar la práctica. Con estos datos, después se podía desarrollar un análisis en MATLAB para ver mejor la señal y mejorar el estudio de esta.

## Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS PPG

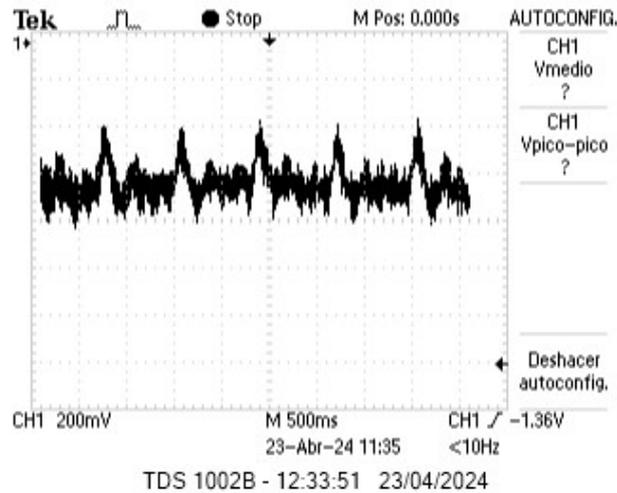
Durante este capítulo, al igual que en el de la otra práctica, se mostrarán los resultados obtenidos durante los días que se realizó la fotopletismografía con comparaciones y ampliaciones de algunas de las señales con la finalidad de mejorar su estudio. Se ha realizado un estudio más profundo, analizando las señales mediante el programa MATLAB para realizar un mejor análisis.

Para los resultados de esta práctica se tienen señales muy variadas. Hay que tener en cuenta las tres posibles variantes de colores y tipos de led que aparecen, juntándose, como se ha explicado anteriormente, con la posible variación debida al entorno o al operador, entre otras circunstancias. Pese a ello, se han obtenido señales distintas con cada uno de los leds para que ayuden a su análisis y que además faciliten el entendimiento de que es muy complicado sacar una señal perfecta como sacaría un dispositivo más sofisticado, pero se ha podido realizar un buen análisis y comparación a una fotopletismografía real gracias a su modificación en MATLAB.

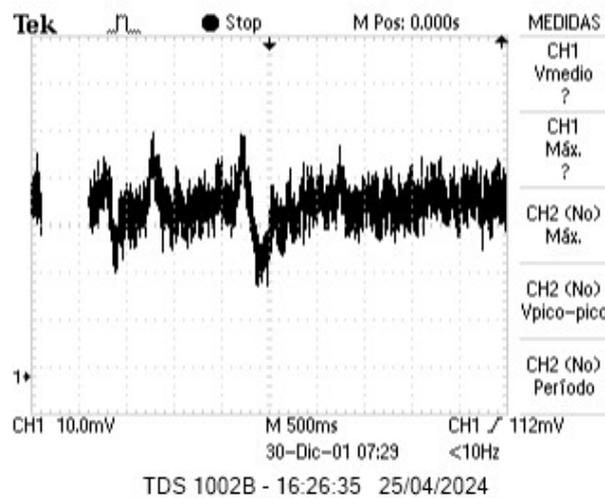
Algunas de las señales obtenidas que no se han analizado en MATLAB, pero se piensa que su aparición en el trabajo ayudará, son las siguientes:



*Ilustración 25 : Señal de led rojo*



*Ilustración 26 : Señal de Led infrarrojo*

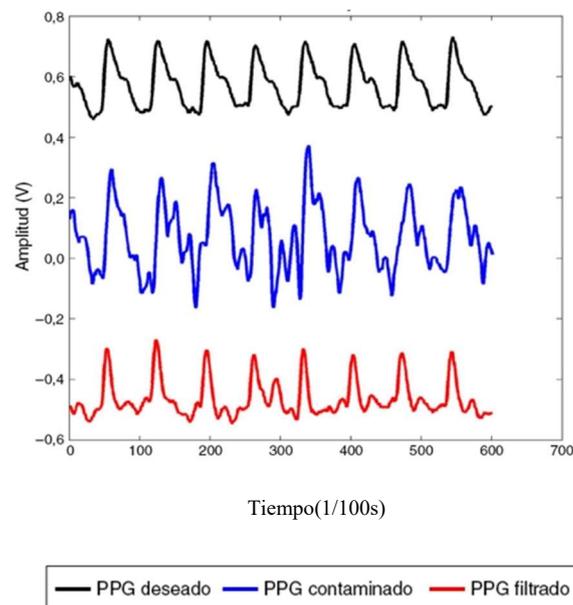


*Ilustración 27 : Señal de led verde*

En estas tres ilustraciones, a pesar de que no se vaya a realizar un análisis exhaustivo de ellas, se puede apreciar que el circuito funciona y se ve el pulso cardíaco. Cada una de las señales aparece con una escala distinta en el osciloscopio, por lo que el análisis o comparación de ruido no sería correcto realizarlo ahora. Todas las señales se tomaron buscando la escala con la que mejor se veía en cada caso, por lo que a grandes rasgos se

puede observar que el led de color rojo con su respectivo diodo receptor es el que mejor funciona y en el que se aprecia mejor el resultado de esta técnica. También, el led infrarrojo es con el que se ve la señal más clara y con el que se puede prever que el análisis posterior tenga los mejores resultados. Por otro lado, el led verde es el que peor resultado ofrece y a la hora de realizar la práctica también el que más trabajo llevó que funcionase. A pesar de que a simple vista el led rojo parezca el mejor, en los siguientes apartados se realizará un análisis de las tres combinaciones con el que se decidirá cuál de los tres diseños ha sido el óptimo.

El procedimiento será igual en las tres combinaciones; se buscará que al final de las modificaciones realizadas en MATLAB quede una señal lo más parecida a esto:



*Ilustración 28 : Ejemplo de cómo deberían ser las señales de PPG (perfecta, contaminada y filtrada)*

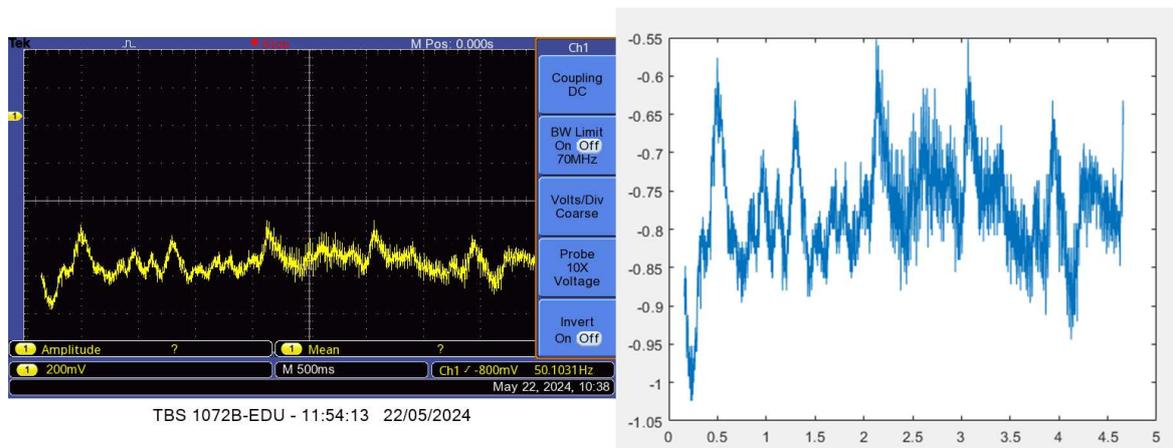
[23]

Según la fuente, la PPG puede contaminarse por varias causas, las dos principales y las que se podrán ver también en este trabajo son: Por interferencias de la línea eléctrica con la

fuerza principal, o por el ruido mioeléctrico, esto es, la aparición de artefactos debido al movimiento muscular.

## 7.1 LED ROJO

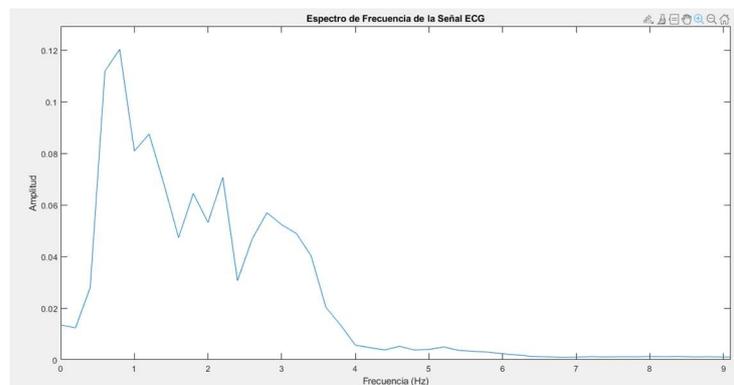
Después de tomar la señal que se ha visto en el apartado anterior, se volvió a realizar la práctica, pero esta vez para obtener resultados del osciloscopio que se pudiesen analizar en MATLAB. Se obtuvieron resultados numéricos en forma de documento csv que se metieron en el MATLAB a analizar. Para comprobar que se había realizado de manera correcta, se enseña a continuación una comparación entre la señal a analizar en MATLAB y la que salía en el osciloscopio (eje x es el tiempo en segundos; eje y es la amplitud en voltios).



*Ilustración 29 : Comparación señal osciloscopio y MATLAB led rojo*

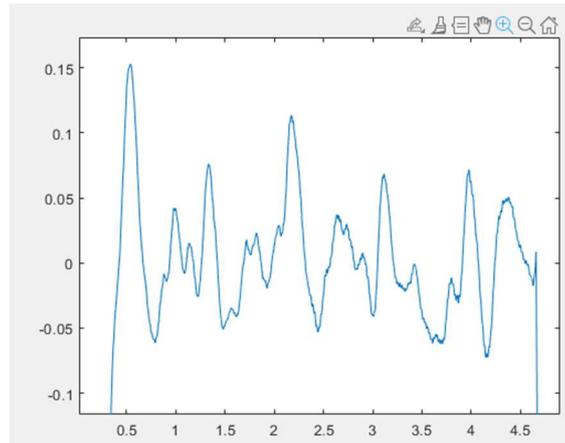
De esta ilustración no hay que sacar ningún valor cuantitativo, sino que cualitativo, una vez se ve que ambas señales coinciden, se procede a utilizar los datos obtenidos para realizar un análisis más a fondo. En primer lugar, se realiza la transformada de Fourier de la gráfica que se ha obtenido. De este paso, no se saca nada que sirva para el análisis como tal, sino que ayudará para los siguientes pasos. La transformada servirá para realizar un filtro paso banda a la señal de la ilustración 29. Las frecuencias entre las que está este filtro son 0,5 y 3,6 Hz, que son entre las que se trabaja para encontrar el pico del latido. Una vez se ha filtrado la

señal, se vuelve a realizar la transformada de Fourier sobre la señal filtrada y así obtener el espectro de frecuencias final. Si no se filtraba la imagen, en el espectro aparecía un valor medio de continua que no permitía realizar de manera correcta el análisis. En el espectro de frecuencias habrá que fijarse en las frecuencias entre las que se trabaja al realizar esta técnica, que, como se ha explicado en la parte del diseño, estará entre los 0,1 Hz y los 20Hz. En esa gráfica se tiene que buscar el pico que corresponda con el pulso cardíaco, este estará cerca de las frecuencias más bajas. Por lo tanto, se realiza zoom en las primeras frecuencias para encontrar el respectivo pico.



*Ilustración 30 : Espectro de frecuencias del led rojo*

Como se puede observar en la ilustración 30, en el espectro de frecuencias aparecen varios picos, por lo que habrá que elegir el que se considere más relevante. Se aprecia que el pico más significativo se encuentra alrededor de 1 Hz. Este pico es el que se corresponderá con el latido. Por lo tanto, la frecuencia a la que está este pico indicará la frecuencia a la que va el pulso cardíaco del sujeto. Se buscará que los tres colores den valores parecidos. Por último, la señal una vez filtrada y lista para el análisis es la siguiente:

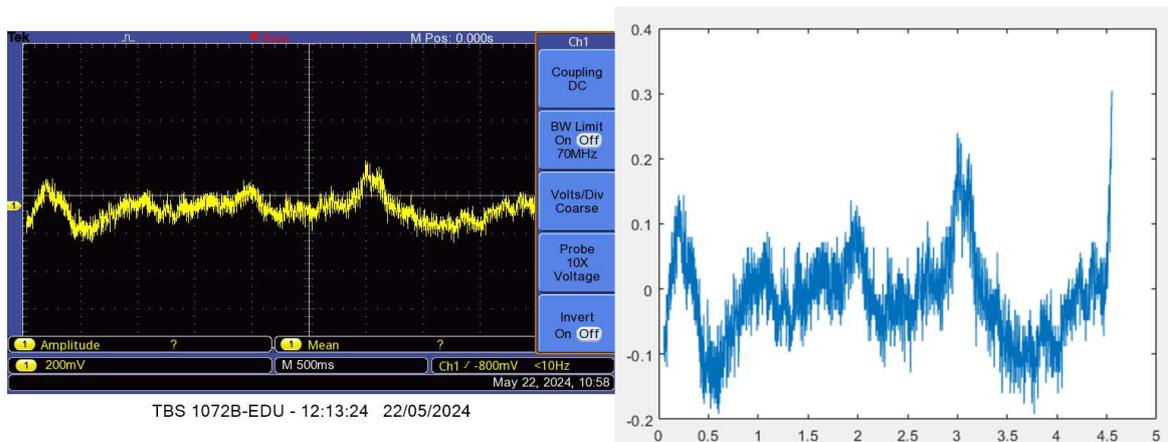


*Ilustración 31 : Señal led rojo después del filtro paso banda(eje x tiempo en s, eje y amplitud en V)*

Si se realiza una comparación entre la ilustración 31 y la ilustración 28, se puede observar que mantienen bastante parecido. Si hubiera que relacionar la gráfica del led rojo con alguna de las tres opciones que aparecen en la ilustración 28, con la que más parecido mantiene es con la opción de la PPG contaminada. Esto es comprensible, ya que no se tienen los mejores electrodos ni las mejores condiciones. Pero lo importante es que mantiene relación de forma con un PPG normal y se ven los latidos que van a aproximadamente 1 por segundo, que suele ser de los valores más comunes. Si se consiguiese filtrar de una manera mejor o tomar mejores medidas a la hora de hacer la práctica, se podría ir pareciendo más a las señales deseadas.

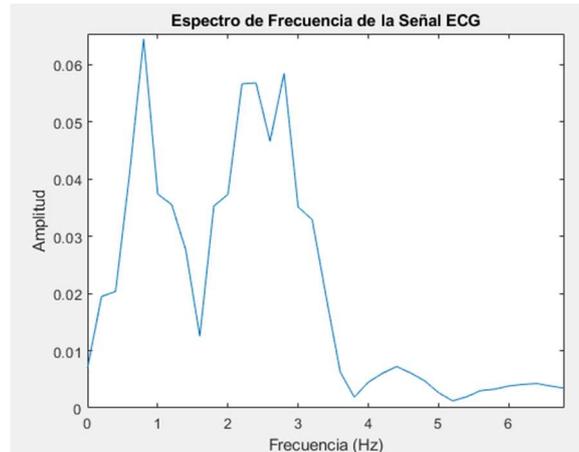
## **7.2 LED VERDE**

Del mismo modo que se ha explicado el procedimiento antes, se realizó el mismo con el led verde, resultando en la siguiente comparación entre señal osciloscopio y señal en el MATLAB. En la señal de MATLAB, el eje x es el tiempo en segundos y el eje y es la amplitud en voltios:



*Ilustración 32 :Comparación señal osciloscopio y MATLAB led verde*

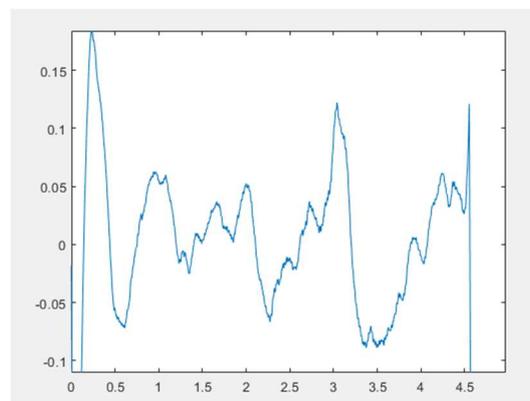
En este caso se puede observar que el resultado no es tan claro como en el led anterior, y que igual se podría haber conseguido una señal mejor con otras condiciones. Pero también se observa que ambas señales se corresponden y hay que llevarse ese valor cualitativo para seguir con el análisis. Como se ha explicado antes, entran muchas variables a la hora de tomar la señal y en las condiciones de los días en los que se tomaron estas señales, resultó la de la ilustración la mejor. De todos modos, se puede realizar un buen análisis, como se verá a continuación. Siguiendo el procedimiento como en el anterior, una vez se ha comprobado que coinciden las señales. Se calcula de nuevo la transformada de Fourier para filtrar la señal con la misma banda de paso que la anterior (0,5 a 3,6 Hz). Después se vuelve a calcular la transformada de Fourier y se hace el espectro de amplitudes, como se ve a continuación:



*Ilustración 33 : Espectro de frecuencias del led verde*

Se busca de nuevo el pico más significativo en el espectro y en las frecuencias en las que se trabaja. Se observa que hay varios picos parecidos, pero se considera que el pico de mayor relevancia es el que se encuentra en la frecuencia de 1 Hz. El pico que se ha elegido de mayor relevancia vuelve a estar en torno al mismo valor que con el led anterior, por lo que se puede considerar correcto también.

Por último, después de analizar el espectro de amplitudes, se observa la imagen de la señal filtrada para completar el análisis de este color de led:

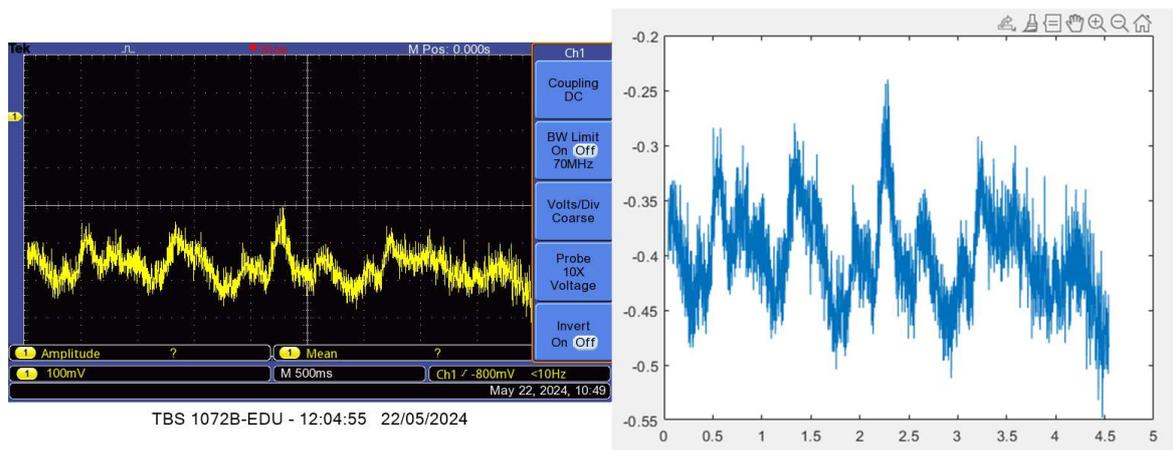


*Ilustración 34 : Señal led verde después del filtro paso banda(eje x tiempo en s, eje y amplitud en V)*

En este caso, a simple vista se ve que no se ha obtenido un resultado como en el anterior led. Si se compara de nuevo con la ilustración 28, cuesta relacionarlo con alguna de las señales, por lo que se podría considerar que al usar el led verde se trata de una PPG muy contaminada. A pesar de ello, se puede observar que los picos de los latidos, aunque no sean similares entre ellos, sí que respetan la frecuencia que se había visto en el espectro. Para este color, habría que volver a tomar las medidas, probando en otro ambiente en el que igual se pueda medir mejor y de una señal más clara y así el análisis resulte mejor. Seguramente este haya sido el caso más afectado por no haber conseguido el filtro paso banda en 0,1 Hz y haberlo hecho en 0,5 Hz.

### 7.3 LED INFRARROJO

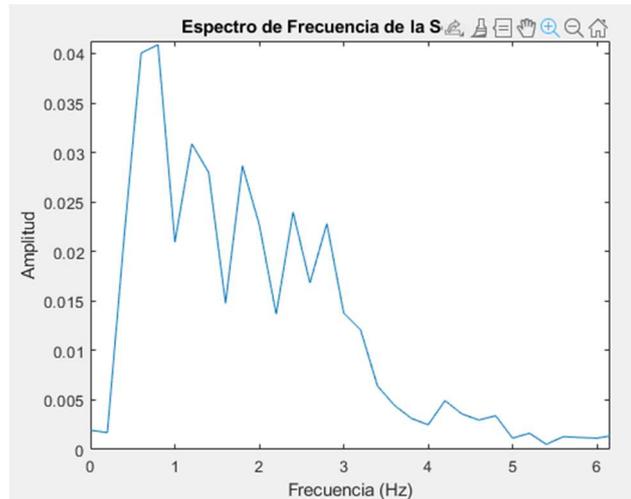
Al igual que en los dos casos anteriores, ocurre lo mismo con los resultados de la combinación del led con el fotosensor infrarrojo, se meten en MATLAB para comprobar si se corresponde la señal con la recibida en el osciloscopio. De nuevo, el eje x es el tiempo en segundos y el eje y es la amplitud en voltios:



*Ilustración 35 : Comparación señal osciloscopio y MATLAB led infrarrojo*

Al verificar que las dos señales coinciden, se realiza de nuevo el mismo procedimiento que anteriormente. Se calcula la transformada de Fourier, se filtra la señal y se recalcula la

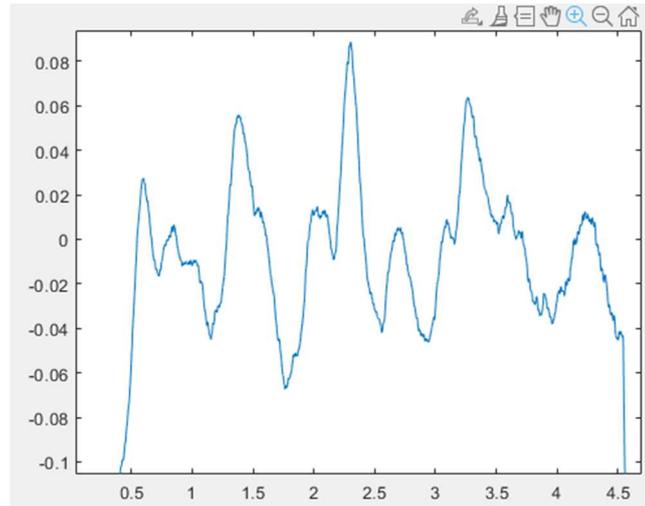
transformada para así sacar el espectro de amplitudes en el que se hará zoom en las frecuencias que interesan para el desarrollo del trabajo.



*Ilustración 36 : Espectro de frecuencias led infrarrojo*

En este caso, se ven de nuevo varios picos en el espectro de frecuencia, pero sí que se puede determinar que hay uno con más relevancia que los demás y, de nuevo, aparece en la frecuencia igual a 1Hz. Coincide el valor del pico con el de los casos anteriores también y de nuevo es un valor lógico, ya que implicará un latido aproximadamente por segundo.

Al igual que en los casos anteriores, se muestra a continuación la imagen de la señal filtrada por el filtro paso banda para poder realizar un mejor análisis:



*Ilustración 37 : Señal led infrarrojo después del filtro paso banda( eje x tiempo en s; eje y amplitud en V)*

En este último caso, comparando de nuevo con la ilustración 28, se puede relacionar con la PPG contaminada. De nuevo se buscaría filtrar la señal de otra forma para ver si se consiguen mejores resultados, o tomar de nuevo las medidas. Si se pusiese un filtro Bessel se podrían mejorar estos resultados ya que es completamente plano en la banda de paso y tiene respuesta en fase lineal. Con esta modificación se podría intentar conseguir una señal más parecida al rojo (después del análisis es en la que mejor se pueden apreciar los picos de los latidos) y más adelante a una PPG no contaminada. Como se veía en las primeras señales, tanto el infrarrojo como el rojo daban los mejores resultados. Gracias al análisis por MATLAB se puede corroborar esta hipótesis.

## **Capítulo 8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

En general, a lo largo de este trabajo he conseguido aprender de los errores cometidos a la hora de realizar los diseños y cómo poder modificarlos para obtener la señal deseada aplicando los conocimientos que sobre todo he obtenido a lo largo del último curso de este grado. También he realizado por primera vez un análisis de ondas de osciloscopio en MATLAB, algo que no había probado en ninguno de los años anteriores, pero que al haberlo realizado se me ha abierto una nueva puerta de posibilidades de análisis al tomar señales con el osciloscopio.

Como última parte del trabajo, en el siguiente apartado se explicarán las posibles ideas de trabajos futuros relacionados con este que han surgido durante el desarrollo, sumado a la planificación económica que conllevarían. Y en el último apartado las conclusiones a las que se ha llegado después de haber realizado el diseño de circuitos, los ensayos y por último el análisis de los resultados.

### ***8.1 TRABAJOS FUTUROS Y PLANIFICACIÓN ECONÓMICA***

El primer trabajo futuro que puede aparecer tiene que ver con la electromiografía. Como se ha explicado en la parte de análisis de resultados, al solo observar un músculo, no se pueden sacar demasiadas conclusiones. Una posibilidad es que, ya teniendo el esquema de diseño de circuito, se pueda replicar varias veces este y por lo tanto se puedan medir varios músculos a la vez. Con ello, se podría ver si existe simetría entre dos músculos iguales, pero uno en la izquierda y otro en la derecha, lo que ayudaría a poder detectar anomalías existentes en alguno de ellos. Por otro lado, también se podría usar si una persona siente molestias en alguna parte del cuerpo al hacer un ejercicio en concreto. Se le podrían poner varios electrodos y medir los diferentes músculos que actúan para ver si existe algún tipo de retardo de activación en uno de ellos o si fuerza mucho más de lo debido algún músculo.

Un trabajo futuro para la segunda práctica realizada en este proyecto se basaría en medir el nivel de saturación de oxígeno en sangre. Para esto, obteniendo el circuito que mejores resultados ha dado, se podría intentar conseguir este objetivo, con el fin de tener un pulsioxímetro diseñado mediante circuitos en el laboratorio. Habría que juntar dos leds a la vez y realizar una comparación entre los valores pico-pico de las señales resultantes para obtener conclusiones de ese estudio. Pero hoy es desconocido para mí; si hiciese esta ampliación de trabajo, conllevaría también una parte de investigación para conseguir hacerlo de la manera más efectiva posible.

En cuanto a la planificación económica, como se explicaba en el inicio del trabajo, las dos técnicas que se realizan en las prácticas destacan por no ser de alto coste y estar al alcance de la mayoría de los ciudadanos. Al realizarlas en el laboratorio, el coste tampoco es elevado, ya que muchos de los elementos utilizados en los circuitos son de muy fácil adquisición. Por otro lado, a la hora del análisis sí que cambia el término de los gastos, ya que un osciloscopio es más difícil de conseguir y más caro. Además, dentro de la gama de osciloscopios existen muchos tipos y, al igual, si se hubiese usado uno con más canales aislados disponibles, se hubiesen realizado mejores comparaciones, pero son mucho más difíciles de obtener. En resumen, la elaboración del diseño de circuitos para este trabajo no tiene un gran coste, pero el intentar perfeccionarla hasta conseguir unos resultados con el mínimo porcentaje de error sí que conllevaría una inversión algo mayor.

## **8.2 CONCLUSIONES**

En este apartado se verán las conclusiones que se han sacado a la hora de realizar este trabajo y divididas en las dos partes que tenía. Muchas de estas conclusiones se han ido describiendo a lo largo de los capítulos anteriores, pero ahora quedarán descritas de manera más ordenada y explicadas más a fondo.

### **8.2.1 CONCLUSIONES ELECTROMIOGRAFÍA**

Para la electromiografía, la conclusión principal a la que se ha llegado con este trabajo es la importancia del uso de la tierra. Al hacer uso del electrodo de tierra conectado al antebrazo

y al circuito, se obtenían unos resultados mucho más limpios que si se usaban únicamente los electrodos que ejercían de inputs. Por otro lado, y a pesar de que no fuese necesario en el caso de la práctica utilizada, también es esencial por tema de seguridad, con lo que si en los trabajos futuros se aumentan las tensiones usadas, el electrodo de tierra tiene que ser de uso esencial.

Por otro lado, como se ha explicado en los trabajos futuros y en el análisis de resultados, es necesario ampliar la técnica, ya que con un solo músculo estudiado no se puede sacar demasiada información. El estudio de varios músculos a la vez puede hacer de esta práctica un desarrollo mayor y que se pueda realizar un mejor análisis de resultados.

Por último, al realizar la práctica con electrodos superficiales se ha podido encontrar algo de ruido y diferencias notables entre señales que se habían tomado en días diferentes, esto más debido al error inevitable del operador de no colocar los electrodos en la misma posición exacta a la hora de repetir los ensayos.

### **8.2.2 CONCLUSIONES FOTOPLETISMOGRAFÍA**

En cuanto a la segunda práctica también aparecen varias conclusiones. La principal es que el ambiente, la luz y la posición del dedo (en este caso) afectaban mucho a la señal. Ya que cuando una persona usa el dispositivo médico especializado en las PPG, está aislado de la luz exterior y de esa forma es mucho más fácil que el fotosensor solo reciba la luz del led a través del dedo. Pero son circunstancias con las que ya se contaba al principio del proyecto y se ha intentado conseguir que afectasen lo mínimo posible.

Como se ha explicado antes también, es muy importante que la frecuencia de corte del filtro paso alto fuese 0,1 Hz y no más, pero con los elementos disponibles era prácticamente imposible conseguir eso.

En cuanto a la conclusión de la comparación entre los tres colores, hay un claro “perdedor”. El color verde da resultados parecidos a los otros dos colores, pero peor que ellos en todos los parámetros. En cambio, como se ha explicado en el capítulo anterior, los leds rojo e infrarrojo han conseguido resultados similares a lo que se podía esperar con los recursos

utilizados. También es importante reiterar que se podría usar otro tipo de filtro para el filtro paso banda o de número de polos en este mismo filtro para ir modificando la señal como lo exija cada conjunto de datos y así obtener mejores resultados. Pero siguiendo este diseño y este tipo de filtro, una de las formas que se podrían encontrar para mejorar sería si se consigue que el filtro paso alto tenga la frecuencia de corte que debería.

## REFERENCIAS

- [1] J. G. Webster, Bioinstrumentation, Wiley International Edition [Libro], 2008.
- [2] H. J. C. «RiberaSalud: "Tipos de Pruebas diagnósticas: electromiografía" (Artículo),» 2 Abril 2018. [En línea]. Available: <https://riberasalud.com/juan-cardona/2018/04/02/electromiografia-tipos-de-pruebas-diagnosticas/>. [Último acceso: Junio 2024].
- [3] P. d. M. Clinic, «Mayo Clinic: "Electromiografía" (Artículo),» 21 Mayo 2019. [En línea]. Available: [https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/emg/about/pac-20393913#:~:text=La%20electromiograf%C3%ADa%20\(EMG\)%20es%20un,los%20controlan%20\(neuronas%20motoras\)](https://www.mayoclinic.org/es/tests-procedures/emg/about/pac-20393913#:~:text=La%20electromiograf%C3%ADa%20(EMG)%20es%20un,los%20controlan%20(neuronas%20motoras).). [Último acceso Junio 2024]
- [4] J. Allen, «IOPscience: "Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement" (Artículo),» 20 Febrero 2007. [En línea]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0967-3334/28/3/R01>. [Último acceso: Junio 2024].
- [5] R. M. Medrán, «Trabajo Fin de Grado: "Medición del ritmo cardíaco mediante fotoplethysmografía",» 2018. [En línea]. Available: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/12461/fichero/PFC-2461-MEDRAN.pdf>. [Último acceso: Junio 2024].
- [6] A. Kamal, J. Harness, J. Irving y A. Means, «ScienceDirect: "Skin photoplethysmography — a review" (Artículo),» 14 Agosto 2003. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0169260789901594>. [Último acceso: Junio 2024].
- [7] «Universidad Politecnica de Cataluña: "Crónica de la ingeniería biomédica en España 1976-2000" (Artículo),» 24 Enero 2023. [En línea]. [Último acceso: Junio 2024].

- [8] M. J. Vidal Ledo, R. Avello Martínez, M. A. Rodríguez y J. A. Menéndez Bravo, «SciELO: "Simuladores como medios de enseñanza" (Artículo),» 1 Diciembre 2019. [En línea]. Available: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-21412019000400008](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412019000400008). [Último acceso: Junio 2024].
- [9] B. Nagappan y H. Homavazir, «Dialnet: "Exploración de la contribución de la ingeniería a la mejora del flujo de trabajo y la eficiencia en enfermería" (Extracto de Revista),» 6 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9072043>. [Último acceso: Junio 2024].
- [10] O. J. O. d. Rio, «Revistas Udistrital: "La informática en la investigación biomédica. Análisis de señales biomédicas" (artículo),» 15 Mayo 2017. [En línea]. Available: [file:///C:/Users/Usuario/Downloads/aabuchar,+v6n1a11+\(2\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/aabuchar,+v6n1a11+(2).pdf). [Último acceso: Junio 2024].
- [11] «Instituto nacional de bioingeniería e imágenes biomédicas: "Sistemas de administración de medicamentos "(Artículo),» Marzo 2022. [En línea]. Available: <https://www.nibib.nih.gov/sites/default/files/2022-05/Fact-Sheet-Sistemas-de-administraci%C3%B3n-de-medicamentos.pdf>. [Último acceso: Junio 2024].
- [12] E. Guzman Muñoz y G. Mendez Rebolledo, «SciELO, Revista Salud Uninorte: "Electromiografía en las Ciencias de la Rehabilitación" (Artículo),» Diciembre 2018. [En línea]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-55522018000300753](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-55522018000300753). [Último acceso: Junio 2024].
- [13] «Ndd: "¿El pletismógrafo corporal sigue siendo el método de referencia para las PFP?" (Artículo),» [En línea]. Available: <https://nddmed.com/es/soluciones/el-proximo-metodo-de-referencia-para-los-volumenes-pulmonares>. [Último acceso: Junio 2024].
- [14] N. Olarte Lopez, J. Sanchez Ramirez, C. Orrego Muñoz y G. Echeverry Vasquez, «Revista Interdisciplinar de Estudios en Ciencias Básicas e Ingenierías: "EVALUACIÓN DE AMPLITUD Y FRECUENCIA MEDIANTE EL ACONDICIONAMIENTO DE PULSO PLETISMOGRÁFICO Y POSTERIOR EXTRACCIÓN OXIMÉTRICA"

(Informe),» Diciembre 2019. [En línea]. Available:

[file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeAmplitudYFrecuenciaMedianteElAcondicio-8742437.pdf)

[EvaluacionDeAmplitudYFrecuenciaMedianteElAcondicio-8742437.pdf](file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Dialnet-EvaluacionDeAmplitudYFrecuenciaMedianteElAcondicio-8742437.pdf). [Último acceso: Junio 2024].

[15] «Lifeder: "Sístole y Diástole" (Artículo),» 24 Junio 2022. [En línea]. Available:

<https://www.lifeder.com/sistole-y-diaстole/>. [Último acceso: Junio 2024].

[16] «Naciones Unidas: "Objetivos de Desarrollo Sostenible" (Apartado Página Web),» 29 Agosto 2018. [En línea]. Available:

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2018/08/sabes-cuales-son-los-17-objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: Mayo 2024].

[17] «mDurance: "Guía básica (y ejemplos) de interpretación de la señal de EMG

[+VIDEO]" (Artículo),» 18 Agosto 2020. [En línea]. Available:

<https://mdurance.com/blog/guia-basica-como-interpretar-la-electromiografia/> . [Último acceso: Junio 2024].

[18] L. Gilla, A. Malanda, I. Rodríguez Carreño, J. Rodríguez Falces y J. Navallas,

«SciELO: "Métodos de procesamiento y análisis de señales electromiográficas" (informe),» 2009. [En línea]. Available:

[https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1137-66272009000600003](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1137-66272009000600003). [Último acceso: Junio 2024].

[19] «Texas Instruments: "INA826 Precision, 200- $\mu$ A Supply Current, 3-V to 36-V Supply" (Hoja de características),» Agosto 2011. [En línea]. Available:

[https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/4248668/mod\\_resource/content/1/ina826.pdf](https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/4248668/mod_resource/content/1/ina826.pdf). [Último acceso: Junio 2024].

[20] R. Giannetti, «Biomedical Electronics and Instrumentation: "amplifying EMG signals" [Enunciado Práctica],» 10 Octubre 2023. [En línea]. Available:

[https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/4248688/mod\\_resource/content/2/myo-ampli.pdf](https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/4248688/mod_resource/content/2/myo-ampli.pdf). [Último acceso: Febrero 2024].

- [21] R. Giannetti, «Biomedical Electronics and Instrumentation: "Photo-Plethysmography Sensor"(Enunciado Práctica),» 2 Noviembre 2023. [En línea]. [Último acceso: Febrero 2024].
- [22] «Complubot: "MCP6002 - Amplificador operacional" (Tienda),» [En línea]. Available: <https://shop.complubot.com/mcp6002--amplificador-operacional-p-1-50-696/>. [Último acceso: Junio 2024].
- [23]. L. Brayans Becerra, R. Martínex-Memije, R. Cartas-Rosado, O. Infante-Vázquez<<Scielo: “Aumento en la efectividad de la identificación de cimas y pies en el pulso fotopletismográfico al reconstruirlo mediante filtrado adaptativo” Marzo 2017 [En línea]. Available: [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-99402017000100061](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-99402017000100061) [Último acceso: Junio 2024].
- [24] «Departamento de Fisiología: "Taller de interpretación del electrocardiograma."(Informe Práctica),» [En línea]. Available: <https://fisiologia.facmed.unam.mx/index.php/taller-de-interpretacion-del-electrocardiograma/>. [Último acceso: Junio 2024].
- [25] Onsemi: “General Purpose Transistors” (Datasheet) [En línea]. Available: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/2n3903-d.pdf> [Último acceso: Febrero 2024]
- [26] Wileba Electrónica (Calculadora Web) [En línea]. Available: <https://wilaebaelectronica.blogspot.com/2017/01/filtro-pasa-altos-activo-de-2do-orden-sallen-key.html> 23 Septiembre 2018 [Último acceso: Junio 2024]
- [27] La web de Juanki[En línea]. Available: <https://www.ugr.es/~juanki/LED.htm> [Último acceso 2024]
- [28] alldatasheet: “SFH203P Datasheet (PDF) - Siemens Semiconductor Group” (Datasheet) [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/45626/SIEMENS/SFH203P.html> [Último acceso Junio 2024]

[29] Osram: “SFH 203 P Datasheet” (Datasheet) [En línea]. Available:

[https://www.mouser.es/datasheet/2/588/asset\\_pdf\\_5174114-3419302.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/588/asset_pdf_5174114-3419302.pdf) [Último acceso Junio 2024]