



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Implementación de foto-acoplador como transductor de frecuencia de ondas estacionarias para amplificación de instrumentos de cuerda.

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Martí Llorens, Javier Andrés

Tutor/a: Ibáñez Civera, Francisco Javier

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Contenidos Generales:

- Memoria
- Planos
- Pliego de condiciones
- Presupuesto



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

MEMORIA:

Implementación de photo-acoplador como transductor de frecuencia de ondas estacionarias para amplificación de instrumentos de cuerda.

Trabajo fin de grado:

Ingeniería Electrónica, Industrial y Automática

2022



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Índice Memoria

1. Objeto.....	4
2. Antecedentes	4
3. Especificaciones del encargo.....	5
4. Normativa.....	5
5. Planteamiento de las soluciones alternativas y elección de la solución.....	6
5.1. Instrumentos de cuerda para la implementación del sensor.	6
5.2. Transductores de frecuencia para instrumentos de cuerda.	6
5.3. Características de la señal de salida.	7
5.4. Alimentación.	7
5.5. Conectores de salida de audio.	7
5.6. Tamaño y forma de la PCB (Printed Circuit Board) y Carcasa.	7
6. Estudio de la aplicación del sensor.	8
6.1. Estudio musical instrumento de cuerda: Guitarra Española.....	8
6.1.1 Rango de frecuencias audibles 20Hz-20kHz.....	8
6.1.2 Notas musicales: frecuencias y armónicos.	8
6.1.3 Ancho de Banda de una guitarra española.	9
7. Diseño electrónico de circuitos.....	10
7.1. Características de las señales y sistemas analógicos.	11
7.2. Diagrama de bloques del diseño.....	12
7.3. Implementación del sensor de frecuencia Optoelectrónico.....	13
7.4. Filtro Pasa-Banda.	15
7.5. Buffer	21
7.6. Sumador y filtro pasa altas HPF.....	22
8. Simulación en LTSpice	23
9. Diseño de PCBs mediante ECAD Altium Designer y fabricación en JLCPCB.	24
10. Objetivos Desarrollo Sostenible	26
11. Bibliografía	27

Introducción

En este documento se presenta el diseño y fabricación de un sistema de sensado para instrumentos de cuerda. Para ello se utilizan sensores comerciales optoelectrónicos para obtener una señal eléctrica equivalente a la magnitud física deseada, una señal alterna compuesta de las frecuencias producidas por una cuerda tensada en vibración. Posteriormente esta señal, pasará por distintas etapas de filtrado y amplificación para proporcionar la salida adecuada del instrumento.

Motivación

La motivación del alumno para realizar este trabajo en específico es la de enfrentarse a un diseño electrónico completo, ya que el diseño hardware e implementación electrónica es la parte que más le apasiona de sus estudios.

Se escoge un sistema de sensado para instrumentos de cuerda de nylon al no encontrarse en la industria un aparato para este propósito de alta fidelidad especialmente para bajas frecuencias.

Cabe mencionar que la elección del proyecto se ha debido a la gran pasión del autor por los equipos de audio y la música, y con este sensor dar así, una opción novedosa para la grabación y directo de artistas; por otra parte, considera que este diseño le permitirá hacer uso de componentes y sistemas electrónicos de interés para documentarlos en su Trabajo Fin de Grado.

1. Objeto

El objeto de este documento es el de realizar un diseño completo de un producto electrónico. El producto escogido es un sistema de sensado para instrumentos de cuerda.

En la industria normalmente trabajan muchas personas y departamentos para diseñar un producto final: departamento de hardware, de software, de mecánica... Este va a ser un diseño modesto alcanzable por un solo ingeniero como TFG realizando todos los trabajos anteriormente descritos y así comprender la comunicación y complejidad que tendrían proyectos de mayor envergadura.

Se redacta el presente documento como Trabajo de Fin de Grado del título Ingeniería Electrónica, Industrial y Automática impartido en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universitat Politècnica de València.

2. Antecedentes

A la hora de buscar un tema para el Trabajo de Fin de Grado hay que tratar de realizar un proyecto original e innovador y leer diferentes documentos científicos y de ingeniería para hacerse una idea de cómo los profesionales actúan al redactar y enfocar un proyecto, tesis o trabajo.

Debido al grado que yo he estudiado y mi interés por el diseño electrónico, el presente texto va a tratar de hacer de forma organizada y clara el diseño de un producto funcional cumpliendo con las especificaciones deseadas. Este documento será la recopilación de los pasos realizados para la consecución de este diseño único y propio, y posiblemente sea de interés para el lector la forma en la que ha sido abordado.

Además, supondrá una solución para la amplificación de instrumentos de cuerdas no metálicas, ya que para estos casos habitualmente encontramos sensores piezoeléctricos pegados a las cajas de resonancia o se coloca un micrófono delante del instrumento. Siendo las limitaciones de estos dos métodos, la de no tener una buena respuesta en bajas frecuencias y la de captar el ruido ambiente respectivamente, por lo que el sensor optoelectrónico es una gran solución a estos problemas.

3. Especificaciones del encargo

Las especificaciones que debe de cumplir el proyecto son obtener un **producto final implementado físicamente y funcional** con las siguientes características:

- Ser capaz de **proporcionar una señal eléctrica equivalente a la magnitud física deseada**, es decir, una señal alterna acoplada en AC compuesta de las frecuencias producidas por una cuerda tensada en vibración independientemente del material de fabricación de la cuerda, por ejemplo, cuerdas de nylon.
- La **señal de salida** debe ser **similar en amplitud e impedancia a la de INST** (20-100mV y de baja impedancia de salida) para conectarla a un amplificador de guitarra con previo estándar o a una *interface* de audio.
- La respuesta del sensor debe ser adecuada para todo el rango de frecuencias del espectro audible **20-20.000 Hz de ancho de banda**.
- La **salida** del dispositivo debe ser un **conector Jack de 6.3mm** hembra para utilizar los cables estándar que se usan en la industria.

4. Normativa

Para introducir un producto en el mercado europeo es necesario realizar la **documentación técnica** que proporciona información sobre el diseño, la fabricación y el funcionamiento de este y debe incluir todos los datos necesarios para demostrar que se ajusta a los requisitos aplicables y, por tanto, justifica y apoya la **declaración UE de conformidad**. Esta documentación es necesaria para colocar el mercado CE en el producto.

La **declaración UE de conformidad** es un documento obligatorio que el fabricante o su representante autorizado debe firmar para declarar que sus productos cumplen los requisitos de la UE. Al firmarla, el fabricante asume plena responsabilidad del cumplimiento por parte de su producto de la legislación aplicable de la UE.

Cuando existen, las **normas armonizadas** pueden ayudar a demostrar el cumplimiento de la normativa de la UE.

2014/30/EU

Official Journal of the European Union: Electromagnetic Compatibility (EMC)

Summary list as pdf document (Normas europeas EN)

Titles and references of harmonised standards under Directive 2014/30/EU for EMC

2001/95/EC

Official Journal of the European Union: General Product Safety

Summary list as pdf document (Normas europeas EN)

Titles and references of European standards under Directive 2001/95/EC for products

2014/32/EC

Official Journal of the European Union: Measuring instruments

Summary list as pdf document (Normas europeas EN)

Titles and references of European standards under Directive 2014/32/EU for measuring

IPC-2141

Design Guide for High-Speed Controlled Impedance Circuit Boards

IPC-1782

Standard for Manufacturing and Supply Chain Traceability of Electronic Products

5. Planteamiento de las soluciones alternativas y elección de la solución.

En este apartado se van a plantear las posibles opciones:

5.1. Instrumentos de cuerda para la implementación del sensor.

Bajo eléctrico: El primer instrumento que se propone como candidato para ser amplificado es un bajo eléctrico. Este instrumento se lleva utilizando en conciertos y en grabación de discos de música sobre todo Música Rock y Hevy Metal, desde que el bajo y la guitarra eléctricos se pusieran de moda en los años 60 con la aparición de bandas como Led Zeppelin, Van Halen o Jimmy Hendrix. Es un buen punto de partida, pero tiene el inconveniente de ya tener un sistema de sensado muy estandarizado en la industria: las pastillas de campo magnético, siendo esta la magnitud física que transforman en señal eléctrica.

Bajo acústico: Este instrumento proporciona un timbre más cálido que el bajo eléctrico debido a la construcción del instrumento y a tener una caja de resonancia. Este instrumento se utiliza más en bandas de Jazz o Blues y resulta interesante para el proyecto porque habitualmente se utilizan como transductores sensores piezoeléctricos o micrófonos delante de la caja de resonancia, y estos dos sensores tienen como limitaciones no tener una buena respuesta ante frecuencias bajas y la de captar el ruido ambiente respectivamente. Lo dicho anteriormente se puede aplicar también a las guitarras acústicas.

Guitarra Española: Este instrumento también resulta interesante para implementar el sensor del proyecto debido a no utilizar pastillas magnéticas y normalmente tampoco utilizar sensores piezoeléctricos, estando limitados a la utilización únicamente de micrófonos. Además de ser un instrumento tradicional utilizado en el Flamenco y llevado a su máximo potencial por Paco de Lucía. Como inconveniente, no genera frecuencias tan bajas como un bajo acústico o un bajo eléctrico. Este es el instrumento elegido para el trabajo.

5.2. Transductores de frecuencia para instrumentos de cuerda.

Pastillas magnéticas: Se denominan así a los sensores que incorporan los bajos y guitarras eléctricos que se componen de bobinas, que expuestas a un campo magnético producido por la vibración de cuerdas metálicas, inducen una corriente eléctrica equivalente a la vibración de la cuerda.

Sensores piezoeléctricos: Estos sensores se utilizan también en otras aplicaciones y su principio de funcionamiento se basa en ser resistencias variables ante la flexión, por lo que, al colocarlas pegadas a un material, una deformación en este provocaría una deformación en la resistencia, y como consecuencia, un cambio en su valor nominal en ohmios. Al colocar una resistencia variable en un divisor de tensión, podemos obtener una señal eléctrica variable proporcional a la variación de la resistencia, y, por lo tanto, a la deformación del material al que está pegada. Así es como la vibración de la caja de resonancia se traduce en una señal eléctrica y en este caso la resistencia piezoeléctrica actúa como sensor de frecuencia o de vibración.

Micrófonos: Existen micrófonos capacitivos, de cristal, dinámicos... todos ellos se basan en captar ondas físicas acústicas y captar la presión que estas ondas producen al chocar con el sensor.

Sensor optoelectrónico: Este sensor tiene un diodo LED como emisor y un photo transistor como receptor, que se pueden encontrar comercialmente en forma de U. Sirven para captar la presencia de objetos actuando como interruptor binario 0 o 1, indicando presencia o ausencia de objetos entre el emisor y el receptor.

Para nuestra aplicación se podría polarizar el transistor en régimen continuo para utilizarlo no como interruptor sino como transductor de paso de cuerdas en vibración, dentro del rango continuo del transistor y así obtener una señal eléctrica equivalente a la vibración de la cuerda.

5.3. Características de la señal de salida.

Señal de bajo nivel y baja impedancia de salida INST: Esta señal es la que proporcionan instrumentos como los bajos y las guitarras eléctricos y suele tener una amplitud en torno a 100mV Vpp y una baja impedancia de salida, por lo que, se tienen que conectar a un previo con alta impedancia de entrada High-Z. Este es el tipo de señal de salida de nuestro sistema.

Este tipo de entradas con previo las tienen los amplificadores de guitarra y bajo, e interfaces de audio. También se pueden conectar a un previo independiente según el interés del usuario.

Después de pasar por la amplificación del previo se obtiene una señal de LINE de 1.7V lista para amplificar en potencia, producir, ecualizar ...

Señal de LINE: Se denomina señal de línea a aquella que tiene 1.7V y ya no es de bajo nivel. Es la que se utiliza para transmisión, ecualización, tratamiento, amplificación de potencia... y es proporcionada por previos, sintetizadores o teclados.

5.4. Alimentación.

Sistemas pasivos: Son aquellos que no requieren de alimentación para funcionar y solo utilizan componentes electrónicos pasivos. Un ejemplo son las pastillas de bajos y guitarras eléctricos.

Sistemas activos con alimentación simple: Son aquellos que necesitan una fuente de alimentación o batería para funcionar y utilizan componentes electrónicos activos como transistores. La alimentación simple se refiere a que solo hay fuentes con tensiones positivas.

Sistemas activos con alimentación simétrica: Son aquellos que tienen alimentación y además de proporcionar tensiones positivas, proporcionan alimentaciones negativas de igual nivel. Se utilizan en sistemas que requieran de alimentación simétrica para su correcto funcionamiento, como un amplificador operacional con una señal de entrada alterna sin componente DC, que su amplitud oscila entre valores positivos y negativos. Esta es la alimentación necesaria para la PCB.

5.5. Conectores de salida de audio.

Jack de 3.5mm: En conectores de audio es un estándar el conector Jack. El de 3.5mm suele utilizarse en aparatos electrónicos de consumo como móviles, ordenadores o auriculares y puede tener dos, tres o cuatro terminales. Para la señal de audio mono y masa (TS), audio estéreo (Left and Right) y masa (TRS) y audio estéreo (Left and Right), micrófono y masa (TRRS).

Cabe matizar que se compone de un solo conector con dos, tres, o cuatro terminales y el cable lleva dentro dos, tres o cuatro cables con cada señal.

Jack de 6.2mm: Este conector es el utilizado para el proyecto. Por ser estándar en guitarras y bajos eléctricos, teclados, sintetizadores, mixers, interfaces... Es más grande que el Jack de 3.5mm, y también está en versión TS y TRS para señales monofásicas o balanceadas en este caso.

RCA: Es otro tipo de conector, en este caso dos conectores que llevan la señal por cables separados rojo y blanco, normalmente para audio estéreo. Estos conectores se encuentran en amplificadores de audio y en fonógrafos.

5.6. Tamaño y forma de la PCB (Printed Circuit Board) y Carcasa.

Una sola PCB: Que incluya alimentación y sensado.

Modular: Más de una PCB Para la implementación del sistema conectadas por cables.

Sin carcasa: Únicamente la PCB sujeta por tornillería u otro método.

Con carcasa: Carcasa diseñada a medida en impresión 3D en PLA u otros materiales.

6. Estudio de la aplicación del sensor.

Para este proyecto debemos realizar un transductor de frecuencia optoelectrónico para un instrumento de cuerda concretamente una guitarra española. Como en cualquier problema a resolver debemos tener una visión global y es imprescindible comprender que vamos a medir, en este caso las frecuencias producidas por la vibración de una cuerda tensada en un instrumento de cuerda.

6.1. Estudio musical instrumento de cuerda: Guitarra Española.

Una Guitarra española es un instrumento de cuerda compuesto por seis cuerdas tensadas y un cuerpo que se compone de una caja de resonancia y un mástil con trastes para producir notas musicales.

Los instrumentos de cuerda generan el sonido por la vibración de cuerdas tensadas. El sonido es la interpretación que hace nuestro cerebro gracias a los órganos auditivos que captan ondas sonoras, que son ondas acústicas propagadas por un medio físico como el aire moviendo sus partículas.

El sonido producido por una cuerda tensada es muy débil por lo que hay que amplificarlo. Esta amplificación se hace mediante la caja de resonancia excepto en el caso de la guitarra y el bajo eléctricos, que usan sensores magnéticos y amplificadores siempre.

Las características de una onda sonora de una guitarra se corresponden con las características de una onda estacionaria típica estudiada en los temarios de física. Esta onda estacionaria tiene una componente fundamental y varios armónicos con sus nodos debidos a la superposición de vibraciones en la misma.

Nosotros vamos a diseñar un transductor optoelectrónico que nos transforme la vibración de la cuerda en señales eléctricas con frecuencias equivalentes.

Por lo tanto, para la implementación del sensor, es importante conocer el rango de frecuencias en las que tendrá que trabajar el sistema, y para ello, vamos a estudiar las frecuencias que produce una guitarra, cómo está afinada y la función que tienen los trastes en la producción de distintas notas musicales y así definir el ancho de banda de nuestro sistema.

6.1.1 Rango de frecuencias audibles 20Hz-20kHz

El oído humano tiene una capacidad de audición de frecuencias de entre 20Hz y 20kHz generalmente. Este rango es una aproximación ya que depende cada persona, su edad, exposición al ruido ... pero nos sirve como referencia para el estudio.

Con este dato tenemos una aproximación a un posible ancho de banda del sistema.

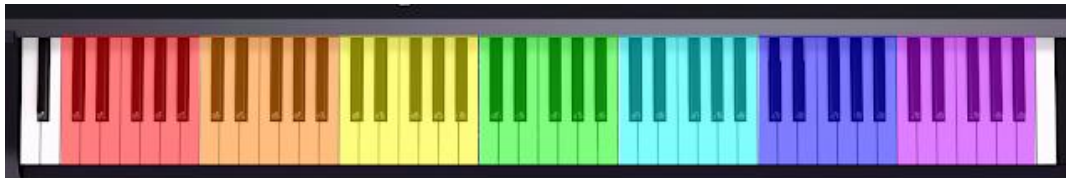
6.1.2 Notas musicales: frecuencias y armónicos.

En la escala musical occidental hay doce notas musicales que se repiten cada octava. Aumentar o disminuir una octava, significa multiplicar o dividir la frecuencia fundamental de una nota por dos. Por lo que tenemos doce notas musicales que se repiten en octavas.

La nota de referencia para afinar los instrumentos es el LA de 440Hz.

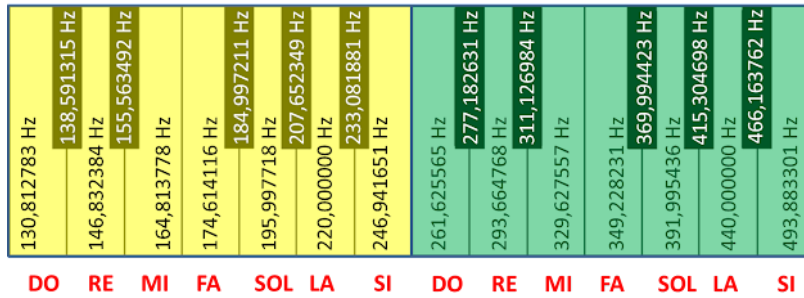
Para calcular la frecuencia de una nota cualquiera hay que partir de una frecuencia conocida y multiplicarla por la raíz doceava de 2 elevada al número de semitonos de separación con la nota de referencia. Ej. $SI = LA \cdot (\sqrt[12]{2})^{N^{\circ} \text{semitonos}} = LA \cdot (\sqrt[12]{2})^2 = 440 \cdot (\sqrt[12]{2})^2 = 493.883$.

El instrumento en el que mejor se visualiza esta distribución de notas es el teclado. Este suele contar con ochenta y ocho teclas divididas en siete octavas y el La de 440Hz corresponde a la octava cuatro.



OCTAVA 1 OCTAVA 2 OCTAVA 3 OCTAVA 4 OCTAVA 5 OCTAVA 6 OCTAVA 7

Teclado de 88 teclas dividido en octavas



Frecuencias de las octavas tres y cuatro de un teclado

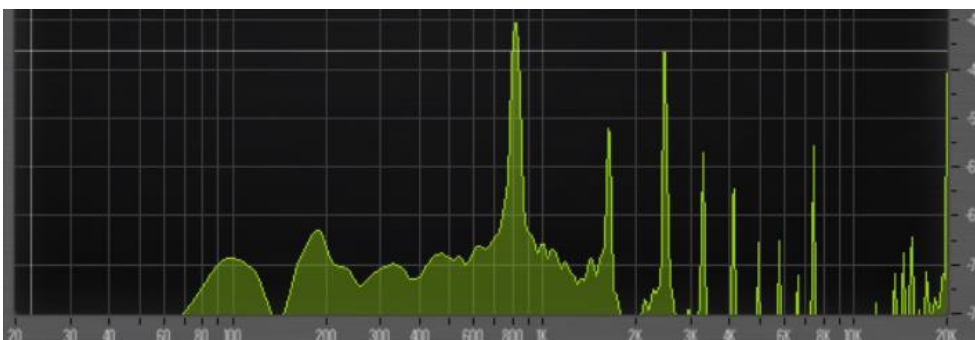
6.1.3 Ancho de Banda de una guitarra española.

La guitarra española tiene seis cuerdas tensadas o afinadas a seis frecuencias o notas: Mi, Si, Sol, Re, La, Mi; 329'63Hz, 246'94Hz, 196'00Hz, 146'83Hz, 110'00Hz, 82'41Hz. De estas frecuencias fundamentales de las cuerdas deducimos que la frecuencia más grave posible generada por la guitarra es de 82,41Hz.

Para obtener la frecuencia fundamental más aguda de una guitarra clásica, que puede tener hasta diecisiete trastes, sería: $329'63 \cdot (\sqrt[12]{2})^{17} = 880\text{Hz}$. Apareciendo armónicos de hasta 15kHz.



Componente en frecuencias de la nota más grave de la guitarra.



Componente en frecuencias de la nota más aguda de la guitarra.

Respecto del bajo eléctrico, que también sería interesante diseñar el sensor para él, tenemos cuatro cuerdas tensadas o afinadas a cuatro frecuencias o cuatro notas: Sol, Re, La, Mi; 97'99Hz, 73'41Hz, 55'00Hz, 41'20Hz. La frecuencia más grave que aparece es la de 41,20Hz.

Después de todo este análisis, el ancho de banda elegido para el diseño es de: (15Hz-15kHz)

7. Diseño electrónico de circuitos.

En este trabajo vamos a implementar un sensor/transductor optoelectrónico que sea capaz de captar la frecuencia del sonido producido por un instrumento de cuerda y nos proporcione una señal eléctrica equivalente a la magnitud física de interés (vibración de onda estacionaria).

Los instrumentos de cuerda requieren de amplificación debido a que el simple movimiento de esta, produce un volumen muy tenue, como ya hemos señalado. Por eso, los instrumentos de cuerda son siempre amplificados sea de forma acústica o mediante el uso de circuitos electrónicos activos.

Un esquema típico de un set de guitarra o bajo eléctrico sería guitarra/bajo pasivos, un altavoz activo con previo y amplificador, y un cable TS-TS.



**Pasive
BASS**



**Cable
TS**



**Speaker
Amp/Pre-Amp**

Set típico de bajo eléctrico pasivo

En el instrumento de este set, solo hay componentes pasivos como: transductores, potenciómetros, resistencias, condensadores y bobinas. Y con todo esto, el instrumento proporciona una señal eléctrica de bajo nivel (unos 20mV-100mV), por lo que después de que se produzca esta señal, hará falta amplificarla. Un amplificador típico de bajo y guitarras eléctricas, recibe una señal de bajo nivel, y la amplifica mediante un previo incorporado en el mismo, que eleva los pocos milivoltios a 1.7V de señal de línea y después pasa por una etapa de amplificación de potencia que inyecta una señal capaz de mover la membrana de un altavoz hasta llegar a los cientos de vatios.

En cambio, una amplificación acústica para instrumentos de cuerdas no metálicas se basa en que el cuerpo del instrumento contenga una caja de resonancia que amplifique de forma física las ondas sonoras. Cabe mencionar que la amplificación acústica tiene un límite de volumen dado por el tamaño y geometría de la caja, siendo necesario en los conciertos en directo recurrir al uso de altavoces de gran potencia, cuya señal proviene normalmente de sensores piezoeléctricos o de un micrófono colocado delante del instrumento.



**Acustic
INSTRUMENT**



MIC



Cable XLR



Piezoelectric



**Cable
TS 6.2mm Jack**



**Speaker/MIXER
Amp/Pre-Amp**

Set típico de instrumento acústico amplificado para conciertos.

Con esto, ya comprendemos las señales y las etapas de sensado y amplificación que aparecen en los instrumentos de cuerda más comunes.

Ahora procederemos al diseño electrónico de nuestro sensor para instrumentos de cuerdas no metálicas, y en específico para una guitarra clásica. Todo esto, como alternativa al micrófono y al sensor piezoeléctrico, que pese a llevar a cabo su función de captar la vibración, el factor más limitante de estos dos sensores es la captación de ruido ambiente y una peor respuesta ante las bajas frecuencias respectivamente.

Por esto vamos a implementar un sensor optoelectrónico comercial que tiene la capacidad de detectar la presencia o no de objetos y en nuestro caso, de la vibración de la cuerda.

Ya que el sensor se compone de un diodo LED y un photo-transistor (componentes electrónicos activos), el instrumento va a tener alimentación, y esta va a ser proporcionada por dos pilas de 9V estándar.

En la placa habrá dos soportes para las pilas de 9V, un regulador a 5V y otro de -5V, seis sensores, seis filtros pasa-banda pasivos, seis buffers, un sumador y un conector Jack d 6.3mm TS hembra.

Los pasos para el diseño del sistema de sensado se detallan a continuación:

7.1. Características de las señales y sistemas analógicos.

Los sistemas electrónicos analógicos procesan señales de entrada para obtener a la salida la señal deseada. El análisis y diseño de estos sistemas es complejo y por ello es conveniente seguir un orden lógico y estructurado para no saltarse ninguna consideración importante.

Para este diseño, vamos a seguir la filosofía de diseño top-down, que comienza por los aspectos más generales hasta el diseño concreto de cada subsistema y cálculos finales de consumo y errores.

Definición de las características estáticas y dinámicas de señales y sistemas.

En este apartado vamos a definir las características de las señales y de los sistemas para posteriormente tan solo nombrarlas dado por entendido su significado.

Características estáticas

-Amplitud, nivel y rango (Señales): el nivel corresponde con el valor medio de la señal y con la componente de continua DC. La amplitud hace referencia a la componente alterna y es la diferencia entre el valor de la señal y su valor medio, y el rango es la diferencia entre el valor máximo y mínimo de la señal.

-Impedancias de salida e impedancias de entrada: Se refiere a la resistencia vista desde la salida y la entrada de un sistema. La impedancia, limita la cantidad de corriente que puede entregar la salida y la cantidad de corriente que consume una entrada. La correcta elección de las impedancias de entrada y de salida del sistema son importantes a la hora de no perder información y no quemar componentes.

-Topología de salida y de entrada: Es importante elegir la topología de entrada de un sistema de procesamiento analógico de acuerdo con la topología de la señal a procesar. Una mala elección en la topología puede hacer que se pierda información de la señal y no se pueda procesar correctamente. Pueden ser diferenciales/no diferenciales. Referidas a masa 0V o a otras referencias.

-Función de transferencia: La Fdt se define analíticamente como el cociente entre la señal de salida y la señal de entrada. Hay que añadir que la ganancia es la variación de la salida en función de la señal de entrada y el rango, el intervalo en el que esta variación es lineal.

-Características del OpAmp real: Ganancia no infinita, impedancia de entrada no infinita, impedancia de salida no nula, existencia de tensiones de offset, corrientes de polarización, corrientes de offset, corrientes de polarización y de offset con la temperatura. Es necesario considerar estos aspectos en el diseño y además elegir un OpAmp comercial adecuado.

Características dinámicas

En el apartado anterior, se ha estudiado el comportamiento estático de un sistema. En este apartado se va a tratar el comportamiento dinámico a través del análisis de la variación de respuesta con la frecuencia y se introducirán conceptos de limitaciones de los componentes.

-Ancho de banda (Señales y Sistemas): Rango de frecuencias de la señal del sensor o rango de frecuencias en el que trabaja el sistema.

-Slew Rate: es una característica dinámica de sistemas analógicos de procesado que limita la frecuencia máxima de trabajo. Como nuestro diseño no trata señales de alta frecuencia, y cortamos el ancho de banda a 20k Hz, este parámetro no nos va a limitar.

-Producto ganancia por ancho de banda (OpAmps): Es un dato aportado por el fabricante del AO. Este valor aportado es el ancho de banda del sistema para una ganancia igual a la unidad. Si utilizamos ganancias muy altas puede ser un factor determinante. No es nuestro caso ya que no utilizamos ni ganancias ni frecuencias altas.

7.2. Diagrama de bloques del diseño

El diagrama de bloques del diseño proporciona una visión estructurada de las partes que aparecen en el sistema. Es de ayuda tanto para el diseñador como para cualquier ingeniero que trabaje en el proyecto. El diagrama de bloques del sensor para instrumentos de cuerda es el siguiente:

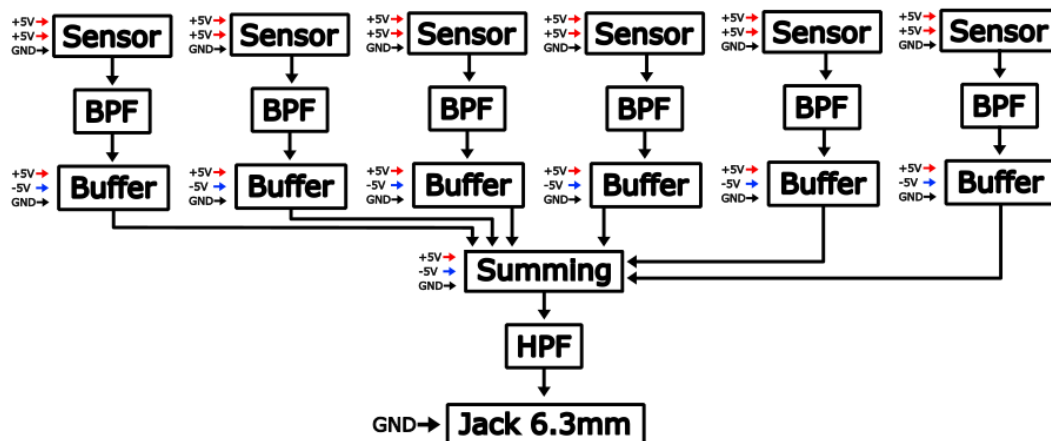


Figura X.X diagrama de bloques del diseño

7.3. Implementación del sensor de frecuencia Optoelectrónico

En nuestro caso vamos a diseñar la PCB para el OMRON 1041. Una vez escogido el modelo de sensor en concreto y habiendo hecho un estudio de la cadena de suministros de este, procedemos a la implementación del mismo.


El acondicionamiento del sensor vamos a realizarlo apoyándonos en el datasheet y realizando los cálculos pertinentes.

Un sensor optoelectrónico se compone de un emisor de luz y un receptor, cuando el receptor detecta luz proveniente del emisor es que no hay presencia de objetos entre emisor y receptor y si no detecta la luz del emisor se interpreta como presencia de un objeto en medio. Utilizamos este principio de funcionamiento para adaptarlo al refresco continuo de la posición de la cuerda y obtener una señal alterna de frecuencia equivalente a la vibración de esta.

Los sensores tipo U que vamos a utilizar se componen de un diodo LED como emisor y un fototransistor como receptor, integrados en una sola pieza de plástico con 4 terminales: el ánodo y cátodo del diodo, y el colector y emisor del transistor.

Las características principales que aparecen en el datasheet son las siguientes subrayadas:

Ordering Information

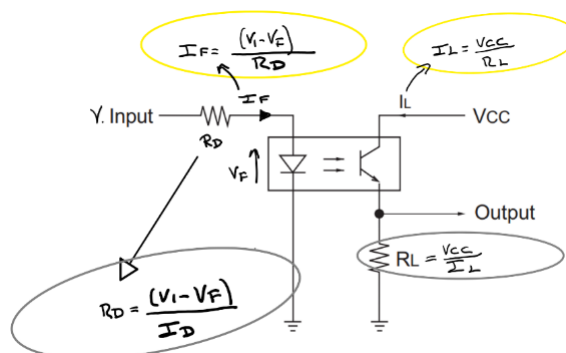
Appearance	Sensing method	Slot width	Slot depth	Sensing object	Output configuration	Weight	Part number
	Transmissive	5 mm	8.2 mm	Opaque, 0.5 x 2.2 mm min.	Phototransistor	Approx. 0.6 g	EE-SX1041

■ Electrical and Optical Characteristics (Ta = 25°C)

Item	Symbol	Value	Condition
Emitter	Forward voltage	V_F	1.2 V typ., 1.5 V max.
	Reverse current	I_R	0.01 μ A typ., 10 μ A max.
	Peak emission wavelength	λ_p	940 nm typ.
Detector	Light current	I_L	0.5 mA min., 14 mA max.
	Dark current	I_D	2 nA typ., 200 nA max.
	Leakage current	I_{LEAK}	---
	Collector–Emitter saturated voltage	$V_{CE(sat)}$	0.1 V typ., 0.4 V max.
	Peak spectral sensitivity wavelength	λ_p	850 nm typ.
Rising time	t_r	4 μ s typ.	$V_{CC} = 5$ V, $R_L = 100$ Ω , $I_L = 5$ mA
Falling time	t_f	4 μ s typ.	$V_{CC} = 5$ V, $R_L = 100$ Ω , $I_L = 5$ mA

Características principales EE-SX1041

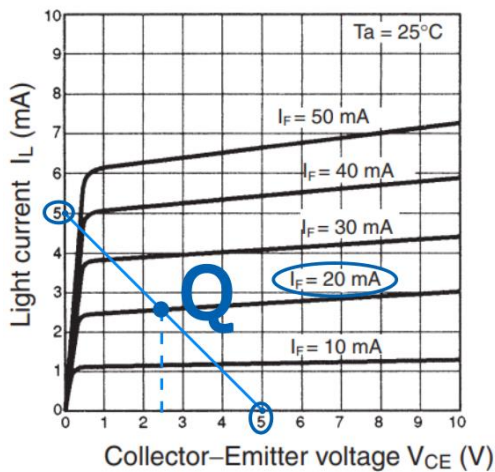
En la siguiente imagen vemos el esquema con símbolos de cómo hay que implementar el sensor. Como se ve en la imagen, hay que escoger dos resistencias, la resistencia de limitación de corriente para el diodo LED y la resistencia de carga para el transistor polarizado en emisor común.



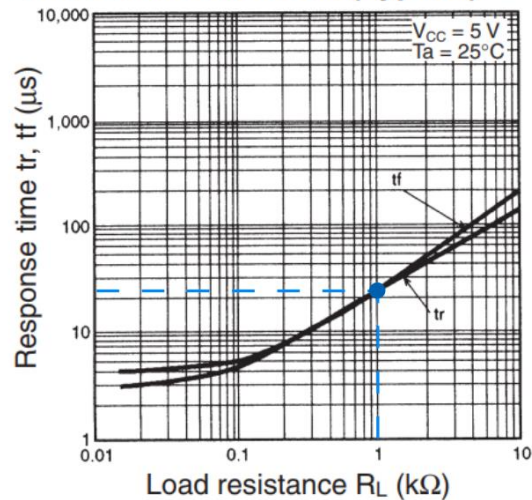
Esquema de polarización del sensor optoelectrónico

Para elegir de manera correcta las dos resistencias lo haremos apoyándonos las gráficas del datasheet y así obtener el comportamiento deseado para nuestra aplicación.

Light Current vs. Collector–Emitter Voltage Characteristics (Typical)



Response Time vs. Load Resistance Characteristics (Typical)



Tiempo de respuesta frente a resistencia de carga. Polarización del transistor: gráfica punto Q

Con estas dos gráficas podemos elegir valores comerciales para las resistencias.

Estos son escogidos para obtener un punto de polarización Q a 2.5V, es decir, el transistor estará polarizado en modo continuo para que trabaje en el rango de la señal de entrada y lo refleje en la salida sin saturar... Después, más adelante, en el documento pondremos un filtro pasa altas que elimine la componente continua de 2.5V de la señal de salida y acople la señal en AC teniendo solo las componentes de alterna, que serán nuestra señal deseada de salida.

Debido a que queremos el menor consumo de corriente por parte del diodo LED y del phototransistor, escogemos el punto Q para una I_F de 10mA y una I_L de 1.28mA. Como se ve en las imágenes anteriores subrayadas en color azul.

La elección de componentes para el acondicionamiento del sensor concluye en:

$$I_L = \frac{V_{CC}}{R_L} = \frac{5}{1k} = 5mA \quad I_F = \frac{V_i - V_f}{R_D} = 20mA$$

$$R_L = \frac{V_{CC}}{I_L} = \frac{5}{5mA} = 1k \text{ Ohm}$$

$$R_D = \frac{V_i - V_f}{I_F} = \frac{(5 - 1.2)}{20mA} = \frac{3.8V}{20mA} = 190 \approx 220 \text{ Ohm}$$

$$t_r = t_f = 15\mu s$$

$R_L=1K$

$R_D=220 \text{ Ohm}$

7.4. Filtro Pasa-Banda.

La señal para procesar es la proveniente del sensor y tiene las siguientes características: amplitud (50mV) nivel (2.5V) rango (100mV) topología (single-ended grounded) terminal uno (señal) terminal dos (0V) impedancia de salida (1k Ohm) y ancho de banda (15Hz-15kHz).

La FDT del filtro debe ser de segundo orden con un derivador y dos polos simples para obtener un filtro pasa banda, con una banda de paso de ancho de banda de 15Hz-15kHz para acoplar la señal en AC (Eliminar la componente de DC) y eliminar el ruido de altas frecuencias. La topología de debe ser single-ended grounded para concordar con la señal de entrada, y la impedancia de entrada será dada por un condensador, por lo que variará dependiendo de la frecuencia. El valor del condensador lo calcularemos en la elección de componentes del filtro.

Un sistema de procesado puede contener bloques funcionales de filtrado. Con este se consigue obtener a la salida del sistema la señal de entrada sin algunas de sus componentes de frecuencia. Es decir, el filtro permite únicamente el paso de las frecuencias especificadas en el diseño.

Los filtros pasivos son aquellos en los que su ganancia máxima alcanzable teórica es la unidad, no tienen capacidad de amplificación ni tampoco de control.

- Filtro Pasa Bajas “Low Pass Filter” (LPF)

Los filtros paso bajo, permiten el paso de las frecuencias bajas e impiden el paso de las frecuencias altas superiores a la frecuencia de corte superior.

Se dice que un sistema pasa bajas está acoplado en DC porque permite el paso de la continua.

Partiendo del diseño electrónico de un LPF pasivo se obtiene el siguiente filtro RC.

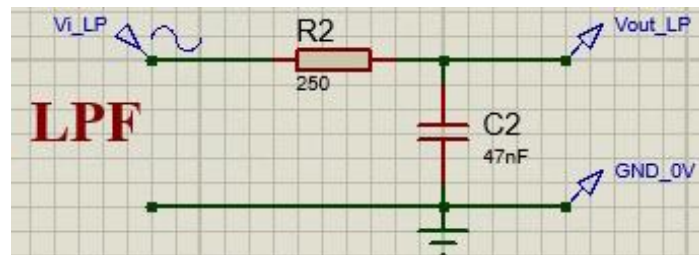
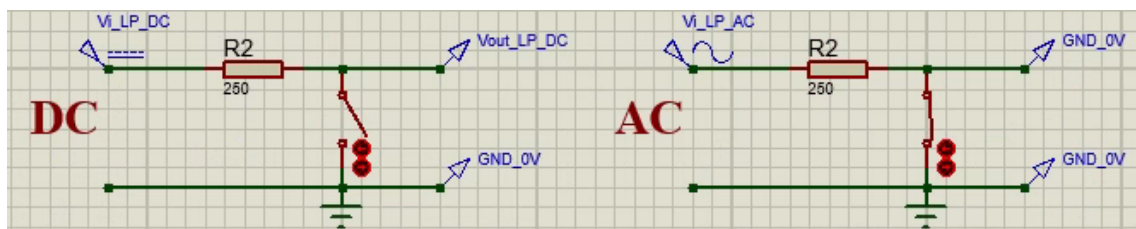


Figura Filtro Pasa Bajas “Low Pass Filter” (LPF) RC Pasivo



Comportamiento del condensador frente a frecuencias bajas y altas

La función de transferencia de este circuito se puede obtener de forma sencilla con la ley de ohm aplicada para un divisor resistivo.

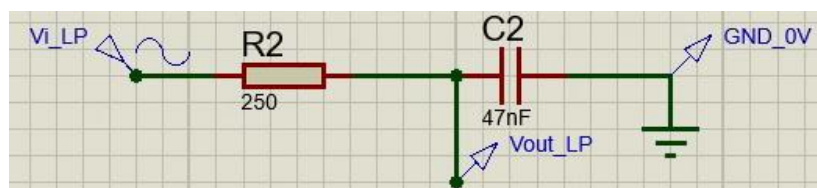


Figura Despliegue divisor resistivo Filtro RC Pasa Bajas

Análisis del LPF pasivo. Obtención de la función de transferencia en el dominio de Laplace:

$$V_o = (I) \cdot (X_c) =$$

$$V_o = \left(\frac{\Delta V}{Z}\right) \cdot X_c = \left(\frac{V_i - GND}{R + X_c}\right) \cdot X_c = \left(\frac{V_i - 0}{R + \frac{1}{Cs}}\right) \cdot \frac{1}{Cs} = \frac{\frac{V_i}{Cs}}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{\frac{V_i}{Cs}}{\frac{RCs + 1}{Cs}} = \frac{V_i}{RCs + 1}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = Fdt = \frac{1}{RCs + 1}$$

Selección de componentes:

Partiendo de la función de transferencia y con las formas canónicas de un LPF de 1er orden con un polo real.

$$\frac{V_o}{V_i} = Fdt = \frac{1}{RCs + 1} = \frac{1}{\tau s + 1} = \frac{1}{\frac{j\omega}{\omega_0} + 1}$$

$$\tau = RC = \frac{1}{\omega_0}$$

A partir de una frecuencia de corte elegida de 15kHz y las ecuaciones anteriores, obtenemos las siguientes relaciones.

$$f_{cs} = 15kHz \rightarrow \omega_0 = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 5k = 10\pi \cdot 10^3 = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{RC}$$

Escogiendo un valor de condensador arbitrario C=47nF y sustituyendo en la ecuación anterior:

$$R = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \frac{1}{30\pi \cdot 10^3 \cdot 0,047 \cdot 10^{-6}} = 225 \text{ Ohm}$$

Obtenemos una resistencia de R=250 Ohm comerciales.

La nueva frecuencia de corte con estos valores es de 13.5kHz

- Filtro Pasa Altas “High Pass Filter” (HPF)

Los filtros pasa altas, permiten el paso de las frecuencias altas e impiden el paso de las frecuencias bajas inferiores a la frecuencia de corte inferior.

Se Dice que un sistema pasa bajas está acoplado en AC porque impide el paso de la continua.

Partiendo del diseño electrónico de un HPF pasivo podemos obtener el siguiente filtro RC

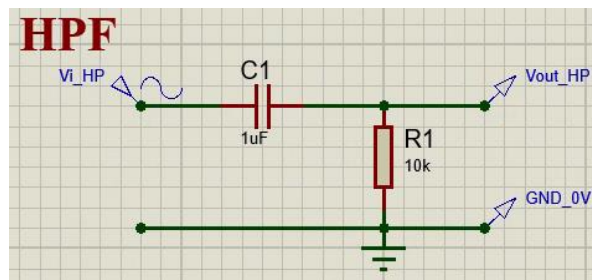
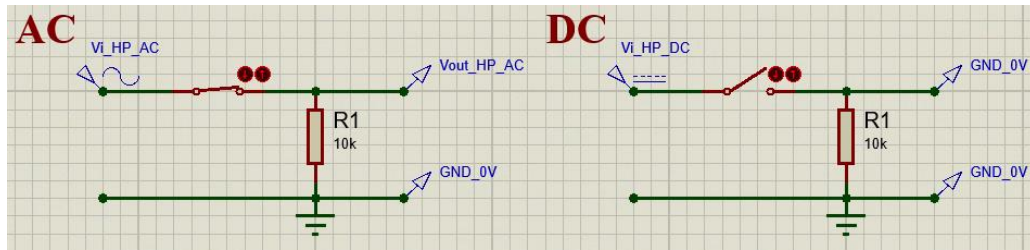


Figura Filtro Pasa Altas RC Pasivo



Comportamiento del condensador frente frecuencias bajas y altas.

La función de transferencia de este circuito se puede obtener de forma sencilla con la ley de ohm aplicada para un divisor resistivo.

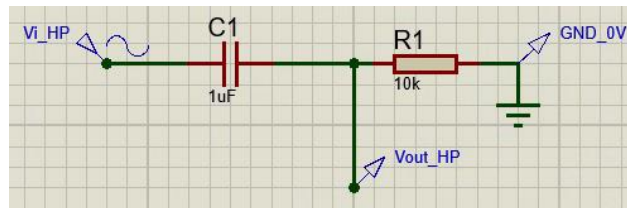


Figura Despliegue divisor resistivo Filtro RC Pasa Altas

Análisis del HPF pasivo. FDT

$$V_o = (I) \cdot (R) =$$

$$V_o = \left(\frac{\Delta V}{Z}\right) \cdot R = \left(\frac{V_i - GND}{R + X_c}\right) \cdot R = \left(\frac{V_i - 0}{R + \frac{1}{Cs}}\right) \cdot R = \frac{V_i \cdot R}{R + \frac{1}{Cs}} = \frac{V_i \cdot R}{\frac{RCs + 1}{Cs}} = \frac{V_i \cdot RCs}{RCs + 1}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = Fdt = \frac{RCs}{RCs + 1}$$

Selección de componentes

Partiendo de la función de transferencia y con las formas canónicas de un HPF de 1er orden con un polo real y un derivador:

$$\frac{V_o}{V_i} = Fdt = \frac{RCs}{RCs + 1} = \frac{\tau s}{\tau s + 1} = \frac{\frac{j\omega}{\omega_0}}{\frac{j\omega}{\omega_0} + 1}$$

$$\tau = RC = \frac{1}{\omega_0}$$

A partir de una frecuencia de corte elegida de 15Hz, obtenemos la siguiente ecuación.

$$f_{ci} = 15Hz \rightarrow \omega_{ci} = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 15 = 30\pi = \frac{1}{RC}$$

Escogiendo un valor de condensador arbitrario C=1uF

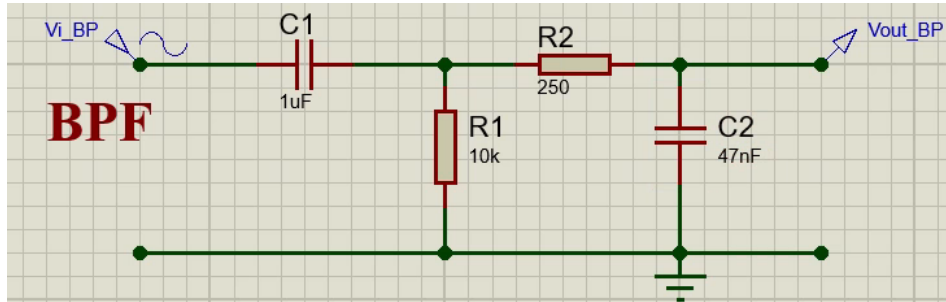
$$R = \frac{1}{\omega_0 \cdot C} = \frac{1}{30\pi \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 10610 \text{ Ohm}$$

obtenemos una resistencia de R=10k Ohm comerciales. Este valor permite la circulación de corriente por el circuito y una apreciable caída de tensión en los bornes del componente.

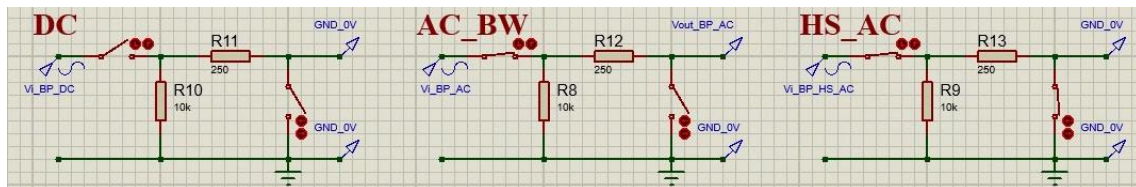
- Filtro Pasa Bandas “Band Pass Filter” BPF

Este es el filtro que vamos a incorporar a la salida del sensor optoelectrónico. Es Necesario eliminar el ruido no deseado de la señal proveniente del sensor además de quitar la componente de continua acoplando el sistema en AC, por lo que haremos uso de un filtro pasa banda de 15Hz a 13,5kHz para este propósito.

La idea principal es utilizar un filtro pasa banda pasivo porque en el sensor no necesitamos amplificación y así nos ahorramos componentes, dinero y alimentación de filtro activo.



Filtro pasa-banda pasivo (15Hz-13.5kHz)



Comportamiento del condensador en DC, En el ancho de banda y altas frecuencias.

La función de transferencia de este circuito se puede obtener de forma sencilla con dos filtros FPA y FPB en cascada:

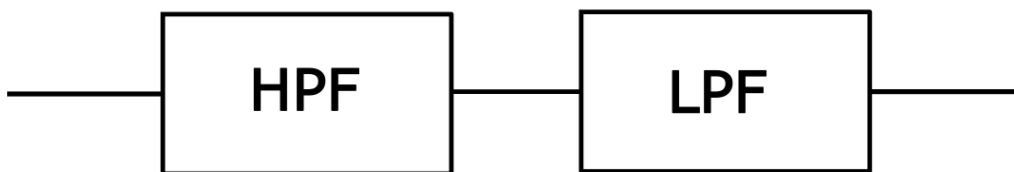


Figura bloque HPF en cascada con LPF

Análisis del BPF pasivo.

$$\frac{V_o}{V_i} = FPA \cdot FPB = \frac{R_1 C_1 s}{R_1 C_1 s + 1} \cdot \frac{1}{R_2 C_2 s + 1}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = Fdt = \frac{R_1 C_1 s}{(R_1 C_1 s + 1) \cdot (R_2 C_2 s + 1)}$$

Selección de componentes

Partiendo de la función de transferencia y con las formas canónicas de un BPF de 2° orden con dos polos reales y un derivador:

$$\frac{V_o}{V_i} = Fdt = \frac{R_1 C_1 s}{(R_1 C_1 s + 1) \cdot (R_2 C_2 s + 1)} = \frac{\tau_1 s}{(\tau_1 s + 1) \cdot (\tau_2 s + 1)} = \frac{\frac{j\omega}{\omega_{01}}}{\left(\frac{j\omega}{\omega_{01}} + 1\right) \cdot \left(\frac{j\omega}{\omega_{02}} + 1\right)}$$

$$\tau_{01} = RC = \frac{1}{\omega_{01}} \qquad \tau_{01} = RC = \frac{1}{\omega_{01}}$$

$$f_{ci} = 15\text{Hz} \rightarrow \omega_{ci} = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 15 = 30\pi = \frac{1}{\tau_1} = \frac{1}{R_1 C_1}$$

$$f_{cs} = 15\text{kHz} \rightarrow \omega_{cs} = 2\pi \cdot f = 2\pi \cdot 5k = 10\pi \cdot 10^3 = \frac{1}{\tau_2} = \frac{1}{R_2 C_2}$$

- Para ω_{ci} :

Escogiendo un valor de condensador arbitrario $C_1=1\mu\text{F}$ y sustituyendo en 10.3.8.

$$R_1 = \frac{1}{\omega_{01} \cdot C_1} = \frac{1}{30\pi \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 10610 \text{ Ohm}$$

obtenemos una resistencia de $R_1=10\text{k Ohm}$ comerciales.

- Para ω_{cs} :

Escogiendo un valor de condensador arbitrario $C_2=47\text{nF}$

$$R_2 = \frac{1}{\omega_{02} \cdot C_2} = \frac{1}{30k\pi \cdot 0,047 \cdot 10^{-6}} = 225.75 \text{ Ohm}$$

obtenemos una resistencia de $R_2=250 \text{ Ohm}$ comerciales.

Con estos valores, el ancho de banda del filtro es de (15.9Hz-13.5kHz)

Sustituyendo los valores de R1, R2, C1, C2 queda la siguiente FDT.

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_i} = Fdt &= \frac{R_1 C_1 s}{(R_1 C_1 s + 1) \cdot (R_2 C_2 s + 1)} = \\ &= \frac{10k \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot s}{(10k \cdot 1 \cdot 10^{-6} \cdot s + 1) \cdot (250 \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot s + 1)} = \\ &= \frac{0.01 \cdot s}{(0.01 \cdot s + 1) \cdot (11.75 \cdot 10^{-6} \cdot s + 1)} \end{aligned}$$

Respuesta en frecuencia del sistema: Diagrama de Bode:

Simulación del filtro en MatLab:

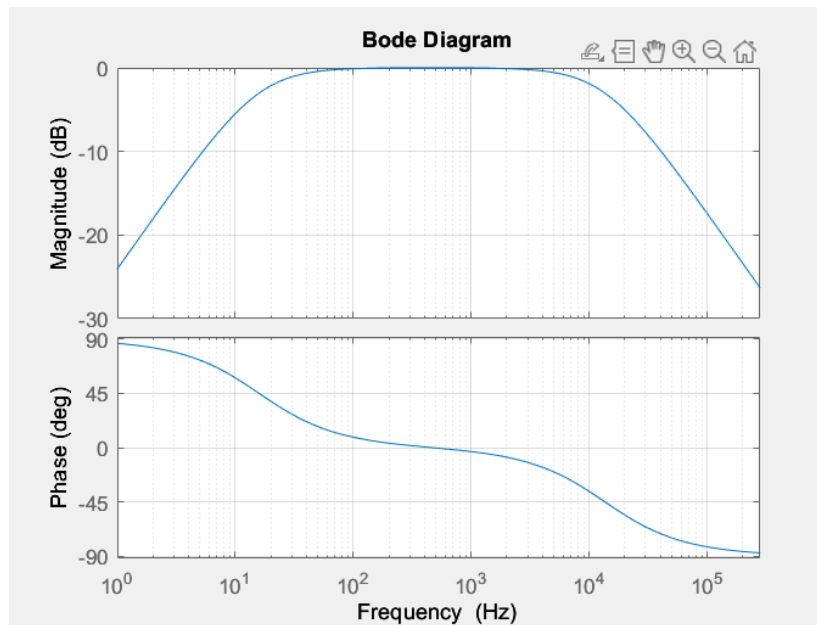


Figura diagrama de bode en MatLab

Simulando en Proteus el filtro calculado:

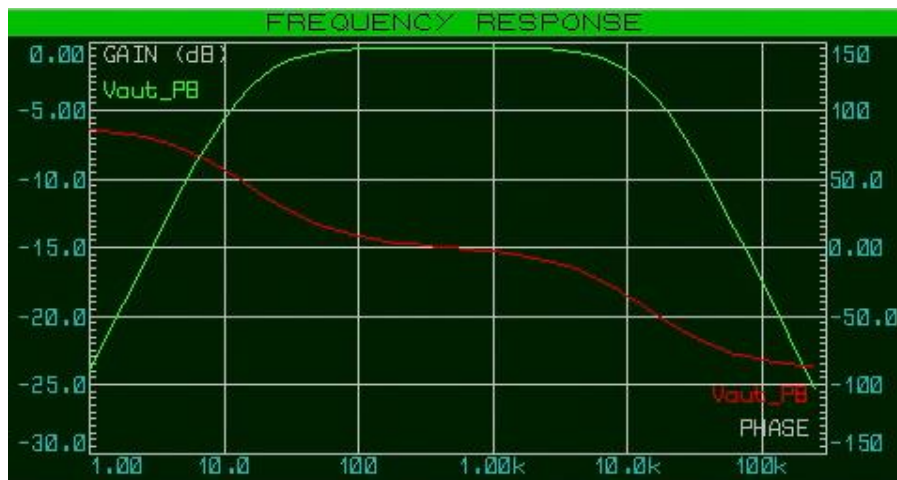


Figura diagrama de bode simulado en Proteus

Interpretación de la FDT y del diagrama de Bode.

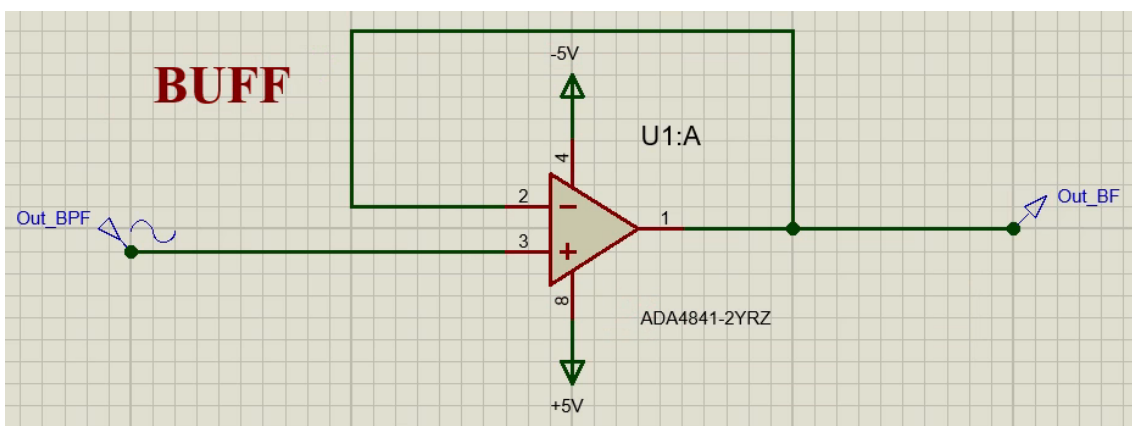
Del filtro pasa banda podemos concluir que al tratarse de un filtro pasa altas en cascada con un filtro pasa bajas, la función de transferencia total es la multiplicación de ambas FDT.

El primer condensador C1 del HPF no permite el paso de la componente DC y el segundo condensador C2 al tener una respuesta rápida, consigue seguir las altas frecuencias y al estar en paralelo conectado a GND, a la salida no aparecen estas frecuencias, actúa como cortocircuito. En definitiva, los diagramas de bode y colocación de polos y ceros se corresponden con el comportamiento esperado y deseado.

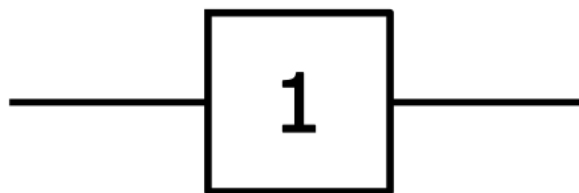
7.5. Buffer

En este bloque funcional vamos a utilizar amplificadores operacionales AO OpAmps. La configuración de seguidor de un OpAmp cumple la función de aislar circuitos y así desadaptar impedancias. Las características del AO son las responsables de esta consecuencia y al implementar esta configuración, obtenemos a la salida del AO la señal de entrada, pero aislada. Esto es causa de la gran impedancia de entrada y la baja impedancia de salida del integrado. Es necesario el uso de buffers cuando requerimos aislar etapas, como lo es en este caso.

Debido a tener seis sensores que proporcionan seis señales analógicas distintas, que después pasan cada una por un BPF y luego hay que sumarlas sin modificar las funciones de transferencia de los BPF, hay que poner un buffer a la salida de cada filtro y después de aislar los circuitos, sumar las señales con un sumador.



Configuración OpAmp BUFFER



Bloque BUFFER

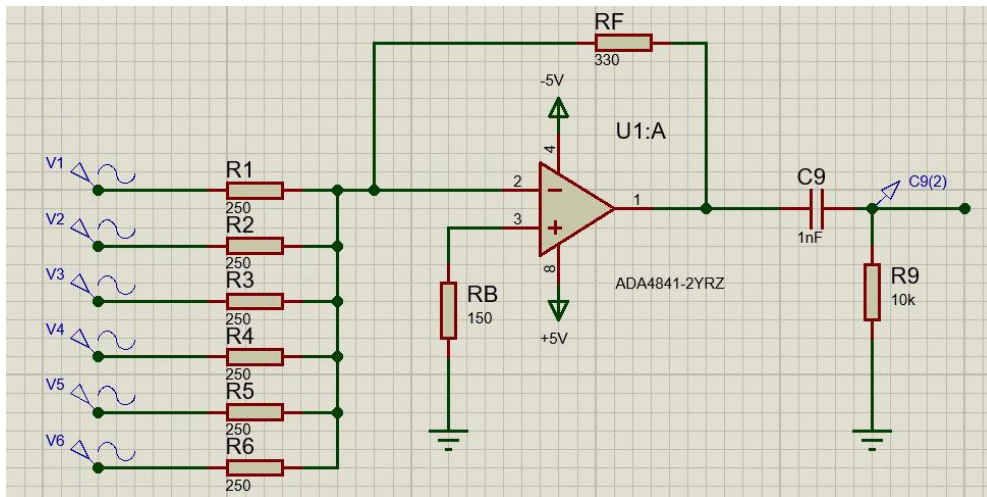
Análisis del Buffer

$$V^+ = V^-$$
$$V_o = V_i$$

7.6. Sumador y filtro pasa altas HPF.

En este apartado vamos a realizar un bloque sumador inversor de tensiones.

Es importante en este bloque tener en cuenta las corrientes de bias y poner una resistencia para derivarlas a tierra desde el terminal positivo del integrado, ya que nuestro opamp ADA4841 tiene muy buena respuesta al ruido, pero como contrapartida no tiene las corrientes de bias excesivamente bajas. En este sistema sí podemos derivarlas a tierra, cosa que en el buffer no podíamos por la naturaleza de su configuración. El offset final producido por todos los opamps (que es añadido por los buffers y por el sumador es de unos -400mV) se quitará con un condensador en serie y una resistencia en paralelo formando un filtro pasa altas a 15Hz de frecuencia de corte.



Configuración OpAmp SUMADOR

Análisis del BPF pasivo.

$$V_o = R \cdot I = -RF \cdot (I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6) = -RF \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} + \frac{V_5}{R_5} + \frac{V_6}{R_6} \right)$$

Como:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = R_S$$

$$V_o = -RF \left(\frac{V_1}{R_S} + \frac{V_2}{R_S} + \frac{V_3}{R_S} + \frac{V_4}{R_S} + \frac{V_5}{R_S} + \frac{V_6}{R_S} \right) = \frac{-RF}{R_S} (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6)$$

Poniendo unas resistencias de $RF=330$ y $RS=250$ tenemos una ganancia de:

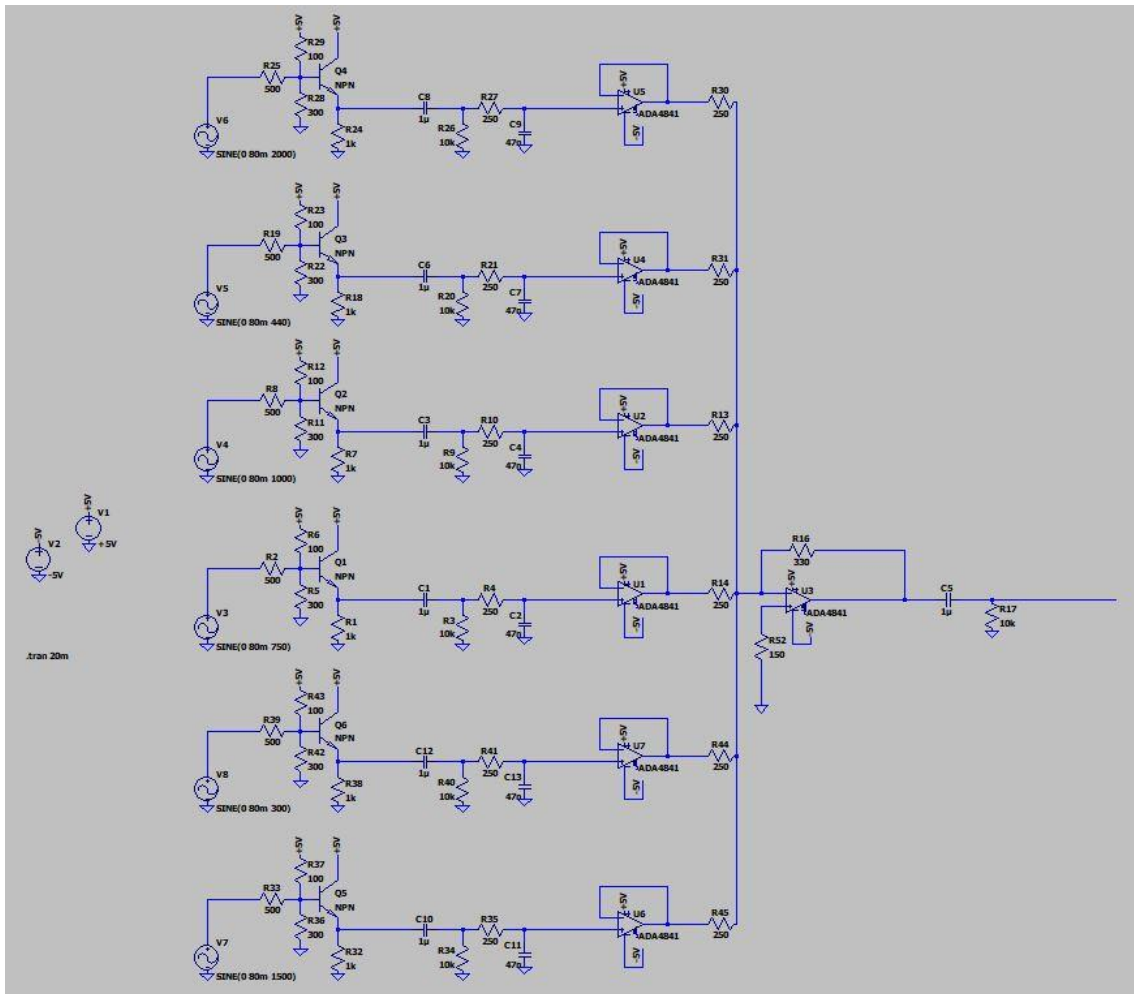
$$G = \frac{330}{250} = 1.32 \frac{V}{V}$$

Para la I bias escogemos una resistencia comercial de 150 Ohm:

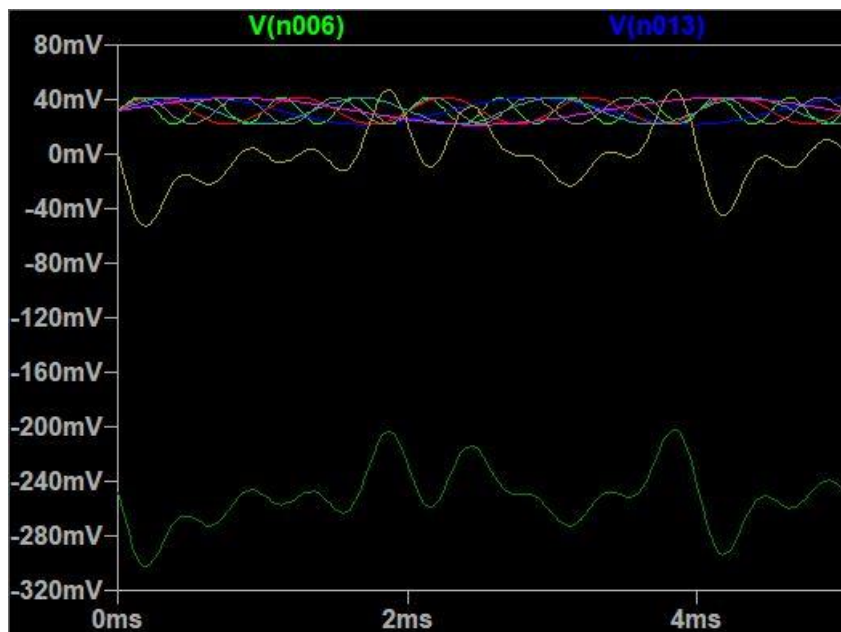
$$I_b = R^- - R^+ \rightarrow I_b = 0 \rightarrow R^- = R^+$$

$$R^- = RF \parallel RS \rightarrow \left(\frac{1}{RF} + \frac{1}{RS} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{330} + \frac{1}{150} \right)^{-1} = 142.24 \Omega$$

8. Simulación en LTSpice



Esquemático del sensor en LTSpice



Simulación del modelo en LTSpice

9. Diseño de PCBs mediante ECAD Altium Designer y fabricación en JLCPCB.

Una vez calculados todos los componentes y sistemas que vamos a incorporar en nuestro producto, pasamos al diseño e implementación en físico.

Para ello, vamos a utilizar el software Altium Designer de diseño de placas de circuitos impresos. Este software ECAD (*Electronic Computer Aided Design*) facilita las tareas necesarias en el diseño de circuitos, en la preparación de documentos y dibujos para la clara comprensión y fabricación de PCBs... En este proyecto, hemos utilizado la formación gratuita y licencia de seis meses para estudiantes de Altium Education.

Una PCB puede ser muy sencilla, incorporando unos pocos componentes o puede ser muy compleja incorporando miles de componentes e interconexiones. Las PCB suponen la base de toda la electrónica moderna y sin estas, no podríamos tener ordenadores, televisores, automóviles modernos, *smart phones*, satélites, aeronaves... Las placas de circuito impreso proporcionan mucho más que un lugar para colocar componentes electrónicos, proporcionan una manera de crear conexiones muy robustas en entornos de bajo ruido. Un buen diseño, siguiendo unas ciertas reglas, permite la incorporación de circuitos analógicos, digitales, de alta frecuencia y de potencia. Además, es necesario diseñar conociendo las capacidades que ofrece el fabricante de PCBs.

Los tipos de documentos necesarios para el diseño y fabricación de la PCB son:

-Esquemáticos: Todos los diseños empiezan con las hojas de esquemáticos. Estos archivos son dibujos que muestran qué componentes son usados en el diseño, las *nets* utilizadas para realizar conexiones eléctricas entre componentes, conexiones a las *power nets* y *ground nets*, *net names* y notas aclaratorias imprescindibles para entender cómo funciona el diseño.

En un diseño puede haber varios esquemáticos, y estos, muestran toda la información eléctrica del producto.

Los tipos de esquemáticos más comunes son los jerárquicos y los planos. Los esquemáticos jerárquicos son aquellos que tienen más de un esquemático, donde hay uno principal y otros sub-esquemáticos. Este tipo de organización se utiliza mucho en sistemas extensos, que no caben en un solo esquemático, y permiten una rápida visualización, comprensión y organización entre ellos. Los esquemáticos planos son los que no contienen sub-esquemáticos en su interior.

-Layout: El archivo de PCB *layout* contiene la localización física de los componentes y líneas de señales y potencia que se quieren en la PCB física. También contiene la información del *stackup*, que es el número de capas de cobre de la PCB, la distancia entre ellas, los materiales de los dieléctricos y el *prepreg*. La distancia entre capas y las reglas del diseño: ancho de líneas (50 ohm de impedancia), *clearance* y *creepage*, son importantes para la integridad de la señal.

Para realizar un correcto *layout*, se definen las reglas de ruteado en las opciones del ECAD y su valor depende del *stackup* utilizado.

-Librerías de PCB, PCB libraries: Las librerías se encargan de almacenar todos los datos correspondientes a los componentes utilizados en el diseño y mantienen la información sincronizada en los esquemas, el *layout* y el BOM. Los datos que almacena son el MPN (*Manufacture Part Number*), la descripción del componente, el símbolo para los esquemáticos, el *footprint* y modelo 3D.

Para la fabricación de la PCB y ensamblaje de los componentes SMT (*Surface Mount Technology*) necesitaremos aportar los siguientes archivos a la empresa encargada de esta tarea: JLCPCB.

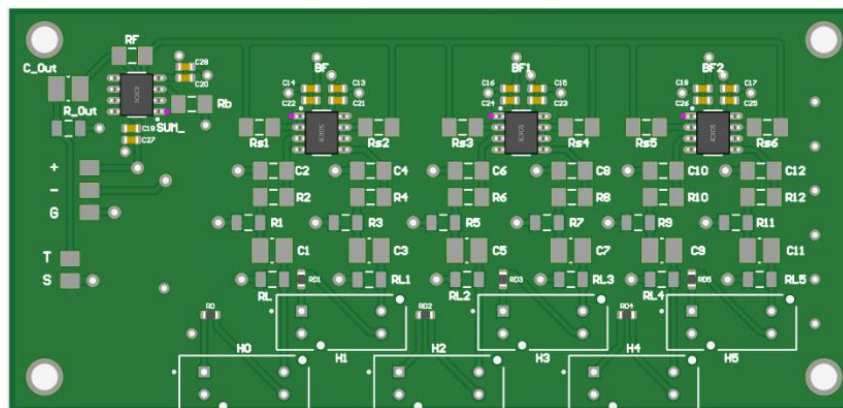
-Gerbers: Son los archivos que proporcionan la información necesaria del *layout* para que el fabricante pueda realizar la fabricación la PCB. Los archivos *gerber* mínimos necesarios son: *layer copper* (informa de cómo deben ser las capas de cobre), *solder mask* (es la máscara antisoldante que hay que colocar por encima de la capa de cobre superior e inferior para solo dejar expuesto el cobre necesario para soldar), *overlay* (es la capa de serigrafía que permite dibujar información relevante en la PCB).

-Archivos de taladro NC: Contienen las coordenadas y diámetro de los taladros a realizar en la PCB.

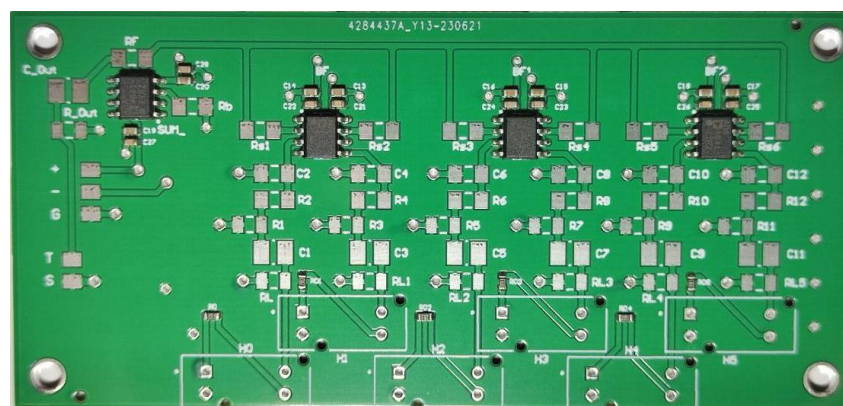
-Lista de materiales, *Bill Of Materials (BOM):* Este es un archivo que contiene una lista de los componentes utilizados en el diseño y se utiliza para hacer la compra de los mismos en la empresa encargada de la fabricación y ensamblaje de PCBs. Esta lista la hace automáticamente el ECAD basándose en el *layout* y los esquemáticos.

Pick and place: El archivo del *pick and place* contiene las coordenadas y orientaciones de cada componente individual para que la empresa encargada del ensamblaje SMT pueda cargar este archivo y la máquina coloque cada componente en su lugar correspondiente.

Cabe mencionar que, en este proyecto, se va a encargar el ensamblaje SMT de tan solo unos componentes en específico, a la empresa externa. En concreto los opamps ADA4841 y las resistencias y condensadores cerámicos SMD 0603. Los demás componentes los soldaremos a mano con pinzas y soldador porque la empresa JLCPCB no dispone de estos componentes en *stock* y los compramos por otra parte a Mouser.



Previsualización del montaje de JLCPCB



PCB del sensor con ensamblaje SMT de JLCPCB

10. Objetivos Desarrollo Sostenible

“En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible, una oportunidad para que los países y sus sociedades emprendan un nuevo camino con el que mejorar la vida de todos, sin dejar a nadie atrás. La Agenda cuenta con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, que incluyen desde la eliminación de la pobreza hasta el combate al cambio climático, la educación, la igualdad de la mujer, la defensa del medio ambiente o el diseño de nuestras ciudades.”

Los 17 objetivos pueden verse de manera clara en la siguiente imagen:



Objetivos de desarrollo sostenible

Queremos que nuestro proyecto se considere participe del objetivo 4: educación de calidad y del 9: industria, innovación e infraestructuras.

Objetivo 4: la educación es un derecho humano imprescindible para la formación de niños y niñas en todo el mundo. Es la base para alcanzar un pensamiento crítico, crecer como sociedad, poder optar a trabajos que requieran de formación académica, salir de la pobreza... Consideramos que nuestro proyecto hace una pequeña aportación a este objetivo por el hecho de documentar conocimientos y al exponerlo públicamente puede ser accesible a todo el mundo. Así como también se muestra el agradecimiento del autor por haber tenido la oportunidad de acceso a una educación de calidad que le permite crecer día a día en su trabajo y vida personal.

Objetivo 9: la industria y la innovación son sectores clave para el crecimiento económico y facilitan la vida de las personas desde la primera revolución industrial. Las comunicaciones, la red eléctrica, el transporte... son muestra de ello. Estos últimos años se habla de la cuarta revolución industrial que viene dada por el internet, las comunicaciones, la electrónica... A pesar de que llevamos muchos años con internet, comunicaciones y electrónica, estas tecnologías nunca dejan de sorprendernos, superándose y alcanzando mayores números de datos, frecuencias, implementaciones... Por eso, nuestro modesto proyecto hace honor a estas disciplinas tan importantes e incorpora elementos de electrónica analógica y óptica para una aplicación novedosa. Así pues, esperamos estar a la altura del objetivo 9, industria, innovación e infraestructura.

11. Bibliografía

Equipos de sonido Casetes, CD audio y amplificadores

Francisco Ruiz Vassallo

Introducción al diseño y análisis de sistemas analógicos

Beatriz Trénor Gomis

Arturo Gil Gil

Fundamentos de electrónica

Castells Ramón, Francisco

Esteve Bosch, Raúl

Moratal Pérez, David

Fundamentos de la teoría de filtros

Santiago Cogollos Borrás

Control automático tiempo continuo y tiempo discreto

Julián J. Salt Llobregat

Ángel Cuenca Lacruz

Vicente Casanova Calvo

Antonio Correcher Salvador

Apuntes de clase

Altium Education

Altium Resources



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Planos:

**Implementación de photo-acoplador como
transductor de frecuencia de ondas estacionarias
para amplificación de instrumentos de cuerda.**

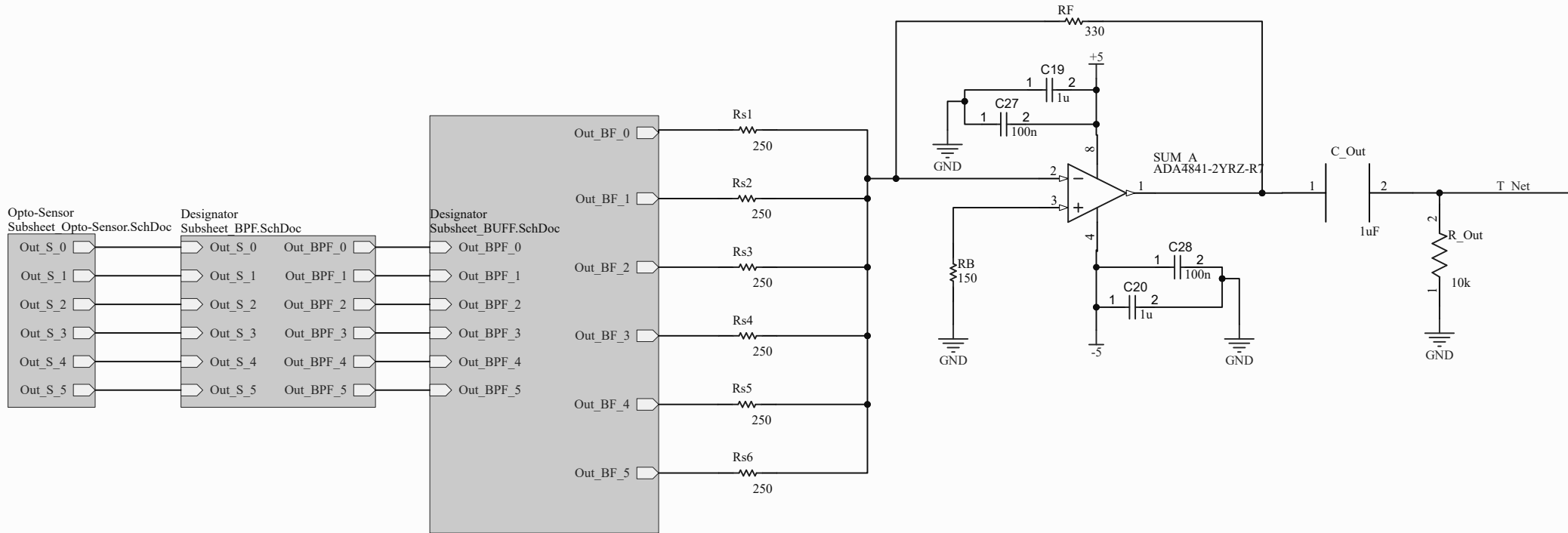
Trabajo fin de grado:

Ingeniería Electrónica, Industrial y Automática

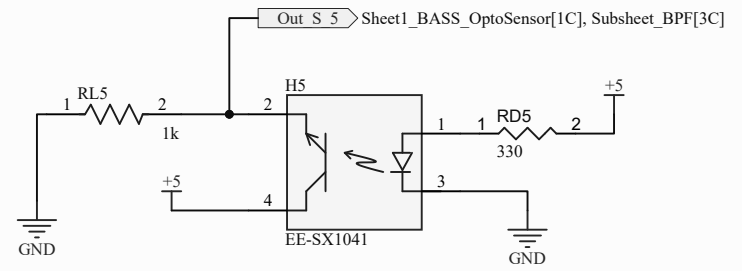
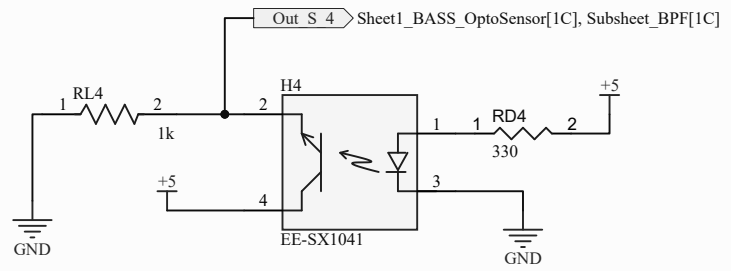
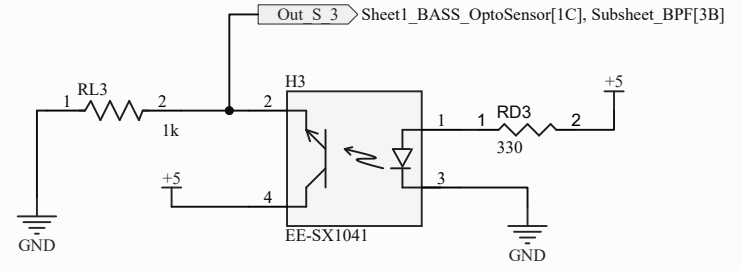
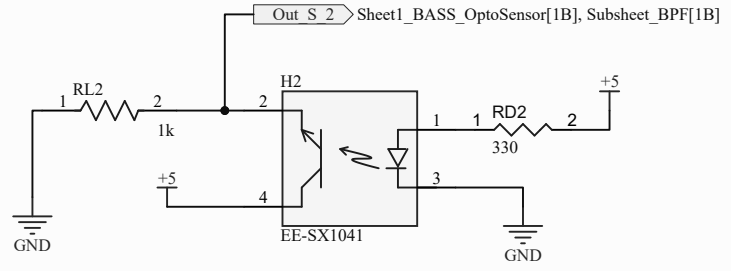
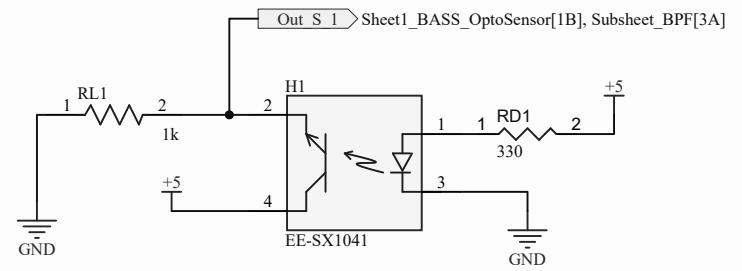
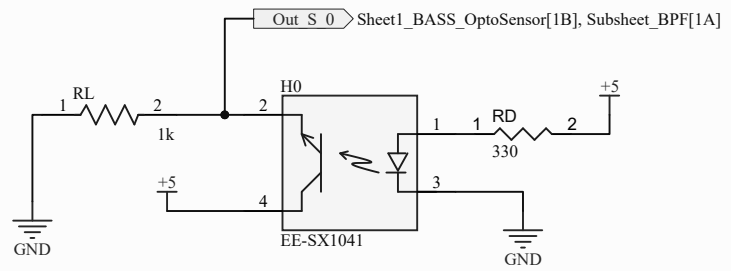
2022



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

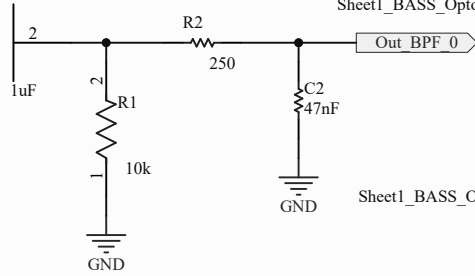
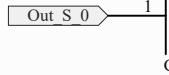


Title			TFG_Guitar_OptoSensor_PCB		
Size	Number	Revision			
A4	1	A			
Date:	6/27/2023	Sheet of			
File:	C:\Users\...\Sheet1_BASS_OptoSensor.SchDoc	Drawn By:		Javier A Marti	



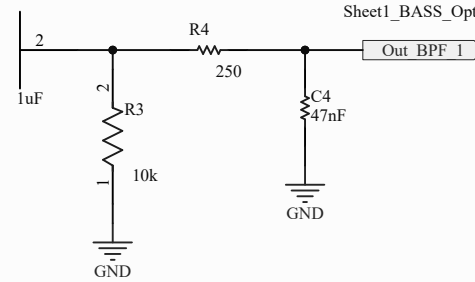
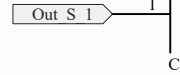
Title			TFG_Guitar_OptoSensor_PCB		
Size	Number	Revision			
A4	2	A			
Date:	6/27/2023	Sheet of			
File:	C:\Users\...\Subsheet_Opto-Sensor.SchDoc	Drawn By:		Javier A Marti	

Sheet1_BASS_OptoSensor[1B], Subsheet_Opto-Sensor[2A]



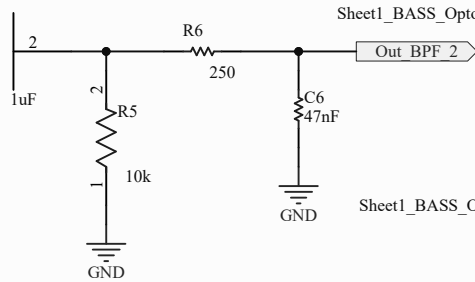
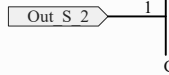
Sheet1_BASS_OptoSensor[2B], Subsheet_BUFF[1A]

Sheet1_BASS_OptoSensor[1B], Subsheet_Opto-Sensor[3A]



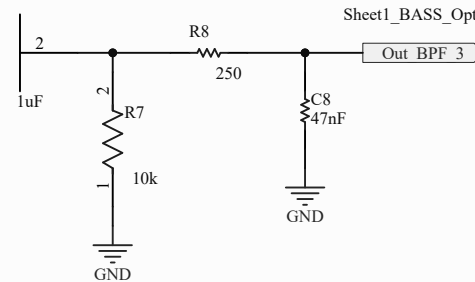
Sheet1_BASS_OptoSensor[2B], Subsheet_BUFF[3B]

Sheet1_BASS_OptoSensor[1B], Subsheet_Opto-Sensor[2B]



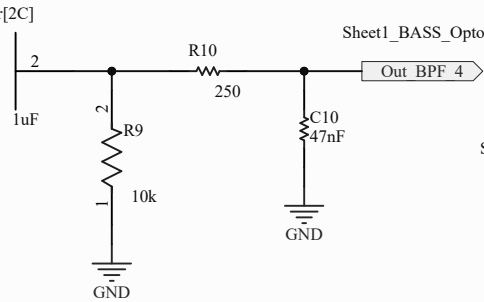
Sheet1_BASS_OptoSensor[2B], Subsheet_BUFF[1B]

Sheet1_BASS_OptoSensor[1C], Subsheet_Opto-Sensor[3B]



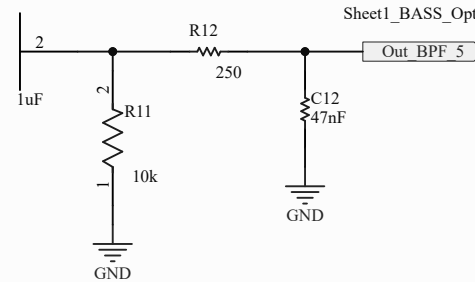
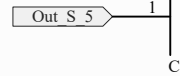
Sheet1_BASS_OptoSensor[2C], Subsheet_BUFF[3C]

Sheet1_BASS_OptoSensor[1C], Subsheet_Opto-Sensor[2C]



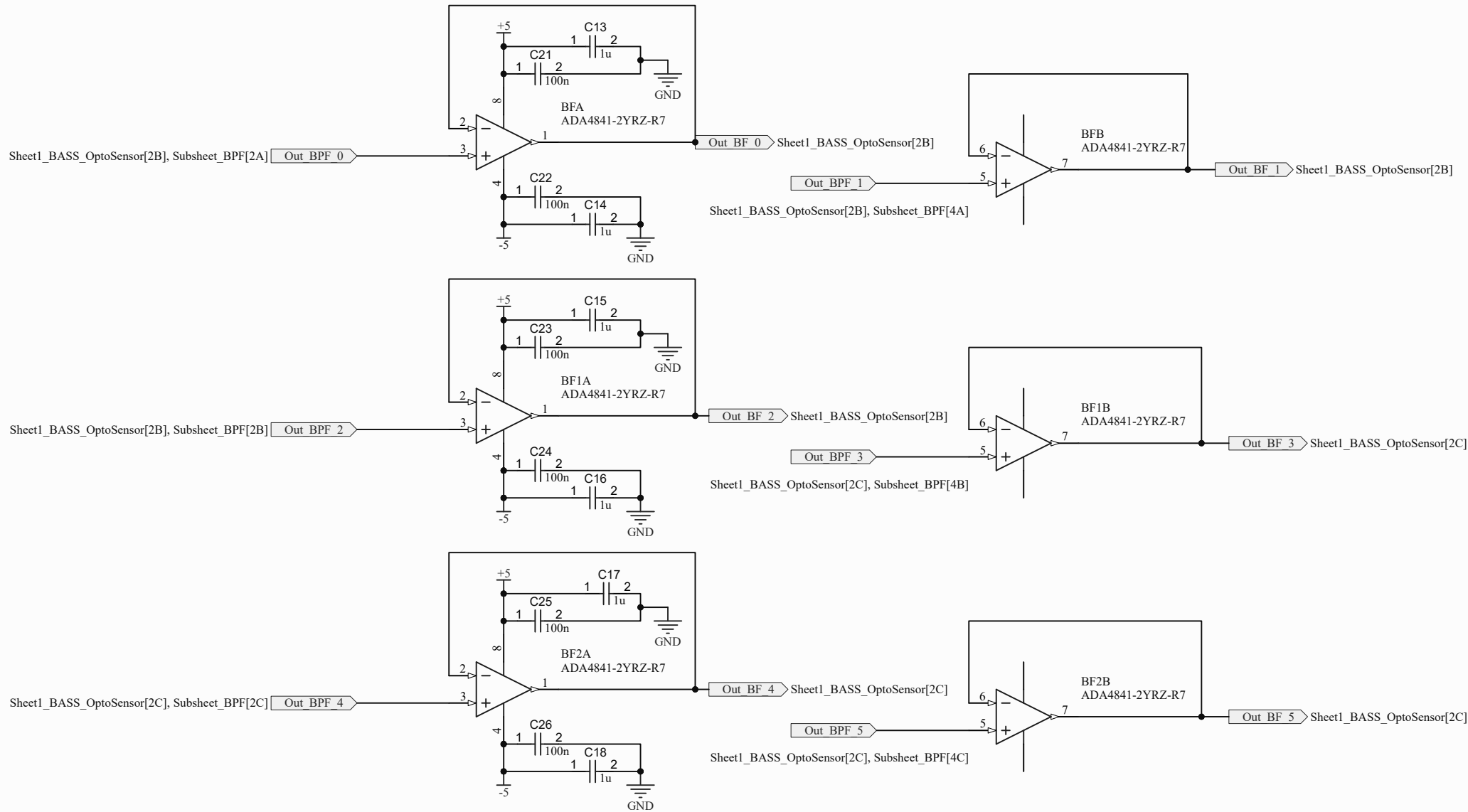
Sheet1_BASS_OptoSensor[2C], Subsheet_BUFF[1D]

Sheet1_BASS_OptoSensor[1C], Subsheet_Opto-Sensor[3C]



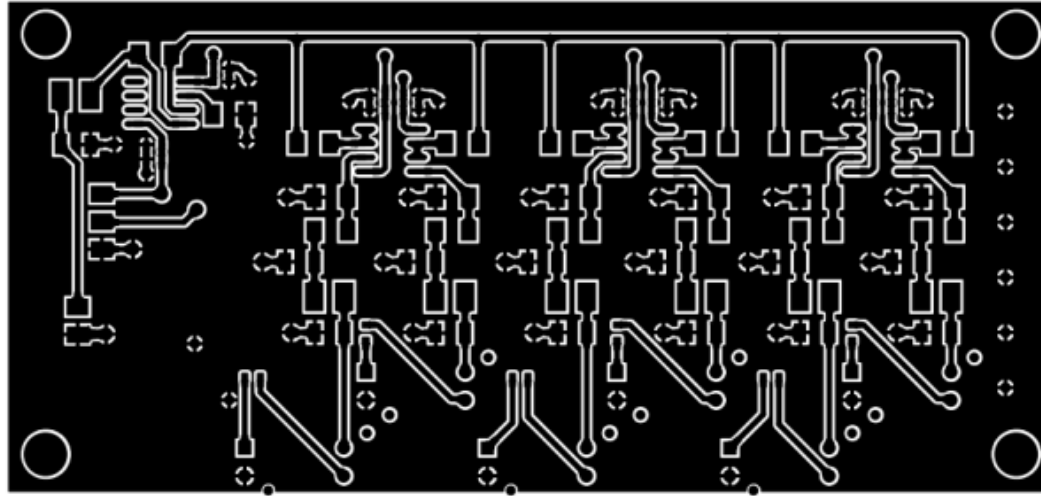
Sheet1_BASS_OptoSensor[2C], Subsheet_BUFF[3D]

Title			TFG_Guitar_OptoSensor_PCB		
Size	Number	Revision			
A4	3	A			
Date:	6/27/2023		Sheet of		
File:	C:\Users\...\Subsheet BPF.SchDoc		Drawn By: Javier A Marti		

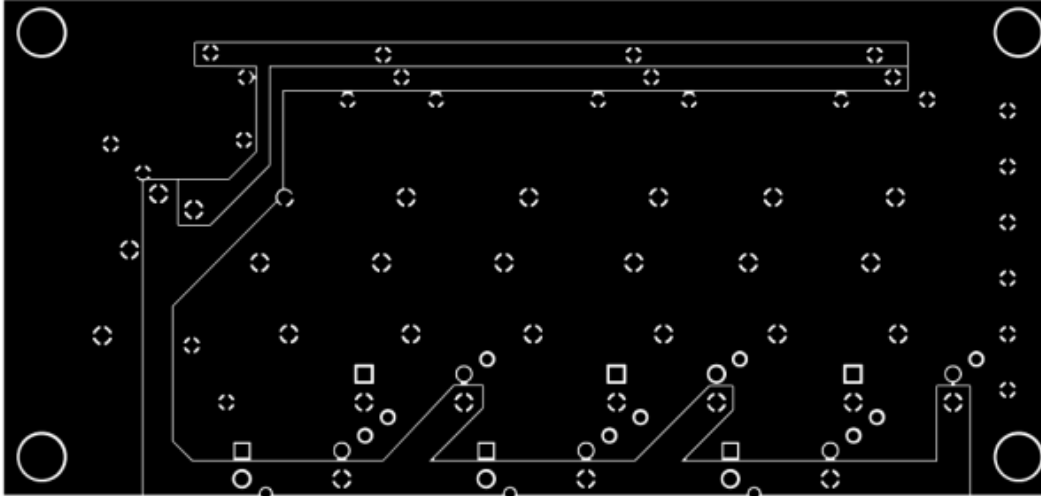


Title			TFG_Guitar_OptoSensor_PCB		
Size	Number	Revision			
A4	4	A			
Date:	6/27/2023	Sheet of			
File:	C:\Users\...\Subsheet_BUFF.SchDoc	Drawn By:		Javier A Marti	

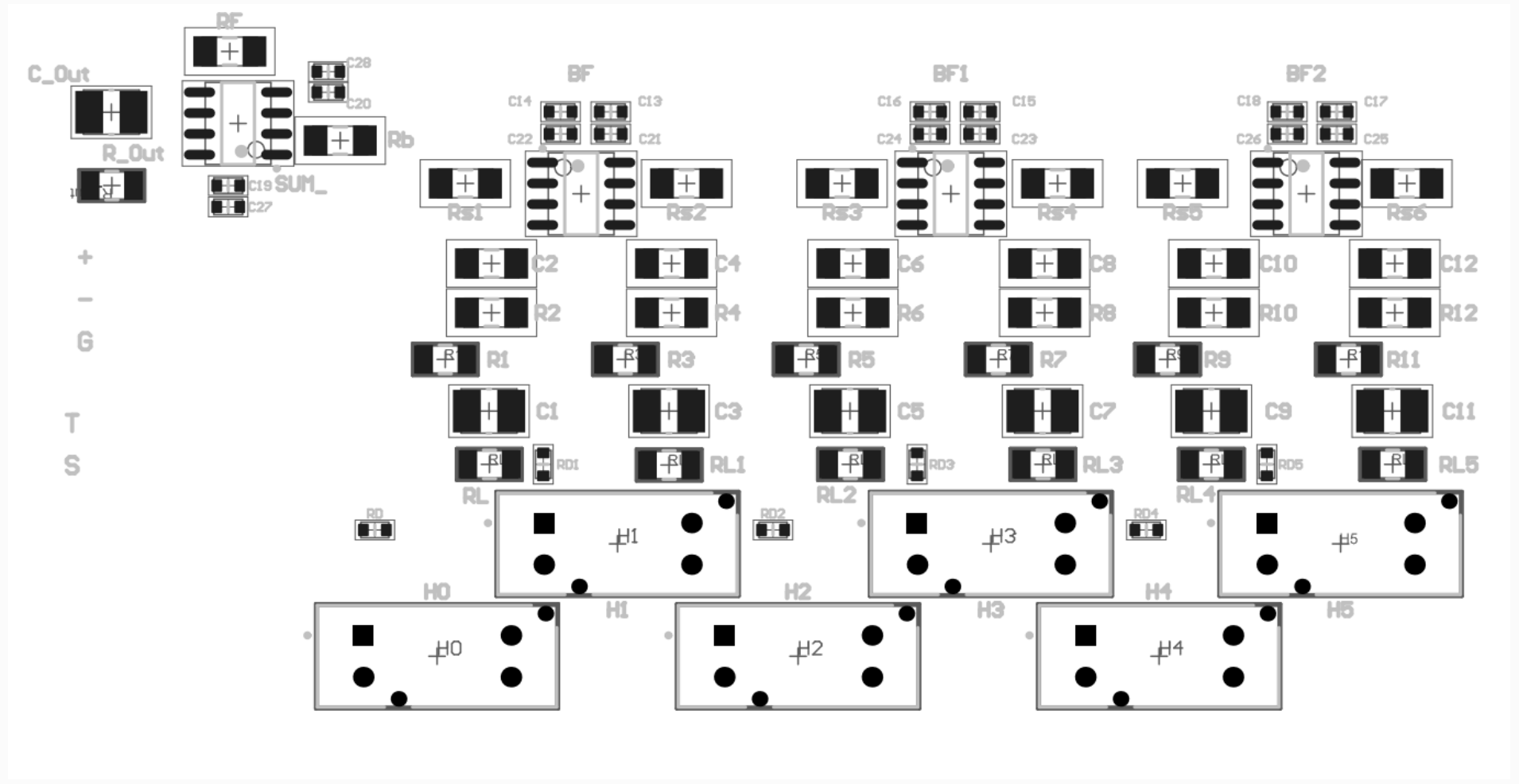
Top Layer Cooper



Bottom Layer Cooper



Title		
Gerbers_Guitar_Sensor_PCB		
Size	Number	Revision
A4	5	
Date:	7/02/2023	Sheet of
File:		Drawn By: Javier A Marti



Title		
Assembly_Drawings_Guitar_Sensor_PCB		
Size	Number	Revision
A4	6	
Date:	7/02/2023	Sheet of
File:		Drawn By: Javier A Martí

BOM_Guitar_PCB				
Comment	Designator	Footprint	MPN	JLPCB Part
390	RD, RD1, RD2, RD3, RD4, RD5	R0603		basic
1uF	C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20	C0603		basic
100nF	C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28	C0603		basic
OpAmp	SUM_, BF, BF1, BF2	SOIC-8	ADA4841-2YRZ-R7	C495330
10k	R1, R3, R5, R7, R9, R11, R_Out	R1206	MCA12060D1002BP100	
1k	RL, RL1, RL2, RL3, RL4, RL5	R1206	MCA1206MD1001BP100	
249	R2, R4, R6, R8, R10, R12, RS1, RS2, RS3, RS4, RS5, RS6	R1206	TNPW1206249RBEEN	
150	RB	R1206	TNPW1206150RBEEN	
330	RF	R1206	TNPW1206330RBEEA	
1uF	C1, C3, C5, C7, C9, C11, C_Out	C1210	ECP-U1C105MA5	
47nF	C2, C4, C6, C8, C10, C12	C1206	ECH-U1C473GX5	
Jack 6.3mm	J1		NMJ4HFD2	
Sensor	H, H1, H2, H3, H4, H5		EE-SX1041	

Title			BOM_PCB_Guitar_Sensor		
Size	Number	Revision			
A4	7				
Date:	7/02/2023	Sheet of			
File:		Drawn By:		Javier A Martí	

Pick and Place				
Designator	Mid X	Mid Y	Layer	Rotation
C28	19.9000mm	38.9500mm	Top	0
C27	13.8000mm	30.7000mm	Top	0
C26	78.3357mm	35.1500mm	Top	0
C25	81.3500mm	35.1500mm	Top	0
C24	56.5658mm	35.1500mm	Top	0
C23	59.6138mm	35.1500mm	Top	0
C22	34.050mm	35.1500mm	Top	0
C21	37.1094mm	35.1500mm	Top	0
RD	22.7330mm	11.0000mm	Top	0
RD5	77.0890mm	15.0000mm	Top	90
RD4	69.7500mm	11.0000mm	Top	0
RD3	55.7784mm	15.0000mm	Top	90
RD2	47.0000mm	11.0000mm	Top	0
RD1	33.0000mm	15.0000mm	Top	90
C16	56.5660mm	36.5000mm	Top	0
C15	59.6140mm	36.5000mm	Top	0
C14	34.0500mm	36.5000mm	Top	0
C13	37.1090mm	36.5000mm	Top	0
C20	19.9000mm	37.6936mm	Top	0
C19	13.8000mm	32.0000mm	Top	0
C18	78.3360mm	36.5000mm	Top	0
C17	81.3500mm	36.5000mm	Top	0
BF	35.3060mm	31.5000mm	Top	270
BF2	79.5020mm	31.5000mm	Top	270
BF1	57.8358mm	31.5000mm	Top	270
SUM_	14.4018mm	35.7886mm	Top	90

Title			Pick_and_Place_PCB_Guitar_Sensor		
Size	Number	Revision			
A4	8				
Date:	7/02/2023	Sheet of			
File:		Drawn By: Javier A Martí			



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Pliego de condiciones:

**Implementación de photo-acoplador como
transductor de frecuencia de ondas estacionarias
para amplificación de instrumentos de cuerda.**

Trabajo fin de grado:

Ingeniería Electrónica, Industrial y Automática

2022



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

1. Objeto

El pliego de condiciones, junto con los planos, constituyen extensiones del contrato entre propiedad y contratista.

Responde a las preguntas: ¿qué?, ¿cómo?, ¿cuándo?, ¿cuánto?, y ¿qué ocurre si no se cumple?

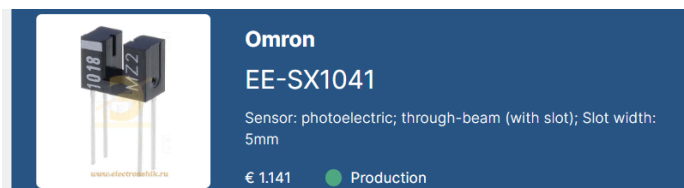
Con los planos adjuntados en el siguiente apartado contestamos al: ¿qué? y ¿cómo? de manera gráfica y con el pliego de condiciones al resto de cuestiones.

2. Condiciones de los materiales

-Descripción de los materiales

La búsqueda de componentes la haremos en octopart, y tiendas como Mouser, Farnell, Digi Key... prestando especial atención a la cadena de suministros: al stock, al estado de producción, al precio y la MOQ (mínimum order quantity). Además, puede interesarnos si hay modelos 3D, footprints y símbolos disponibles para descargar.

Sensor optoelectrónico EE-SX1041: El sensor escogido es el EE-SX1041 principalmente por sus dimensiones, al ajustarse al requerimiento de ser de tecnología optoelectrónica e implementación en una guitarra española. También han sido determinantes su rapidez (4us) de tiempo de subida y de bajada de flancos, lo cual lo convierte en uno de los photointerruptores más rápidos. Y, por último, es positivo que se encuentre un modelo 3D y footprint en altium lo que facilita el layout y ahorra tiempo de realizar la huella y el modelo o de buscarlo y descargarlo de internet en caso de existir.



EE-SX1041

Resistencias de film 1206: Se han escogido resistencias de film para los filtros y las resistencias del sumador porque estos componentes de film son mucho menos ruidosos que los cerámicos y como esta es una aplicación de bajo nivel en tensión, el ruido de los componentes es una característica crítica. Es importante que los componentes más cercanos al sensor sean de bajo ruido y cuidar mucho el layout utilizando la menor longitud de pistas hasta la amplificación.

Se han escogido dos series de la marca vishay para las resistencias de film y cabe mencionar que se escoge el tamaño 1206 debido a que son las menos ruidosas dentro de la serie según especifica el datasheet.



Las series mencionadas son: la TNPW y la MCA 1206.



Resistencias film1206 Low Noise

Condensadores de film 1210 y 1206: Por el mismo motivo de necesidad de componentes de bajo ruido, que teníamos con las resistencias de film, se hace uso de condensadores de film en los filtros.

Los dos modelos escogidos para los condensadores de 1uF y 47nF son: ECP-U1C105MA5 y ECH-U1C473GX5

	Mouser No: 667-ECP-U1C105MA5 Mfr. No: ECP-U1C105MA5 Mfr.: Panasonic	Film Capacitors 1uF 16VDC 20% 1210 Acrylic Resin
	Mouser No: 667-ECH-U1C473GX5 Mfr. No: ECH-U1C473GX5 Mfr.: Panasonic	Film Capacitors 0.047uF 16VDC 2% PPS FILM 1206

Condensadores film *Low Noise*

Resistencias de protección del diodo 0603: Estas resistencias se escogen de cerámica y de tamaño menor (0603) por no ser crítico el ruido y por limitación de espacio en la pcb. Como se van a montar en PCBA (PCB Assembly) por la empresa jlcpcb las incluimos en el BOM (Bill Of Materials) para que ellos escojan un modelo de su catálogo con las características 0603 390 Ohm.

Condensadores de desacoplo 0603: Igual que las resistencias del diodo, se añaden al BOM condensadores 0603 de 100nF y de 1uF para la entrada de alimentaciones a los opamps.

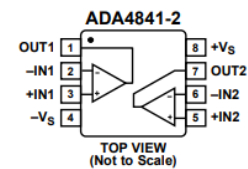
Opamp 2 Channel Low Noise SOIC8: Se escoge el amplificador operacional ADA4841-2 por su característica de bajo ruido ($7nV/\sqrt{Hz}@10Hz$; $13pA/\sqrt{Hz}@10Hz$) sin comprometer en exceso el precio. También se elige porque tiene dos canales por la limitación de espacio de la PCB, y al necesitar 7 opamps pondremos solo 4 dobles. Al final, nos sobrará uno, por ejemplo, para hacer un comparador que indique nivel bajo de batería o cualquier aplicación.



Low Power, Low Noise and Distortion,
Rail-to-Rail Output Amplifiers


Data Sheet

ADA4841-1/ADA4841-2



OpAmp Dual *Low Noise*

Jack 6.2mm NMJ4HFD2: El conector escogido es un Jack de 6.2mm hembra TS para señales monofásicas con montaje en PCB through hole, con tuerca y rosca para fijar a la carcasa.



Neutrik
NMJ4HFD2 € 1.057
Jack 1/4" Mono Switched - Full Thread Nose - Pcbh - Supplied With Nrj-Wb
And Nrj-Nut-B Rohs Compliant: Yes | Neutrik **NMJ4HFD2**

Conector Jack 6.3mm hembra

PCB 2 Layers 1.6mm FR-4: Se escoge esta configuración por ser la más económica y estándar ofreciendo dos capas para el layout.

Base Material  Layers 1 2 4 PCB Thickness 1.0 1.6

Detalles de la PCB

Fuente de alimentación simétrica +5V -5V: Para alimentar el sensor, se va a utilizar una fuente de laboratorio con salida de +5V, -5V, GND.



Fuente de alimentación simétrica de +5V, -5V, GND

-Control de calidad:

Se propone para el control de la calidad de las piezas las siguientes medidas:

-Medir el grosor de las PCBs recibidas para comprobar si se desvían de los 1.6mm requeridos. Esto se hará con un calibre de precisión.

- Comprobar las continuidades según el *layout* de la PCB para detectar posibles defectos de fabricación o diseño.

-Medir las impedancias de las pistas.

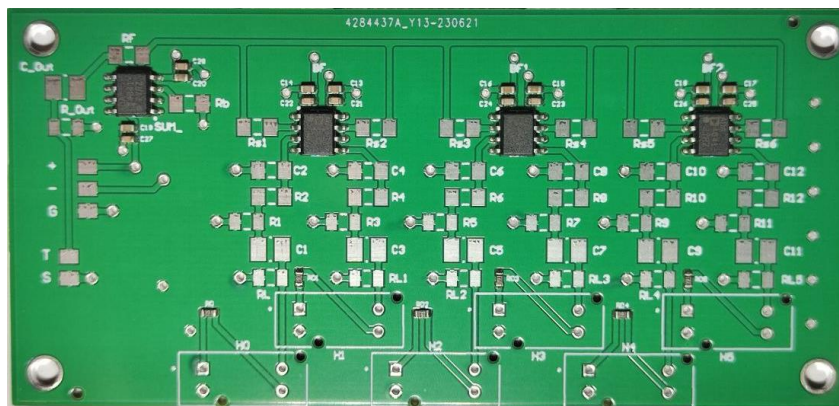
-Medir los valores nominales de los componentes con instrumentación adecuada

3. Condiciones de la ejecución

-Descripción:

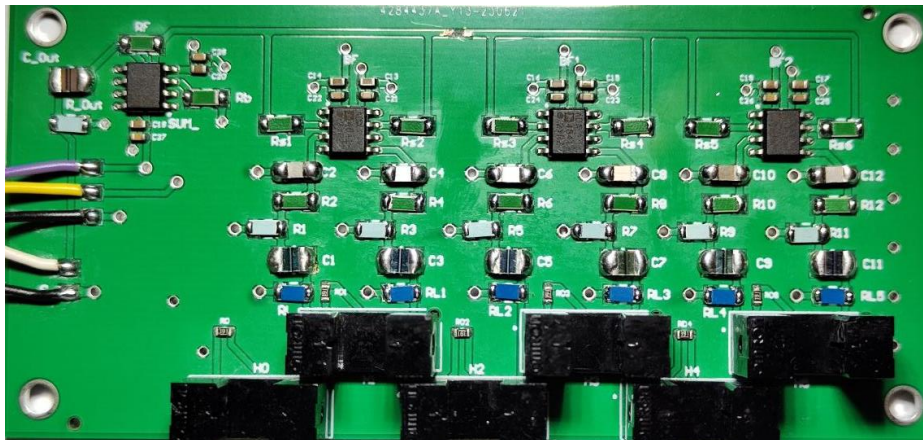
Soldadura de componentes SMD manual y montaje en instrumento.

Partiendo de la PCB recibida por el fabricante:



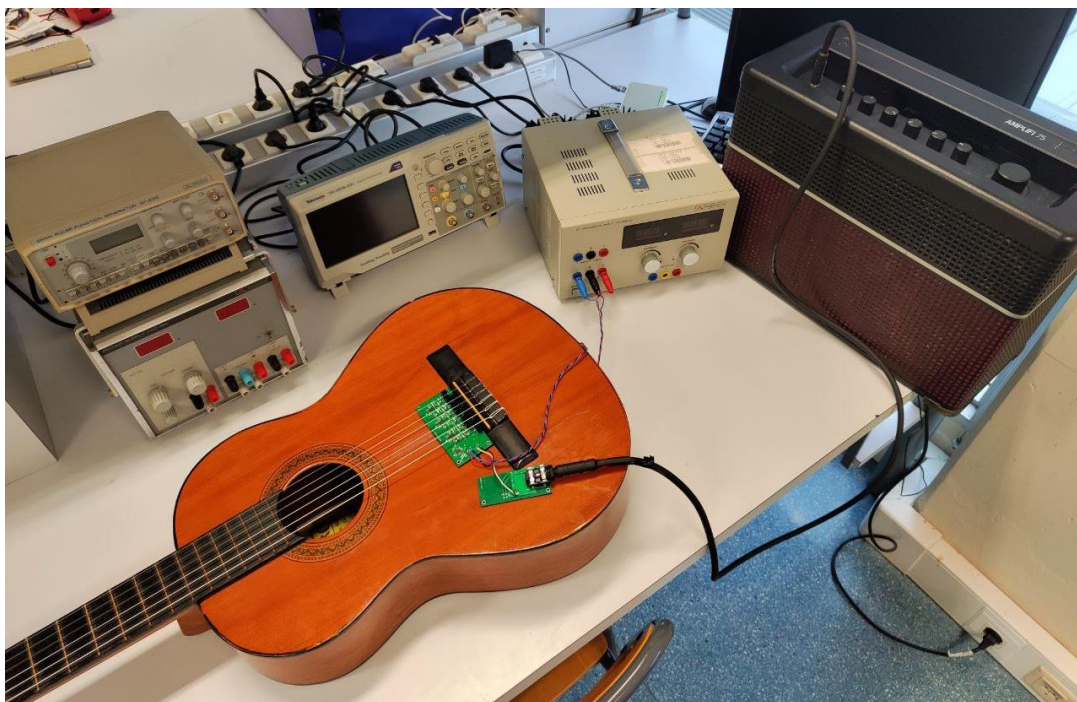
PCB del sensor con ensamblaje SMT de JLCPCB

procederemos a la soldadura manual de los componentes restantes. Soldar componentes SMD con soldador requiere de cierta práctica y precisión, pero en nuestro caso, los componentes a soldar son de un tamaño bastante grande lo que facilita el trabajo.

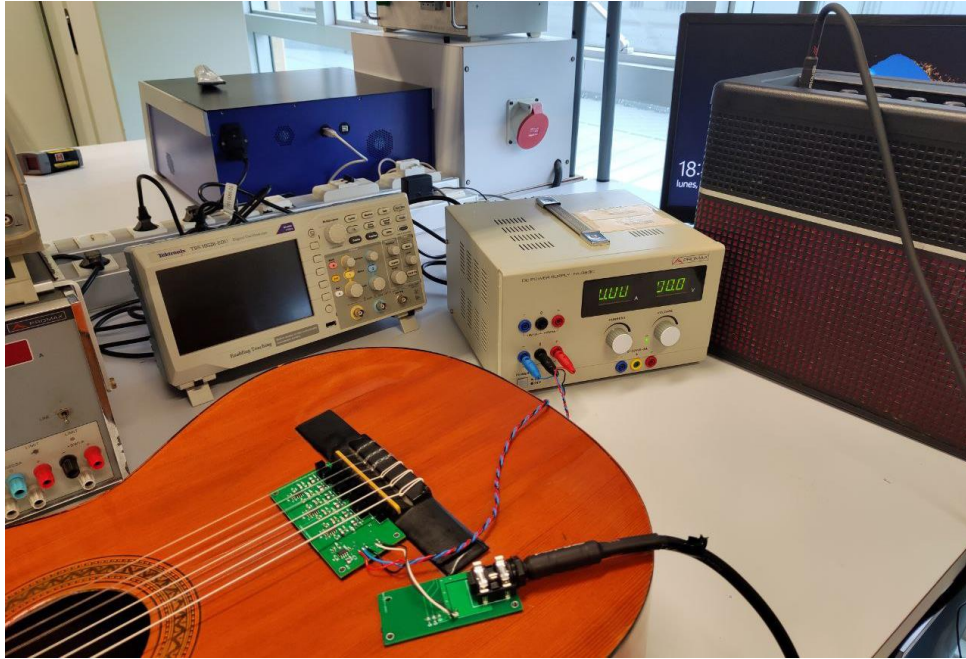


PCB Con todos los componentes soldados

El montaje del sensor en el instrumento se ha realizado poniendo dos capas de cinta de doble cara para alcanzar la altura exacta para que las cuerdas queden entre el emisor y el receptor.



Fotografía del sensor implementado en la guitarra y conectado a la fuente de alimentación y al amplificador



Setup instrumento

-Control de calidad:

Se propone para el control de calidad de la soldadura y el montaje, las siguientes medidas:

- Comprobación de continuidades en las nuevas soldaduras.
- Asegurarse de que esta alimentado a +5V y no a más tensión.
- Comprobación de sonido de que la altura del sensor es adecuada.

4. Pruebas y ajustes finales o de servicio

Se han hecho varias pruebas y ajustes para la puesta en servicio.

Se ha probado el sistema por partes: primero midiendo tensiones con el osciloscopio con un sensor montado solo y posteriormente, conectado al amplificador con volumen. Una vez comprobado el funcionamiento con un sensor se ha hecho lo mismo con dos y finalmente con los seis finales.

Hay que asegurarse de que el sistema este alimentado a +5V.

Comprobación final de que la altura del sensor es la adecuada y suenan todas las cuerdas correctamente.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Presupuesto:

**Implementación de photo-acoplador como
transductor de frecuencia de ondas estacionarias
para amplificación de instrumentos de cuerda.**

Trabajo fin de grado:

Ingeniería Electrónica, Industrial y Automática

2022



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Presupuesto

El presupuesto de este proyecto se divide en dos partes: los gastos recurrentes y los no recurrentes.

Los gastos recurrentes, ascienden a 56,14€ (IVA Incluido) que es lo que cuesta la fabricación del producto. Los gastos no recurrentes son los gastos de ingeniería, que en este caso suman 2541€ (IVA incluido por 120 horas pagadas a 17,5€/h por ser uno de los primeros proyectos del ingeniero autor.

Y el precio de venta del prototipo es de 117,37€ (IVA Incluido) con unos beneficios industriales de 40,86€.

El desglose de precios se puede ver en la siguiente tabla:

COMPONENTS_Guitar_PCB				
Comment	Designator	1UND Price €	UND	Ext Price €
JLPCB				
390	RD, RD1, RD2, RD3, RD4, RD5	0,0009	4	0,0036
1uF	C13, C14, C15, C16, C17, C18, C19, C20	0,0049	8	0,0392
100nF	C21, C22, C23, C24, C25, C26, C27, C28	0,0022	8	0,0176
OpAmp	SUM_, BF, BF1, BF2	3,0367	4	12,1468
MOUSER				
10k	R1, R3, R5, R7, R9, R11, R_Out	0,667	7	4,669
1k	RL, RL1, RL2, RL3, RL4, RL5	0,912	6	5,472
249	R2, R4, R6, R8, R10, R12, RS1, RS2, RS3, RS4, RS5, RS6	0,562	12	6,744
150	RB	0,865	1	0,865
330	RF	0,62	1	0,62
1uF	C1, C3, C5, C7, C9, C11, C_Out	0,463	7	3,241
47nF	C2, C4, C6, C8, C10, C12	0,352	6	2,112
Jack 6.3mm	J1	1,74	1	1,74
Sensor	H, H1, H2, H3, H4, H5	2,03	6	12,18
PCB				
	PCB_Guitar_Sensor	0,732	1	0,732
	PCB_Sensor_Supply	1,336	1	1,336
PCBA Assembly PCB_Guitar_Sensor				
	Setup fee	3,555	1	3,555
	Stencil	0,67	1	0,67
IVA Incluido				56,14
Gastos de Ingeniería				
	Horas	1UND		Ext Price
	120	17,5		2100
IVA 21%				441
IVA Incluido				2541

Venta del prototipo	€
Coste de fabricación	56,14
Beneficios industriales	40,86
Total sin IVA	97
IVA 21%	20,37
IVA Incluido	117,37

Desglose presupuesto