

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



***Proyecto Fin de Grado***

**FONENDOSCOPIO INALAMBRICO  
(WIRELESS STETHOSCOPE)**

Para acceder al Título de

**GRADUADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

Carlos Rodríguez Fuente

Septiembre – 2015

<b>TÍTULO</b>	<b>FONENDOSCOPIO INALAMBRICO</b>		
<b>AUTOR</b>	<b>Carlos Rodriguez Fuente</b>		
<b>DIRECTOR / PONENTE</b>	<b>Mar Martínez Solórzano</b>		
<b>TITULACIÓN</b>	<i>Grado Ingeniería Electrónica Industrial y Automática</i>	<b>FECHA</b>	14/09/2015

## **PLABRAS CLAVE**

**Fonendoscopio Inalámbrico, auscultación, Amplificación de sonido, Transmisión FM, Audio de calidad, Ruidos Pulmonares y Cardiacos.**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

**Lograr un prototipo que permita transmitir el audio que se escucha en una auscultación médica tanto de corazón como pulmonar de manera inalámbrica. Facilitando de esta manera el aprendizaje de alumnos y residentes en los hospitales universitarios.**

**La comunicación debe de poder emitirse a más de un usuario, incluyendo el propio médico que se encuentra con el paciente. A su vez, el prototipo debe de ser de fácil manejo y totalmente portátil e independiente.**

## **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

**El prototipo se ha realizado empleando una etapa de amplificación que capta el sonido mediante un micrófono, tras esta etapa de amplificación el sonido se pasa por un filtro para eliminar posibles ruidos, y se envía mediante FM a los dispositivos receptores (Radios, Móviles...).**

**El dispositivo posee una batería para darle autonomía, así como también dispone de una pantalla donde visualizar la frecuencia a la que se emite, un indicador del volumen o ganancia al que estamos amplificando el sonido y dos pulsadores para manejarse por estas pantallas.**

**Se realizó una caja impresa en 3D para integrar todos los componentes y dar una idea para posibles futuras versiones, tanto del tamaño como del aspecto visual.**

## **CONCLUSIONES / PRESUPUESTO**

<b>PRESUPUESTO TAREAS DE DISEÑO Y PROTOTIPADO:</b>	<b>2412.5</b>
<b>PRESUPUESTO MATERIALES:</b>	<b>25.79</b>
<b>TOTAL:</b>	<b>2438.47</b>

Este Coste total, es para la primera unidad del prototipo. Los costes más elevados son los de mano de obra y diseño. Si se propusiera una producción en semiserie, de unas 100 unidades, ya que el material académico es de muy baja tirada, se podrían reducir significativamente los gastos de la forma que se podrían amortizar los costes de diseño entre las 100 unidades, y bajar los costes.

## BIBLIOGRAFÍA

[1]. [http://www.med.umich.edu/lrc/psb\\_open/repo/primer\\_heartsound/primer\\_heartsound.html](http://www.med.umich.edu/lrc/psb_open/repo/primer_heartsound/primer_heartsound.html) - Sonidos Cardiacos

[2]. <http://electronicayciencia.blogspot.com.es/2010/06/utilizar-un-microfonoelectret.html> - Uso y conocimientos micrófono electrec

[3]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf> - Datasheet LM324

[4]. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6910123fa.pdf> - Datasheet LTC6910

[5]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv702.pdf> - Datasheet TLV702

[6]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf> - Datasheet LM2776

[7]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22036a.pdf> - Datasheet MCP73811

[8]. [http://radio-z.ucoz.lv/kt\\_0803/KT0803L\\_V1.3.pdf](http://radio-z.ucoz.lv/kt_0803/KT0803L_V1.3.pdf) - Datasheet KT0803

[9]. <https://www.arduino.cc/> - Documentación Arduino

[10]. <http://www.ti.com/lit/ds/ti/analog/webench/webench-filters.page?DCMP=sva-webfilter-en&HQS=sva-web-filter-pr-en> – Filter Pro

[11]. Instrumentación electrónica – 9788428337021 - MIGUEL ANGEL PEREZ GARCIA

[12]. <http://www.cadsoftusa.com/> - Eagle Versión Estudiante

[13]. [http://www.wryr.org/Antenna\\_instructions.pdf](http://www.wryr.org/Antenna_instructions.pdf) - Antena FM

[14]. <http://www.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf> - HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER APPLICATIONS

[15]. [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SSD1306](https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306) - Liberia OLED



# DOCUMENTOS

**1. MEMORIA**

**2. PLIEGO DE CONDICIONES**

**3. PRESUPUESTO**

**4. ANEXOS**

# INDICE

<b>MEMORIA</b> .....	<b>8</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>8</b>
1.1 MOTIVACIÓN.....	8
1.2 OBJETIVOS .....	10
<b>2. EXPERIMENTACIÓN</b> .....	<b>12</b>
2.1 PRUEBAS DE SONIDO .....	12
2.2 METODOLOGIA.....	14
2.3 CONCLUSIONES.....	22
<b>3. DISEÑO DE HARDWARE</b> .....	<b>24</b>
3.1 ETAPA DE FILTRADO .....	24
3.1.1 Resumen .....	24
3.1.2 Diseño.....	24
3.2 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN .....	37
3.2.1 Resumen .....	37
3.2.2 Diseño.....	38
3.3 TRANSMISION FM .....	46
3.3.1 Resumen .....	46
3.3.2 Diseño.....	47
3.4 ETAPA DE CONTROL E INTERFACE .....	50
3.4.1 Diseño.....	50
3.5 ETAPA DE ALIMENTACION .....	53
3.5.1 Diseño.....	53
3.6 PCB.....	57
3.6.1 Resumen .....	57
3.6.2 Diseño.....	57
3.6.3 Pruebas .....	59
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	<b>64</b>
<b>PLIEGO DE CONDICIONES</b> .....	<b>66</b>
1. CONDICIONES ORGANIZATIVAS.....	66
2. CONDICIONES TECNICAS .....	67
<b>PRESUPUESTO</b> .....	<b>69</b>
1. PRESUPUESTO TAREAS DE DISEÑO Y PROTOTIPADO .....	69
2. PRESUPUESTO MATERIALES .....	69
<b>ANEXOS</b> .....	<b>71</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>76</b>

# INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1 - Estetoscopio Moderno .....	8
Ilustración 2 - Estetoscopio Primitivo.....	9
Ilustración 3 -Zona Aortica .....	12
Ilustración 4 - Zona Ápex .....	12
Ilustración 5 - Zona Pulmonar Frontal .....	13
Ilustración 6 - Zona Pulmonar Lateral .....	13
Ilustración 7 - Micrófono Electret.....	13
Ilustración 8 - Osciloscopio .....	14
Ilustración 9 - Circuito Micrófono.....	14
Ilustración 10 - Circuito Electret para pruebas.....	15
Ilustración 11 - Early Systolic Murmur .....	16
Ilustración 12 – Filtro 1KHz .....	16
Ilustración 13 - Filtro 2KHz.....	16
Ilustración 14 - Señal sin filtrar .....	16
Ilustración 15 - Holosystolic Murmur .....	17
Ilustración 16 - Filtro 1KHz.....	17
Ilustración 17 - Filtro 2KHz.....	17
Ilustración 18 – Señal sin filtrar .....	17
Ilustración 19 - Holosystolic Murmur .....	18
Ilustración 20 - Filtro 1KHz.....	18
Ilustración 21 – Filtro 2KHz .....	18
Ilustración 22 – Señal sin filtrar .....	18
Ilustración 23 - Mitral Opening Snap and Diastolic Murmur.....	19
Ilustración 24 - Filtro 1KHz.....	19
Ilustración 25 - Filtro 2KHz.....	19
Ilustración 26 - Señal sin filtro .....	19
Ilustración 27 - Systolic Murmur with Absent S2.....	20
Ilustración 28 - Filtro 1Khz .....	20
Ilustración 29 - Filtro 2Khz .....	20
Ilustración 30 - Señal sin filtro .....	20
Ilustración 31 - Systolic and Diastolic Murmurs .....	21
Ilustración 32 - Filtro 1KHz.....	21
Ilustración 33 - Filtro 2KHz.....	21
Ilustración 34 - Señal sin filtro .....	21
Ilustración 35 - OPAMP LM324 .....	24
Ilustración 36 - Especificaciones Filtro Paso Bajo .....	25
Ilustración 37 - Tipos de Filtros (Paso Bajo).....	26
Ilustración 38 - Topologia Sallen-Key (Paso Bajo) .....	26
Ilustración 39 - Grafica Margen de Fase / Ganancia (Paso Bajo).....	27
Ilustración 40 - Especificaciones Filtro Paso Alto .....	27
Ilustración 41 - Tipos de Filtro (Paso Alto).....	28
Ilustración 42 - Topologia Sallen-Key (Paso Alto) .....	28
Ilustración 43 - Grafica Margen de Fase / Ganancia (Paso Alto).....	28
Ilustración 44 - Esquemático Filtros OrCaD .....	29

Ilustración 45 - Simulación temporal .....	29
Ilustración 46 - Simulación temporal 500Hz .....	29
Ilustración 47 - Simulación temporal 1KHz.....	30
Ilustración 48 - Simulación temporal 20Hz .....	30
Ilustración 49 - Simulación temporal 5KHz.....	30
Ilustración 50 - Respuesta en frecuencia .....	31
Ilustración 51 - Configuración FA .....	32
Ilustración 52 - Montaje de pruebas .....	32
Ilustración 53 - Filtro real (1KHz).....	33
Ilustración 54 - Filtro real (5KHz).....	33
Ilustración 55 - Filtro real (10KHz).....	34
Ilustración 56 - Muestra real 1 .....	34
Ilustración 57 - Muestra real 2.....	35
Ilustración 58 - Muestra real 3.....	35
Ilustración 59 - Muestra real 4 .....	35
Ilustración 60 - Especificaciones LTC6910.....	38
Ilustración 61 - LTC6910.....	38
Ilustración 62 - Esquema LTSpice.....	39
Ilustración 63 - Simulación 10V/V 1Khz .....	39
Ilustración 64 - Simulación 10V/V 50Hz .....	40
Ilustración 65 Simulación 10V/V 2Khz.....	40
Ilustración 66 - LTC6910-2 TSOP .....	41
Ilustración 67 - Sinusoidal 1.2KHz.....	41
Ilustración 68 - Prueba LTC6910 a 1.2KHz .....	42
Ilustración 69 – Sinusoidal a 400Hz .....	42
Ilustración 70 - 400Hz Ganancia 1 .....	42
Ilustración 71 - 400Hz Ganancia 2 .....	43
Ilustración 72 - 400Hz Ganancia 4 .....	43
Ilustración 73 - Saturación del amplificador.....	43
Ilustración 74 - KT0803L.....	47
Ilustración 75 - Datasheet KT0803L.....	47
Ilustración 76 - Modulo FM y Arduino.....	48
Ilustración 77 - OLED (Frecuencia).....	50
Ilustración 78 - OLED (Ganancia) .....	51
Ilustración 79 - OLED (Batería) .....	51
Ilustración 80 - OLED (Silencio) .....	52
Ilustración 81 - Consumo .....	53
Ilustración 82 - TLV702 .....	53
Ilustración 83 - LM2776.....	54
Ilustración 84 - Etapa de Alimentación .....	54
Ilustración 85 - Tensión Negativa .....	54
Ilustración 86 - Tensión Positiva .....	54
Ilustración 87 - Salida Negativa.....	55
Ilustración 88 - LM324 Sin Usar .....	57
Ilustración 89 - PCB BOT .....	58
Ilustración 90 - PCB TOP .....	58
Ilustración 91 - Etapa Alimentación (PCB) .....	60
Ilustración 92 - Tensión Positiva (PCB).....	60
Ilustración 93 - Tensión Negativa (PCB) .....	60
Ilustración 94 - Etapa Filtrado (PCB).....	61

Ilustración 95 - Filtro PCB 400Hz .....	61
Ilustración 96 - Filtro PCB 20Hz .....	62
Ilustración 97 - Filtro PCB 3.3KHz.....	62
Ilustración 98 - PCB Final .....	63

# RESUMEN

A día de hoy nos encontramos en una sociedad en la cual el uso de la tecnología está en aumento de forma constante, y estamos desarrollando productos electrónicos relacionados con todos los ámbitos de nuestra vida, tanto a nivel personal como profesional, siendo la medicina uno de ellos.

La exploración de los sonidos que se producen en el interior de un organismo humano siempre ha sido una referencia para el diagnóstico de dolencias tanto cardíacas como pulmonares sobre todo desde la invención del fonendoscopio.

El objetivo principal de nuestro trabajo es proveer de una herramienta para el personal médico, que permita una exploración del paciente lo menos invasiva posible, facilitando que los sonidos captados, puedan ser enviados a diferentes dispositivos, evitando de esta forma que cada uno de los residentes que acompañan a un médico en un hospital universitario tengan que intervenir en la auscultación, siendo esta menos agresiva para el paciente.

El objetivo será lograr un sistema portable y de bajo coste, que nos brindara la capacidad de poder realizar ampliaciones del mismo en un futuro mejorando la funcionalidad.

# MEMORIA

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 MOTIVACIÓN

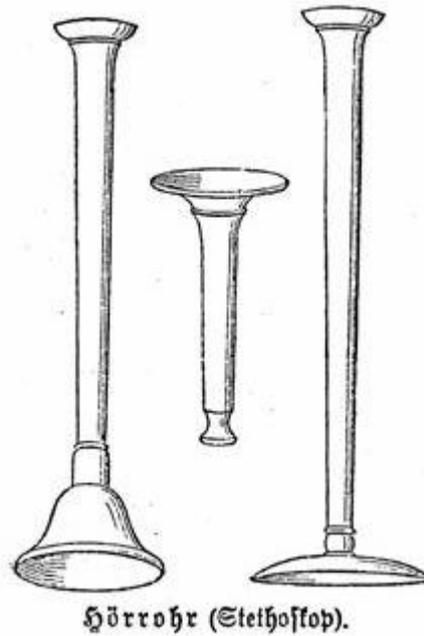
Actualmente existe una fuerte relación entre la medicina y la electrónica. Cada día tenemos instrumental nuevo, que aúna un desarrollo electrónico con técnicas que se llevan empleando a lo largo de los años con verdadera eficacia. Juntando ambos ámbitos se obtiene una mejora sustancial en el desempeño de la medicina, logrando tanto mejoras en los tratamientos, como en los diagnósticos.

Uno de los instrumentos más empleados para el diagnóstico es el fonendoscopio. Este fue inventado en Francia por el médico René Léanme en 1816, desde entonces, ha tenido una gran aplicación en el mundo de la medicina para el diagnóstico de enfermedades tanto cardíacas como pulmonares.

Existe una evolución en el fonendoscopio a lo largo de los años, llevando a cabo mejoras sobre los mismos, de forma que se ha ido ganando en calidad de sonido, cantidad de sonidos que se pueden captar, así como adaptaciones para diferentes pacientes y enfermedades.



*Ilustración 1 - Estetoscopio Moderno*



*Ilustración 2 - Estetoscopio Primitivo*

El fonendoscopio, también llamado estetoscopio, como tal, tiene el inconveniente, que la persona que lo está usando, no puede comunicar o reproducir dichos sonidos, ya sea a médicos residentes, o estudiantes de prácticas. La tarea de la enseñanza de como auscultar, es algo complejo, debido a que es necesario aplicar el fonendo en una zona determinada, con una presión precisa, que en ocasiones es difícil de reproducir por la persona que se encuentra aprendiendo.

El funcionamiento del fonendoscopio es sencillo, Cuando el corazón late o los pulmones se llenan de aire, se producen unas pequeñas vibraciones de sonido a través del cuerpo. El estetoscopio capta estas vibraciones y el diafragma las amplifica. El sonido pasa por el tubo, que lo transfiere a los auriculares del médico, tal como se muestra en la *Ilustración 1*

## 1.2 OBJETIVOS

El objetivo principal, es lograr transmitir los sonidos captados por el fonendoscopio, al médico que está empleándolo, así como a un número determinado de personas que se encuentre en la sala junto al mismo.

Las características que proponemos para el dispositivo a desarrollar son:

- **Bajo Coste:** uno de los objetivos principales es lograr un desarrollo de bajo coste, que esté al alcance de cualquier unidad médica, sin necesidad de realizar un desembolso elevado.
- **Tamaño Reducido:** la portabilidad del dispositivo es una característica esencial, debido a que el personal médico deberá llevarlo consigo en el hospital, sin que esto suponga una carga o un aumento del tamaño considerable en comparación con los dispositivos clásicos. Se procurara que este incluya una batería para dotarlo de autonomía.
- **Precisión y Fiabilidad:** lograr una correcta calidad en el sonido transmitido es otra premisa de este proyecto. Todos los receptores deben poder identificar con claridad los síntomas que se pueden diagnosticar a través de la escucha de los diferentes sonidos.
- **Facilidad de uso:** dado que el uso actual del fonendoscopio es sencillo, únicamente necesitamos aplicar el mismo en la zona adecuada con la presión adecuada, no queremos complicar esta tarea, por lo tanto buscaremos simplicidad en el uso, reduciendo la cantidad de botones y u opciones disponibles para obtener un instrumento preciso a la vez que de fácil manejo.
- **Ampliación:** como citamos en apartados anteriores, debido a que es un proyecto de desarrollo, se dejara abierta la puerta a posibles ampliaciones en lo que funcionalidades y fiabilidad se refiere.

Partiremos de un análisis de los sonidos recogidos por el fonendoscopio que podremos ver en la sección 2, tras lo cual diseñaremos una etapa para la adecuación de dichas señales, y finalmente procederemos al envío de los datos a los dispositivos receptores.

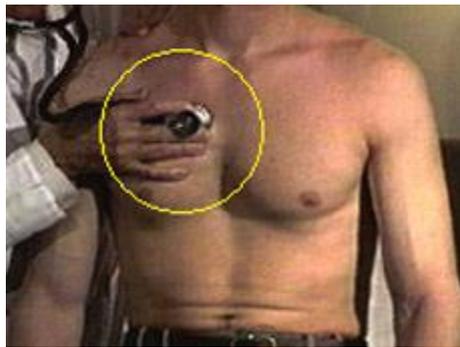


## 2. EXPERIMENTACIÓN

Durante el presente capítulo analizaremos los diferentes sonidos que debemos captar con el dispositivo, empleando referencias en bases de datos disponibles en internet. Tendremos que llevar a cabo un análisis del rango de frecuencias que debemos manipular, así como la amplitud de dichos sonidos tener una referencia en la etapa de filtrado y adaptación.

### 2.1 PRUEBAS DE SONIDO

Tenemos 4 zonas diferentes donde podemos realizar la auscultación. Estas zonas están claramente diferenciadas y donde tenemos que los sonidos recogidos poseen características diferentes, en cuanto a frecuencia y amplitud.



*Ilustración 3 -Zona Aortica*



*Ilustración 4 - Zona Ápex*



*Ilustración 5 - Zona Pulmonar Frontal*



*Ilustración 6 - Zona Pulmonar Lateral*

El equipo que vamos a emplear para realizar las medidas va a constar de lo siguiente:

- **Micrófono Electret.** se trata de un micrófono ampliamente extendido en el mundo del audio, con un coste muy accesible y unas características perfectas para el uso que vamos a darle en este proyecto. Tiene un rango de frecuencias de 50Hz a 15KHz y una sensibilidad entre -50 dB y -70 dB. Otra de las ventajas es que es poco sensible a los cambios ambientales, no siendo sensible a temperaturas elevadas y altos rangos de humedad.



*Ilustración 7 - Micrófono Electret*

- **Auriculares:** para la reproducción de los sonidos sobre el micrófono. De esta forma podemos captar la señal recibida mediante el osciloscopio, y analizar las frecuencias que tenemos en dicha señal.
- **Osciloscopio:** nos permitirá captar la señal de los diferentes sonidos que podemos captar con el fonendoscopio, lo que nos dará una idea clara para posteriormente llevar a cabo el desarrollo de la electrónica adecuada para la adaptación de niveles así como el filtrado de la señal.

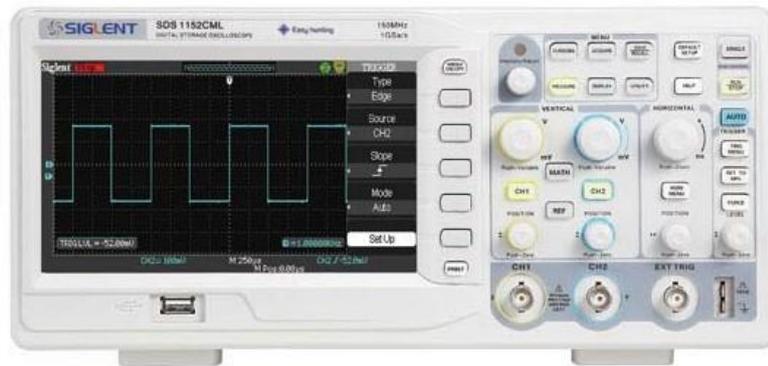


Ilustración 8 - Osciloscopio

## 2.2 METODOLOGIA

Tenemos disponibles en internet diferentes bases de datos con sonidos tanto cardiacos como pulmonares captados con el fonendoscopio, nosotros hemos empleado la base de datos de la *Universidad de Michigan* [1], debemos reproducir estos sonidos de forma que el auricular sea capaz de transmitirlos al micrófono electrec y este al osciloscopio.

El esquema se muestra en la *ilustración 9*, debemos realizar el circuito de alimentación y adaptación del micrófono:

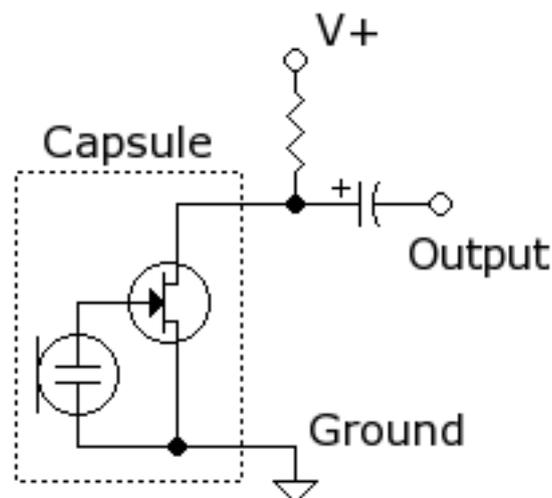
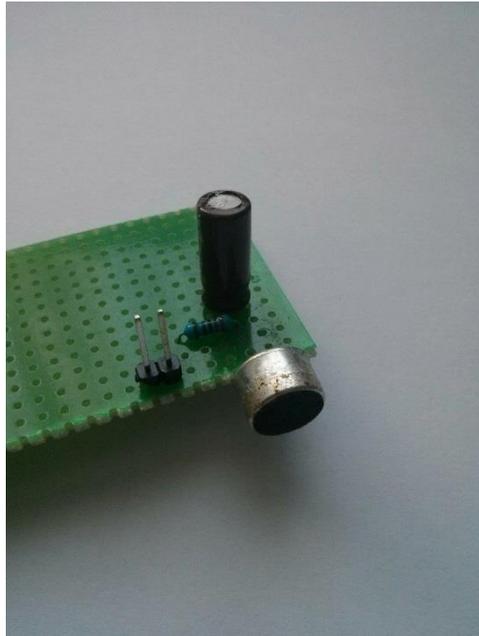


Ilustración 9 - Circuito Micrófono

Dicho circuito, consta del propio micrófono, que en esencia es una lámina capacitiva, junto a un FET, al cual debemos de añadir un condensador en serie a la salida, que funciona como filtro DC, permitiendo solo el paso de la señal AC, así como una resistencia que se encarga de polarizar el transistor.

En nuestro caso, empleamos una resistencia de 2.2K, que a 3V nos da una corriente de 1mA aproximadamente, suficiente para polarizar el FET<sup>1</sup> sin llegar a saturarlo y un condensador de 1uF.



*Ilustración 10 - Circuito Electret para pruebas*

Con dicho circuito, obtenemos una señal de salida AC con un offset mínimo, y con un punto de saturación óptimo.

Tenemos disponibles multitud de sonidos, como citamos anteriormente, pero nos centraremos en los más significativos, los que nos puedan aportar información sobre los límites en frecuencia de los mismos.

Aplicaremos filtros digitales mediante el osciloscopio, para comprobar si tenemos una atenuación excesiva de la señal, lo que nos pueda ocasionar una pérdida considerable de la misma, originando así fallos en la transmisión del audio. Se decidió aplicar filtros del orden de los KHz, en este caso, de 2Khz y 4Khz, así como el muestreo de la señal sin ningún tipo de filtro.

---

<sup>1</sup> FET: o transistor de efecto campo es en realidad una familia de transistores que se basan en el campo eléctrico para controlar la conductividad de un "canal" en un material semiconductor.

1. Ruido Sistólico

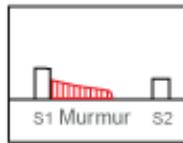


Ilustración 11 - Early Systolic Murmur

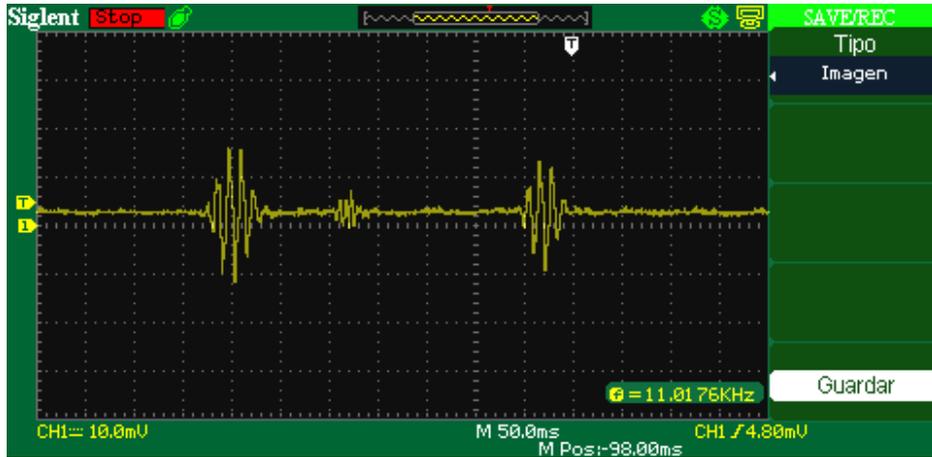


Ilustración 12 - Filtro 1KHz

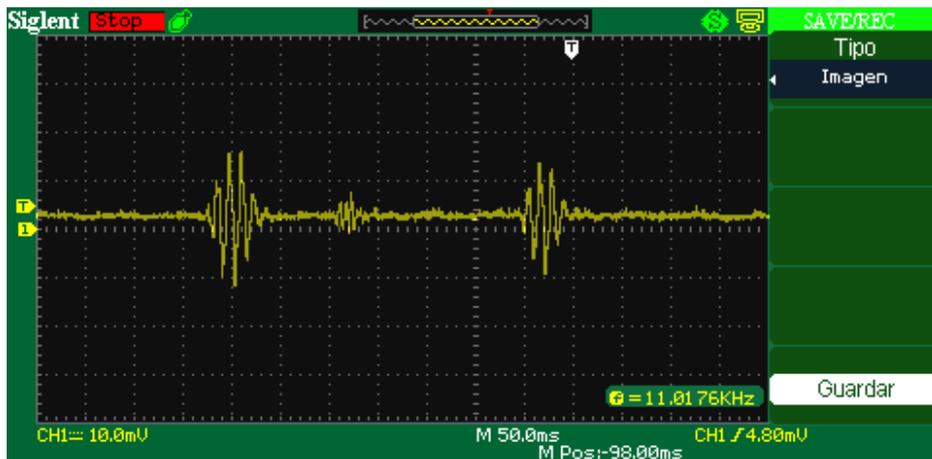


Ilustración 13 - Filtro 2KHz

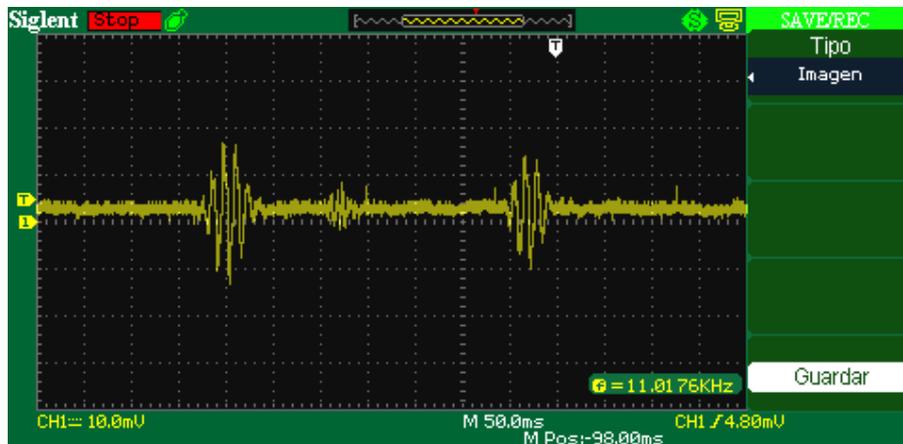


Ilustración 14 - Señal sin filtrar

2. *Soplo Holosistólico*

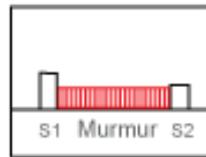


Ilustración 15 - Holosystolic Murmur

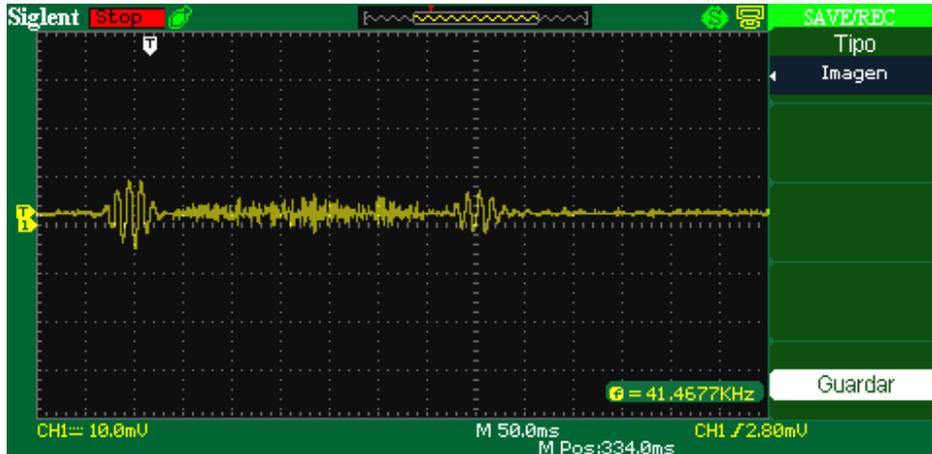


Ilustración 16 - Filtro 1KHz

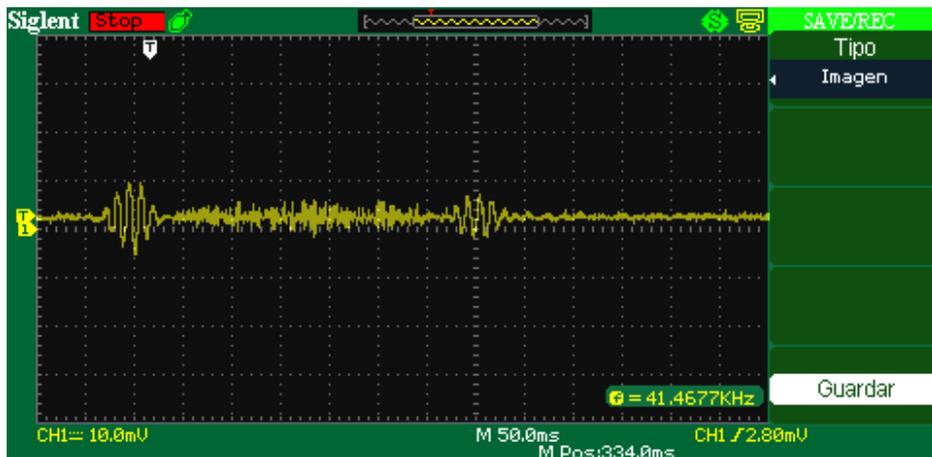


Ilustración 17 - Filtro 2KHz

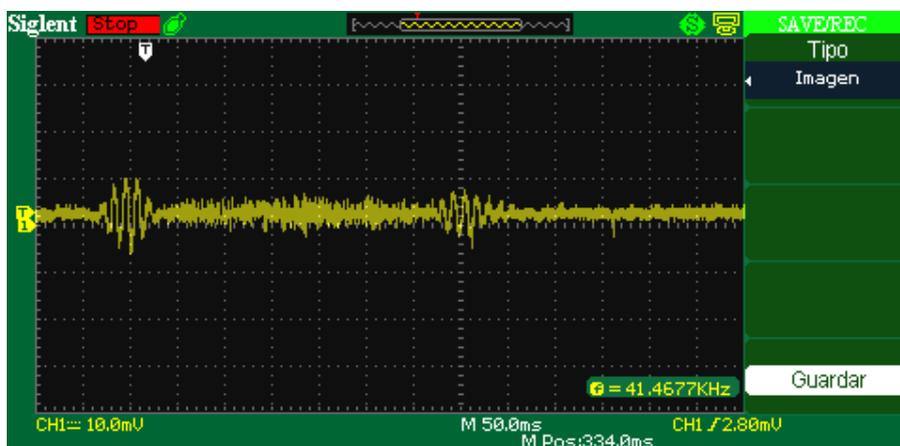


Ilustración 18 – Señal sin filtrar

3. R3 y Soplo Holosistolico

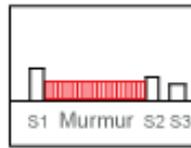


Ilustración 19 - Holosystolic Murmur

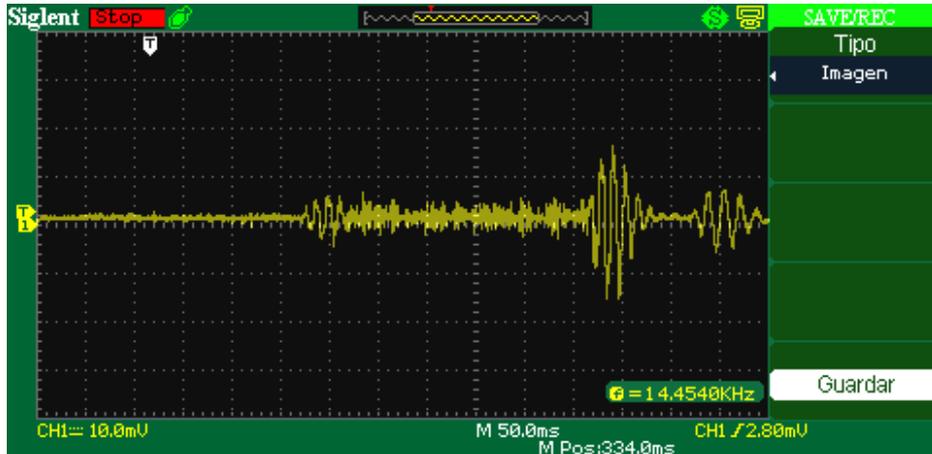


Ilustración 20 - Filtro 1KHz

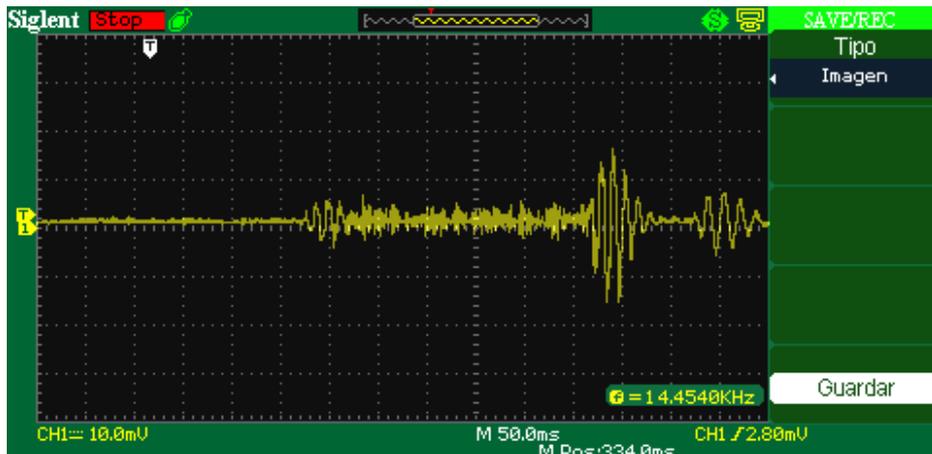


Ilustración 21 – Filtro 2KHz

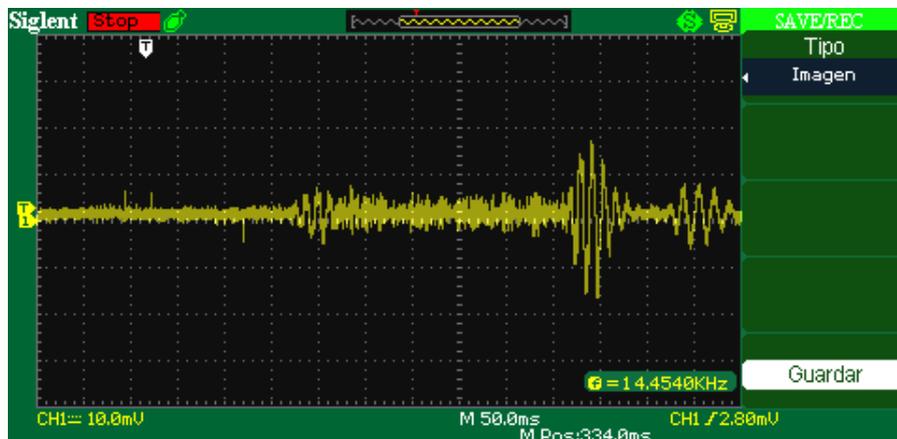


Ilustración 22 – Señal sin filtrar

4. Click de eyección y soplo diastólico

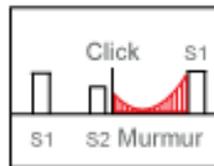


Ilustración 23 - Mitral Opening Snap and Diastolic Murmur

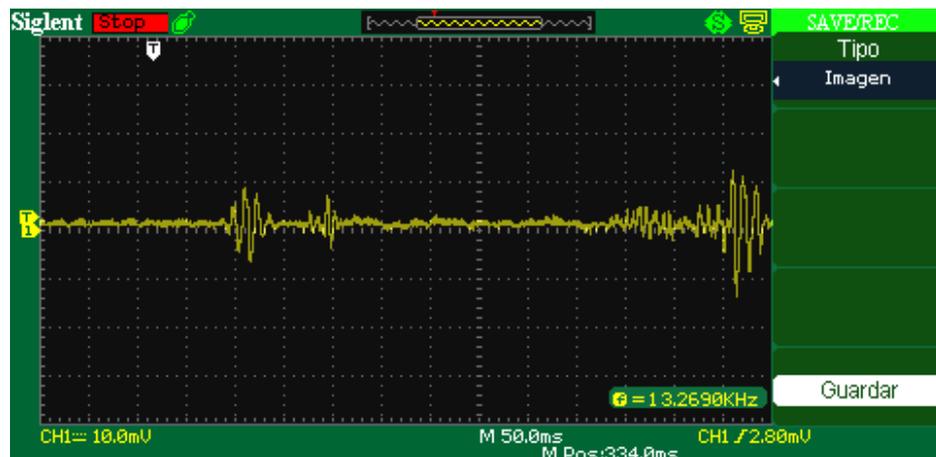


Ilustración 24 - Filtro 1KHz

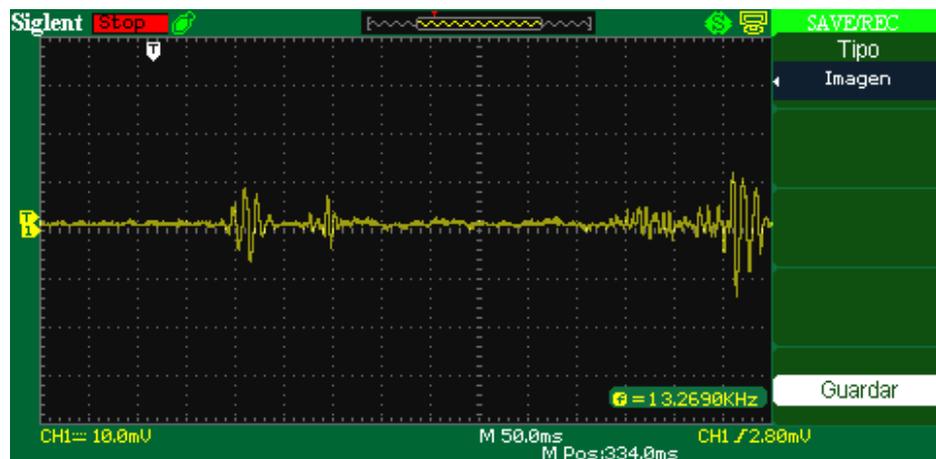


Ilustración 25 - Filtro 2KHz

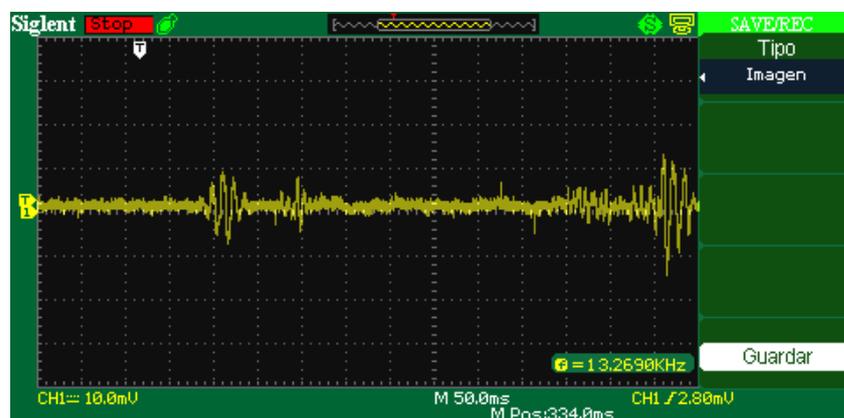


Ilustración 26 - Señal sin filtro

5. Soplo Sistólico con R2 Ausente

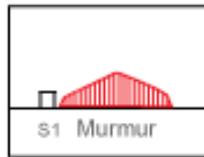


Ilustración 27 - Systolic Murmur with Absent S2

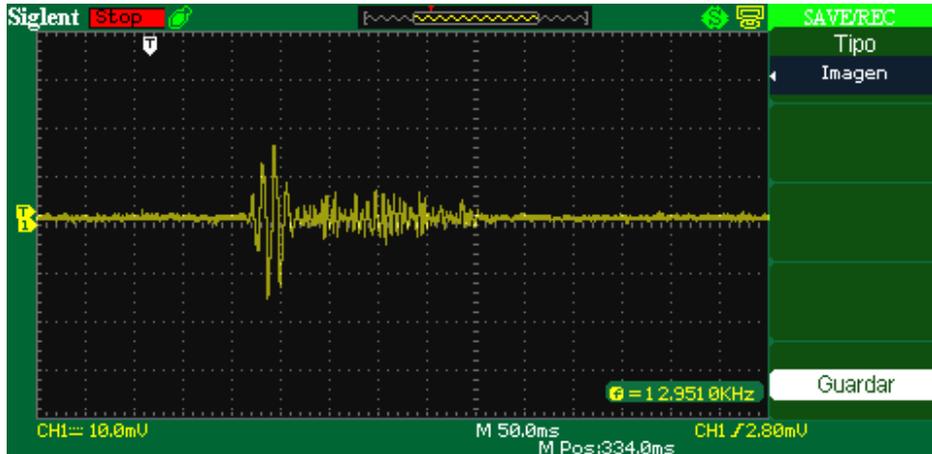


Ilustración 28 - Filtro 1Khz

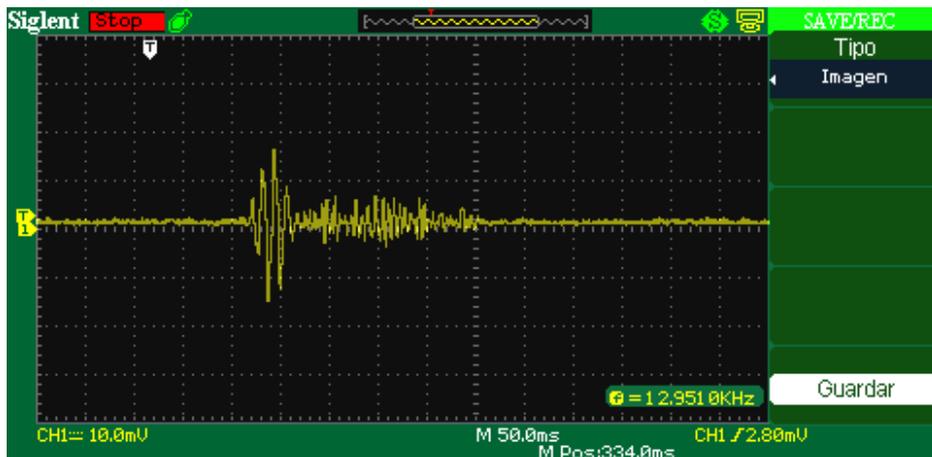


Ilustración 29 - Filtro 2Khz

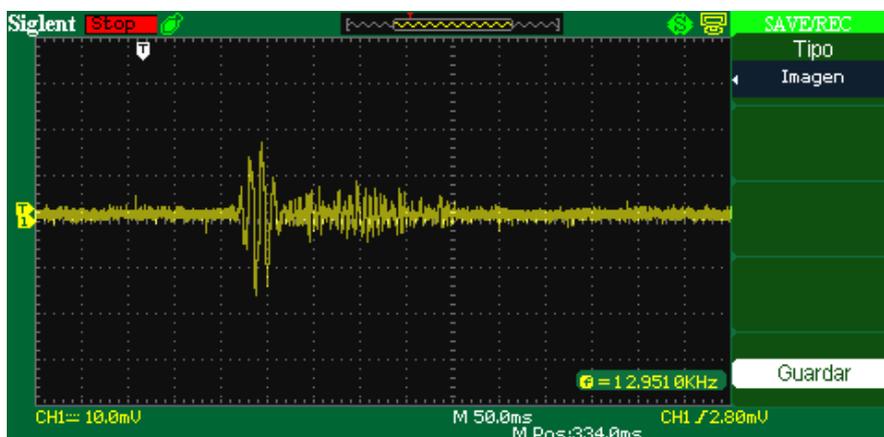


Ilustración 30 - Señal sin filtro

6. Soplo Diastolicos y Sistólicos

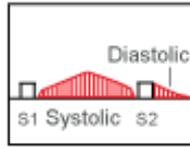


Ilustración 31 - Systolic and Diastolic Murmurs

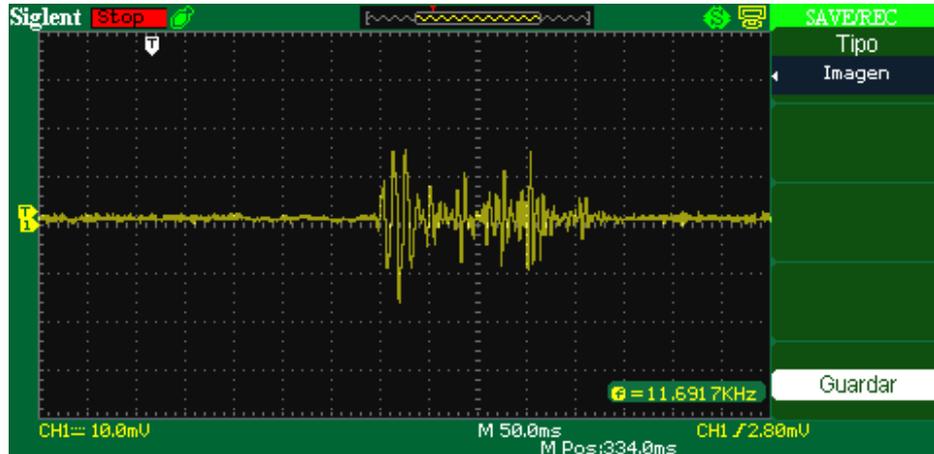


Ilustración 32 - Filtro 1KHz

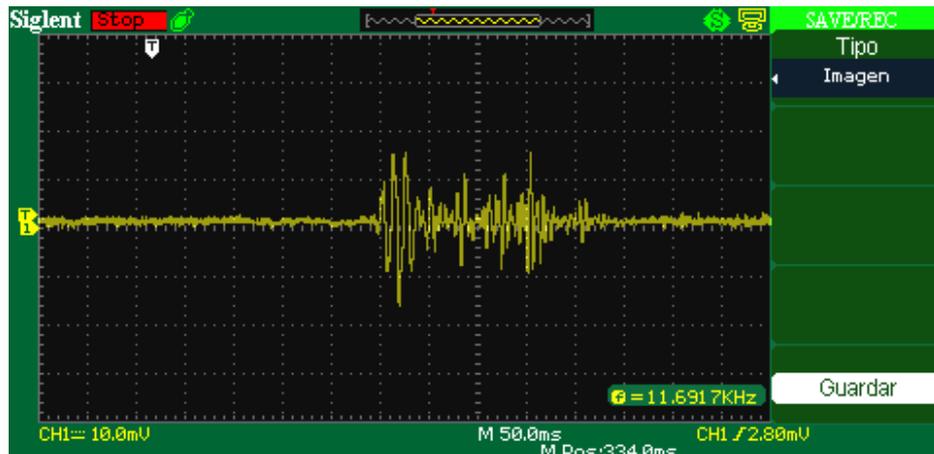


Ilustración 33 - Filtro 2KHz

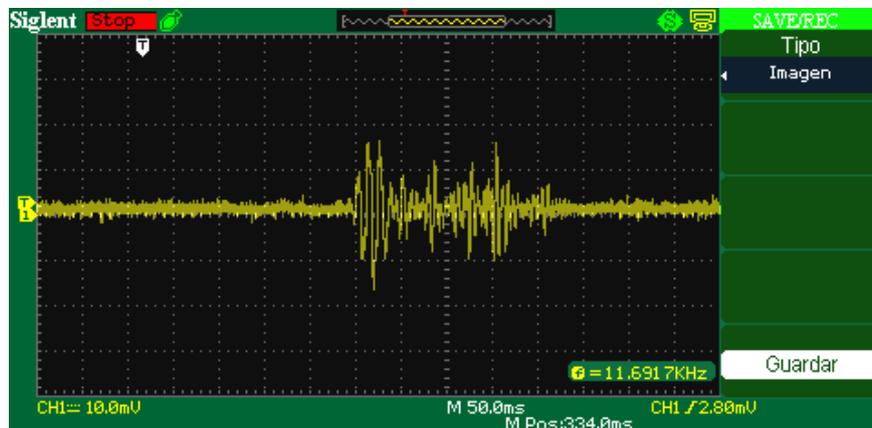


Ilustración 34 - Señal sin filtro

## 2.3 CONCLUSIONES

Tenemos una referencia de dos de cada uno de los tipos de auscultación que podemos realizar. Escogiendo los audios que mayor variación en frecuencia tengan y aplicando los filtros a los mismos, podemos ver que tanto el uso de un filtro de 1KHz como de 2KHz será válido para esta aplicación, no teniendo apenas atenuación de la característica fundamental de la señal.

Debemos tener en cuenta que el oído humano es capaz de captar sonidos, en condiciones ideales de 20Hz a 20KHz, por tanto, por debajo de 20Hz no nos interesa la captación de ningún tipo de señal.

Los sonidos por debajo de los 256Hz se consideran de frecuencias bajas, o graves. Analizando esta información, por debajo de los 30Hz, tenemos sonidos poco comunes, que rara vez son audibles por una persona con características auditivas normales. De esta forma, aplicaremos un filtro paso alto, para eliminar los sonidos de frecuencias inferiores a 30Hz.

Por encima de los 2Khz, no apreciamos sonidos en la serie de pruebas realizadas, emplearemos por tanto un filtro paso bajo para la eliminación de posibles ruidos que puedan entrar en nuestro sistema, por encima de este margen. Con esto, aseguramos también que ruidos de alta frecuencia puedan interferir en nuestro sistema.



## 3. DISEÑO DE HARDWARE

### 3.1 ETAPA DE FILTRADO

#### 3.1.1 Resumen

Para la etapa de filtrado, vamos a diseñar un filtro Paso Banda, mediante el uso de dos filtros, uno de ellos Paso Bajo y otro Paso Alto, los requerimientos de dicha etapa son los siguientes:

- Frecuencia de paso 30Hz – 2KHz
- Tensión de alimentación dual +3V -3V
- Ganancia Unidad

#### 3.1.2 Diseño

Teniendo en cuenta los requerimientos anteriores, vamos a emplear como *Activo* de nuestro circuito, el amplificador operacional de baja potencia LM324, muy conocido en el mundo de la electrónica, con cuatro salidas y posibilidad de alimentación *Single Supply* o *Dual*.

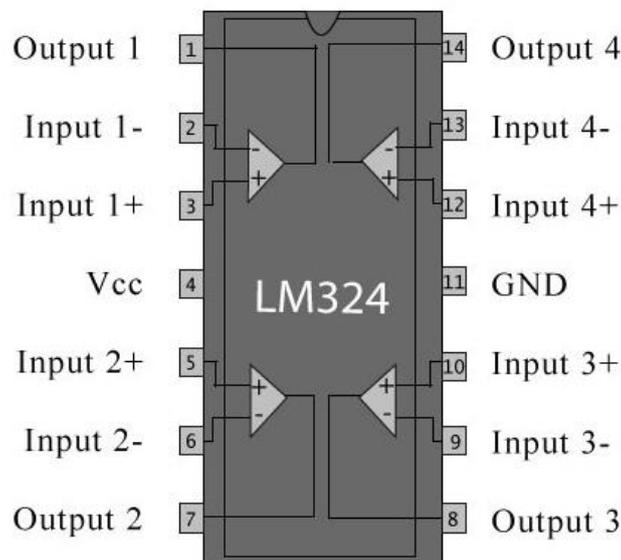


Ilustración 35 - OPAMP LM324

La estructuración de nuestro filtro nos lleva a diseñar una etapa Paso Bajo, y otra Paso Alto conectadas en serie, lo que nos da como resultado un filtro Paso Banda.

Para el diseño inicial del filtro, recurrimos a la herramienta ofrecida por *Texas Instruments*, *Filter Pro* [10]. Herramienta libre y gratuita, que nos posibilita el diseño de filtros introduciendo las especificaciones del mismo.

Comenzamos con el filtro Paso Bajo, estamos interesados en la obtención de un filtro de orden 2, ya que de esta forma aunque la atenuación sea menor que en uno de orden superior, tenemos una única etapa, lo que simplifica el circuito. La ganancia como nos mandan las especificaciones la establecemos a 1, y la frecuencia de paso a 3Khz, debemos tener en cuenta, que el diseño no es ideal, y el inicio de la atenuación es algo inferior a esos 3KHz (Considera la frecuencia de corte en la caída de 3dB), por tanto es mejor asegurarnos de no atenuar frecuencias que no nos interesa atenuar, ampliando en cierto modo la banda de paso.

1. Filter Type  
**Lowpass**

2. Filter Specifications  
 $A_o$ : 1,00 V/V (0,00 dB)  
 $f_c$ : 3000,00 Hz  
 $R_p$ : 1 dB  
 $f_s$ : 5000,00 Hz  
 $A_{sb}$ : -45,00 dB  
 $n$ : 2

3. Filter Response

4. Filter Topologies

### Step 2: Filter Specifications

Please enter filter specifications:

Gain ( $A_o$ ):  V/V  dB

Passband Frequency ( $f_c$ ):  Hz

Allowable Passband Ripple ( $R_p$ ):  dB

Stopband Frequency ( $f_s$ ):  Hz

Stopband Attenuation ( $A_{sb}$ ):  dB

Optional - Filter Order:  Set Fixed

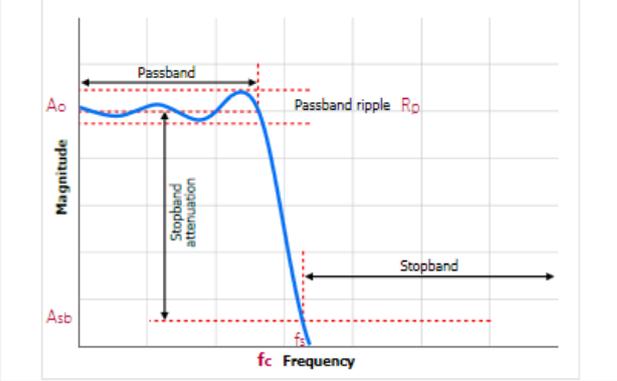


Ilustración 36 - Especificaciones Filtro Paso Bajo

Debemos seleccionar ahora el tipo de filtro que deseamos, teniendo en cuenta que los filtros Bessel y Butherworth nos otorgan una mejor característica en cuanto a ganancia, no teniendo un pico de ganancia cerca de la zona de corte, y que la atenuación viene a ser bastante similar en todos. Teniendo el filtro Bessel un factor de calidad de 0.58, siendo el del Butherworth de 0.71, nos decantamos por este último.

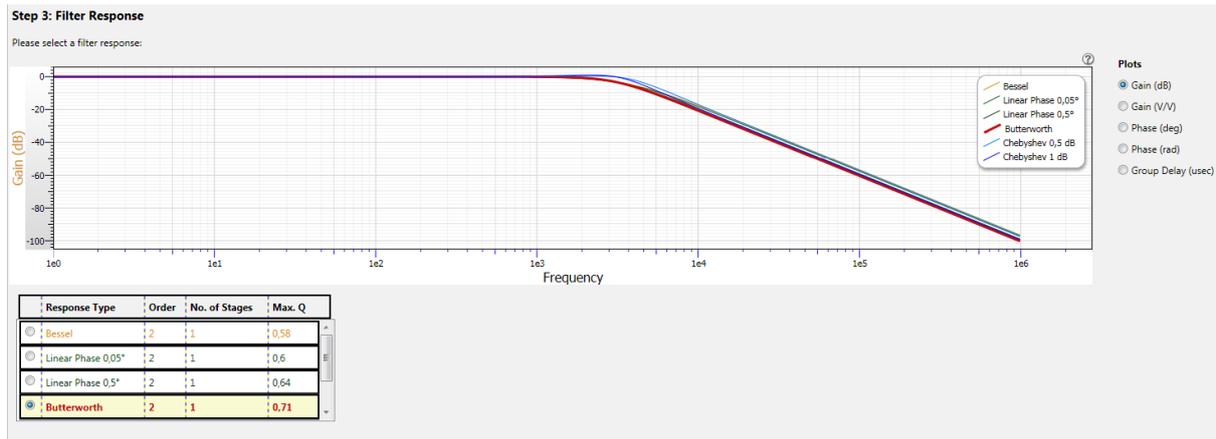


Ilustración 37 - Tipos de Filtros (Paso Bajo)

Para finalizar, empleamos topología Sallen-Key, debido a su estabilidad de ganancia, idónea para filtros con ganancia unidad, y la cantidad de elementos pasivos necesaria es baja. Es un tipo de topología no inversora.

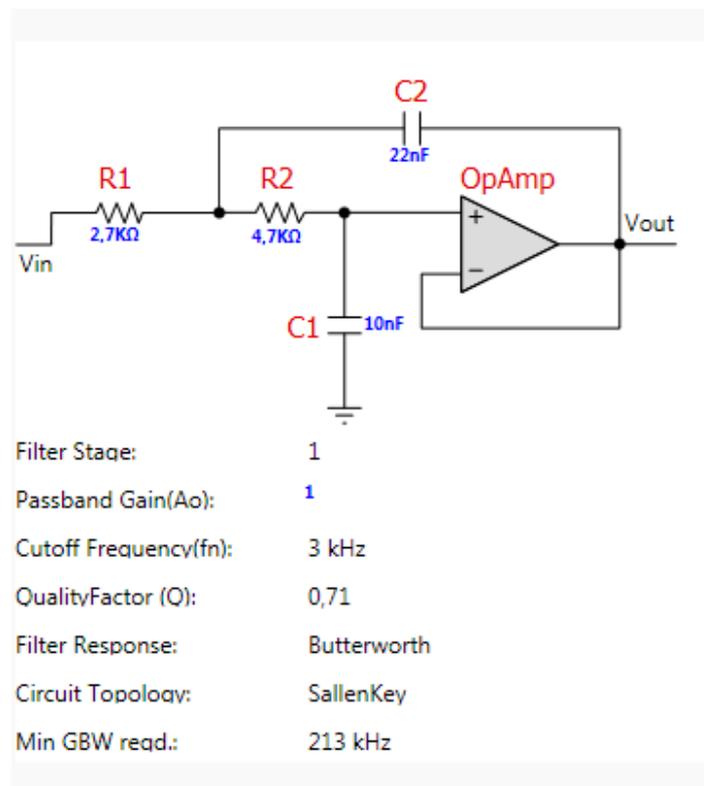


Ilustración 38 - Topología Sallen-Key (Paso Bajo)

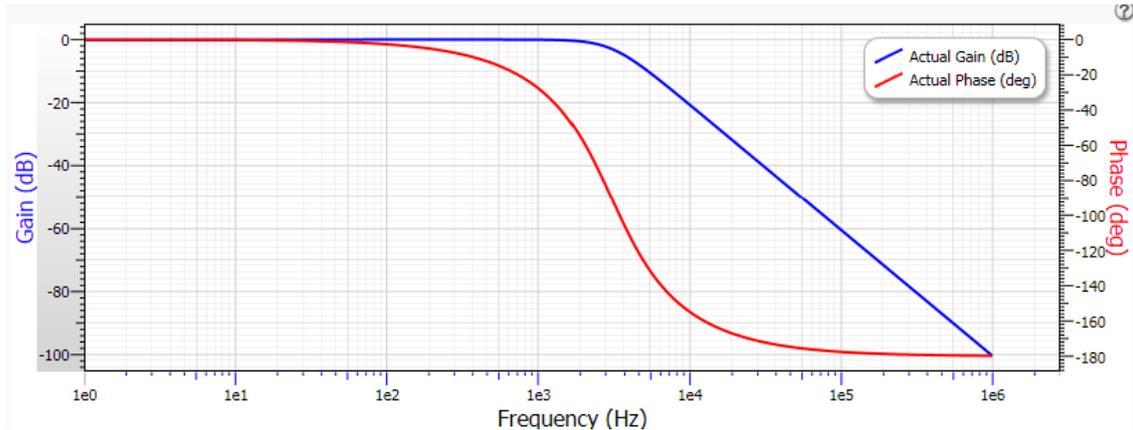


Ilustración 39 - Gráfica Margen de Fase / Ganancia (Paso Bajo)

Proseguimos con el filtro Paso Alto, para eliminar las bajas frecuencias que no deseamos, al igual que con el filtro Paso Bajo, debemos darle cierto margen a la zona de paso para obtener los requerimientos deseados. Situamos la frecuencia de corte en 30Hz, con ganancia unidad.

1. Filter Type  
Highpass

2. Filter Specifications  
A<sub>o</sub>: 1,00 V/V (0,00 dB)  
f<sub>c</sub>: 30,00 Hz  
R<sub>p</sub>: 1 dB  
f<sub>s</sub>: 2000,00 Hz  
A<sub>sb</sub>: -45,00 dB  
n: 2

3. Filter Response  
Bessel  
Order: 2

4. Filter Topologies

### Step 2: Filter Specifications

Please enter filter specifications:

Gain (A<sub>o</sub>):  V/V  dB

Passband Frequency (f<sub>c</sub>):  Hz

Allowable Passband Ripple (R<sub>p</sub>):  dB

Stopband Frequency (f<sub>s</sub>):  Hz

Stopband Attenuation (A<sub>sb</sub>):  dB

Optional - Filter Order:  Set Fixed

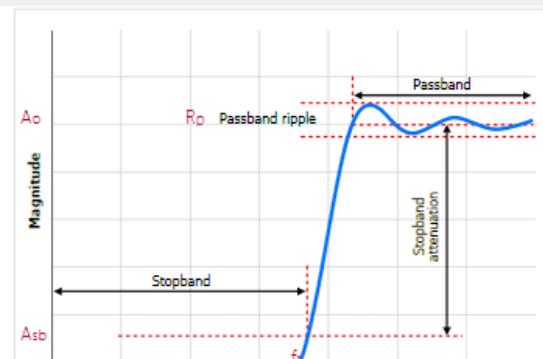


Ilustración 40 - Especificaciones Filtro Paso Alto

Al igual que en la etapa anterior, escogemos filtro Butterworth, que nos otorga un factor de calidad de 0.71 y unas características de atenuación aceptables.

Step 3: Filter Response

Please select a filter response:

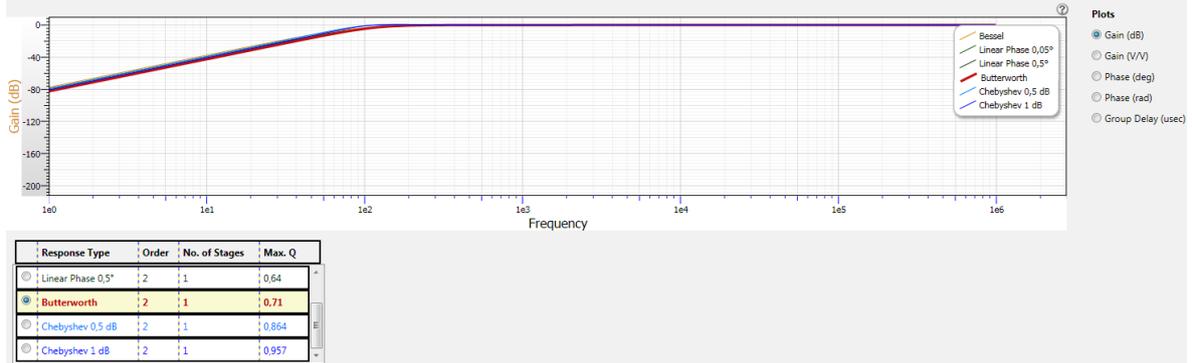


Ilustración 41 - Tipos de Filtro (Paso Alto)

Finalizamos con la topología Sallen-Key, teniendo ya la segunda etapa de nuestro filtro. Ambas etapas formaran el filtro Paso Banda.

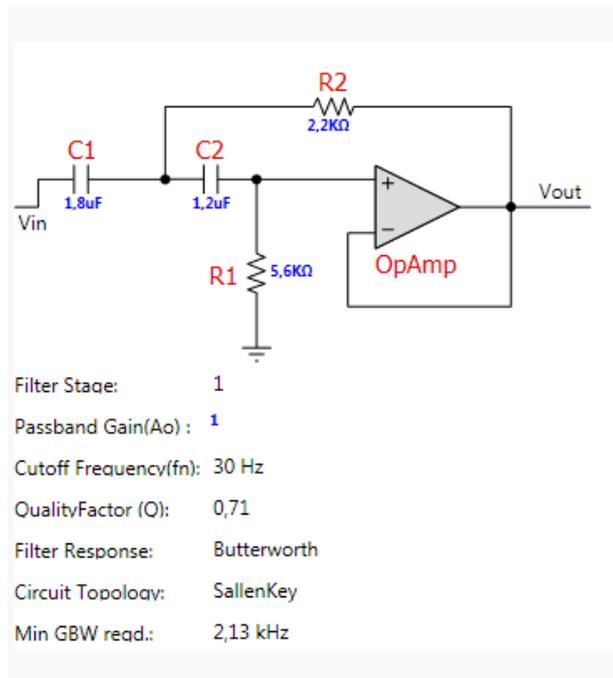


Ilustración 42 - Topologia Sallen-Key (Paso Alto)

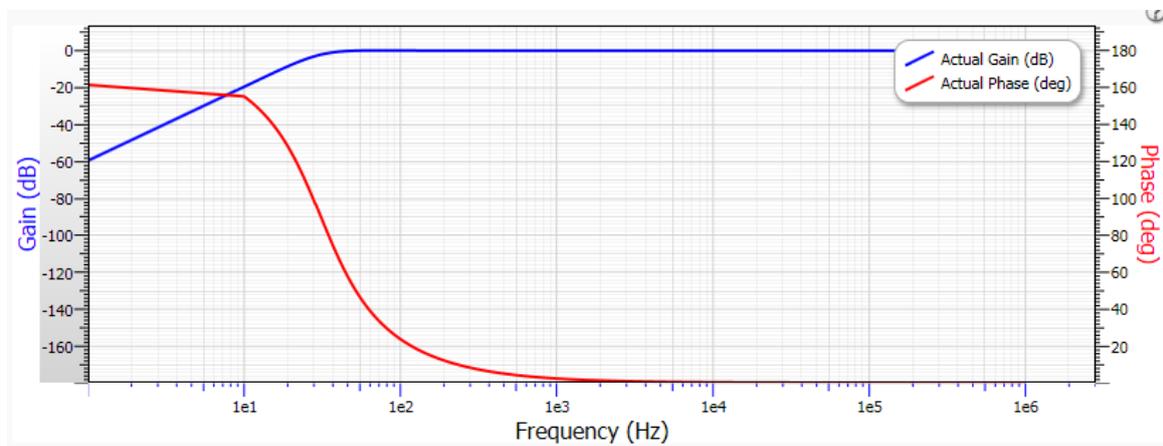


Ilustración 43 - Grafica Margen de Fase / Ganancia (Paso Alto)

Es importante tener en cuenta el parámetro  $GBW_{reqd}$ , en nuestro caso el LM324 tiene un  $GBW$  de 1Mhz, en caso de no cumplir con el  $GBW_{reqd}$  dado en el programa de cálculo, nos podemos encontrar con comportamientos del operacional erráticos o inestables.

Una vez tenemos el diseño realizado, procedemos a realizar una simulación acorde a nuestro Operacional escogido, simulaciones realizadas con el programa OrCad.

Introduciremos ambos filtros, y calcularemos la Ganancia y Margen de Fase de ambos, tanto separados, como en serie, para comprobar que el comportamiento de nuestro circuito va a ser el correcto.

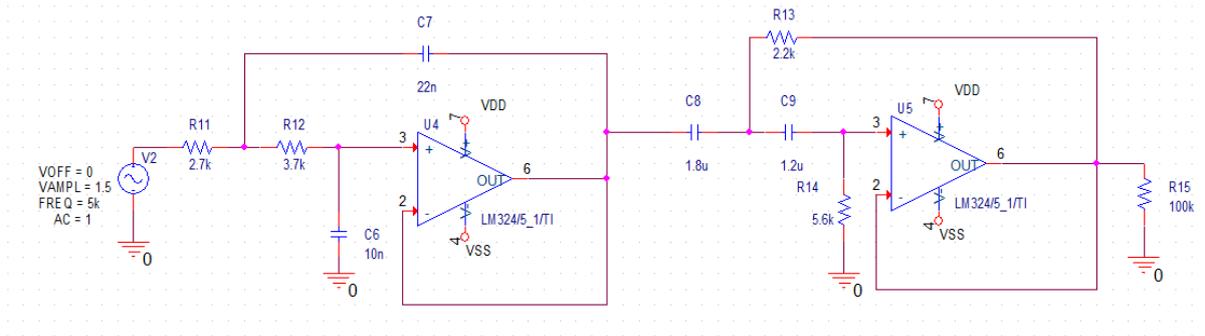


Ilustración 44 - Esquemático Filtros OrCad

Primeramente simulamos la salida en ambos filtro, con una entrada de 500Hz y otra de 1KHz para tener una referencia en los puntos medios.

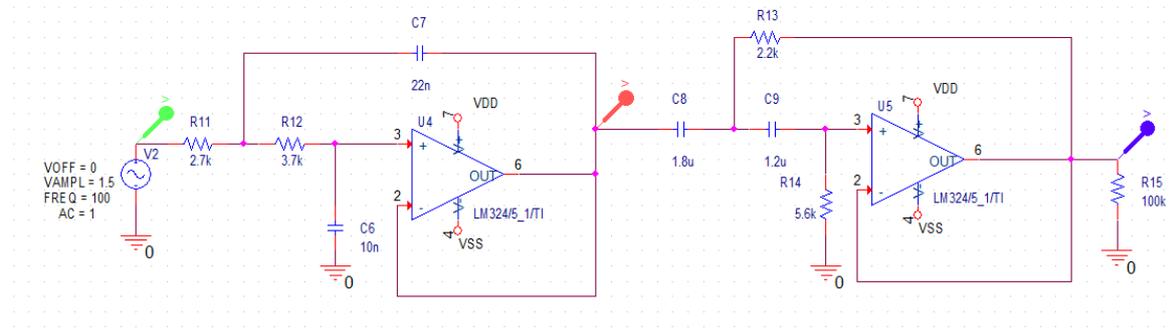


Ilustración 45 - Simulación temporal

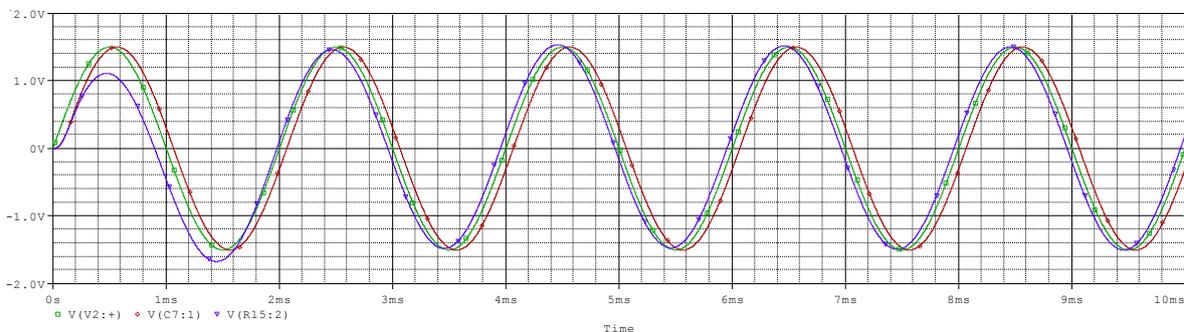


Ilustración 46 - Simulación temporal 500Hz

Como podemos observar, tenemos una ganancia unidad, no existiendo atenuación para esta frecuencia. Podemos comprobar que el filtro introduce un pequeño desfase como era de esperar, pero nada que afecte al funcionamiento normal.

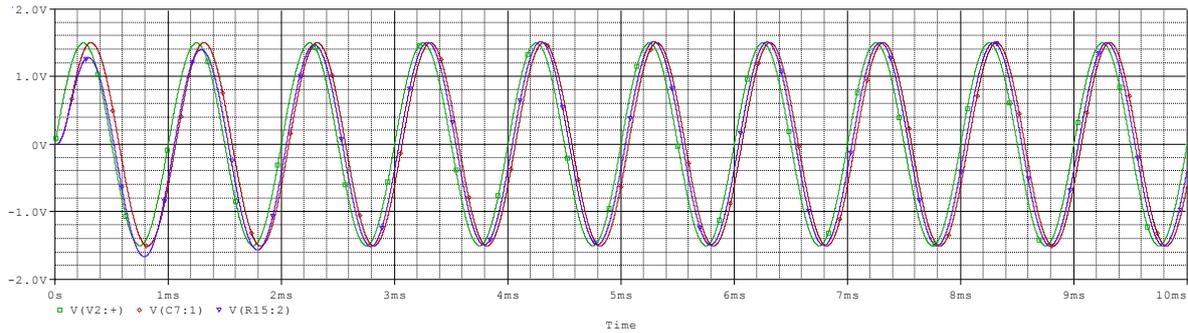


Ilustración 47 - Simulación temporal 1KHz

Al igual que con 500Hz, con 1KHz nos encontramos aun en la banda de paso del filtro, teniendo una salida correcta en amplitud.

Pasamos a simular ahora frecuencias en los extremos, en las que actúa la atenuación del filtro, primeramente 20Hz y tras esto 5KHz

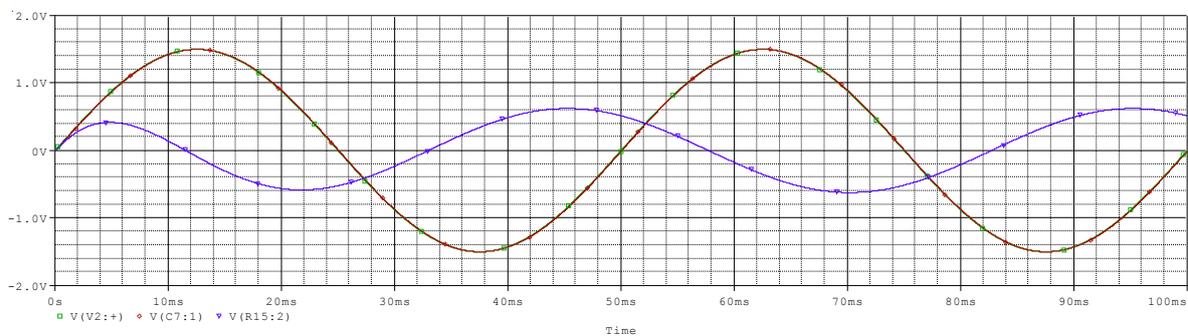


Ilustración 48 - Simulación temporal 20Hz

Como vemos, tenemos la salida atenuada por la segunda etapa, el filtro Paso Alto, y desfasada respecto a las anteriores.

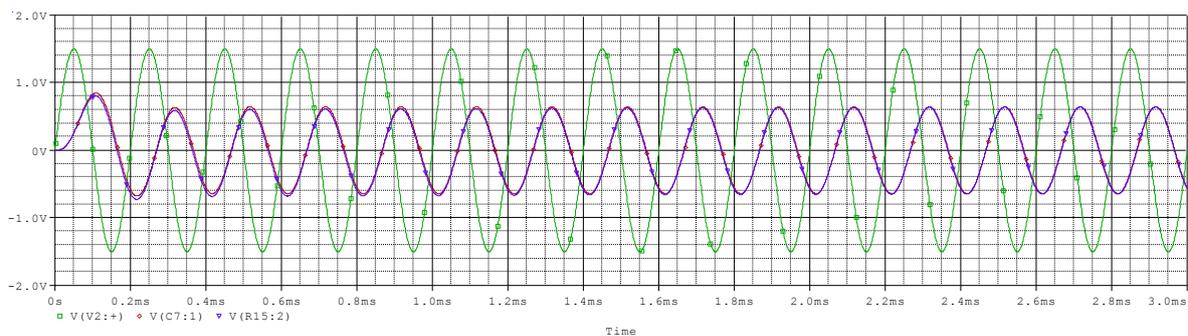


Ilustración 49 - Simulación temporal 5KHz

Con 5KHz de entrada, es la primera etapa del filtro la que nos atenúa y desfasa la señal de entrada, funcionando de esta manera el filtro adecuadamente.

Cabe destacar, que en caso de que tras las pruebas preliminares sobre pacientes, se apreciara una pérdida de sonidos, se podría modificar los límites del filtro para llegar a frecuencias ya sean más inferiores o superiores.

Para completar las simulaciones, realizamos una simulación de las dos etapas en Ganancias y Fase, para comprobar que la ganancia es correcta, así como el margen de fase no se descompense y podamos llegar a inestabilidades en el funcionamiento del amplificador operacional.

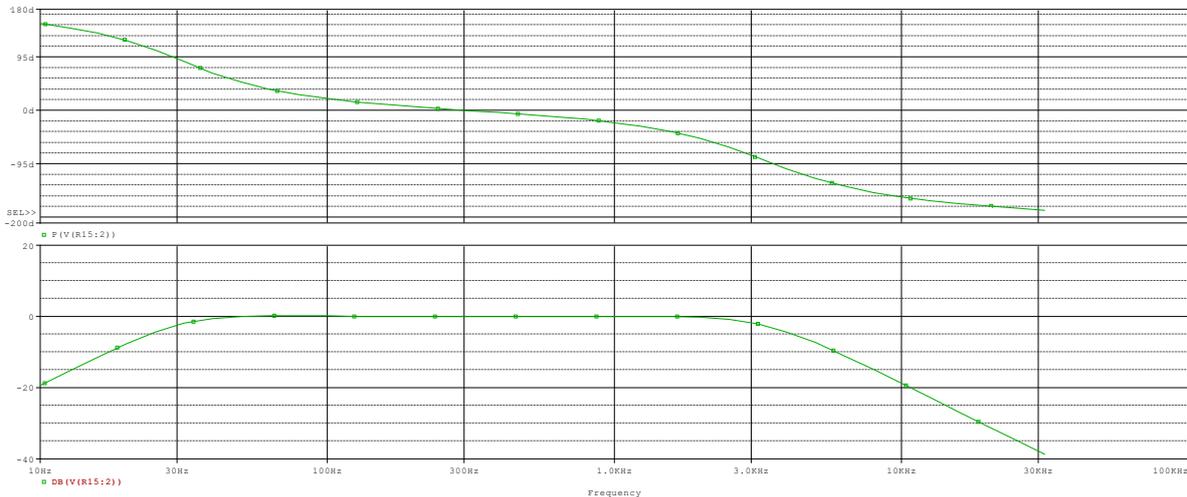


Ilustración 50 - Respuesta en frecuencia

Como observamos en las gráficas anteriores, la respuesta en frecuencia es la que estábamos buscando. Tenemos una ganancia unidad entre los 150Hz y los 1.5KHz, tras lo cual se sucede una atenuación de 40dB/Década, propia de filtros de segundo orden.

En cuanto a la fase, tenemos estabilidad en las frecuencias deseada, con margen de fase más que correcto, lo que evitara que el Operacional entre en inestabilidades y tengamos una correcta reproducción del audio.

Para el montaje preliminar del filtro, se han empleado componentes de 10% de tolerancia, teniendo él cuenta que en el programa establecimos componentes de 5% de tolerancia existe una pequeña modificación en el comportamiento final respecto a las pruebas, pero dada la escasa diferencia en valores, no hay una modificación muy notable del comportamiento.

Para alimentar el montaje se emplea una fuente de alimentación RIGOL DP832, configurada en modo Track para tener dos salidas simétricas de 3.3V, que será la alimentación empleada para este circuito.

1		2		3	
30V	On CV	30V	On CV	5V	Off CV
3A		3A		3A	
03.294 <sup>V</sup>		03.290 <sup>V</sup>		0.000 <sup>V</sup>	
0.00 <sup>A</sup>		0.000 <sup>A</sup>		0.000 <sup>A</sup>	
00.003 <sup>W</sup>		00.000 <sup>W</sup>		00.000 <sup>W</sup>	
Set	Limit	Set	Limit	Set	Limit
03.300 <sup>V</sup>	33.000 <sup>V</sup>	03.300 <sup>V</sup>	33.000 <sup>V</sup>	5.000 <sup>V</sup>	5.500 <sup>V</sup>
0.100 <sup>A</sup>	3.300 <sup>A</sup>	0.100 <sup>A</sup>	3.300 <sup>A</sup>	2.000 <sup>A</sup>	3.300 <sup>A</sup>
Voltage	Current	OVP Off	OCP Off	Track On	

Ilustración 51 - Configuración FA

La conexión es sencilla, debemos conectar el CANAL 1 a la entrada positiva del Operacional, respetando la polaridad, y el CANAL 2, a la entrada negativa del operacional, con la polaridad invertida.

El montaje es el siguiente:

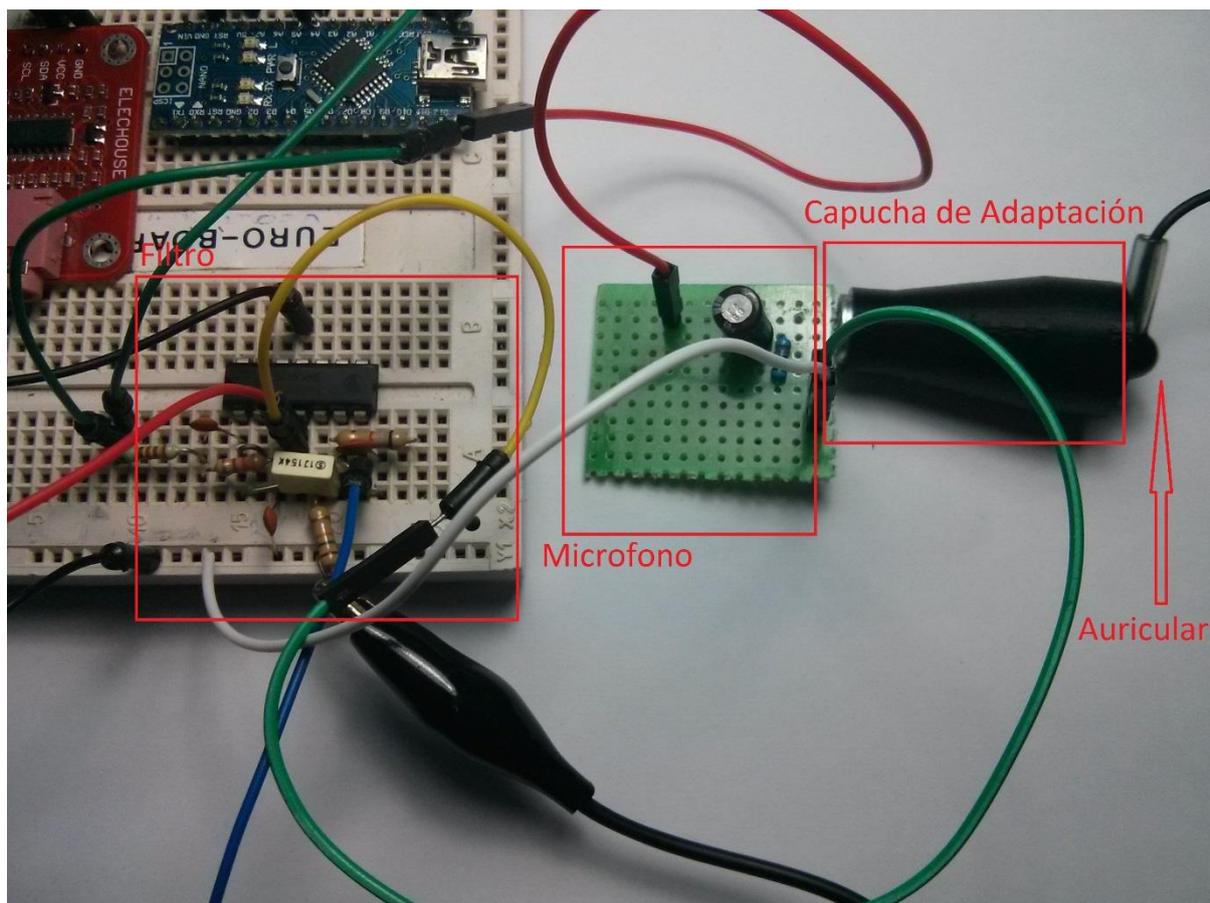


Ilustración 52 - Montaje de pruebas

Para el montaje de pruebas, se ha realizado una pequeña campana con una impresora 3D para poder reproducir tonos y que estos sean escuchados por el micrófono Electret.

Las pruebas se han realizado con diferentes tonos, teniendo una buena respuesta de los mismos, y con los sonidos empleados en las pruebas preliminares sin filtro para ver la respuesta, a continuación dejamos unos ejemplos.

La señal amarilla corresponde al CANAL 1 y es la señal ya filtrada, la señal azul corresponde al CANAL 2 y es la señal sin filtrar.

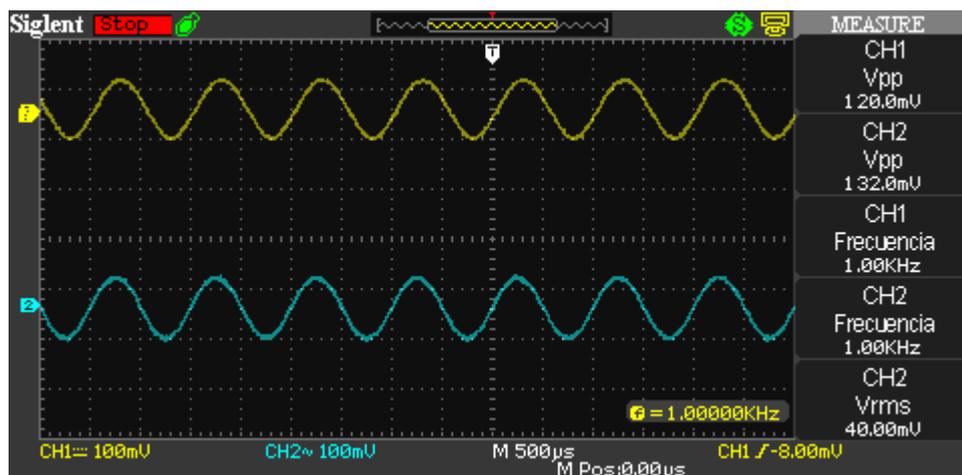


Ilustración 53 - Filtro real (1KHz)

A 1KHz no tenemos atenuación, entramos dentro de la zona de paso de nuestro filtro.

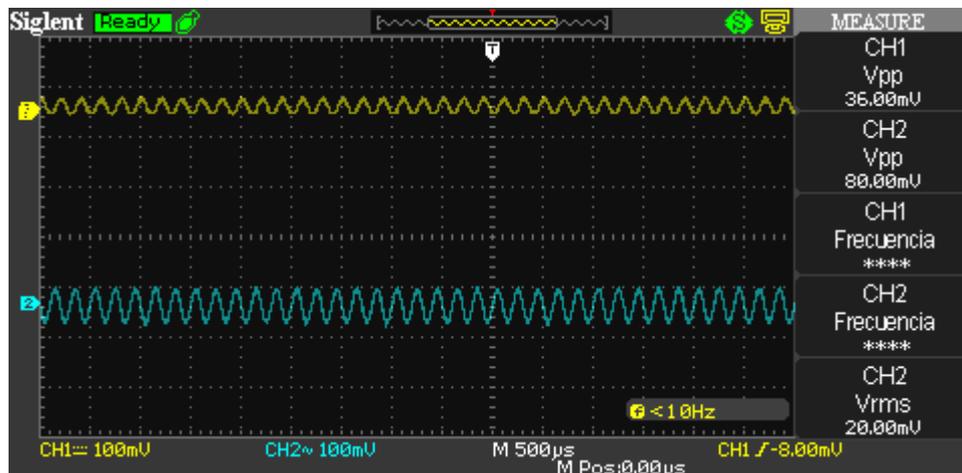


Ilustración 54 - Filtro real (5KHz)

A medida que aumentamos la frecuencia, en este caso 5Khz vemos que tenemos una atenuación ya considerable, aproximadamente de un 50% de la señal original.

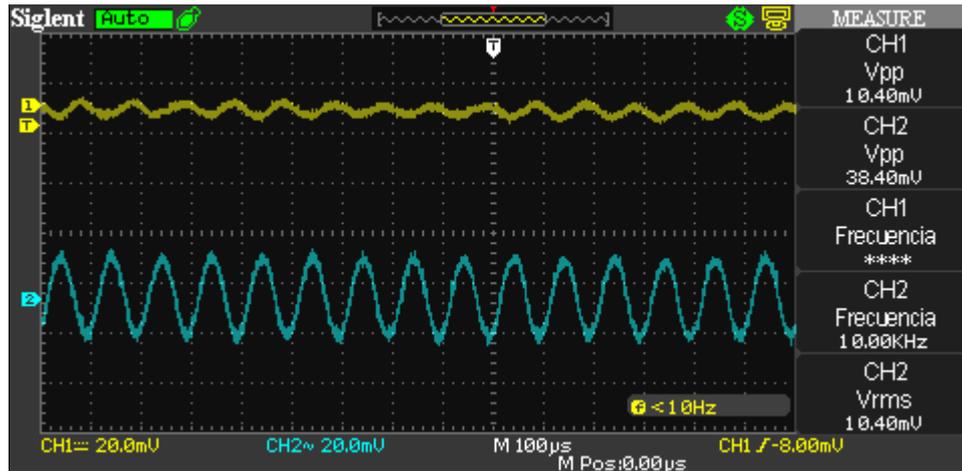


Ilustración 55 - Filtro real (10KHz)

A 10KHz tenemos que la atenuación supera el 50% de la señal sin filtrar con creces. Hemos logrado el objetivo de partida para nuestro filtro.

Por ultimo unas referencias con señales reales de sonido a escuchar con el fonendo, como vemos tenemos una correcta reproducción de los sonidos.

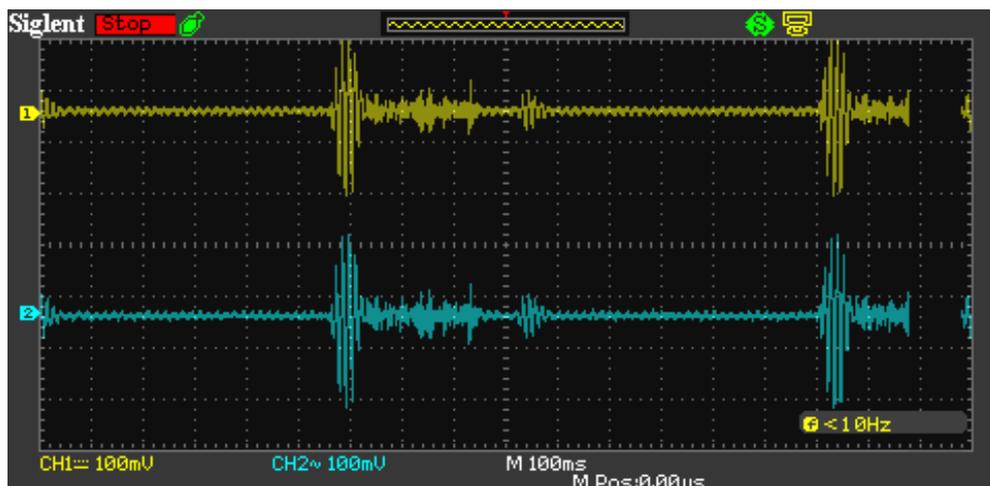


Ilustración 56 - Muestra real 1

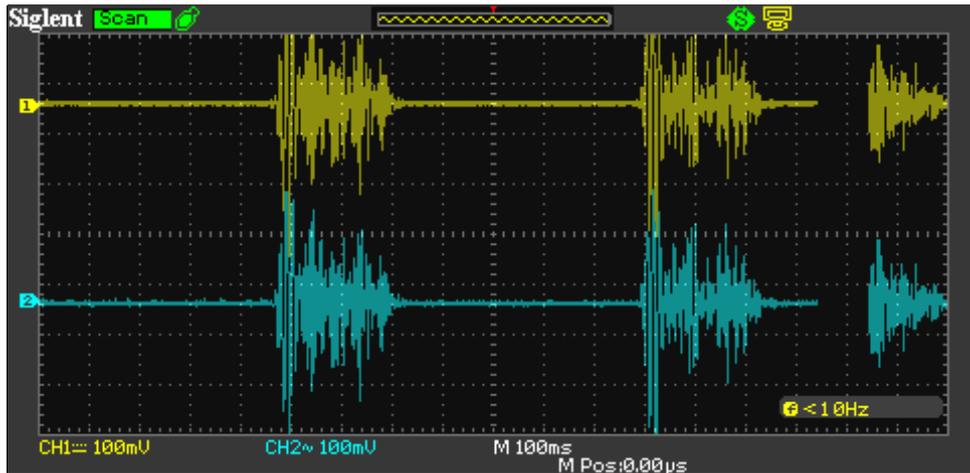


Ilustración 57 - Muestra real 2

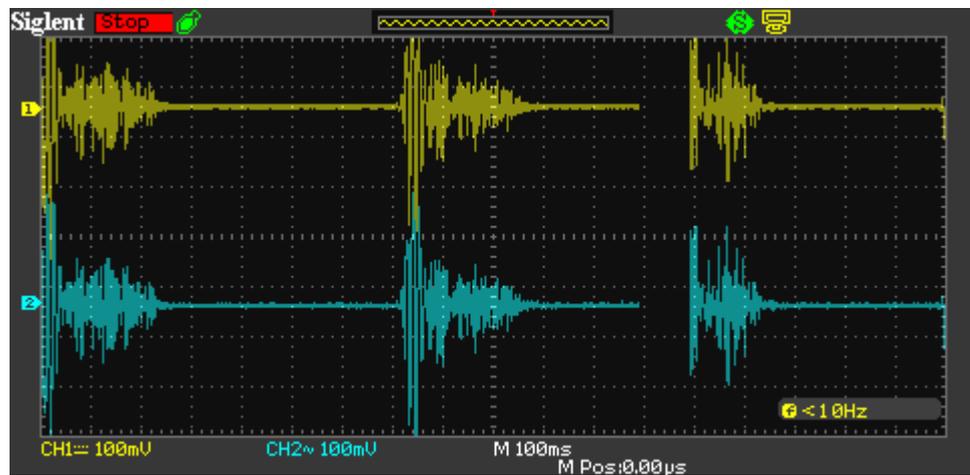


Ilustración 58 - Muestra real 3

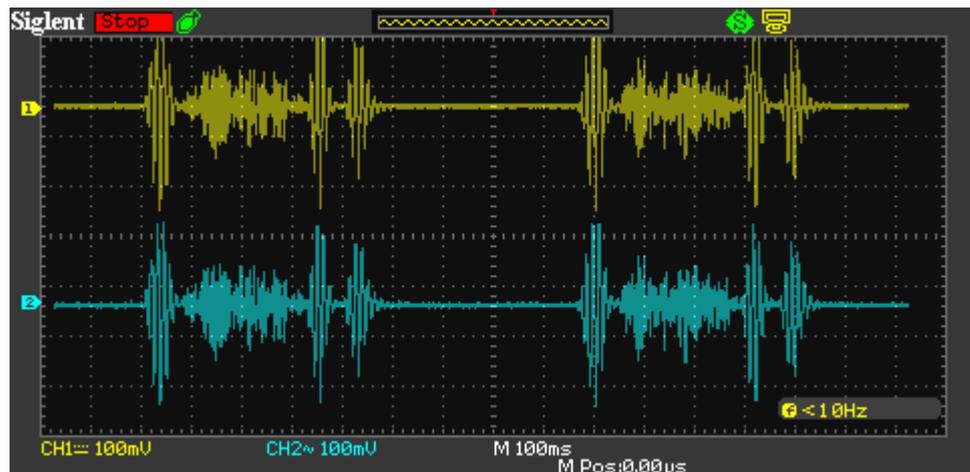


Ilustración 59 - Muestra real 4

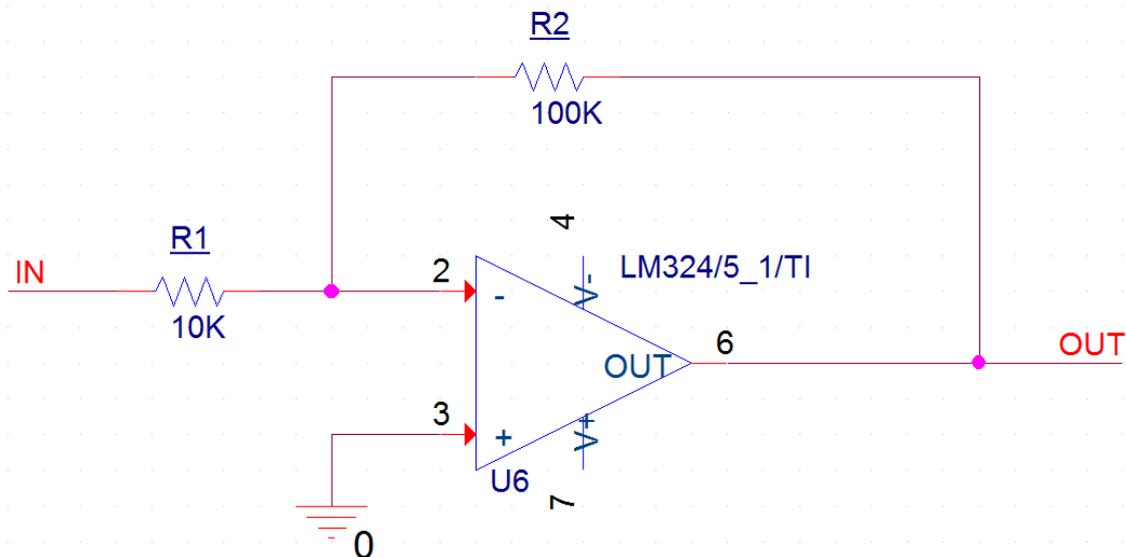


## 3.2 ETAPA DE AMPLIFICACIÓN

### 3.2.1 Resumen

Los ruidos captados por el fonendoscopio, tienen una intensidad muy baja, es por ello por lo que nos vemos obligados a realizar una etapa de amplificación de la señal, para su correcta transmisión.

La idea inicial consistía en la realización de un filtro con uno de los operacionales del LM324, con una ganancia fija preestablecida que nos permitiese captar los sonidos correctamente. Se realizaron una serie de pruebas con un resultado satisfactorio, empleando la configuración de amplificador inversor.



Teniendo de esta forma una ganancia con la siguiente expresión:

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} * V_{in}$$

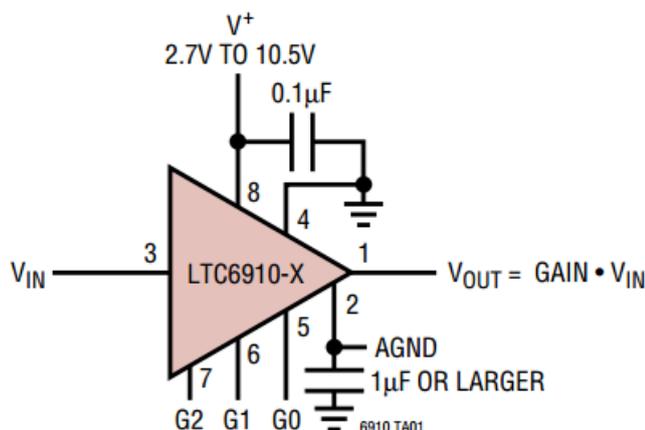
Esta aplicación, tenía ciertas limitaciones, si bien fue válida para realizar las pruebas iniciales para la transmisión correcta, se buscaba mayor versatilidad en cuanto a la posibilidad de amplificación de sonido.

De esta forma, se recurrió a un IC de Linear, en concreto el LTC6910. Dicho integrado consiste en un Amplificador operacional inversor con ganancia regulable o programable, mediante la combinación de tres entradas digitales, es decir,  $2^3$  combinaciones posibles.

- 3-Bit Digital Gain Control in Three Gain-Code Options
- Rail-to-Rail Input Range
- Rail-to-Rail Output Swing
- Single or Dual Supply: 2.7V to 10.5V Total
- 11MHz Gain Bandwidth Product
- Input Noise Down to 8nV/√Hz
- System Dynamic Range to 120dB
- Input Offset Voltage: 1.5mV
- 8-Pin Low Profile (1mm) SOT-23 (ThinSOT™) Package

Ilustración 60 - Especificaciones LTC6910

DIGITAL INPUTS			GAIN IN VOLTS/VOLT		
G2	G1	G0	6910-1	6910-2	6910-3
0	0	0	0	0	0
0	0	1	-1	-1	-1
0	1	0	-2	-2	-2
0	1	1	-5	-4	-3
1	0	0	-10	-8	-4
1	0	1	-20	-16	-5
1	1	0	-50	-32	-6
1	1	1	-100	-64	-7



PIN 2 (AGND) PROVIDES BUILT-IN HALF-SUPPLY REFERENCE WITH INTERNAL RESISTANCE OF 5k. AGND CAN ALSO BE DRIVEN BY A SYSTEM ANALOG GROUND REFERENCE NEAR HALF SUPPLY

Ilustración 61 - LTC6910

Como podemos observar es un circuito integrado sencillo y practico, que nos permite obtener una ganancia variable mediante el uso de únicamente tres entradas digitales, y escasos componentes externos. Además, tenemos un buen rango dinámico, y un ancho de banda más que suficiente para nuestros requerimientos. Pudiendo también operar tanto en *Single Supply*<sup>2</sup>, como en *Dual*<sup>3</sup>.

Teniendo un rango correcto de tensión de trabajo, ya que nosotros estaremos en -3.3V +3.3V, lo que nos da un rango de 6.6V, siendo el máximo del operacional 10.5V.

### 3.2.2 Diseño

Primeramente, comenzamos con una simulación para comprobar que teóricamente el funcionamiento del Operacional es el correcto. Para ello empleamos el programa propietario de Linear, LTSpice.

<sup>2</sup> Single Supply: Configuración de circuito en el que solo existe una fuente de tensión positiva.

<sup>3</sup> Dual: Configuración de circuito en el que la referencia inferior de tensión es negativa no cero.

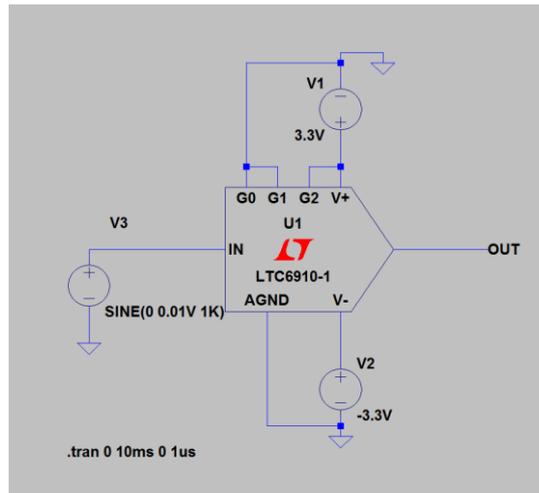


Ilustración 62 - Esquema LTSpice

Tenemos configurada una ganancia de 10 V/V, lo que con una entrada de 10mV, debiera dar una salida de 100mV, comprobamos que esto es correcto:

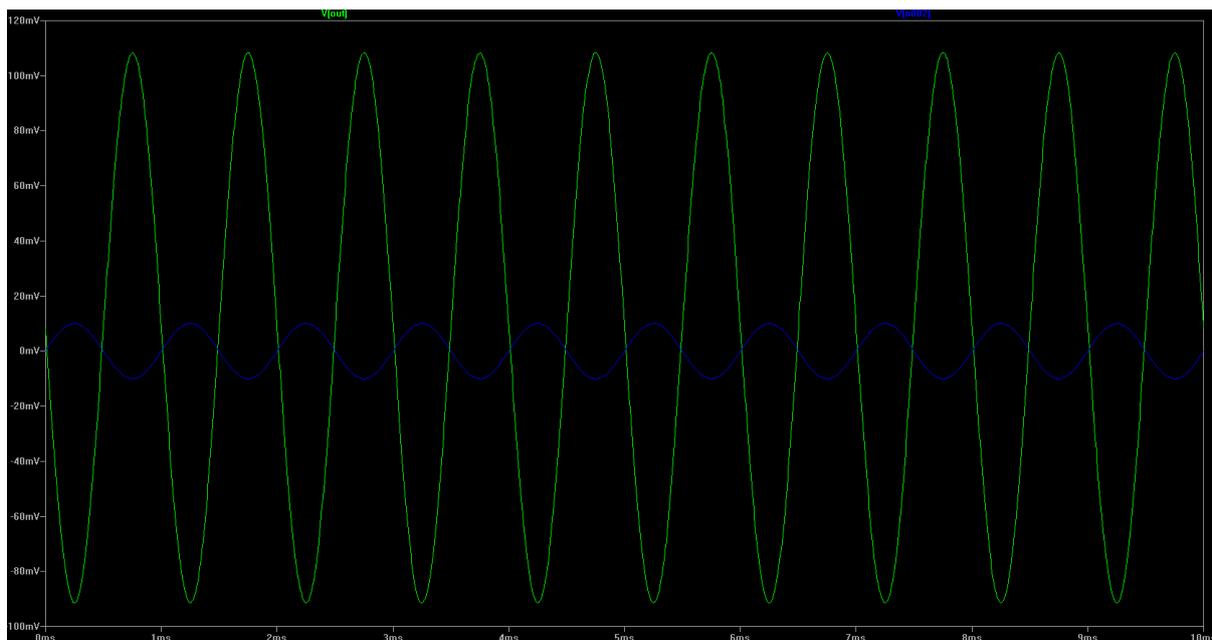


Ilustración 63 - Simulación 10V/V 1Khz

Como podemos observar, tenemos una ganancia correcta, con un desfase de 180°, debido a que tenemos un amplificador en modo inversor. Comprobamos que el comportamiento sería el correcto en los límites de frecuencias con los que vamos a tratar.

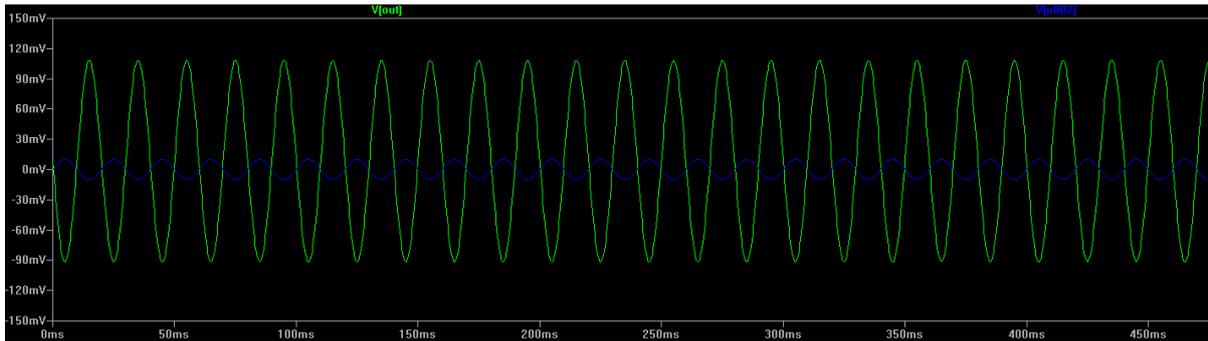


Ilustración 64 - Simulación 10V/V 50Hz

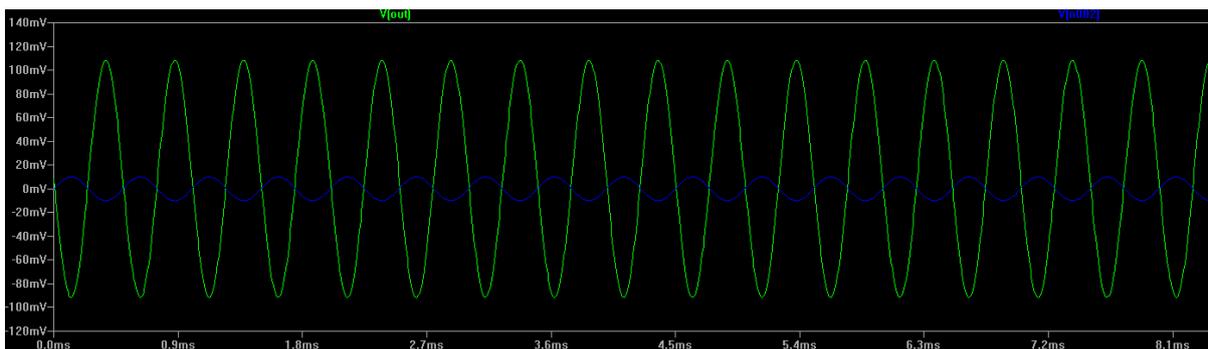
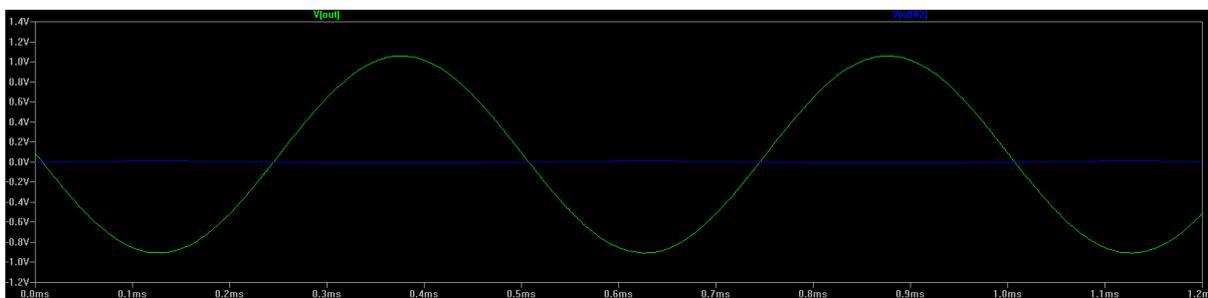


Ilustración 65 Simulación 10V/V 2KHz

Se llevan a cabo unas simulaciones para comprobar el funcionamiento del operacional a plena ganancia 100V/V, las cuales denotan que el comportamiento del operacional es el esperado, no resultando afectada la integridad de la señal, teniendo una amplificación limpia.



Para el circuito real, tenemos el integrado LTC6910-2, que posee una tabla de ganancias un poco diferente respecto al modelo mostrado en la página resumen de este mismo capítulo, pero tenemos como ganancia máxima -64V/V, más que suficiente para nuestros propósitos.

Comprobaremos a continuación el comportamiento real del integrado y la amplificación que realiza sobre la señal de entrada, así como su correcto control con las entradas digitales que posee.

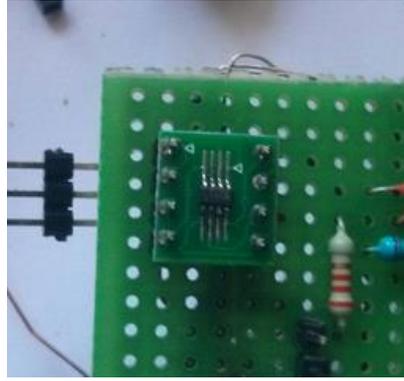


Ilustración 66 - LTC6910-2 TSOP

Situamos el integrado en una PCB para realizar pruebas con este tipo de encapsulados, de esta forma el conexionado es más sencillo. Para las pruebas inyectaremos señales sinusoidales de distintas frecuencias y amplitudes y comprobaremos el comportamiento.

Para comenzar, nos situaremos en una señal de 1.2Khz con una amplitud de 250mVpp, con una ganancia situada en -8V/V, tenemos que a partir de esos 250mV, obtenemos 1.84V, lo que nos da una ganancia de 7.38, bastante cercano a lo esperado, y con una buena respuesta en frecuencia.

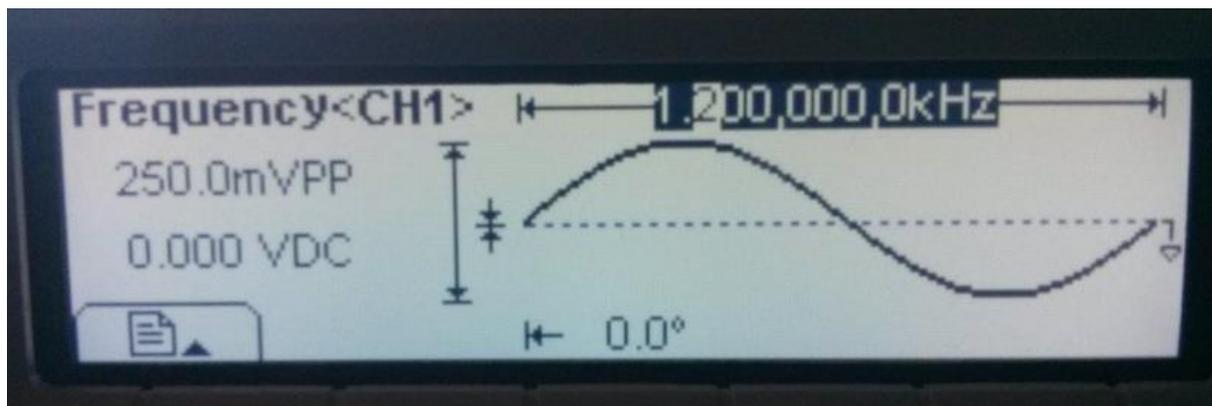


Ilustración 67 - Sinusoidal 1.2KHz

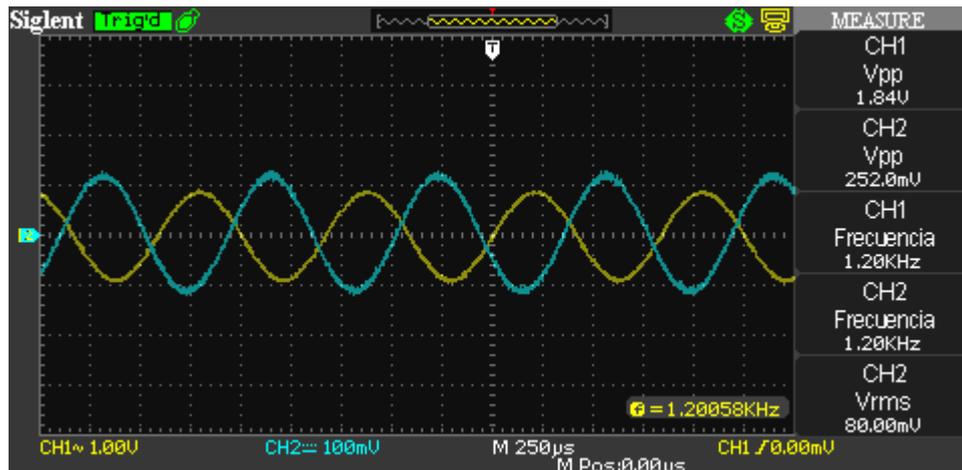


Ilustración 68 - Prueba LTC6910 a 1.2KHz

Pasamos a una frecuencia intermedia, 400Hz con la misma amplitud de la señal de entrada, esta vez comprobamos que los valores de las ganancias son aproximados a el *Datasheet* [4], y así es, tenemos que la ganancia es bastante cercana al valor real, el error puede ser debido a ciertas atenuaciones en la etapa de filtrado que hacen que dicha ganancia se vea parcialmente disminuida.

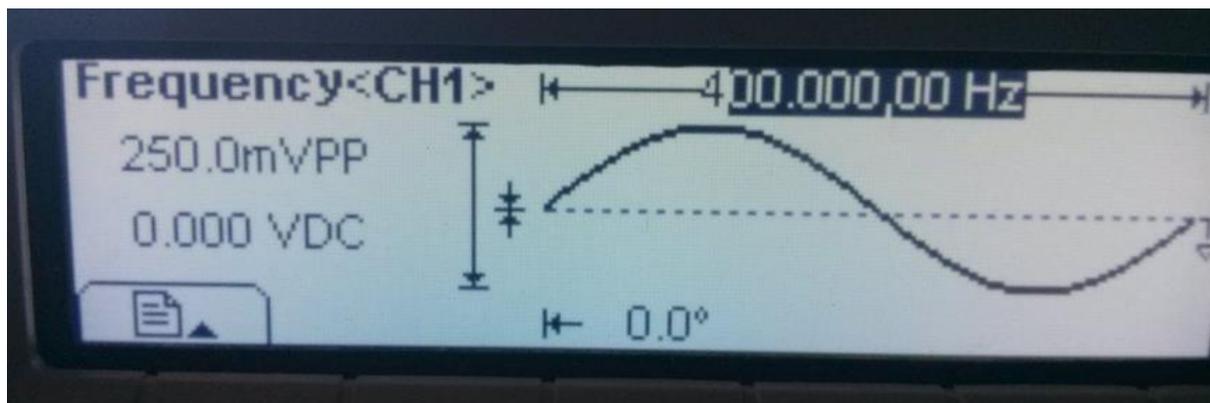


Ilustración 69 – Sinusoidal a 400Hz

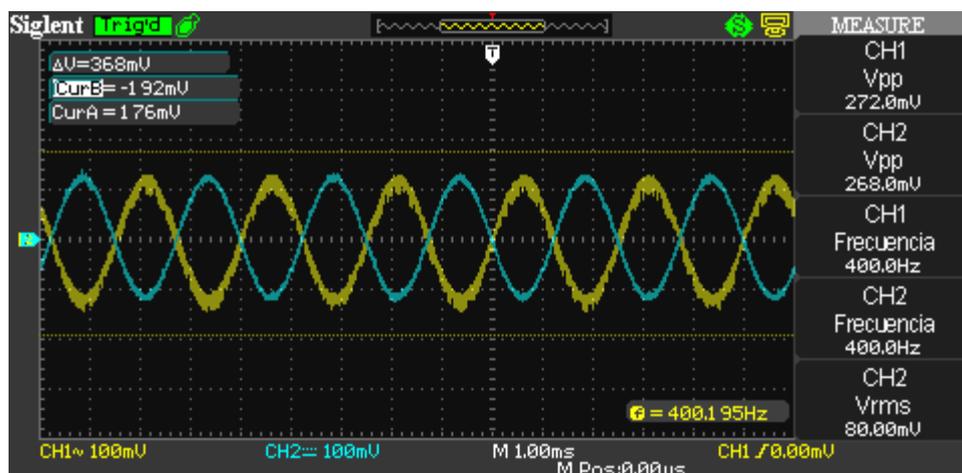


Ilustración 70 - 400Hz Ganancia 1

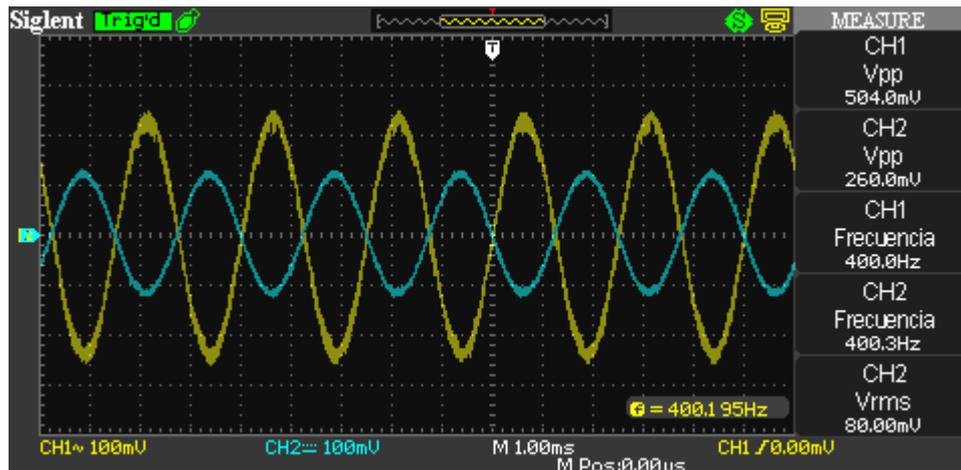


Ilustración 71 - 400Hz Ganancia 2

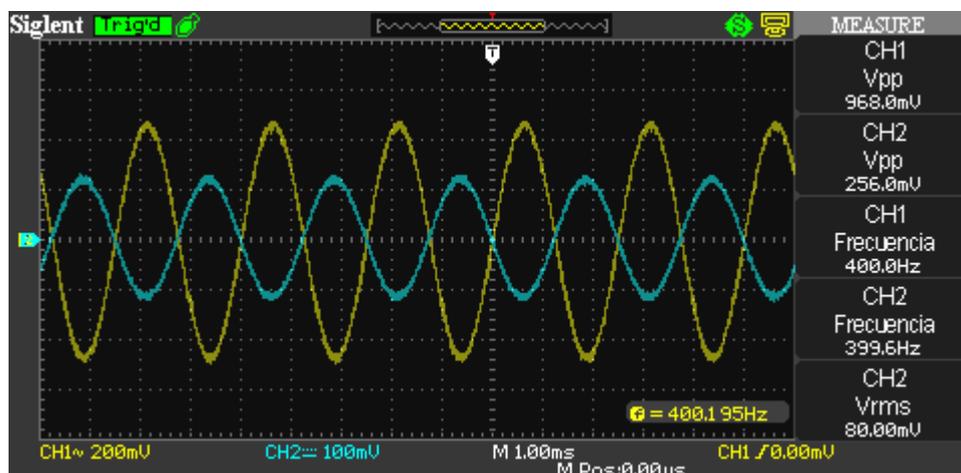


Ilustración 72 - 400Hz Ganancia 4

Como podemos comprobar, al igual que en 1.2Khz, tenemos una pequeña bajada de la ganancia, nada que pueda afectar a nuestro diseño, pero a tener en cuenta si la ganancia del mismo necesitara ser crítica. Otro de los aspectos que tenemos que tener en cuenta, es el nivel de saturación, ya que puede ocurrir que saturemos el operacional, y la señal se distorsione.

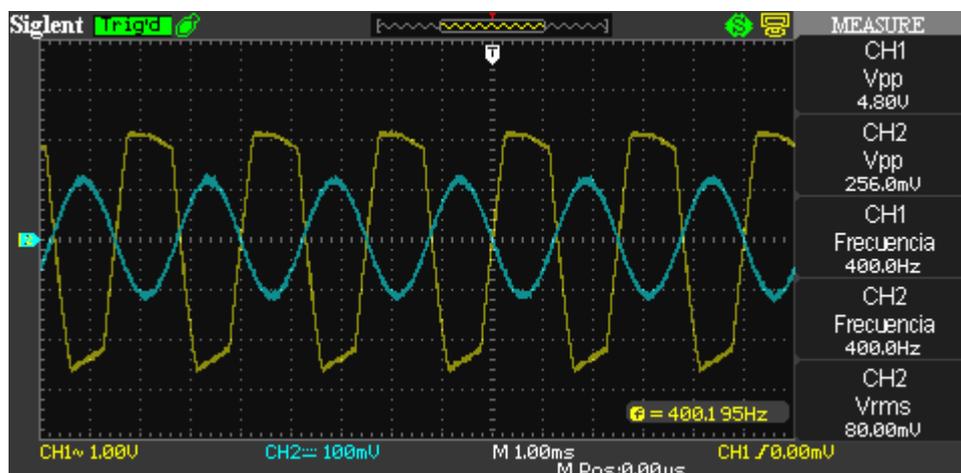


Ilustración 73 - Saturación del amplificador

Teniendo en cuenta estos resultados, podemos concluir en que el operacional funciona como se esperaba para nuestra aplicación, dándonos versatilidad en cuanto a niveles de amplificación, y permitiendo al usuario de manera sencilla modificar dicha ganancia para tener una mayor amplitud del sonido.



## 3.3 TRANSMISION FM

### 3.3.1 Resumen

Primeramente, antes de realizar la transmisión de audio, es necesario llevar a cabo un muestreo del audio, si tenemos en cuenta que trabajamos en frecuencias comprendidas entre 100Hz y 2Khz, el muestreo de audio, según el teorema de Nyquist se debe realizar mínimo a 4Khz para poder reconstruir la señal. Sabiendo que el audio convencional se suele muestrear con 12Bits, tenemos que enviar 12bits cada 0.5ms.

Esta tasa de transferencia nos da como resultado 1440000 bits por segundo.

Para llevar a cabo la transmisión del audio, se analizaron varias opciones, la primera idea fue usar tecnología Bluetooth, empleando un perfil A2DP<sup>4</sup> dedicado a la transmisión de audio. Pero nos encontramos con que la recepción en dispositivos Android, no era posible a día de hoy, debido a la inexistencia de drivers compatibles con dicha tecnología funcionando el móvil como receptor.

Se estudió la idea de usar un módulo Wifi para la transmisión del audio, en concreto el ES8266. Para realizar este tipo de comunicación, debíamos previamente tener el audio digitalizado, ya que aunque el modulo incorpora un puerto I2S<sup>5</sup>, no existe aún ninguna librería para el manejo del mismo. Teniendo en cuenta que la comunicación con dicho modulo es por medio de UART<sup>6</sup>, las velocidades de transferencia necesarias eran muy elevadas, teniendo que recurrir a buffers, lo que complicaba la tarea, además, era necesario codificar el audio previa emisión. Por lo que no estábamos seguros de obtener los resultados deseados, debido a las limitaciones de esta tecnología.

Como última alternativa, valoramos el uso de un Transmisor FM. Hoy en día en la mayoría de dispositivos móviles existe un receptor FM (Radio). Además de ello, existen módulos adaptados para la transmisión de audio vía FM en alta calidad. Sin existir limitación de receptores, cosa que no ocurre con las anteriores tecnologías, otra de las ventajas del uso de dicho transmisor.

Tras analizar los pros y contras, nos decidimos a usar un módulo de transmisión FM, en concreto el módulo KT0803L.

---

<sup>4</sup> A2DP: Perfil BT para la transmisión de audio de alta calidad.

<sup>5</sup> I2S: es un estándar eléctrico de bus serial usado para interconectar circuitos de audio digital.

<sup>6</sup> UART: Transmisor-Receptor Asíncrono Universal, es el dispositivo que controla los puertos y dispositivos serie. Se encuentra integrado en la placa base o en la tarjeta adaptadora del dispositivo.

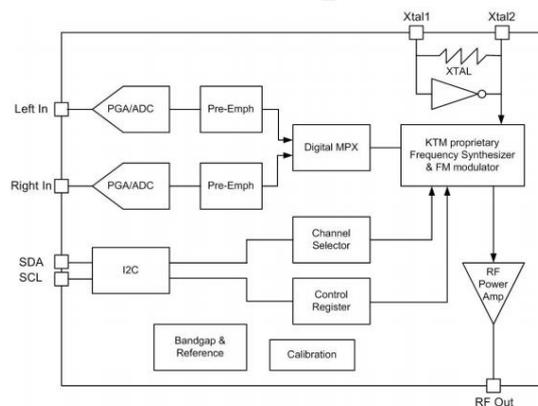


Figure 1: KT0803L System Diagram

Ilustración 74 - KT0803L

Tenemos dos puertos de entrada de audio, uno para cada canal izquierdo y derecho, además de comunicación I2C<sup>7</sup> para el control del integrado.

Como desventaja de usar dicho modulo o tecnología, podemos destacar, el hecho de que no tenemos una comprobación de que los datos son correctamente recibidos por el receptor, o lo que es lo mismo un sistema CRC<sup>8</sup> que nos permita tener constancia de que los datos han sido debidamente recibidos.

Como principal ventaja, encontramos una sencillez en el uso que no nos aportaban los anteriores dispositivos, teniendo de esta forma un diseño compacto, en el que únicamente con un integrado, podemos realizar la transmisión del audio, dejando la tarea de filtrado y amplificación a la otra parte de nuestro circuito.

### 3.3.2 Diseño

Para las pruebas vamos a emplear un módulo remontado con el integrado KT0803L, el cual consiste en el siguiente circuito:

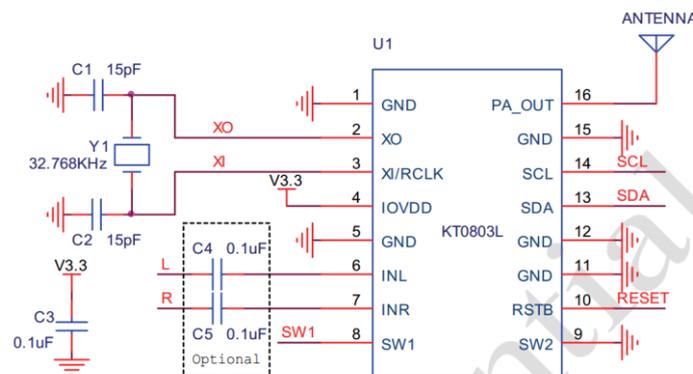


Ilustración 75 - Datasheet KT0803L [8]

<sup>7</sup> I2C: es un bus de comunicaciones en serie

<sup>8</sup> CRC: es un código de detección de errores usado frecuentemente en redes digitales y en dispositivos de almacenamiento para detectar cambios accidentales en los datos

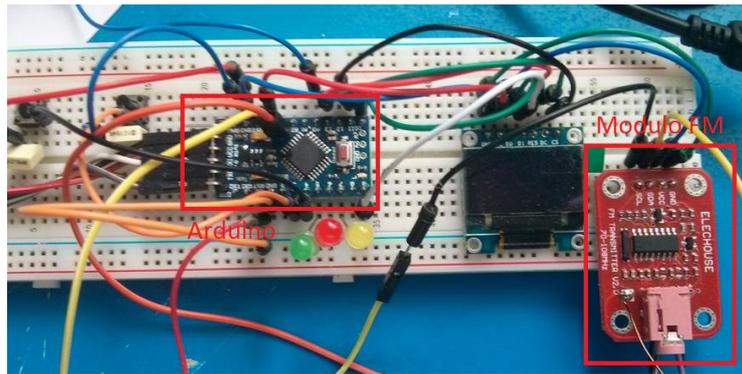


Ilustración 76 - Modulo FM y Arduino

Dicho modulo nos permite tener todas las funcionalidades de este integrado, únicamente conectando la alimentación y teniendo una conexión I2C.

Para controlar la comunicación I2C, emplearemos un Arduino ProMini, dicho Arduino, posee un Atmega 328P, un microcontrolador versátil y de bajo coste, que nos permite en un reducido tamaño, realizar todas las tareas necesarias en nuestro diseño.

El conexionado del módulo es sencillo, el mismo esta alimentado a 3.3V, la misma tensión que recibe el arduino. Además de ello debemos conectar la comunicación I2C, que consiste en dos únicos cables, uno para la señal SCL y otro para la señal SDA.

Una vez tenemos conectado nuestro modulo, disponemos de una librería para el control del mismo, con esta librería podemos fijar la frecuencia a la que queremos emitir. Tenemos un rango de frecuencias disponible desde 85MHz hasta los 106MHz, lo que nos permite establecer una frecuencia en la que no tengamos ruidos y la señal sea limpia.

Además de ello, disponemos de un módulo ALC<sup>9</sup>, que en caso de tener sonidos que saturen los convertidores, el mismo circuito es capaz de suprimirlos para así evitar tener ruidos con demasiada amplitud y que puedan resultar molestos para aquella persona que se encuentre escuchando.

Como antena, usaremos un cable barnizado de cobre de 0.5mm, para calcular la longitud de la misma tenemos:

$$\text{Rango de Frecuencias} = 85 - 106\text{MHz}$$

$$\text{Frecuencia Central} = \pm 96\text{MHz}$$

$$\text{Longitud (Pies)} = \frac{468}{96\text{ MHz}} = 4.8$$

$$4.8\text{ Pies} = \pm 150\text{Cm}$$

<sup>9</sup> ALC: es un módulo de control automático de audio que controla los niveles de saturación



## 3.4 ETAPA DE CONTROL E INTERFACE

### 3.4.1 Diseño

Debido a que tenemos que mostrar una serie de datos que son importantes para el usuario, hemos decidido emplear una pantalla OLED<sup>10</sup> para tal fin. Es una pantalla muy versátil, de bajo consumo, con una resolución de 132\*64 y color de representación en blanco.

Dicha pantalla se encuentra conectada al arduino mediante comunicación SPI<sup>11</sup>, esta comunicación en nuestro caso consta de 5 líneas de datos y dos de alimentación, disponemos de una librería para manejar dicha pantalla lo que facilita el uso de la misma.

Contaremos también con dos pulsadores para desplazarnos por las diferentes funciones.

En dicha pantalla se mostraran los siguientes datos:

- Frecuencia
- Ganancia
- Batería
- Mute (En caso de estar en modo Mute)

#### Frecuencia

En la pantalla visualizaremos como elemento principal la frecuencia a la que estamos emitiendo actualmente, de esta forma sabremos a que frecuencia sintonizar nuestro receptor para poder recibir el audio.

Dicha frecuencia es modificable mediante la pulsación de los botones, con el botón derecho subiremos la frecuencia de emisión, y con el botón izquierdo la bajaremos.

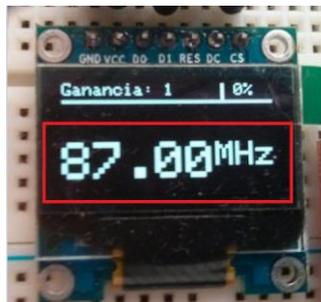


Ilustración 77 - OLED (Frecuencia)

#### Ganancia

Como bien citamos en el capítulo 3.2, nuestro amplificador nos permite regular su ganancia mediante tres entradas digitales, dichas entradas digitales estarán controladas mediante el Arduino, y podemos modificarlas con los pulsadores. De igual forma, los niveles estarán

---

<sup>10</sup> OLED: es un diodo que se basa en una capa electroluminiscente formada por una película de componentes orgánicos que reaccionan, a una determinada estimulación eléctrica, generando y emitiendo luz por sí mismos.

<sup>11</sup> SPI: es un estándar de comunicaciones, usado principalmente para la transferencia de información entre circuitos integrados en equipos electrónicos

representados en la pantalla oled, teniendo 7 niveles, de 1 a 7 para cada una de las ganancias disponibles.

La ganancia 0, solo se representara cuando el fonendo este en modo Silencio, dicha ganancia pone la salida del amplificador a tierra, por lo tanto no tendríamos sonido a emitir.

La forma de subir la ganancia, será pulsando de manera constante el botón derecho, resaltando la zona de ganancia, indicando de esta forma que estamos modificando dicho valor, para realizar la modificación, volvemos a pulsar el pulsador derecho para aumentar la ganancia. Para salir del menú, únicamente tenemos que pulsar el botón derecho, y el valor de ganancia quedara fijado.

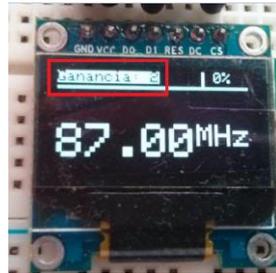


Ilustración 78 - OLED (Ganancia)

### Batería

Debido a que tendremos una batería alimentando el circuito, es necesario saber en todo momento cual es estado de la misma, para cuando sea necesario recargarla, es por ello, por lo cual se ha incorporado un medidor de batería en la parte superior derecha de la pantalla.

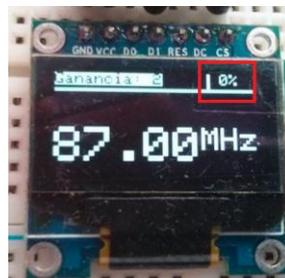


Ilustración 79 - OLED (Batería)

### Mute

Disponemos de un modo Silencio, con el cual podemos poner a cero la salida del operacional anulando así cualquier audio que pueda ser captado, de esta forma si estamos desplazándonos entre habitaciones con el aparato, únicamente silenciando, evitamos el captar ruidos extraños o molestos.

Para activar dicho modo, únicamente tenemos que mantener pulsado el botón izquierdo de manera prolongada hasta que nos salga la señal de MUTE en la pantalla. Y para reactivarlo mantenerlo pulsado hasta que desaparezca. (Cuando estamos en el modo MUTE veremos que la ganancia se nos establece en 0).



*Ilustración 80 - OLED (Silencio)*

## 3.5 ETAPA DE ALIMENTACION

### 3.5.1 Diseño

Una de las especificaciones de nuestro diseño, es la portabilidad, tenemos que tener un diseño ligero y no demasiado grande, además debemos de poderlo usar sin conexión a ninguna fuente de alimentación externa, para lograr este requisito, vamos a emplear una batería de Litio, batería de una única celda, que nos otorga una tensión de 3.7-4.2V, suficiente para nuestros requerimientos.

Para realizar un cálculo aproximado de la capacidad de la misma, tenemos que el consumo del circuito en condiciones de funcionamiento normal es de unos 60mA, por lo tanto, iremos a baterías de pequeño tamaño, en nuestro caso, una de 1000mAh es más que suficiente, teniendo en condiciones ideales, una duración de 16 horas.

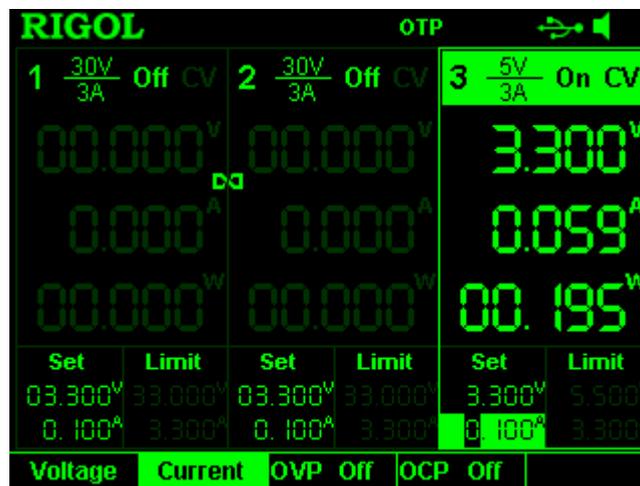


Ilustración 81 - Consumo

La alimentación consistirá en dos Railes de 3.3V, uno positivo y otro negativo, la batería nos entrega 3.7V por lo que debemos adaptar dicha tensión a nuestros requerimientos. Para el Rail positivo, emplearemos un Regulador LDO, con una salida fija de 3.3V, y 300mA, en concreto el TLV70233. Con una caída de tensión máxima de 220mV, tenemos margen suficiente para no tener una tensión demasiado reducida que nos cause inestabilidades en nuestro circuito.

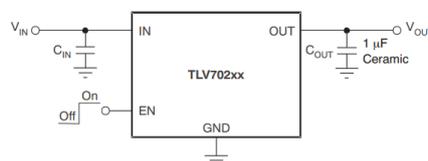


Ilustración 82 - TLV702

Para el Rail negativo, necesitamos un circuito inversor, o también conocido como Charge Pump, dicho circuito, nos otorga una tensión negativa mediante la conmutación de un condensador externo, teniendo de esta manera, una tensión negativa a la salida, de igual magnitud que la tensión de entrada. Es importante tener en cuenta, que este tipo de convertidores pueden generar ruido de alta frecuencia en su salida, por lo que el uso de filtros en nuestro caso es esencial.

El integrado en este caso es el LM2776, que nos entrega 200mA de salida, con una frecuencia de conmutación de 2Mhz.

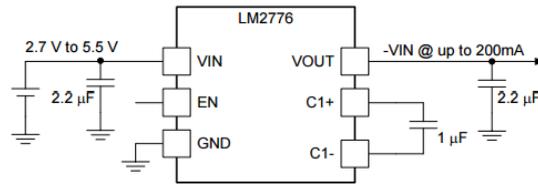


Ilustración 83 - LM2776

El circuito completo integra ambos reguladores, el regulador positivo a su vez alimenta al negativo para poder tener la tensión de 3.3V en el rail negativo adecuada.



Ilustración 84 - Etapa de Alimentación

Las tensiones entregadas son muy cercanas al valor objetivo, teniendo un error del 1% en el regulador positivo, y un error del 5% en el regulador negativo. Cumpliendo ambos con las especificaciones de sus hojas de datos, y siendo válidos para nuestro requerimiento, ya que únicamente necesitamos precisión en el rail positivo para la alimentación, y tener un rango correcto de tensiones que nos permita ampliar la señal sin llegar a saturar.



Ilustración 85 - Tensión Negativa



Ilustración 86 - Tensión Positiva

Comprobamos de igual forma la salida del regulador de tensión negativa, y pudimos comprobar que teníamos un rizado de unos mA en la misma, a una frecuencia de unos 60Khz, factor a tener en cuenta en la aplicación de los filtros y el uso de los operacionales.

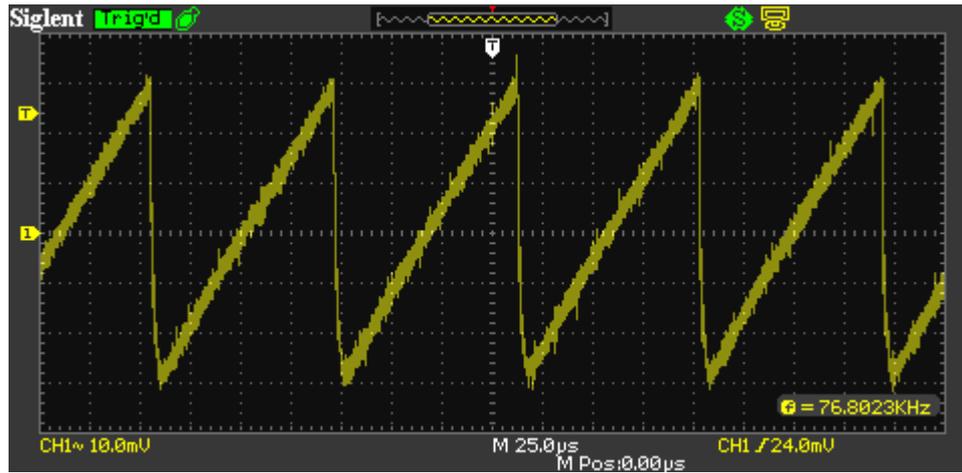


Ilustración 87 - Salida Negativa

Teniendo en cuenta que el LM324 tiene un PSRR de 100dB, tenemos una atenuación más que considerable sobre esta señal, no llegando si quiera al rango del mV.

Como cargador de baterías, usaremos un integrado simple de la casa Microchip, en concreto un MCP73811, un integrado que realiza carga de baterías Li-Po y Li-ion, con una corriente de carga de 450mA, por lo que tendremos una carga completa de la batería en aproximadamente 2 horas.



## 3.6 PCB

### 3.6.1 Resumen

A la hora de realizar la integración de un prototipo, es importante tener en cuenta los requisitos del mismo, tanto electrónico como dimensional, una vez tenemos todo el Hardware definido, podemos pasar a la etapa de diseño del PCB, como tamaño máximo fijaremos para esta primera versión 5cmx5cm, usando componentes SMD. Esto no solo nos dará una idea para futuras versiones, sino que nos permitirá realizar pruebas reales, en las que los ruidos debidos a las conexiones de placas de topos así como placas de prototipo nos puedan ocasionar se vean reducidos, llevando el diseño al siguiente nivel, la aplicación real.

El diseño se realizara en una placa de doble cara, con un grosor de 1.6mm y material FR.4, procurando cumplir la mayoría de normas impuesta para el diseño de PCBs por el organismo regulador IPC.

EL programa empleado será el *Eagle* [12], en su versión estudiante, que pese a tener limitaciones en cuanto a número de capas, es más que suficiente para nuestro propósito.

### 3.6.2 Diseño

Comenzamos realizando el esquemático, colocando todos los componentes necesarios, y realizando sus conexiones, dicho esquemático, es en definitiva, una unión de todas la etapas anteriormente resueltas, conexionadas entre sí.

Añadimos además, los dos pulsadores, para el control de los menús, con sus correspondientes condensadores anti rebote.

Los condensadores de desacoplo de los circuitos integrados es necesario que estén lo más próximos a sus patas de alimentación, para poder filtrar las demandas de corriente de los mismo o ruidos en la alimentación.

Otro de los aspectos importante, es el conexionado de los operacionales que no empleamos, no es conveniente dejar los mismos con su patillaje al aire, para configuraciones de tensión dual, positiva y negativa, el conexionado más conveniente es el siguiente:

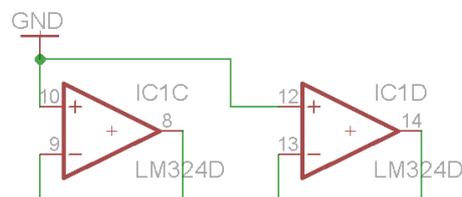


Ilustración 88 - LM324 Sin Usar

De esta forma evitamos posibles saturaciones u oscilaciones indeseadas.

El puerto I2C, a su vez requiere de resistencias pull-up para su correcto funcionamiento, ya que la configuración del mismo es Open-Drain. Llevando a "CERO" el puerto cuando se requiere de la transmisión de un Bit

El paso siguiente consiste en la realización del Layout<sup>12</sup>, la colocación de los componentes en la placa se ha realizado de forma que las diferentes etapas quedasen lo más contiguas posibles, minimizando los ruidos, y siendo más sencillo de esta forma la detección de posibles errores.

Se han situado dos planos de tierra, uno por cada cara, para minimizar el ruido y los lazos de corriente, ambos están unidos mediante vías.

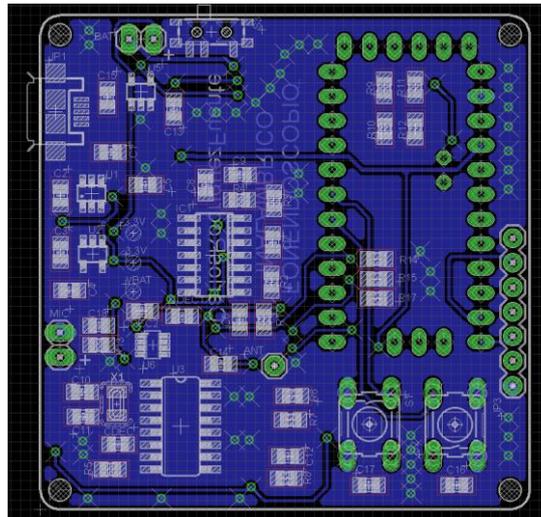


Ilustración 89 - PCB BOT

Podemos ver todas las pistas con ángulos inferiores a 90 grados, y el plano de tierra distribuido por las zonas sin pistas. De igual manera observamos la colocación de los diferentes componentes, que según etapas quedan de la siguiente forma:

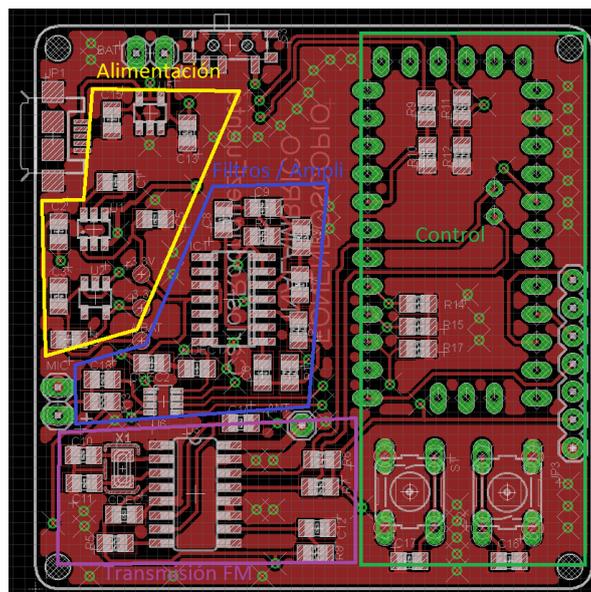
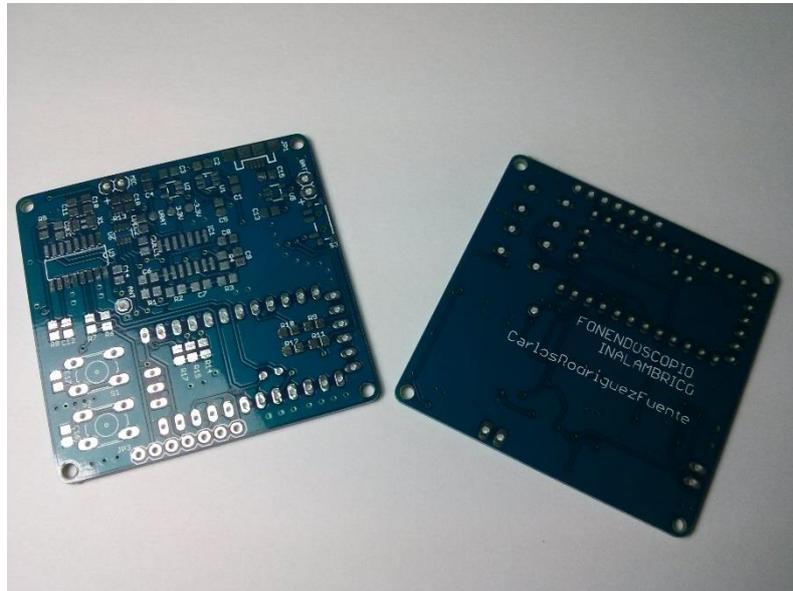


Ilustración 90 - PCB TOP

<sup>12</sup> Layout: Diseño de las pistas del circuito impreso que posteriormente es enviado a fabricar.

### 3.6.3 Pruebas



Tras comprobar visualmente el correcto estado de las PCBs, así como comprobar la lista de componentes, se procedió a soldar los mismos, para la soldadura se ha empleado un soldador con regulación de temperatura, teniendo siempre en cuenta el no someter a los diferentes integrados a altas temperaturas que puedan causar daños en los mismos.

Se comenzó testeando la etapa de alimentación y carga de la batería, comprobando todas las tensiones en los puntos de test, de esta forma nos aseguramos no dañar los componentes de las otras etapas por posibles fallos en la alimentación.

Fue necesario un ajuste en el condensador de filtrado de la salida del regulador de tensión negativa, debido a que obteníamos una medida errónea. Disminuyendo el valor del mismo de 2.2uF a 1uF, obteniendo un correcto funcionamiento.

Como podemos observar en las fotos, las tensiones son correctas tanto la tensión negativa como la positiva.



Ilustración 91 - Etapa Alimentación (PCB)



Ilustración 92 - Tensión Positiva (PCB)



Ilustración 93 - Tensión Negativa (PCB)

Tras comprobar el correcto funcionamiento de los reguladores de tensión, comprobamos la etapa de filtrado, con componentes ya más adecuados a nuestro filtro, es decir, con una tolerancia menor.

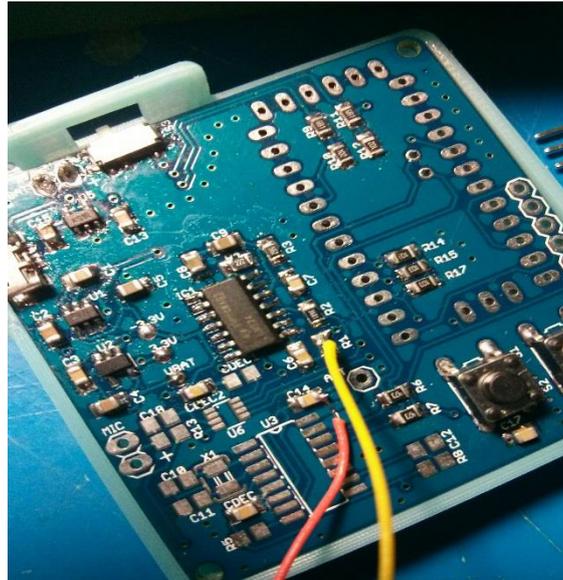


Ilustración 94 - Etapa Filtrado (PCB)

Se procedió a introducir una señal sinusoidal, variando la frecuencia de la misma, para comprobar que la salida era correcta. Apreciamos un ligero ruido en la salida, en parte producido debido a que el generador de funciones a tensiones muy bajas introduce algo de ruido en la señal, y quizás en parte también por la etapa inversora, que introduce algo de ruido en la alimentación. El funcionamiento del filtro en frecuencias límites, es el esperado, verificando de esta forma su funcionamiento.

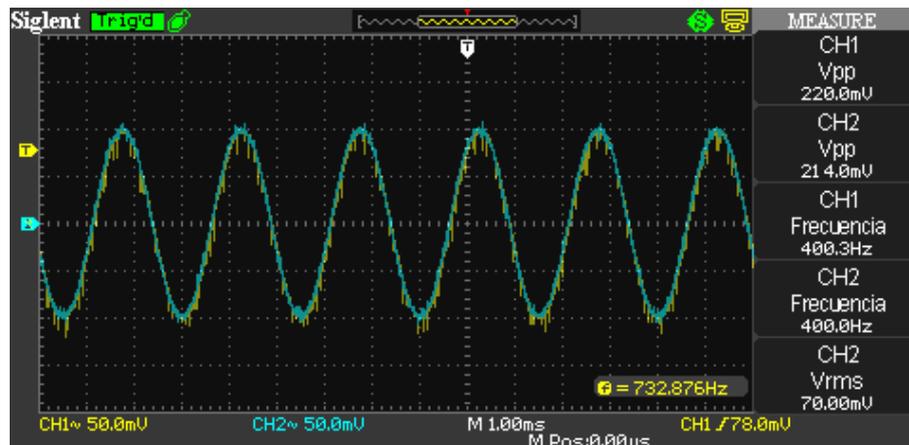


Ilustración 95 - Filtro PCB 400Hz

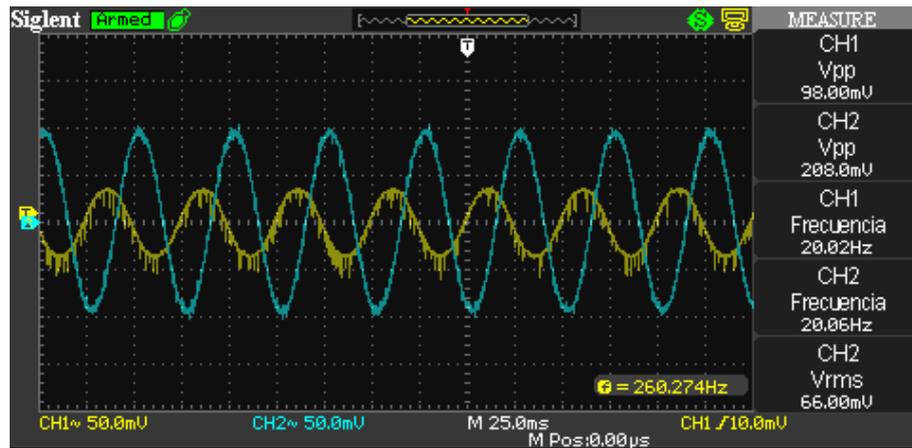


Ilustración 96 - Filtro PCB 20Hz

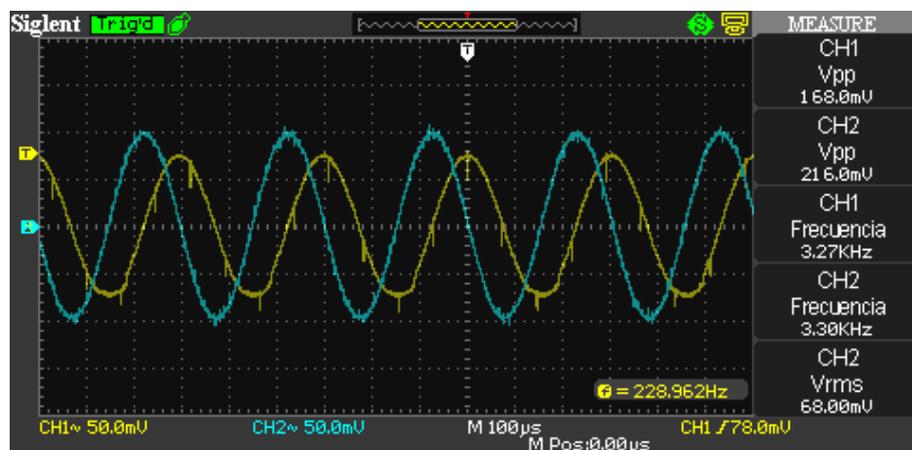
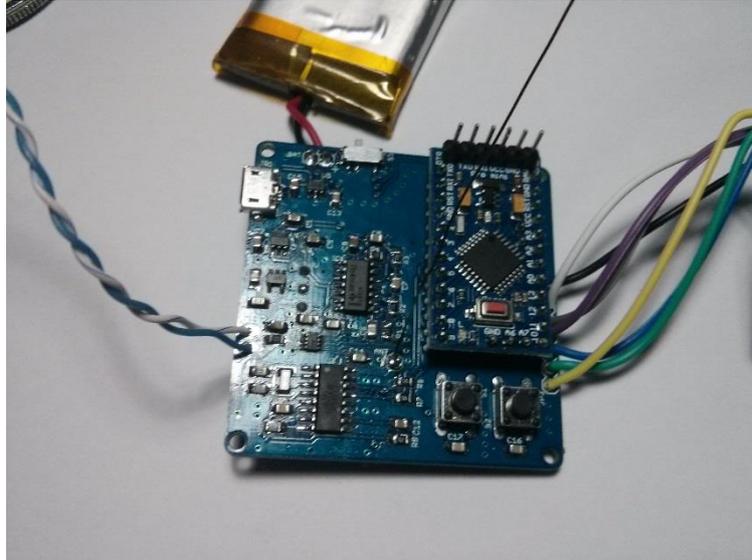


Ilustración 97 - Filtro PCB 3.3KHz

Para las siguientes pruebas, se soldaron todos los componentes, debido a que el control del amplificador programable se lleva a cabo a través del arduino, es por ello que era necesario. Se soldaron todos los componentes restantes, y se comprobó el funcionamiento también de la pantalla así como del módulo FM, obteniendo un resultado correcto, al igual que en la versión prototípica.



*Ilustración 98 - PCB Final*

Tras realizar una serie de pruebas aplicando el fonendo sobre la zona del corazón, y escuchando a través del mismo, fue necesario ajustar la resistencia de polarización del micrófono, ya que se obtenía demasiado ruido comparado con el sonido a escuchar. Empleando una resistencia de 5K6, se logró un desempeño óptimo del micro.

Se disminuyó el valor de las resistencias del divisor resistivo encargado de medir el nivel de batería, debido a un fallo en la adaptación de impedancias del ADC del Arduino.

Los condensadores de salida del módulo de carga y del regulador de tensión negativa fueron ajustados para un correcto funcionamiento de los mismos a largo plazo, ya que con los valores iniciales surgía cierta inestabilidad en la salida del módulo inversor

## 4. CONCLUSIONES

Tras el desarrollo de este diseño, hemos conseguido un prototipo funcional de fonendoscopio inalámbrico, el cual nos permite auscultar pacientes pudiendo obtener sonidos con cierta calidad y amplificación, en un instrumento totalmente portátil y autónomo de dimensiones reducidas y coste asumible. De igual forma, su uso es sencillo, únicamente siendo necesarios dos botones para el control total y disponemos de una pantalla donde ver nítidamente todos los datos disponibles.

Las pruebas sugirieron que la transmisión del audio vía FM es una buena forma de obtener los sonidos captados en varios dispositivos, permitiéndonos la grabación de los mismos, pero no podemos olvidar, que para tener una correcta calidad de sonido, hemos de emplear unos cascos/auriculares de cierta calidad, ya que estamos manejando sonidos delicados y amplificados en frecuencias bajas que ciertas calidades de cascos no son capaces de representar de manera adecuada.

Como punto débil, podemos encontrar ruido estático cuando llevamos al límite en su capacidad de amplificación, pero este apartado podría ser solucionado, implementando un sistema mediante un amplificador de instrumentación regulable, así como un diseño de PCB que evite las EMI. De igual forma una mejora del micrófono, así como su adaptación a la campana del fonendoscopio, un diseño más integrado que nos permita tener mejor calidad de sonido a la salida del micro, lo que llevaría a una necesidad de amplificación inferior, y una mejor calidad de sonido.

Para siguientes versiones de este proyecto, además de lo mencionado en el párrafo anterior, se podría llevar a cabo una implementación del filtro de manera más precisa, empleando componentes pasivos de mayor precisión, así como un Operacional doble, reduciendo tamaño del mismo, y de esta forma evitaríamos dejar en desuso dos de los 4 operacionales. De igual forma, se podrían implementar filtros de mayor orden, teniendo una atenuación más pronunciada en los rangos deseados, siempre y cuando tengamos en cuenta que esta última opción implicaría el uso de un mayor número de operacionales así como de elementos pasivos, comprometiendo el tamaño si nos mantenemos en la escala de componentes SMD empleada en este primer prototipo, siempre pudiendo disminuir el tamaño de los mismos y ampliando la densidad.





# PLIEGO DE CONDICIONES

## 1. CONDICIONES ORGANIZATIVAS

Primeramente, se llevó a cabo un planteamiento del problema a solucionar, se valoraron las diferentes opciones disponibles, teniendo en cuenta tanto factores prácticos, como económicos, realizando prototipos y pruebas sobre placas desechables, pudiendo de esta forma implementar mejoras en las primeras versiones, con un plazo de testeo de un mes, una vez obtenido el diseño final del prototipo, se mandaron a fabricar las PCBs, y encargaron los componentes electrónicos empleados.

El montaje de llevo a cabo de forma manual, teniendo en cuenta que se deben de soldar primeramente los elementos pasivos, y de menos altura, para posteriormente proceder con la soldadura de los elementos activos y de más altura, de esta forma se tiene mayor facilidad a la hora de realizar el ensamblaje de la PCB. Se fraccionaron las etapas, para poder realizar un testeo de las mismas de forma individual, asegurándonos de esta forma, del correcto funcionamiento de todas las etapas, así como evitando la posible destrucción de los componentes empleados por una incorrecta conexión o diseño de los mismo. El procedimiento de montaje fue el siguiente:

1. Soldadura y test de la etapa de alimentación
2. Soldadura y test de la etapa de filtrado
3. Soldadura y test de la etapa de amplificación
4. Soldadura y test de la etapa de interface y pantalla OLED
5. Soldadura y test del módulo FM (Test de integración completa)

Tras la comprobación del prototipo, se llevó a cabo la construcción de la caja que integra todos los componentes, así como la integración con el estetoscopio.

La caja fue impresa en PLA, plástico que cumple con toda la normativa de seguridad y medio ambiente, plástico biodegradable con características mecánicas óptimas para la fabricación de cajas y soportes.

El código de la aplicación cargada en el Arduino, se adjuntara en formato digital junto a una copia del proyecto.

El prototipo de la caja que contiene los componentes no se encuentra en los planos, debido a que se realizó en condición de prueba para poder presentar el prototipo con mayor integridad, no siendo este el principal objetivo del proyecto, realizando en un futuro posible revisiones del mismo con un diseño más acorde a las especificaciones.

## 2. CONDICIONES TECNICAS

Para el prototipo del estetoscopio, se han empleado una serie de programas informáticos que se citaran a continuación. Todo ellos han sido empleados con licencia gratuita, o en equipos de la Universidad de Cantabria, a continuación citamos el software empleado:

- OrCAD 16.6 Lite ( Simulación electrónica)
- FilterPro Texas Instrument (Diseño del Filtro)
- Eagle 6.6.0 Version Estudiante (Diseño PCB)
- Solidworks Version Estudiante (Diseño Caja)

El testeo de la placa requiere una serie de equipo electrónico para la verificación del correcto funcionamiento de todas las etapas del diseño al igual que fue necesario realizar el montaje de la PCB, para dichas operaciones, se empleó el siguiente equipo:

- Osciloscopio SIGLENT SDS1072CML
- Generador de funciones RIGOL DG1022
- Fuente de alimentación RIGOL DP832
- Multímetro RIGOL DM3058
- Soldador HAKKO FX-888D



# PRESUPUESTO

## 1. PRESUPUESTO TAREAS DE DISEÑO Y PROTOTIPADO

TAREA	HORAS	€/HORA	SUBTOTAL
Diseño Electrónico	200	7.50 <sup>1</sup>	1500
Prototipo Electrónico	100	7.50	750
Montaje	10	5 <sup>2</sup>	50
Pruebas	10	7.50	75

**TOTAL: 2375**

(1) Salario medio para titulación de ingeniero técnico electrónico

(2) Salario medio para encargado de montajes de PCBs

## 2. PRESUPUESTO MATERIALES

PRODUCTO	CANTIDAD	€/UNIDAD	SUBTOTAL
LM2776	1	1.05	1.05
TLV70233	1	1.05	1.05
KT0803L	1	3.40	3.40
MCP73811	1	1.15	1.25
LM324	1	0.95	0.95
XTAL 32Khz	1	1.10	1.10
Arduino ProMini	1	4.50	4.50
LTC6910-1	1	4.35	4.35
Resistencia 4.7K	1	0.02	0.02
Resistencia 10K	6	0.02	0.12
Resistencia 20K	2	0.02	0.04
Resistencia 560R	1	0.02	0.02
Resistencia 330R	1	0.02	0.02
Resistencia 2K2	1	0.02	0.02
Resistencia 5K6	1	0.02	0.02
Resistencia 3K7	1	0.02	0.02
Resistencia 2K7	1	0.02	0.02
Resistencia 5K6	1	0.02	0.02
Condensador 100nF	6	0.05	0.30
Condensador 200nF	2	0.05	0.10
Condensador 2.2uF	2	0.05	0.10
Condensador 1uF	5	0.05	0.25
Condensador 10nF	1	0.05	0.05
Condensador 22nF	1	0.05	0.05

<b>Condensador 1.8uF</b>	1	0.05	0.05
<b>Condensador 1.2uF</b>	1	0.05	0.05
<b>Pantalla OLED SPI</b>	1	5	5
<b>Pulsadores</b>	2	1	2
<b>Conector USB</b>	1	1.20	1.20
<b>Placas PCB</b>	1	1.50	1.50
<b>Batería Li-Ion</b>	1	3	3
<b>Interruptor SMD</b>	1	0.20	0.20

**TOTAL: 25.79**

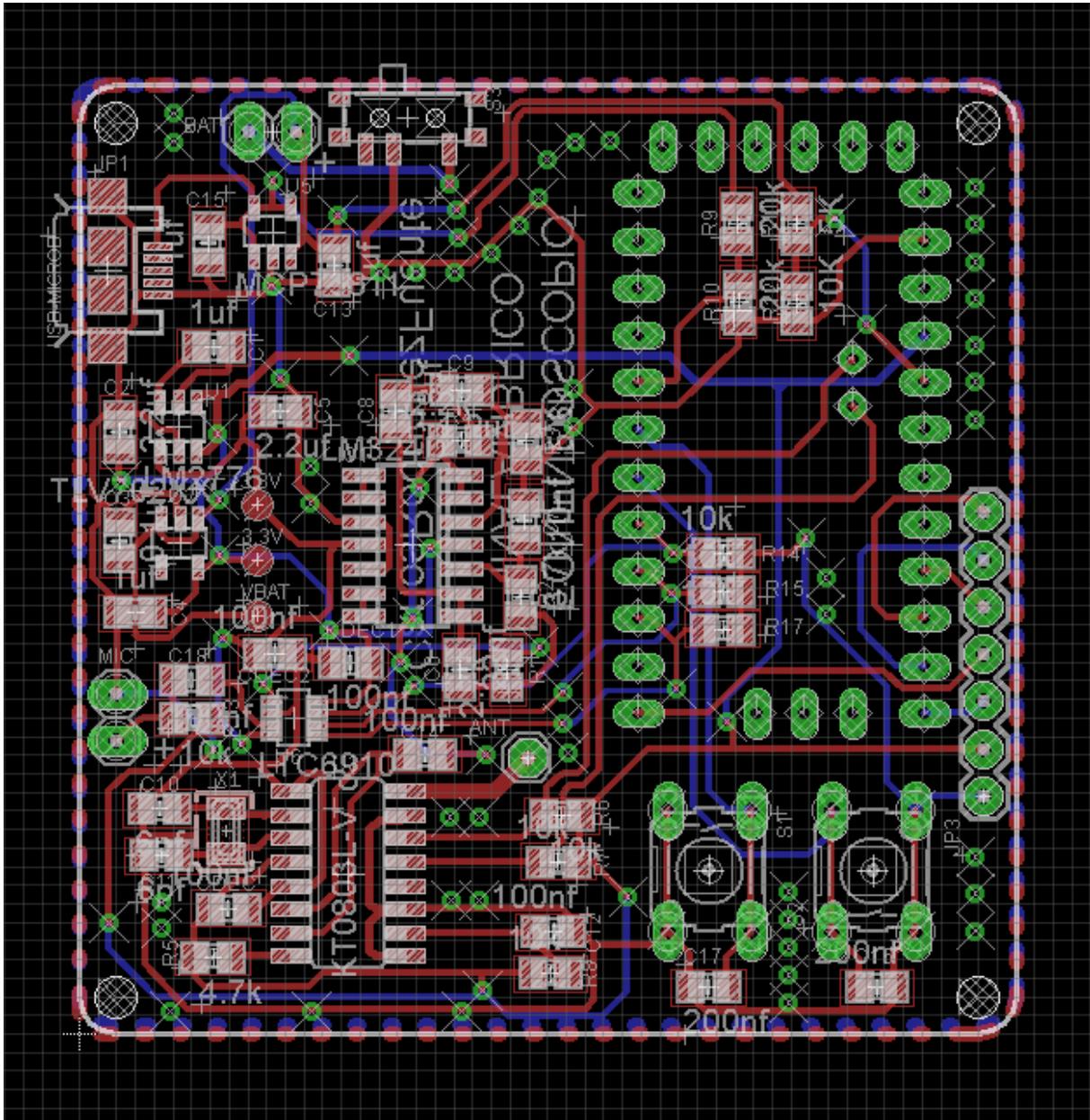
Coste total por cada unidad de prototipo construida.

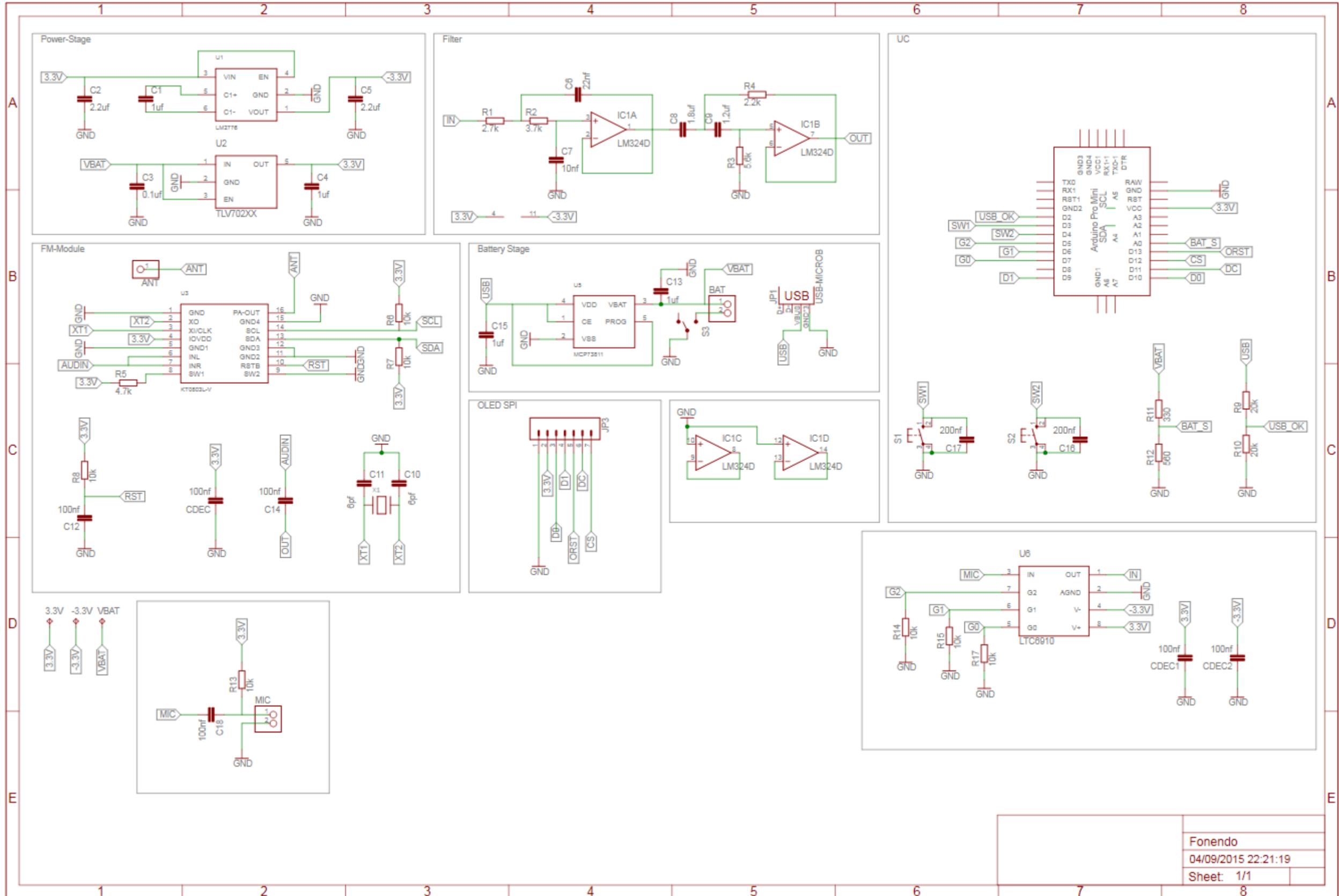
**TOTAL DISEÑO Y MATERIALES: 2438.47**

Este Coste total, es para la primera unidad del prototipo. Los costes más elevados son los de mano de obra y diseño. Si se propusiera una producción en semiserie, de unas 100 unidades, ya que el material académico es de muy baja tirada, se podrían reducir significativamente los gastos de la forma que se podrían amortizar los costes de diseño entre las 100 unidades, y bajar los costes.

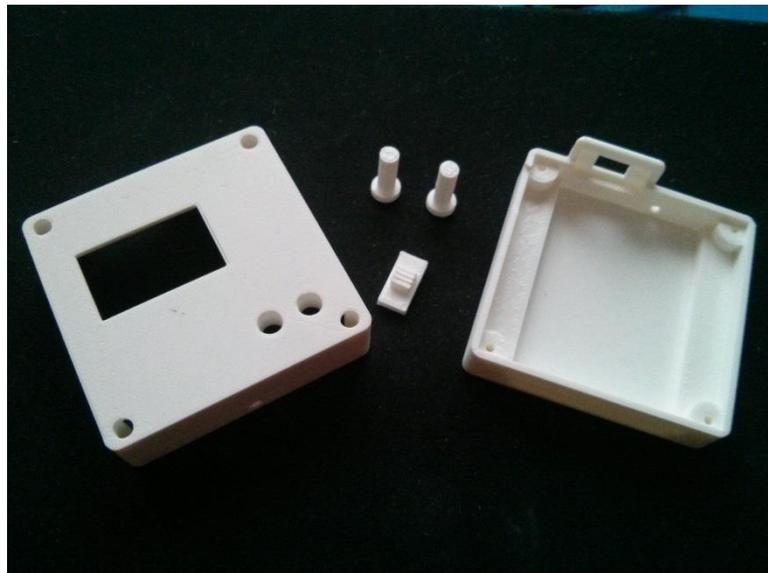
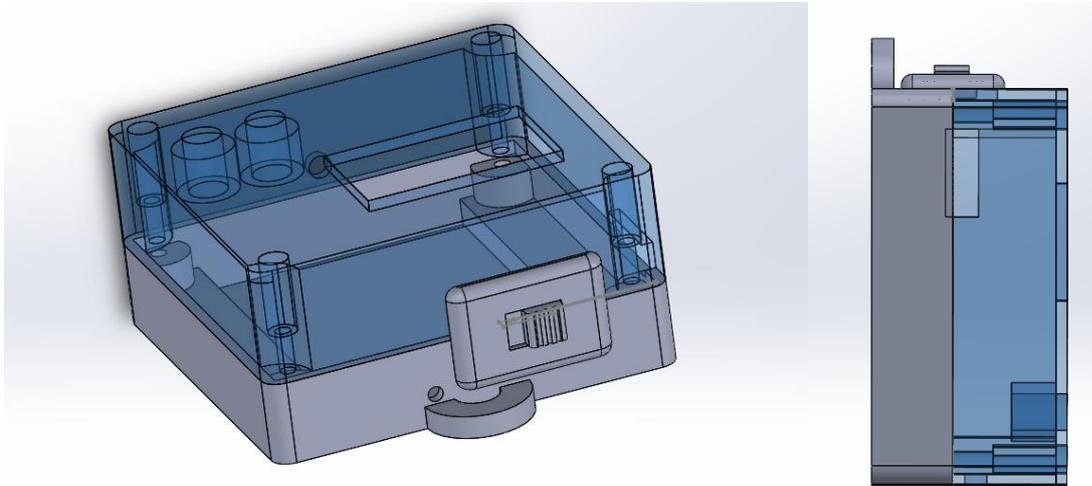
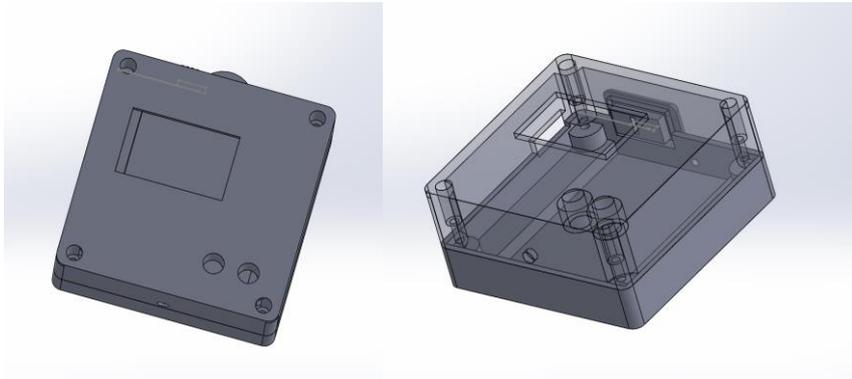
En el precio final, habría que incluir un margen de beneficio lo suficientemente grande como para poder sacar beneficio, y poder ofrecer un servicio técnico.

# ANEXOS

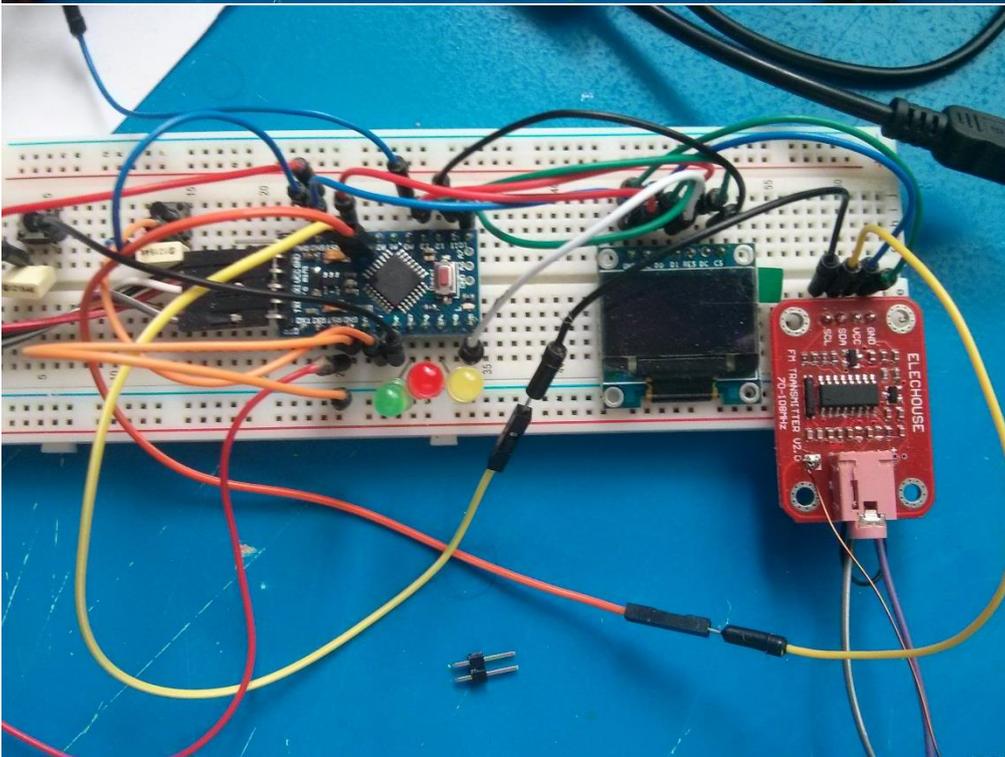
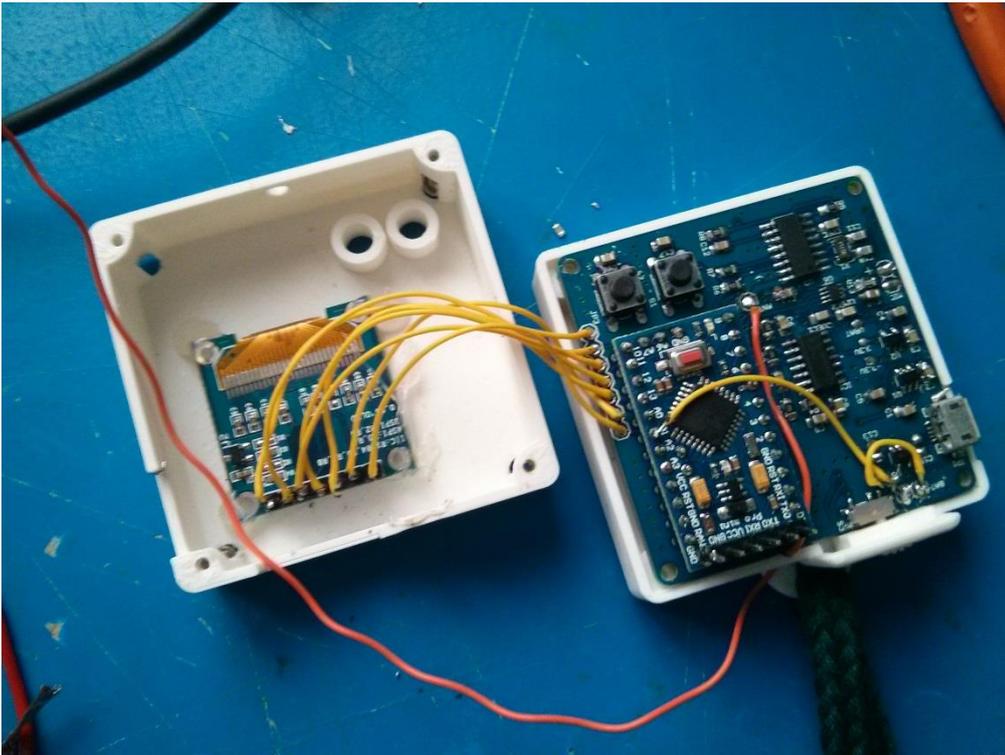


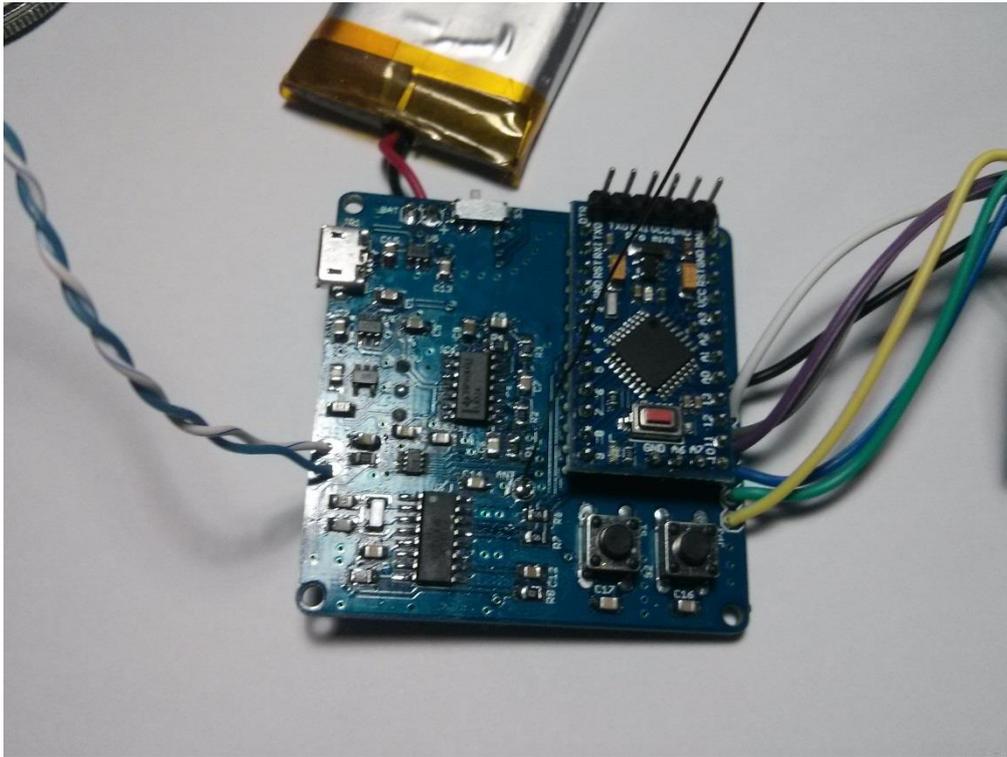


## DISEÑO CAJA



FOTOS





# BIBLIOGRAFIA

- [1]. [http://www.med.umich.edu/lrc/psb\\_open/repo/primer\\_heartsound/primer\\_heartsound.html](http://www.med.umich.edu/lrc/psb_open/repo/primer_heartsound/primer_heartsound.html) - Sonidos Cardiacos
- [2]. <http://electronicayciencia.blogspot.com.es/2010/06/utilizar-un-microfono-electret.html> - Uso y conocimientos micrófono electrec
- [3]. [http://radio-z.ucoz.lv/kt\\_0803/KT0803L\\_V1.3.pdf](http://radio-z.ucoz.lv/kt_0803/KT0803L_V1.3.pdf) - Datasheet KT0803
- [4]. <https://www.arduino.cc/> - Documentación Arduino
- [5]. <http://www.ti.com/lscds/ti/analog/webench/webench-filters.page?DCMP=sva-web-filter-en&HQS=sva-web-filter-pr-en> – Filter Pro
- [6]. MIGUEL ANGEL PEREZ GARCIA, Instrumentación electrónica, 9788428337021 Paraninfo, 2005
- [7]. Johan Huijsing, Operational Amplifiers: Theory and Design, Springer, 2011
- [8]. <http://www.cadsoftusa.com/> - Eagle Versión Estudiante
- [9]. [http://www.wryr.org/Antenna\\_instructions.pdf](http://www.wryr.org/Antenna_instructions.pdf) - Antena FM
- [10]. <http://www.ti.com/lit/an/sboa092a/sboa092a.pdf> - HANDBOOK OF OPERATIONAL AMPLIFIER APPLICATIONS
- [11]. [https://github.com/adafruit/Adafruit\\_SSD1306](https://github.com/adafruit/Adafruit_SSD1306) - Liberia OLED

## DATASHEETS

- [12]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm124-n.pdf> - Datasheet LM324
- [13]. <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/6910123fa.pdf> - Datasheet LTC6910
- [14]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv702.pdf> - Datasheet TLV702
- [15]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2776.pdf> - Datasheet LM2776
- [16]. <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22036a.pdf> - Datasheet MCP73811

