



Universidad de Valladolid

FACULTAD DE CIENCIAS

Trabajo Fin de Grado

Grado en Física

ACONDICIONAMIENTO DE SENSORES

Autora: Elena Sarmentero Medina

Tutor: Iván Santos Tejido

Valladolid, 24 Julio de 2018

*A mis abuelos.
Ojalá fueran eternos.*

Agradecimientos

Agradecer la colaboración de los Departamentos de Física Aplicada y de Electricidad y Electrónica, en concreto a: José María Muñoz y Pedro Prádanos del Pico, por el préstamo de material de laboratorio utilizado en el desarrollo de este trabajo; Jesús Hernández Mangas y Luis Jesús Costilla Mitre por permitirnos el uso de la impresora 3D.

También agradecer a la Universidad de Valladolid, por poner a disposición el laboratorio de Electrónica General (1L007) de la ETSIT.

Agradecer el trabajo y dedicación de mi tutor Iván Santos Tejido, quien me ha ayudado en todo lo posible durante este proceso.

Muchas gracias a mi familia por su apoyo incondicional, amigos y a todas las personas que han aportado su granito de un modo u otro a este proyecto.

Gracias a todos.

Índice general

Lista de figuras	VII
Lista de tablas	IX
Resumen-Abstract	XI
1. Introducción	1
2. Tipos de sensores	3
3. Uso de amplificadores	7
3.1. Amplificadores diferenciales	7
3.2. Amplificadores operacionales. Caso ideal.	8
3.3. Amplificadores de Instrumentación	11
4. Acondicionamiento de resistencias variables.	15
4.1. Divisor de tensión	15
4.2. Divisor de tensión con amplificador operacional	16
4.3. Puente de Wheatstone con amplificador operacional	17
4.4. Puente de Wheatstone con amplificador de instrumentación	18
5. Caracterización de los sensores aislados	21
5.1. Información sobre el sensor elegido	21
5.2. Diseño y fabricación de las piezas	24
5.3. Acondicionamiento con divisor de tensión	25
5.4. Divisor de tensión con amplificador operacional.	29
5.5. Conclusiones	33
6. Fabricación báscula	35
6.1. Diseño y fabricación de las piezas	35
6.2. Medidas realizadas y análisis de los datos tomados.	36
7. Conclusiones	41
7.1. Líneas futuras.	42
Bibliografía	43
Apéndices	45

Índice de figuras

2.1. Estructura general de un sistema de medida [4]	4
3.1. Simbología del amplificador diferencial.	7
3.2. Símbolo del amplificador operacional [11]	9
3.3. Esquema circuito Op en configuración buffer [11].	9
3.4. Esquema Op Amp amplificador inversor [11].	10
3.5. Esquema Op Amp amplificador no inversor [11].	10
3.6. Esquema amplificación de instrumentación [13]	11
4.1. Divisor de voltaje	15
4.2. Divisor de voltaje con Op Amp [5]	16
4.3. Puente de Wheatstone Simple con Op Amp [5]	17
4.4. Dirección de las corrientes elegida para el circuito en puente de Wheatstone	18
4.5. Puente de Wheatstone con Amplificador de Instrumentación [5]	19
5.1. Información sobre el sensor FSR 400 [6]	21
5.2. Sistema conversor fuerza-voltaje [6]	22
5.3. Voltaje de salida en función de la fuerza aplicada para distintas R_M según la hoja de especificaciones del fabricante [6]	23
5.4. Diseño realizado en <i>Tinkecard</i> para la plataforma individual.	24
5.5. Impresora 3D utilizada para la creación de las piezas [3]	25
5.6. Distintas vistas de las piezas de la plataforma individual.	25
5.7. Montaje realizado para la caracterización individual de los sensores [12].	26
5.8. Sensores seleccionados con respuesta más similar.	28
5.9. Datos tabulados por el fabricante comparados con los obtenidos para los cuatro sensores seleccionados.	28
5.10. Diagrama del conexiones del UA741 [16].	29
5.11. Circuito utilizado para detectar los fallos del UA741.	30
5.12. Diagrama de conexiones del TL082 [18].	31
5.13. Comparación de los datos tomados con y sin amplificador operacional TL082.	31
5.14. Circuito utilizado para detectar los fallos del TL082.	32
5.15. Circuito utilizado para detectar los fallos del divisor de tensión.	33
6.1. Diseño realizado en <i>Tinkecard</i> para la plataforma que utilizaremos con los cuatro sensores elegidos.	35

6.2. Montaje final de nuestro prototipo incluyendo la fase de acondicionamiento de señal.	36
6.3. Esquema de las posiciones donde hemos realizado las medidas.	36
6.4. Representación de los resultados obtenidos con la masa de 50 gramos en función de la posición donde se deja el peso.	38
6.5. Representación de los resultados obtenidos con la masa de 100 gramos en función de la posición donde se deja el peso.	39
6.6. Representación de los resultados obtenidos con la masa de 655.6 gramos.	40

Índice de tablas

2.1. Efectos o fenómenos de conversión de distintas formas de energía [1]	4
3.1. Funciones básicas con amplificador operacional (adaptada de [11])	12
5.1. Respuesta de los sensores en función de los diferentes pesos.	27
5.2. Información recogida de las medidas realizadas con el UA741.	30
5.3. Información recogida de las medidas realizadas con el TL082.	32
5.4. Información recogida de las medidas realizadas con el divisor de tensión.	33
6.1. Datos recogidos por los sensores (cuentas) para las diferentes medidas.	37

Resumen

En el presente Trabajo de Fin de Grado se pretende abordar el acondicionamiento de sensores aplicado al caso práctico de la construcción de una báscula utilizando sensores de fuerza.

Para ello será necesario familiarizarse con ciertos conceptos relacionados con el acondicionamiento de señales, así como conocer qué tipos de sensores y qué etapa de acondicionamiento debemos incluir en función de la magnitud que queramos medir y el resultado que queramos obtener.

Una vez comprendidos los aspectos teóricos básicos, se pasará a diseñar las piezas que serán la base de nuestra báscula. Posteriormente, acondicionaremos la señal de los sensores para que se adapte a nuestro sistema y realizaremos un proceso de calibración con el objetivo de sacar un patrón que nos permita calcular cualquier medida de peso a partir de los datos proporcionados por los sensores.

Abstract

This final degree project seeks to address the sensors conditioning applied in the practical case for the construction of a weighing device using force sensors.

This will require more familiarity with many concepts related to signal conditioning as well as a wide knowledge of the kind of sensors and the conditioning circuits we should include according to the magnitude and results required.

After presenting the basic technical aspects the design of the weighing device can begin. Hereinafter the signal of the sensors will be adapted and a calibration operation will be done in order to obtain a trend which enables us to calculate any weight measure from the data provided by sensors.

Capítulo 1

Introducción

Comúnmente llamamos sensor a cualquier dispositivo que este capacitado para detectar estímulos externos y responder en consecuencia. Es decir, nos permiten captar la información del medio que nos rodea y transformarla en señales eléctricas capaces de ser entendidas por un microcontrolador [1].

Este tipo de elementos son muy utilizados en objetos de uso cotidiano con conexión a Internet. De ahí surge el término Internet de las cosas (Internet of things, IoT), un concepto que se refiere a escenarios en los que la conectividad de red y la capacidad de cómputo se extienden a objetos, sensores y artículos de uso diario que habitualmente no se consideran computadoras, permitiendo que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una mínima intervención humana. Esta idea ha ido evolucionando a lo largo de los años a medida que han ido avanzando las nuevas tecnologías adaptándose así a las demandas de los consumidores [2].

Para que sea de utilidad la señal que nos proporcionan los sensores tenemos que iniciar una fase de acondicionamiento. Lo primero que debemos hacer es comprobar que la señal se ajusta al rango de entrada del dispositivo de medida, que en nuestro caso sería un Arduino. Además analizaremos las posibles configuraciones de los amplificadores operacionales que nos ayudaran a adaptar la señal de salida del sensor a nuestras condiciones de trabajo. Nos centraremos en un sensor de resistencia variable en función de la fuerza aplicada.

El objetivo de este trabajo fin de grado es emplear una señal eléctrica proporcionada por un sensor de fuerza, con su debido acondicionamiento, en la fabricación de una báscula.

Para ello realizaremos las siguientes tareas:

1. Estudio del acondicionamiento de sensores
2. Diseño y construcción con una impresora 3D de las piezas necesarias para poder hacer las medidas.

3. Caracterización de la respuesta individual de diez sensores para analizar su variabilidad.
4. Estudio de cómo combinar cuatro sensores para determinar el peso que se coloca sobre ellos.

Esta memoria se estructura de la siguiente forma:

- El capítulo 2 está dedicado a explicar los principios básicos de instrumentación electrónica.
- En el capítulo 3 explicaremos las distintas características que poseen los amplificadores diferenciales, operacionales y de instrumentación.
- En el capítulo 4 se incluye información sobre los tipos de circuitos que podemos utilizar para acondicionar una resistencia variable.
- En el capítulo 5 analizaremos la respuesta individual de los sensores al realizar diferentes medidas para poder crear un patrón de comportamiento que nos permitirá obtener cualquier medida.
- El capítulo 6 recogerá el proceso de fabricación de la báscula a partir de los sensores elegidos, en el que se incluye información sobre éstos, además del diseño y fabricación de nuestro prototipo.
- Por último, tendremos el capítulo 7 en el que se mostrarán las conclusiones finales de todo el proceso, además de las implementaciones que podrían realizarse para mejorarlo.

Capítulo 2

Tipos de sensores

Para comprender el desarrollo de este trabajo, vamos a comenzar haciendo una reseña de los conceptos y términos que usaremos en las siguientes secciones.

Los sensores están integrados tanto en nuestra vida que no somos conscientes de que algunos de ellos nos llevan acompañado desde siempre. El cuerpo humano es capaz de experimentar diferentes sensaciones a través de los sentidos, que serían nuestros sensores.

En general, podemos distinguir dos tipos diferentes de sensores [4]:

- Sensor activo: Es un sensor que requiere una fuente externa de excitación.
- Sensor pasivo: Es un sensor que no requiere una fuente externa de excitación.

En muchas ocasiones, sensor y transductor se emplean como sinónimos, aunque el sensor implica un significado más extenso. Con estos dispositivos queremos conseguir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. La diferencia está en que el transductor convierte una señal física que el sistema no entiende en otra variable entendible por el sistema mientras que el sensor está en contacto directo con la magnitud que se va a evaluar y nos da una respuesta en función a la variación de dicha magnitud.

Podemos combinar varios sensores formando un sistema. Por lo tanto, se denomina sistema a la *“combinación de dos o más elementos, subconjuntos y partes necesarias para realizar una o varias funciones”* [4].

Lo que buscamos al realizar una medida es que el resultado sea independiente del observador, basado en la experimentación y de tal forma que exista una relación entre los datos tomados y las propiedades descritas. Los objetivos de la medida pueden ser: la vigilancia o seguimiento de procesos, como por ejemplo la medida de la temperatura ambiente, o por una necesidad de la ingeniería experimental, como puede ser el estudio de las fuerzas sobre el conductor simulado de un vehículo cuando este choca contra un objeto.

Por lo tanto, podemos resumir los distintos pasos que se deben realizar para la correcta realización de una medida en la Figura 2.1. Como podemos ver en la figura, además de la adquisición de la información realizada por un elemento sensor o transductor, también es necesario un procesamiento de dicha información (acondicionamiento de la señal) y la presentación de resultados.

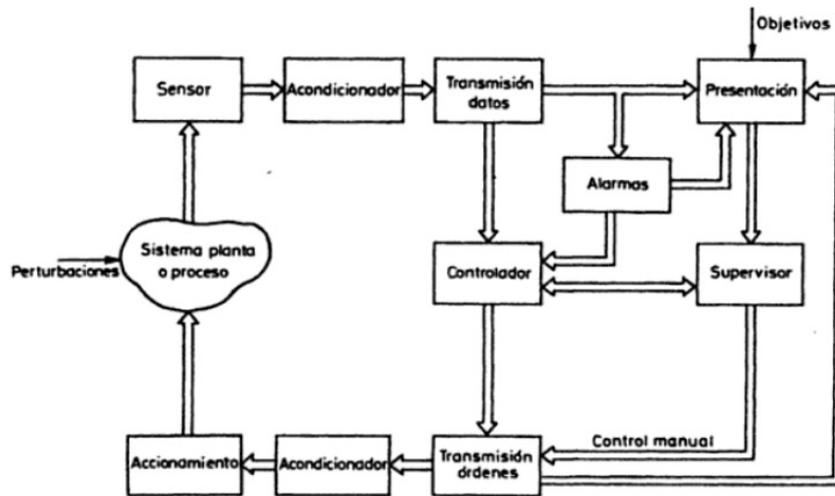


Figura 2.1: Estructura general de un sistema de medida [4]

A modo de resumen, incluimos la Tabla 2.1 que nos da todas las posibles combinaciones de señal de entrada en función de señal de salida:

in \ out	RADIANT	MECHANICAL	THERMAL	ELECTRICAL	MAGNETIC	CHEMICAL
RADIANT	Photo-luminescence	Radiation pressure	Radiation heating (sun)	Photo-conductivity	Photomagnetism	Photochemical reaction
MECHANICAL	Photoelastic effect	Conservation of momentum	Friction heat	Piezoelectric effect	Magnetostriction	Pressure induced reaction
THERMAL	Incandescence	Thermal expansion	Heat conductivity	Seebeck effect	Curie-Weiss law	Endothermic reaction
ELECTRICAL	Electro-luminescence	Piezoelectric effect	Peltier effect	P-n junction	Ampere's law	Electrolysis
MAGNETIC	Faraday effect	Magnetostriction	Ettling-hausen effect	Hall effect	Magnetic induction	
CHEMICAL	Chemo-luminescence	Explosive reaction	Exothermic reaction	Volta effect		Chemical reaction

Tabla 2.1: Efectos o fenómenos de conversión de distintas formas de energía [1]

Desde el punto de vista del Internet de las Cosas [2], los sensores de interés son aquellos dispositivos que nos dan como salida una señal eléctrica (voltaje, corriente, resistencia, capacidad o inducción). Por lo tanto, nosotros nos centraremos sólo en este tipo de señales.

A continuación analizaremos brevemente los efectos que se producen con las diferentes señales de entrada, que podemos ver en la Tabla 2.1 teniendo en cuenta que la señal de salida es siempre eléctrica.

- La **fotoconducción** es un fenómeno que ocurre cuando la luz es absorbida por un material haciendo que la cantidad de portadores cambie provocando a

su vez que la conductividad varíe [10].

- La **piezoelectricidad** es una propiedad que tienen algunos materiales los cuales al someterlos a una presión nos dan como respuesta una diferencia de potencial.
- El **efecto Seebeck** consiste en generar corriente eléctrica sometiendo la unión de dos metales diferentes a una diferencia de temperaturas [14].
- Se denomina **unión PN** a la estructura fundamental de los componentes electrónicos, principalmente diodos y transistores. Está formada por la unión metalúrgica de dos cristales, de naturalezas P y N según su composición a nivel atómico [15].
- El **efecto Hall** se produce cuando se ejerce un campo magnético transversal sobre un cable por el que circulan cargas. Como la fuerza magnética ejercida sobre ellas es perpendicular al campo magnético y a su velocidad, las cargas son impulsadas hacia un lado del conductor y se genera en él un voltaje transversal.
- Por último tenemos el **efecto Volta** que afirma que si colocamos dos metales de diferente naturaleza en contacto aparece una fuerza electromotriz entre ellos.

El sensor elegido en este TFG es un sensor de fuerza tipo resistivo (FSR 400 Series de Interlink electronics [6]) esto quiere decir que la señal de entrada será la fuerza provocada por las diferentes masas que coloquemos sobre él y la salida será una resistencia variable en función de la entrada. Se hará una descripción completa de este sensor en el Capítulo 5.

Capítulo 3

Uso de amplificadores

Antes de seguir con los posibles circuitos acondicionadores que tenemos para una resistencia variable, comentaremos algunos aspectos necesarios para la comprensión y desarrollo de los siguientes capítulos.

3.1. Amplificadores diferenciales

Un amplificador diferencial es un dispositivo con dos entradas cuya salida es proporcional a la diferencia de tensión entre ambas. Podemos representarlo esquemáticamente mediante la Figura 3.1, en la que podemos ver dos entradas: la primera entrada se denomina *entrada no inversora* (V_a), mientras que la segunda, *entrada inversora* (V_b). También existe la posibilidad de que haya un terminal adicional, llamado *de referencia*, cuyo valor se suma directamente a la salida.

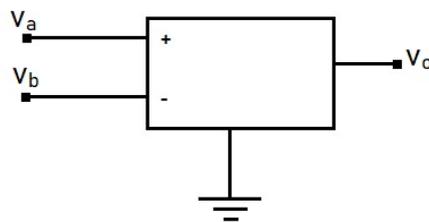


Figura 3.1: Simbología del amplificador diferencial.

En la mayor parte de los casos, las señales de entradas son tensiones pero la salida puede ser en tensión o en corriente. En el caso de que sea en tensión, ésta puede ser absoluta o diferencial.

Las señales entran en el amplificador diferencial como un par de tensiones v_a y v_b . Podemos definir esta señal como una combinación entre dos componentes:

1. Componente en modo diferencial:

$$v_d = v_a - v_b \quad (3.1)$$

2. Componente en modo común:

$$v_c = \frac{v_a + v_b}{2} \quad (3.2)$$

En base a estas componentes, el amplificador diferencial realiza la siguiente operación:

$$v_o = A_d v_d + A_c v_c \quad (3.3)$$

dónde A_d es la ganancia en modo diferencial y A_c la ganancia en modo común. Generalmente la componente en modo diferencial es la que contiene información útil y la de modo común es un elemento no deseado, como por ejemplo ruido. A partir de eso definimos la llamada razón de rechazo en modo común (RRMC) que describe la capacidad del amplificador diferencial de rechazar la componente en modo común.

$$RRMC = \frac{A_d}{A_c} \quad (3.4)$$

$$RRMC_{dB} = 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (3.5)$$

El uso de este tipo de amplificadores es variado. Por un lado, pueden utilizarse para medir diferencias de tensión en el circuito. En otros casos, nos permite eliminar el ruido en señales de baja calidad, donde le resta la tensión de referencia a una señal aparentemente inútil de tal modo que se convierte en una señal correcta

3.2. Amplificadores operacionales. Caso ideal.

Básicamente podríamos decir que un amplificador operacional (Op Amp) es un caso particular del amplificador diferencial con muy alta ganancia e impedancia de entrada infinita.

Las excelentes prestaciones del amplificador operacional le han proporcionado un inmenso campo de aplicación dentro del mundo de la electrónica analógica constituyendo el bloque básico de la mayoría de los amplificadores.

El amplificador operacional se representa con un símbolo como el que se muestra en la Figura 3.2 con dos entradas, una inversora (-) y otra no inversora (+), una salida y dos terminales de alimentación.

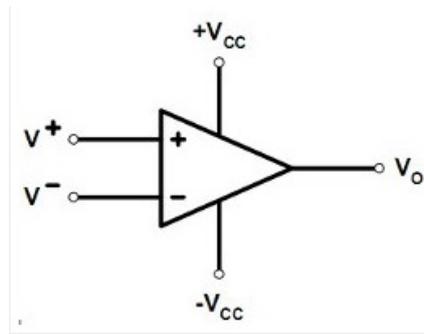


Figura 3.2: Símbolo del amplificador operacional [11]

Su función es la de amplificar con una ganancia de tensión A_d la tensión diferencial V_d según:

$$v_o = A_d v_d = A_d(V^+ - V^-) \quad (3.6)$$

Los características que definen a un amplificador operacional como ideal son [11]:

- La resistencia de entrada infinita, lo que hace a que la corriente de entrada por cualquiera de sus dos entradas sea nula.
- Resistencia de salida nula, lo que implica que la tensión de salida se aplique en su totalidad sobre la carga que se conecte.
- Ganancia en tensión infinita, lo que significa que si su salida es finita, la tensión diferencial de entrada deberá ser nula. Lo que se conoce como Principio de Tierras Virtuales.

Las consideraciones de idealidad permiten un estudio simplificado del operacional y de los circuitos en torno a él, obteniendo aplicaciones muy interesantes en los circuitos de tratamiento de señal.

Aunque son muchas las aplicaciones de los amplificadores operacional, sólo vamos a destacar dos casos que utilizaremos en el desarrollo de los apartados siguientes:

1. Seguidor de tensión o buffer: circuito básico en el que la tensión de salida coincide con la de entrada. Lo que hace el Op Amp en configuración buffer es crear una etapa intermedia para desacoplar las impedancias entre las etapas que conecta [9]. En este caso la señal no se ve amplificada.

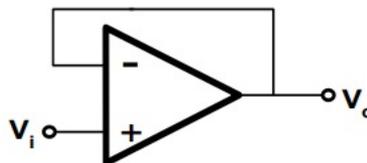


Figura 3.3: Esquema circuito Op en configuración buffer [11].

En este caso tenemos que el voltaje de salida es el mismo que el de entrada.

$$v_o = v_i \quad (3.7)$$

2. Amplificador inversor/no inversor: La relación entre la entrada y la salida, denominada ganancia, depende del valor de las resistencias implicadas. En el caso de amplificador inversor la ganancia es negativa para cualquier valor, mientras que en el amplificador no inversor la ganancia es siempre positiva y mayor que la unidad. Podemos ver la configuración de un amplificador inversor en la Figura 3.4:

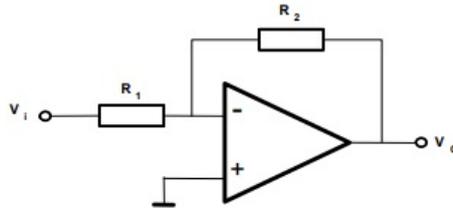


Figura 3.4: Esquema Op Amp amplificador inversor [11].

Aplicando las leyes de Kirchhoff para las corrientes, teniendo en cuenta que $V_- = V_+$ por el principio de las Tierras Virtuales y que la corriente de entrada es nula, tenemos:

$$\frac{v_i - 0}{R_1} = \frac{0 - v_o}{R_2} \quad (3.8)$$

Con lo que hallamos la relación entre el voltaje de entrada y el de salida:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (3.9)$$

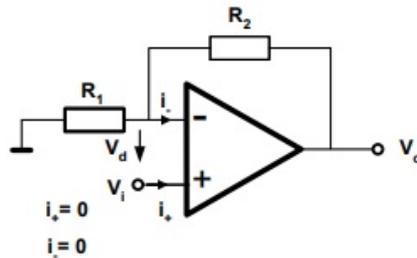


Figura 3.5: Esquema Op Amp amplificador no inversor [11].

Realizamos el mismo proceso para el caso del amplificador no inversor mostrado en la Figura 3.5:

$$\frac{0 - v_-}{R_1} = \frac{v_- - v_o}{R_2} \quad (3.10)$$

En este caso la relación entre el voltaje de entrada y el de salida es:

$$\frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3.11)$$

Incluimos en la Tabla 3.1 un resumen de las principales aplicaciones del operacional ideal, incluyendo las ya nombradas, constituyendo algunos de los circuitos más utilizados.

3.3. Amplificadores de Instrumentación

Un amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial de tensión de precisión. Para ser efectivo, debe ser capaz de amplificar señales del orden de microvoltios y a la vez rechazar tensiones de modo común del orden de los voltios [11]. El amplificador de instrumentación esta compuesto por tres amplificadores operacionales que nos diferencian varias etapas tal y como vemos en la Figura 3.6

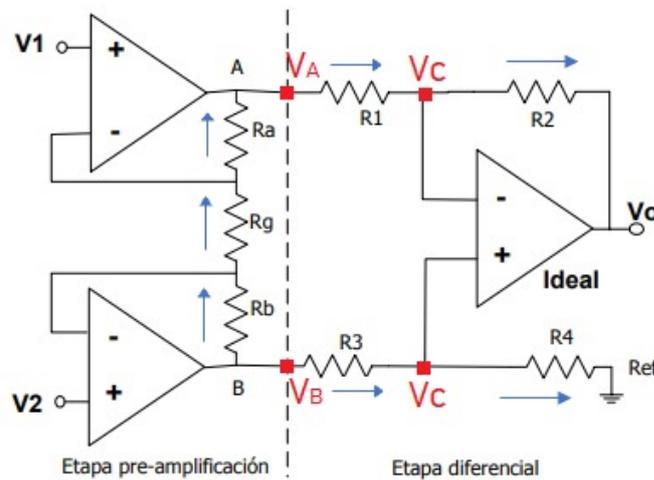


Figura 3.6: Esquema amplificación de instrumentación [13]

Podemos ver una primera etapa de amplificación que aumenta la impedancia de entrada del conjunto. Aplicando las leyes de Kirchoff para las corrientes en el punto A y en el punto B obtenemos que:

$$\frac{V_2 - V_1}{R_g} = \frac{V_1 - V_A}{R_a} \quad (3.12)$$

$$\frac{V_2 - V_1}{R_g} = \frac{V_B - V_2}{R_b} \quad (3.13)$$

Igualando ambas expresiones llegamos a:

$$V_B - V_A = (V_2 - V_1) \left(\frac{R_a + R_b}{R_g} + 1 \right) \quad (3.14)$$

La ganancia diferencial de la etapa amplificadora variará en función del valor R_g

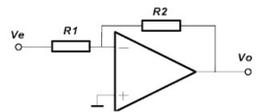
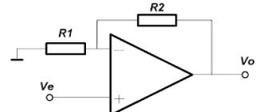
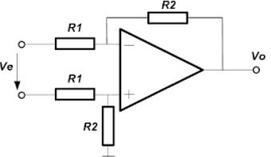
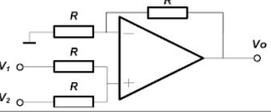
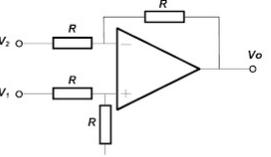
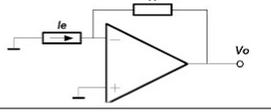
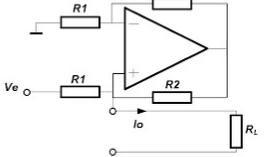
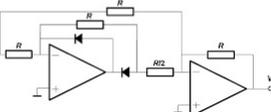
Topología	Función
Amplificador inversor <i>(inverter amplifier)</i> 	$V_o = -\frac{R_2}{R_1} V_e$
Amplificador no inversor <i>(no-inverter amplifier)</i> 	$V_o = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_e$
Amplificador diferencial <i>(differential amplifier)</i> 	$V_o = \frac{R_2}{R_1} V_D$
Sumador 	$V_o = V_1 + V_2$
Restador 	$V_o = V_1 - V_2$
Convertidor corriente-tensión <i>(current-to-voltage converter)</i> 	$V_o = -R \cdot I_e$
Convertidor tensión-corriente <i>(voltage-to-current converter)</i> 	$I_o = \frac{V_e}{R_1}$
Rectificador de precisión <i>(precision rectifier)</i> 	$V_o = V_e $

Tabla 3.1: Funciones básicas con amplificador operacional (adaptada de [11])

A continuación tenemos la etapa diferencial que nos da un voltaje de salida. Realizamos el mismo proceso que en la etapa anterior aplicando las leyes de Kirchhoff en el punto C para obtener V_o [21]:

$$\frac{V_B - V_C}{R_3} = \frac{V_C}{R_4} \quad (3.15)$$

$$\frac{V_A - V_C}{R_1} = \frac{V_C - V_o}{R_2} \quad (3.16)$$

Despejamos V_o dejándolo sólo en función de V_A y V_B , así podremos utilizar el resultado obtenido en la etapa pre-amplificadora.

$$V_o = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) V_A + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \left(\frac{R_4}{R_3 + R_4}\right) V_B \quad (3.17)$$

Por lo tanto, juntando los resultados obtenidos en cada una de las diferentes etapas llegamos al resultado final:

$$V_0 = (V_A - V_B) \left[\frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \left(\frac{1}{2} + \frac{R_b}{R_g} \right) + \frac{R_2}{R_1} \left(\frac{1}{2} + \frac{R_a}{R_g} \right) \right] + \frac{(V_A + V_B)}{2} \left[\frac{1 - \frac{R_2 R_3}{R_1 R_4}}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \right] \quad (3.18)$$

Podemos ver que el primer sumando de esta ecuación corresponde al modo diferencial y el segundo al modo común.

Hemos analizado el caso general, en el que todas las resistencias son de distinto valor. Normalmente esto no ocurre, sino que las resistencias R_a , R_1 y R_2 suelen ser iguales que R_b , R_3 y R_4 , respectivamente. Por lo tanto particularizamos el caso general utilizando las condiciones anteriormente citadas. Al hacer esta particularización podemos ver que estamos eliminando la parte correspondiente al modo común.

$$V_0 = (V_A - V_B) \left(1 + \frac{2R_a}{R_g} \right) \frac{R_2}{R_1} \quad (3.19)$$

Capítulo 4

Acondicionamiento de resistencias variables.

Los sensores de resistencia variable suelen dar valores extremadamente pequeños por lo que el acondicionamiento de este tipo de señales es un paso muy importante para obtener medidas fiables [20].

Vamos a mostrar a continuación las opciones más utilizadas para el acondicionamiento de una resistencia variable.

4.1. Divisor de tensión

Esta sería la forma más sencilla que tenemos para acondicionar un sensor resistivo: produciendo un voltaje que sea función de la variación en la resistencia. En la Figura 4.1 podemos ver el esquema de un circuito acondicionador utilizando un divisor de voltaje en el que colocamos el sensor y una resistencia de valor conocido.

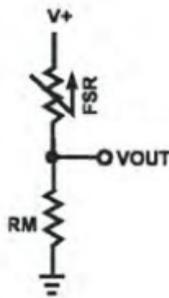


Figura 4.1: Divisor de voltaje

El voltaje de salida, V_{OUT} viene dado por la siguiente expresión:

$$V_{OUT} = \frac{R_M V^+}{(R_M + R_{FSR})} \quad (4.1)$$

De este modo, medimos el voltaje de salida y conociendo el valor de resistencia R_M podemos hallar la resistencia que tenemos en el sensor.

4.2. Divisor de tensión con amplificador operacional

Este tipo de circuito acondicionador es similar al de divisor de tensión descrito en el apartado anterior, añadiendo un amplificador operacional en configuración buffer.

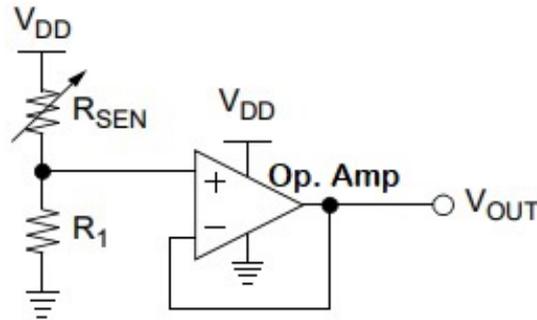


Figura 4.2: Divisor de voltaje con Op Amp [5]

Como vemos en la Figura 4.2, tenemos un divisor de voltaje que nos reparte la tensión de entrada V_{DD} dependiendo del valor de las resistencias de la rama a través de la siguiente relación:

$$V_+ = \frac{R_1 V_{DD}}{(R_1 + R_{SEN})} \quad (4.2)$$

Por lo tanto, V_+ será el voltaje que tendremos en la parte positiva del amplificador operacional. La etapa buffer (o seguidor de tensión) hace que tengamos la misma tensión a la salida que a la entrada. Tal y como hemos indicado anteriormente, la impedancia de entrada es muy elevada y la de salida casi nula para así eliminar efectos de carga o adaptar impedancias de modo que al realizar mediciones de tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no se vea sensiblemente afectada la medición. En este caso particular, la ganancia es unitaria por lo que la señal no se ve amplificada. Entonces V_{OUT} tendrá el mismo valor que el calculado anteriormente para V_+ .

$$V_{OUT} = \frac{R_1 V_{DD}}{(R_1 + R_{SEN})} \quad (4.3)$$

La mayor ventaja de este tipo de circuitos es su simplicidad aunque como inconvenientes debemos destacar la aparición de ruido en el sistema, lo que dificulta la toma de medidas, y la relación entre el voltaje y la resistencia no es lineal.

Este tipo de circuito acondicionador es el recomendado por el fabricante de nuestro sensor elegido [6].

4.3. Puente de Wheatstone con amplificador operacional

Otro método para acondicionar sensores de resistencia variable es utilizando un circuito de puente de Wheatstone.

Para poder tomar medidas con mayor precisión debemos conectar los sensores a un circuito que sea capaz de medir los cambios en la resistencia. Lo más común es utilizar un circuito de puente de Wheatstone, como el que podemos ver en la Figura 4.3, para la medición de la resistencia eléctrica estática o dinámica [13].

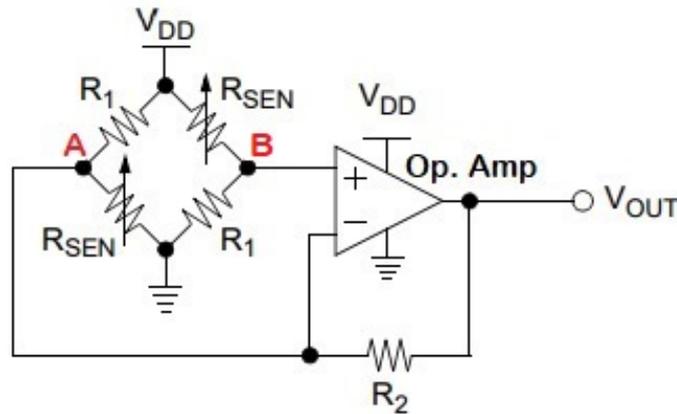


Figura 4.3: Puente de Wheatstone Simple con Op Amp [5]

Como podemos ver, hemos sustituido algunas de las resistencias por resistencias variables, que representan a los sensores utilizados. Esta modificación es muy común en casos de instrumentación electrónica como es el nuestro.

Pasamos a analizar detenidamente el funcionamiento de este circuito. En primer lugar, vamos a mostrar cuál es la función del puente de Wheatstone. Analizamos el caso general en el que las resistencias (incluimos las resistencias variables que nos proporcionan los sensores) no son de igual valor suponiendo cierta variabilidad en R_1 y R_{SEN} , por ese motivo aparecen primadas. Además seleccionamos una dirección para las corrientes tal y como vemos en Figura 4.4.

Aplicando las leyes de Kirchoff para las corrientes en el nodo A:

$$\frac{V_{DD} - V_-}{R_1'} = \frac{V_- - V_o}{R_2} + \frac{V_- - 0}{R_{SEN}'} \quad (4.4)$$

Por otro lado tenemos, en el nodo B tenemos:

$$\frac{V_{DD} - V_+}{R_{SEN}} = \frac{V_+ - 0}{R_1} \quad (4.5)$$

Con esto podemos hallar el voltaje V_+

$$V_+ = \frac{R_1}{R_{SEN} + R_1} V_{DD} \quad (4.6)$$

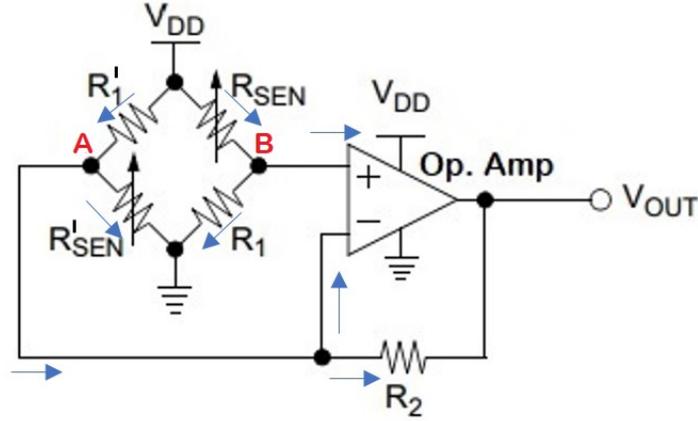


Figura 4.4: Dirección de las corrientes elegida para el circuito en puente de Wheatstone

Si consideramos el caso en el que el amplificador operacional es ideal, tenemos que $V = V_+ = V_-$

$$V = \frac{R_1}{R_{SEN} + R_1} V_{DD} \quad (4.7)$$

A partir de las ecuaciones y hallamos la relación $V_o = f(R_{SEN})$

$$V_o = V_{DD} \left[\frac{R_1}{R_{SEN} + R_1} \left(\frac{R'_1 + R_2 + R'_{SEN}}{R'_1 R'_{SEN}} \right) - \frac{R_2}{R'_1} \right] \quad (4.8)$$

Si particularizamos el resultado anterior para el caso en el que $R'_{SEN} = R_{SEN}$ y $R'_1 = R'_1$, la expresión se reduce a:

$$V_o = V_{DD} \left[\frac{1}{R_{SEN} + R_1} \left(\frac{R_1 + R_2 + R_{SEN}}{R_{SEN}} \right) - \frac{R_2}{R_1} \right] \quad (4.9)$$

4.4. Puente de Wheatstone con amplificador de instrumentación

En este caso, sustituimos el amplificador operacional por uno de instrumentación que posee características muy similares a los Op Amp. La ventaja que presentan este tipo de dispositivos es que pueden ser utilizados en situaciones con alto nivel de ruido o fluctuaciones térmicas. En la Figura 4.5 podemos ver un terminal V_{REF} que nos ayuda eliminar la parte de la señal correspondiente al modo común, que es la que nos puede dar problemas a la hora de tomar medidas.

4.4. PUENTE DE WHEATSTONE CON AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN 19

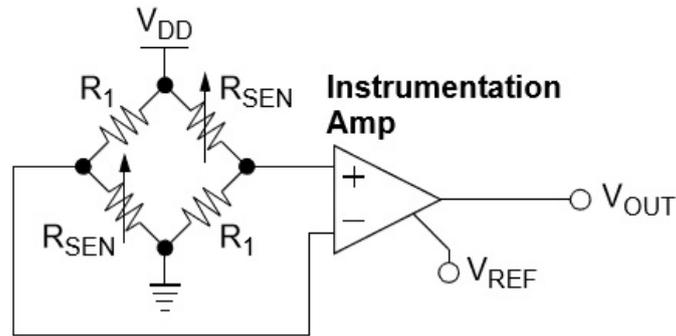


Figura 4.5: Puente de Wheatstone con Amplificador de Instrumentación [5]

Como ya hemos visto en el Apartado 3.3, el amplificador de instrumentación está formado por tres amplificadores operacionales. A esto tendremos que añadirle la función del Puente de Wheatstone que lo que nos hace es que el voltaje V_+ y V_- viene dado por los divisores de tensión que forman las ramas del puente. Es decir:

$$V_+ = V_{DD} \frac{R_1}{R_1 + R_{SEN}} \quad (4.10)$$

$$V_- = V_{DD} \frac{R_{SEN}}{R_1 + R_{SEN}} \quad (4.11)$$

Ahora sustituimos estos resultados en la expresión 3.3, donde $V_+ = V_1$ y $V_- = V_2$, obteniendo el siguiente resultado:

$$V_0 = V_{DD} \left[\frac{1 - \frac{R_{SEN}}{R_1}}{1 + \frac{R_{SEN}}{R_1}} \right] \left(1 + \frac{2R_a}{R_g} \right) \frac{R_2}{R_1} \quad (4.12)$$

Capítulo 5

Caracterización de los sensores aislados

5.1. Información sobre el sensor elegido

Para el diseño y fabricación de nuestro prototipo hemos utilizado cuatro sensores FSR (Force Sensing Resistor) 400 Series de Interlink electronics [6] que muestran una disminución de la resistencia cuando aumenta la fuerza aplicada sobre la superficie activa. Las capas de sustrato están fabricadas con un compuesto polimérico, capaz de dar una respuesta resistiva variable en función de la fuerza aplicada sobre él. En la Figura 5.1 se muestra una foto del sensor junto con una imagen de la estructura de capas.

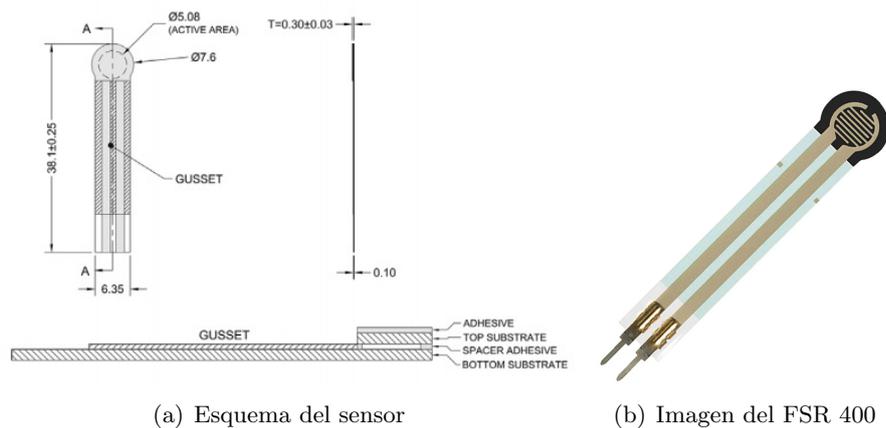


Figura 5.1: Información sobre el sensor FSR 400 [6]

En las hojas de especificaciones del sensor el fabricante recomienda usar un divisor de tensión con Op Amp en configuración buffer tal y como podemos ver en la Figura 5.2:

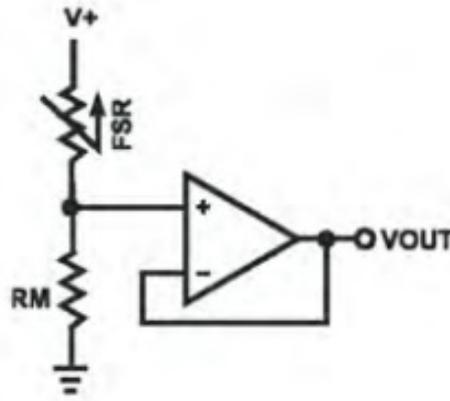


Figura 5.2: Sistema conversor fuerza-voltaje [6]

La relación entre la fuerza aplicada y el voltaje de salida viene dado por un divisor de tensión:

$$V_{OUT} = \frac{R_M V^+}{(R_M + R_{FSR})} \quad (5.1)$$

En donde tenemos varios términos involucrados:

- R_M : es una resistencia cuya función es maximizar el rango de sensibilidad de la fuerza y para limitar la corriente
- V^+ : corresponde al voltaje de entrada, normalmente se utilizan 5V.
- R_{FSR} : es la resistencia asociada al dispositivo.

También incluimos en la Figura 5.3 una familia de curvas de fuerza en función de voltaje que según el fabricante sería el resultado experimental que obtendríamos para un FSR en configuración de divisor de tensión en función de distintos valores de R_M

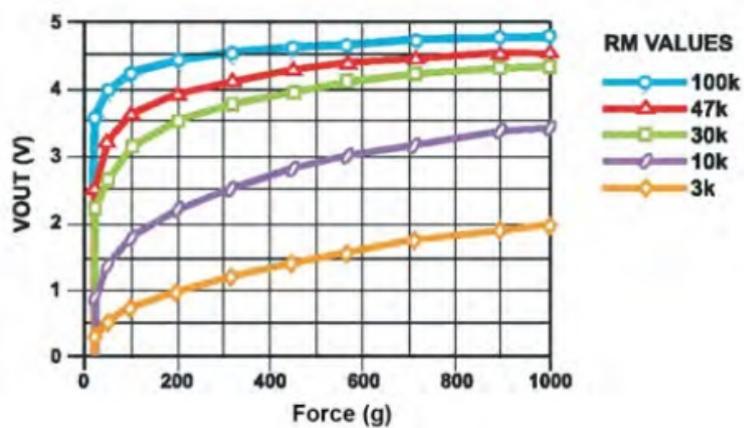


Figura 5.3: Voltaje de salida en función de la fuerza aplicada para distintas R_M según la hoja de especificaciones del fabricante [6]

5.2. Diseño y fabricación de las piezas

Para realizar la caracterización individual de los sensores realizamos una pequeño soporte que servirá de guía antes de realizar el prototipo definitivo. Este soporte individual, que se muestra en la Figura 5.4, consta de dos piezas cuadradas de 5cm de lado cada una. La primera de las piezas tiene de una hendidura en el centro donde irá colocado el sensor, además de unos topes en las esquinas que se elevan por encima de la altura de la base y hacen que la pieza que posteriormente coloquemos encima quede encajada perfectamente. Por otro lado, la segunda pieza tendrá un cilindro en el centro el cual corresponde con la posición donde estará colocado el sensor en la primera pieza y por la parte de abajo tiene unas circunferencias que señalizan la posición donde deberíamos colocar los pesos para realizar las medidas. Con este diseño se pretende que al realizar las medidas ninguna de las dos piezas se mueva. El diseño de la pieza lo realizamos con la herramienta *Tinkecard* [8] que es un software gratuito online creado por la empresa Autodesk, una de las empresas punteras en el software de diseño 3D.

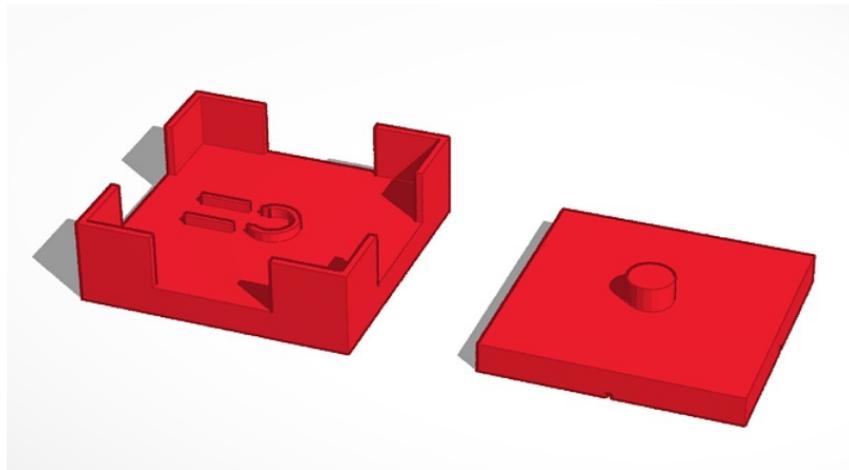


Figura 5.4: Diseño realizado en *Tinkecard* para la plataforma individual.

Después utilizamos una impresora 3D modelo LEON 3D para llevar a cabo nuestro diseño. La impresora utilizada para realizar las piezas es la que podemos ver en la Figura 5.5.



Figura 5.5: Impresora 3D utilizada para la creación de las piezas [3]

El resultado final obtenido es el vemos en la Figura 5.6:

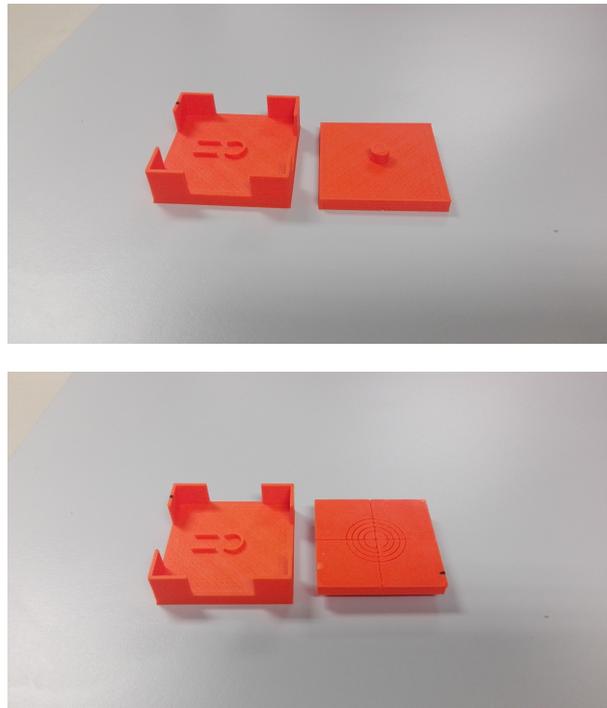


Figura 5.6: Distintas vistas de las piezas de la plataforma individual.

5.3. Acondicionamiento con divisor de tensión

Comenzamos caracterizando individualmente cada uno de los sensores. En este primer paso lo que queremos comprobar es que todos los sensores responden del mismo modo. Seleccionamos varios pesos de distinta magnitud y, colocando el sensor en la soporte individual, realizamos las mismas medidas con todos los sensores para los diferentes pesos.

Para ello hemos utilizado un circuito divisor de tensión, el cual podemos ver en la

Figura 4.2 en el que el voltaje se reparte entre el sensor y una resistencia de valor conocido ($10k\Omega$) la cual no variaremos durante todo el proceso. Después conectamos el Arduino entre una de las entradas analógicas señaladas en el dispositivo y la salida V_{OUT} del divisor de tensión. Este nos permite ver los valores que está tomando el sensor constantemente a través de un sencillo programa que nos lee los datos del programa que nos los muestra por pantalla (ver Anexo A).

Podemos transformar esta señal digital del conversor en voltaje de salida sabiendo que el rango del microcontrolador del Arduino va de 0 a 3,3V. El microcontrolador hace operaciones con paquetes de información. El paquete de información básico es un único valor que puede ser 1 ó 0. Arduino posee un conversor analógico digital de 10 bits, valor que nos indica el tamaño de palabra que utiliza en las operaciones que realiza. Esto nos indica que los paquetes de información puede llegar hasta 2^{10} valores [7].

A continuación almacenamos en un archivo los 1.000 datos recogidos en un minuto con otro programa (ver Anexo A) para su posterior análisis.

Para la caracterización de los sensores utilizamos el circuito de la Figura 5.7.

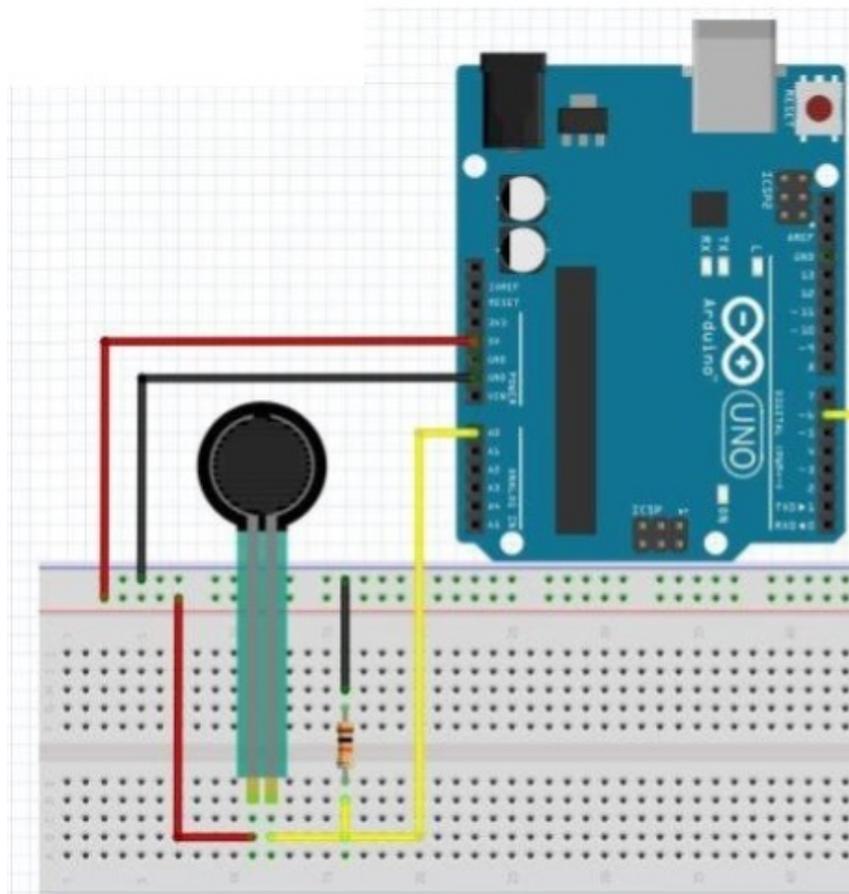


Figura 5.7: Montaje realizado para la caracterización individual de los sensores [12].

El cable rojo va conectado al pin de 5V del Arduino, que nos da el voltaje necesario

para hacer funcionar nuestro circuito. El cable negro indica la conexión a tierra y los amarillos conectan los componentes a una de las entradas analógicas del Arduino.

Lo que podemos ver en la Tabla 5.1 es la respuesta digital del conversor promediada de todos los datos proporcionados por el Arduino en función de las distintas medidas.

Peso(gramos)	50	100	120	450	655.6	1120	1774
Sensor 1	84 ± 4	281 ± 9	518 ± 6	703 ± 17	786 ± 2	1022 ± 1	1014 ± 2
Sensor 2	52 ± 3	129 ± 8	230 ± 4	649 ± 3	760 ± 2	791 ± 3	969 ± 4
Sensor 3	21 ± 3	211 ± 5	278 ± 6	629 ± 4	750 ± 2	717 ± 4	860 ± 4
Sensor 4	82 ± 3	166 ± 7	391 ± 7	574 ± 4	841 ± 1	852 ± 3	854 ± 5
Sensor 5	95 ± 5	260 ± 4	462 ± 5	611 ± 6	840 ± 1	814 ± 3	854 ± 5
Sensor 6	99 ± 9	246 ± 3	349 ± 4	540 ± 4	773 ± 1	725 ± 3	910 ± 5
Sensor 7	56 ± 5	539 ± 3	606 ± 3	666 ± 6	880 ± 1	974 ± 4	1009 ± 3
Sensor 8	158 ± 11	265 ± 7	430 ± 8	542 ± 7	728 ± 1	550 ± 4	782 ± 3
Sensor 9	287 ± 6	452 ± 4	504 ± 5	702 ± 4	829 ± 1	811 ± 4	1023
Sensor 10	89 ± 4	247 ± 7	225 ± 5	587 ± 3	773 ± 1	696 ± 10	991 ± 3

Tabla 5.1: Respuesta de los sensores en función de los diferentes pesos.

Analizando los datos de la Tabla 5.1 la respuesta de los sensores va aumentando a medida que el peso aumenta. Además podemos comprobar que el error en la mayoría de los casos, en comparación con la medida, no es demasiado elevado. Tenemos algunos casos, como en el caso del sensor 1 al utilizar la pesa de 450 gramos, en los que es más notable que podemos asociar a un mal posicionamiento del peso en la plataforma o puede que debido al rozamiento de las piezas, el sensor no estuviera recogiendo datos correctamente desde un principio. También notamos una gran variabilidad asociada al posicionamiento del peso sobre el soporte al realizar las medidas.

A la vista de estos resultados mostrados en la Tabla 5.1, seleccionamos los cuatro sensores que tienen respuesta más similar.

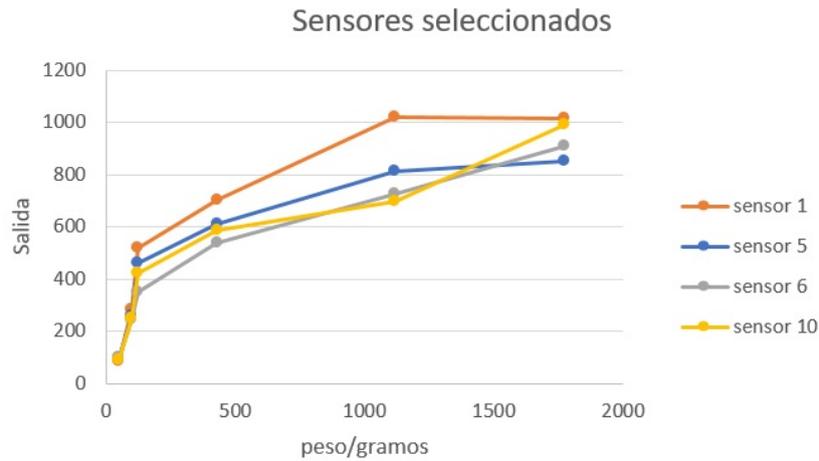


Figura 5.8: Sensores seleccionados con respuesta más similar.

Para comprobar el funcionamiento de los sensores, vamos a compararlos con los teóricos tabulados por el fabricante para una resistencia de $10k\Omega$ que hemos podido ver en el Figura 5.3 transformando los datos anteriores de la Figura 5.8 en voltaje de salida. El resultado obtenido queda recogido en la Figura 5.9:

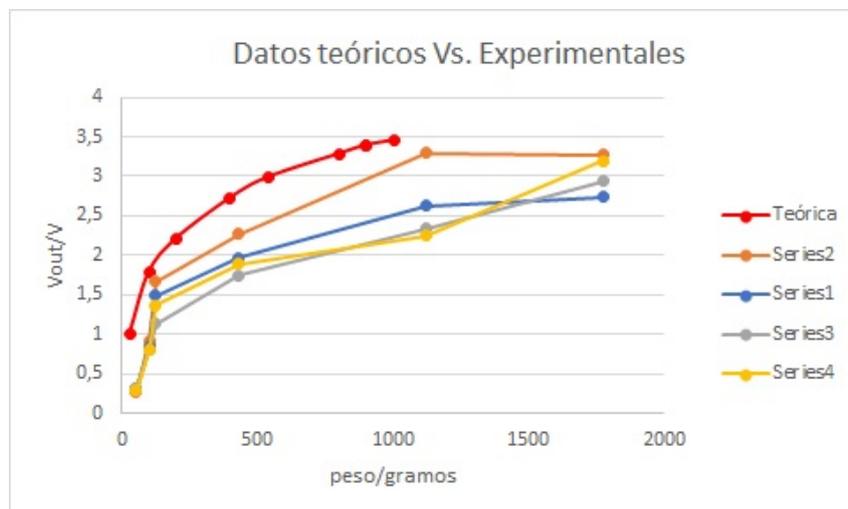


Figura 5.9: Datos tabulados por el fabricante comparados con los obtenidos para los cuatro sensores seleccionados.

Como podemos comprobar, para valores pequeños de la fuerza nuestros datos difieren notablemente de los datos del fabricante. Para valores elevados los datos experimentales y los teóricos siguen una tendencia similar, por lo que podemos decir que los datos que hemos tomado a partir de masas superiores a los 200 gramos serán más fiables.

Una vez seleccionados los cuatro sensores, el objetivo es realizar este mismo proceso

pero utilizando la plataforma grande. Con ello lo que se pretende es sacar un patrón de comportamiento relacionando las medidas tomadas por el sensor de forma individual y las medidas que toman los sensores. Para poder trabajar con los cuatro sensores tenemos que utilizar el tipo de acondicionamiento que mejor se adapte a nuestra situación.

5.4. Divisor de tensión con amplificador operacional.

Se probaron dos modelos distintos de amplificadores operacionales en el circuito de la Figura 4.2.

Primero probamos con el **LM741** [16] que es un tipo de amplificador operacional muy simple y utilizado en distintas aplicaciones de instrumentación electrónica.

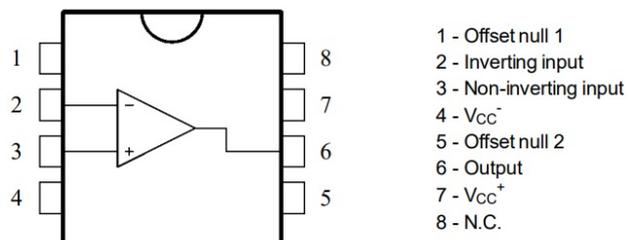


Figura 5.10: Diagrama del conexiones del UA741 [16].

En el primer montaje realizado se observó que independientemente del valor de la resistencia R_1 de la Figura 4.2, el valor de voltaje que nos daba el Op Amp era mayor que el rango del microcontrolador del Arduino. Esto provocaba el valor que tomaba el conversor fuera constantemente el máximo permitido por el Arduino (1023) ya que no era capaz de medir la variación que captaba el sensor al ponerle encima los diferentes pesos.

Para intentar encontrar el origen de este problema montamos el circuito de la Figura 5.11.

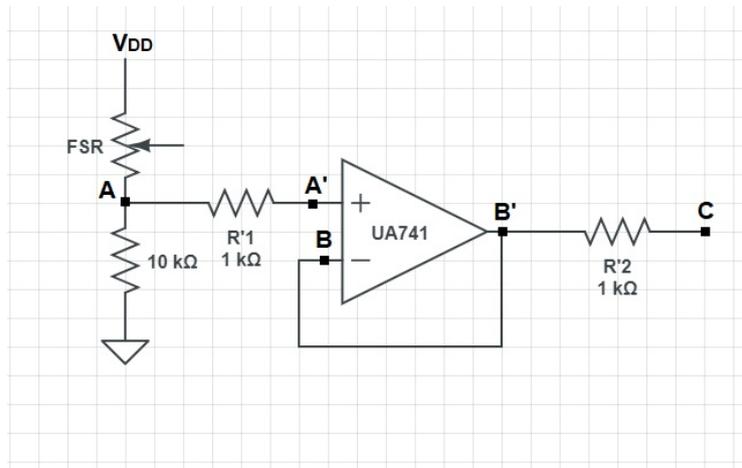


Figura 5.11: Circuito utilizado para detectar los fallos del UA741.

Tomamos valores del voltaje en los diferentes puntos señalados en la figura utilizando la masa de 655.6 gramos, los cuáles mostramos en la Tabla 5.2. Se harán pequeñas variaciones del circuito para poder medir el voltaje en los diferentes puntos. Primero realizaremos una medida con y sin peso, sin colocar las resistencias R'_1 y R'_2 . Luego colocaremos las resistencias y haremos otras dos medidas con y sin peso.

Medidas(V)	A	A'	B	B'	C
Sin peso	0	0	1.889	1.889	-
Con peso	2.7	2.7	2.7	2.7	-
Sin peso + $R'_1 R'_2$	0	0	1.886	1.886	1.886
Con peso + $R'_1 R'_2$	2.82	2.83	2.83	2.83	2.84

Tabla 5.2: Información recogida de las medidas realizadas con el UA741.

Los datos tomados nos verifican que cuando los sensores no tienen ningún peso encima, el voltaje de salida del Op Amp es no nulo. Valoramos cuál es la causa de este problema en el Apartado 5.5.

Posteriormente, utilizamos un **TL082** [17] que posee algunas características mejores. La etapa de entrada tiene transistores JFET en vez de BJT, como es el caso del UA741, lo que hace que las corrientes de polarización de entrada sean del orden de pA en vez de nA.

Como podemos ver en la Figura 5.12 está formado por dos amplificadores operacionales, aunque en nuestro caso sólo haremos uso de uno de ellos.

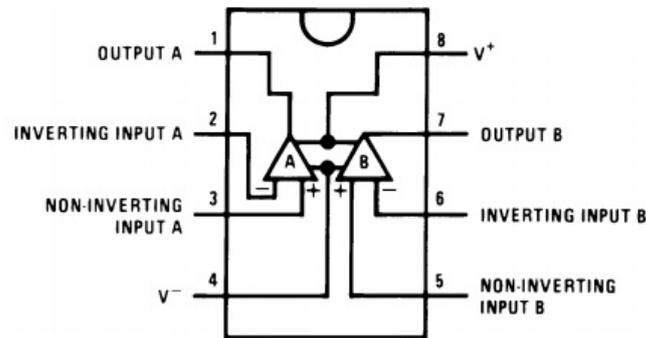


Figura 5.12: Diagrama de conexiones del TL082 [18].

Una vez colocado el nuevo amplificador operacional en el circuito acondicionador, procedemos a realizar las medidas con las diferentes masas y obtuvimos una serie de valores que compararemos con los tomados sin amplificador los cuales recogemos en la Figura 5.13.

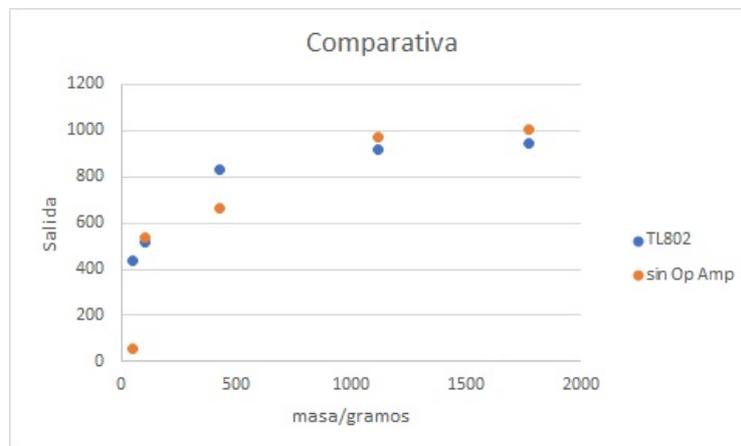


Figura 5.13: Comparación de los datos tomados con y sin amplificador operacional TL082.

Los datos mostrados son los correspondientes a un sólo sensor, ya que en un principio estas medidas se hicieron con el objetivo de demostrar que la etapa buffer no influía en la realización de las medidas y así poder eliminarla para simplificar el montaje final. Como podemos apreciar, cuando colocamos el Op Amp el rango de medida se reduce a la mitad, ya que cuando no tenemos peso sobre la báscula el valor medido es distinto de cero, que sería lo esperado.

También, tal y como hicimos con el anterior Op Amp, analizamos el comportamiento del TL082 siguiendo el mismo proceso con el circuito de la Figura 5.14.

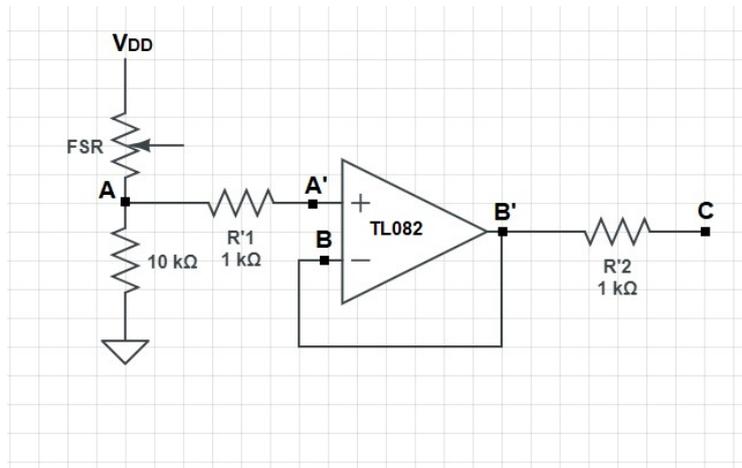


Figura 5.14: Circuito utilizado para detectar los fallos del TL082.

Tomamos valores del voltaje en los diferentes puntos señalados en la figura utilizando la masa de 655.6 gramos, los cuáles mostramos en la Tabla 5.3:

Medidas(V)	A	A'	B	B'	C
Sin peso	0.0443	0.0443	4.53	4.53	-
Con peso	2.78	2.78	2.76	2.76	-
Sin peso + $R'_1 R'_2$	0.0442	0.0486	4.53	4.53	4.52
Con peso + $R'_1 R'_2$	2.8	2.83	2.81	2.81	2.82

Tabla 5.3: Información recogida de las medidas realizadas con el TL082.

En este caso tenemos una pequeña corriente de entrada, que es un efecto no ideal que debemos evitar en los Op Amp. Además vemos que el voltaje medido en los casos “sin peso” es prácticamente el límite de rango de medida, igual que en el caso del UA741, por lo que no podremos realizar muchas medidas sin llegar a saturación. Por estos motivos, descartamos el amplificador operacional TL082 y pasamos a comprobar si con un circuito compuesto simplemente por un divisor de voltaje sería una opción más adecuada.

Una vez descartadas las opciones anteriores, eliminamos la etapa buffer y comenzamos a tomar medidas utilizando como circuito acondicionador un divisor de tensión. Comprobamos que esta opción era la más adecuada utilizando el circuito de la Figura 5.15 y tomando diferentes medidas del voltaje con la masa de 655.6 gramos.

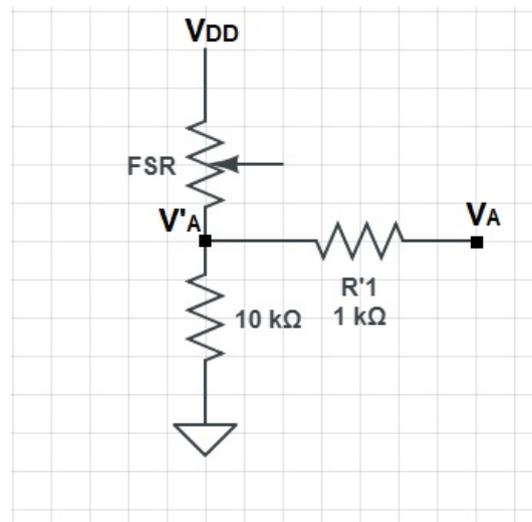


Figura 5.15: Circuito utilizado para detectar los fallos del divisor de tensión.

En primer lugar realizamos medidas con y sin peso, sin colocar la resistencia R' . Posteriormente tomamos otra medida utilizando dicha resistencia. Los datos tomados los incluimos en la Tabla 5.4.

Medidas(V)	A	A'
Sin peso	0	-
Con peso	2.8	-
Sin peso + R'	2.81	2.81

Tabla 5.4: Información recogida de las medidas realizadas con el divisor de tensión.

En este caso, no se planteó ningún problema y se pudieron hacer las medidas en la plataforma grande con los diferentes pesos. Los datos tomados son los que se muestran en la Tabla 6.1.

5.5. Conclusiones

A continuación resumimos el proceso llevado a cabo para decidir qué circuito acondicionador era el más óptimo en nuestro caso.

Comenzamos probando el circuito divisor de tensión con amplificador operacional, ya que es la configuración recomendada por el fabricante del sensor. Probamos dos tipos diferentes de Op Amp, el **UA741** y el **TL082**.

Con el **UA741** nos aparecían efectos no ideales del Op Amp que hacían que se añadiera un offset tan grande que provocaba que las medidas comenzarían casi al límite del rango de medida. Es decir, V_o cuando no colocábamos ningún peso encima era de 1.9V, que es aproximadamente la mitad del rango del microprocesador del Arduino. Esto nos provocaba que al realizar el proceso de medida llegáramos enseguida a saturación, ya que el Arduino no era capaz de medir el cambio ya que estaba fuera de su rango.

Con el **TL082** nos ocurría algo similar, aunque en este caso el offset añadido por el

Op Amp no era tan grande y si pudimos realizar algunas medidas que podemos ver en la Figura 5.13. Se descartó también este tipo de Op Amp por el hecho de que se desperdiciaba mucho rango de medida.

Posteriormente comprobamos que este problema pudiera ser debido a que estábamos utilizando los Op Amp utilizando un voltaje entre 0 y 5V (single supply), siendo la opción correcta usarlos con fuentes de tensión externas, adicionales a las proporcionadas por la placa de Arduino, que nos aportan un voltaje $V_{cc}^+ = 5V$ y $V_{cc}^- = -5V$ (dual supply).

Este problema se podría solucionar utilizando otro tipo de Op Amp, como por ejemplo el LM336 [19], que funcionara en single supply ó alimentando correctamente los Op Amp que ya habíamos utilizado.

Por lo tanto, se descartó la opción de utilizar Op Amp y realizamos las medidas sólo con el circuito divisor de tensión. Este fue la opción seleccionada, y las medidas realizadas con dicho circuito son las que podemos ver en la Tabla 5.1.

Respecto a los sensores, se ha comprobado que son muy sensibles con respecto a la posición en la que se coloca el peso en la plataforma. Además la respuesta posee una gran variabilidad por lo que quizá no sea el tipo de sensor más adecuado para llevar a cabo la idea inicial que se planteaba. Estos sensores fueron seleccionados por su bajo coste frente a otras alternativas mucho más caras, tales como las células de carga.

Capítulo 6

Fabricación báscula

6.1. Diseño y fabricación de las piezas

En este apartado describiremos el proceso seguido para diseñar y fabricar el soporte que utilizaremos durante el resto del proceso, tanto para la calibración como para la toma de medidas.

Una vez comprobado que el soporte individual es óptimo para lograr nuestros objetivos, creamos una nueva plataforma Figura 6.1 que esencialmente es una combinación de cuatro de las individuales utilizando de nuevo la herramienta *Tinkecard* [8]

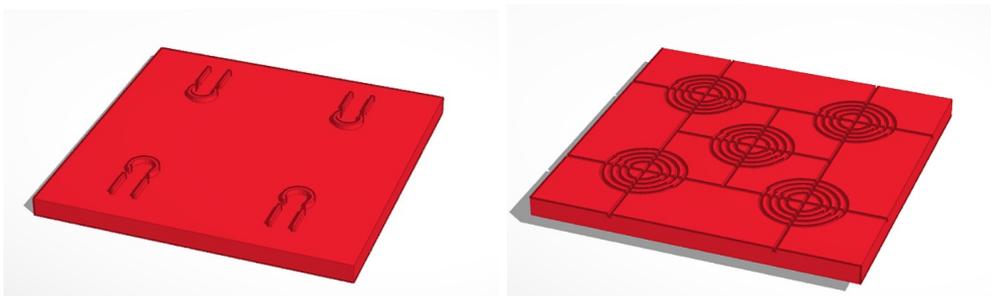


Figura 6.1: Diseño realizado en *Tinkecard* para la plataforma que utilizaremos con los cuatro sensores elegidos.

Utilizando estas nuevas piezas realizamos el montaje final de nuestro prototipo que podemos ver en la Figura 6.2:

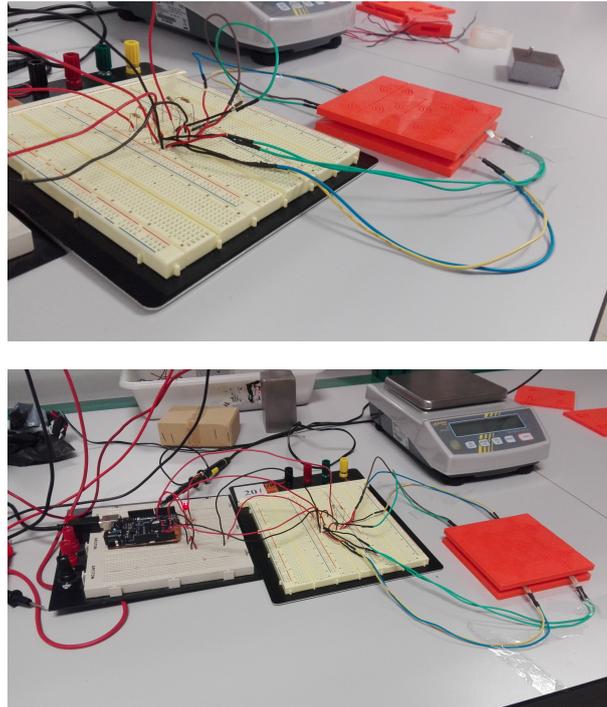


Figura 6.2: Montaje final de nuestro prototipo incluyendo la fase de acondicionamiento de señal.

6.2. Medidas realizadas y análisis de los datos tomados.

Para comprobar el funcionamiento de nuestro prototipo realizamos diferentes medidas variando las masas. Para cada masa realizamos nueve medidas, podemos ver las posiciones señaladas en la Figura 6.3.

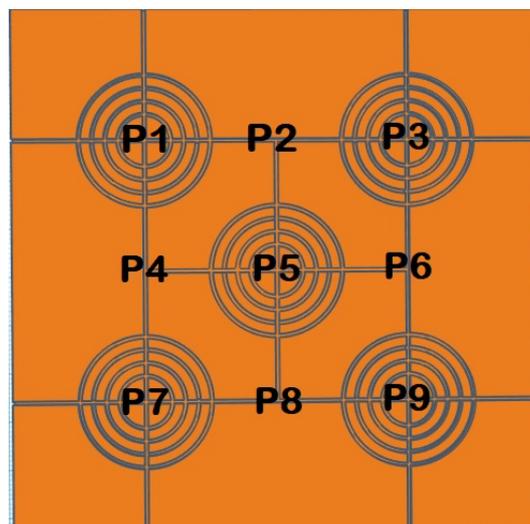


Figura 6.3: Esquema de las posiciones donde hemos realizado las medidas.

Los datos tomados con el acondicionamiento del divisor de tensión sin el Op Amp, podemos verlos en la Tabla 6.1 que añadimos a continuación.

	Peso/gramos			
		50	100	655,60
P1	sensor 5	0.3 ± 0.7	0.4 ± 0.8	0.3 ± 0.7
	sensor 6	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
	sensor 1	90 ± 1	145 ± 14	702 ± 6
	sensor 10	1 ± 1	1 ± 1	2 ± 1
P2	sensor 5	59 ± 2	114 ± 3	241 ± 3
	sensor 6	3 ± 3	37 ± 5	53 ± 4
	sensor 1	63 ± 1	82 ± 2	500 ± 7
	sensor 10	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
P3	sensor 5	110 ± 2	125 ± 3	104 ± 3
	sensor 6	1 ± 1	23 ± 1	589 ± 8
	sensor 1	14 ± 1	55 ± 1	1 ± 1
	sensor 10	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
P4	sensor 5	0.3 ± 0.6	0.3 ± 0.5	13 ± 12
	sensor 6	0.9 ± 1	1.4 ± 1.6	1 ± 1
	sensor 1	67 ± 0.7	95 ± 1	675 ± 3
	sensor 10	0.9 ± 0.9	1 ± 1	665 ± 3
P5	sensor 5	0.4 ± 0.7	60 ± 2	129 ± 2
	sensor 6	28 ± 4	70 ± 2	131 ± 3
	sensor 1	51 ± 1	68 ± 1	280 ± 8
	sensor 10	0.8 ± 1	0.9 ± 1	74 ± 16
P6	sensor 5	59 ± 2	114 ± 3	309 ± 6
	sensor 6	90 ± 2	115 ± 2	476 ± 4
	sensor 1	0.7 ± 0.7	0.6 ± 0.6	1 ± 1
	sensor 10	0.9 ± 0.9	0.9 ± 0.9	1 ± 1
P7	sensor 5	0.3 ± 0.5	0.3 ± 0.5	14 ± 14
	sensor 6	1 ± 1	1 ± 1	1 ± 1
	sensor 1	33 ± 1	52 ± 1	294 ± 2
	sensor 10	1 ± 1	1 ± 1	789 ± 14
P8	sensor 5	0.5 ± 0.7	0.3 ± 0.6	5 ± 4
	sensor 6	0.8 ± 0.7	107 ± 2	328 ± 7
	sensor 1	0.8 ± 0.7	0.7 ± 0.7	1 ± 1
	sensor 10	0.8 ± 1	0.8 ± 1	315 ± 5
P9	sensor 5	0.3 ± 0.6	0.5 ± 0.8	104 ± 3
	sensor 6	95 ± 3	118 ± 2	589 ± 8
	sensor 1	0.7 ± 0.7	0.8 ± 0.6	1 ± 1
	sensor 10	0.8 ± 1	0.8 ± 0.9	1 ± 1

Tabla 6.1: Datos recogidos por los sensores (cuentas) para las diferentes medidas.

Para visualizar los datos de la Tabla 6.1 de una forma más intuitiva, incluimos las siguientes gráficas. Están agrupadas de cuatro en cuatro, situadas en la misma posición que estarían los sensores en la plataforma grande que hemos utilizado para realizar las medidas con las tres masas indicadas y mostrando el valor medido por

el sensor en función de la posición del peso.

Comenzamos por las gráficas correspondientes a la medida de la masa de 50 gramos que podemos ver en la Figura 6.4.

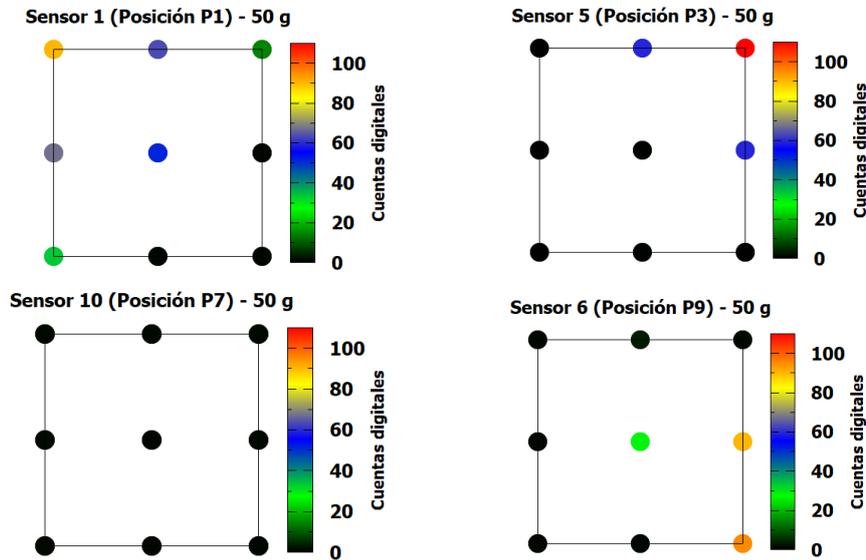


Figura 6.4: Representación de los resultados obtenidos con la masa de 50 gramos en función de la posición donde se deja el peso.

Para este caso, vemos que los sensores 1, 5, 6 tienen una respuesta bastante similar, alta respuesta cuando el peso está sobre ellos y gradualmente menos según se coloca el peso en posiciones más alejadas. Sin embargo, el sensor 10 no recibe ningún estímulo durante el proceso de medición. Esto se puede deber a que la pieza superior de la báscula no estuviera presionando el sensor correctamente.

Si comparamos estos resultados de la posición P5 (centro del soporte), con las medidas realizadas individualmente por cada sensor recogidas en la Tabla 5.1 concluimos podemos decir que el sensor 6 recibe el 28 % de la respuesta, en comparación con que obtenida para el caso individual. El sensor 1 recibe el 61 %, mientras que el sensor 5 y 10 tienen una respuesta de menos del 1 %.

Para el caso de la masa de 100 gramos vemos el resultado obtenido en la Figura 6.5.

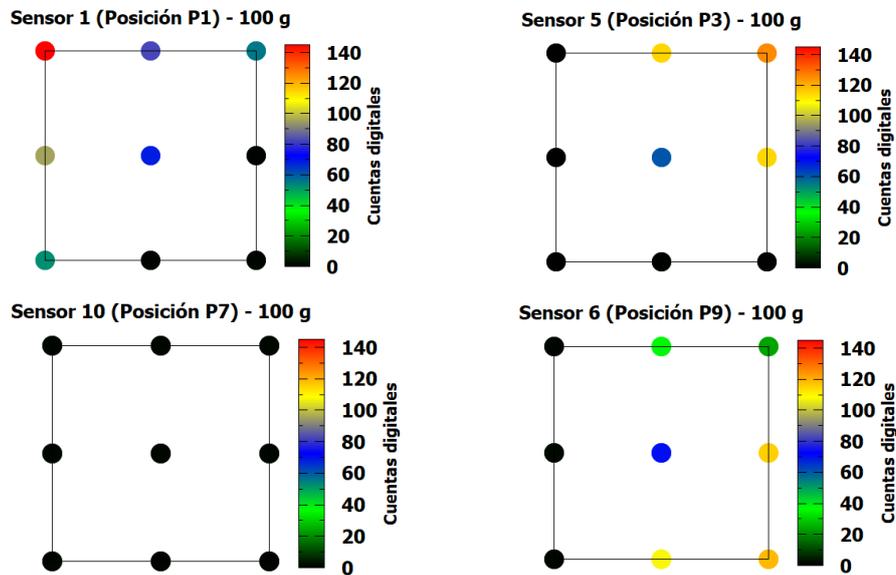


Figura 6.5: Representación de los resultados obtenidos con la masa de 100 gramos en función de la posición donde se deja el peso.

Vemos que todos los sensores tienen una respuesta similar excepto el sensor 10, cuando el peso se coloca en la posición P5. Esto sucede al problema que planteamos para el caso de 50 gramos.

En este caso la respuesta de los sensores 1, 5, 6 cuando se coloca el peso en el centro de la plataforma es bastante similar con un 24%, 23%, 28% respectivamente, en comparación con la respuesta que obtuvimos en el caso individual. Resultado bastante lógico si tenemos en cuenta que una primera idea sería suponer que el peso se reparte equitativamente entre los cuatro sensores cuando se coloca en medio de la plataforma.

Por ultimo, incluimos la Figura 6.6 con las gráficas obtenidas para la masa de 655.6 gramos :

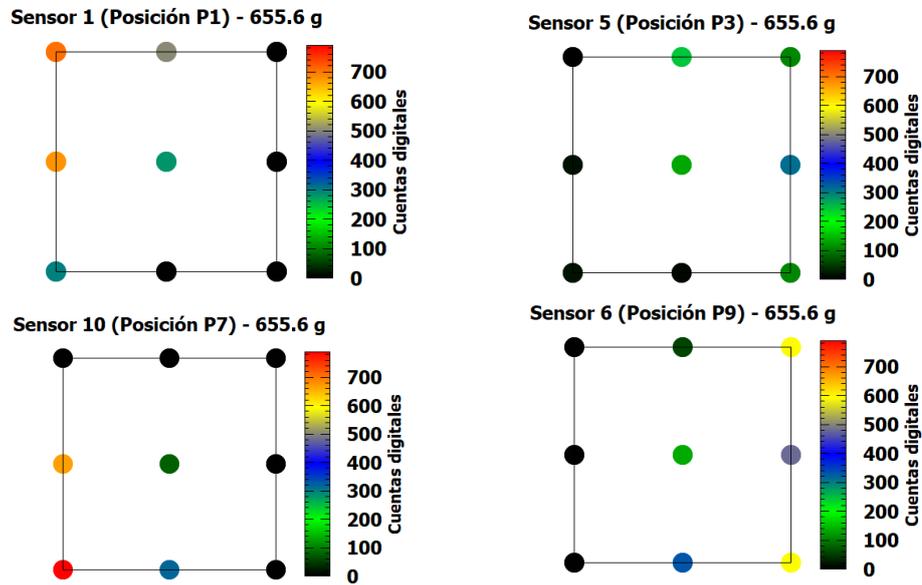


Figura 6.6: Representación de los resultados obtenidos con la masa de 655.6 gramos.

En este caso, al analizar los resultados obtenidos en la posición P5, el sensor 1 presenta un 37% de la respuesta en comparación con los datos obtenidos para el caso individual que pudimos ver en la Tabla 5.1.

El resto de los sensores tienen una efectividad menor pero bastante similar, con una respuesta en torno al 14% en comparación con las medidas que realizamos para la caracterización de cada sensor.

Por lo tanto, podemos concluir este análisis diciendo que el funcionamiento de nuestra báscula es más eficaz para masas elevadas tal y como hemos podido comprobar a través de las representaciones gráficas incluidas en esta sección.

Capítulo 7

Conclusiones

En este trabajo de fin de grado se pretendía analizar los diferentes tipos de circuitos que podemos utilizar para acondicionar una señal eléctrica proporcionada por un sensor de fuerza.

En este capítulo se exponen las conclusiones que pueden extraerse de todo el proceso realizado en este trabajo, así como algunas ideas que ayudarían a mejorar algunos aspectos de cara al futuro.

Primeramente hemos analizado el uso de los amplificadores y cuál sería su papel dentro del acondicionamiento de señales. Realizan funciones como: ampliar la intensidad de la señal, adaptar impedancias o ayudar a eliminar el ruido en situaciones de medida más reales.

Por otro lado, se hizo un estudio de las diferentes posibilidades que teníamos para acondicionar la respuesta resistiva variable que nos daba el sensor al colocar masas de distintas sobre él. Aplicamos las ideas incluidas en el apartado anterior para analizar el funcionamiento de varios circuitos acondicionadores, tanto opciones más sencillas como el divisor de tensión, como alternativas más complejas haciendo uso de amplificadores operacionales o de instrumentación.

A continuación, utilizamos la información proporcionada por el fabricante del sensor de fuerza elegido [6] junto con la descrita en capítulos anteriores para hacer una demostración práctica de todo ello a través de la fabricación de una báscula. Se comenzó haciendo una caracterización individual de todos los sensores disponibles para comprobar su funcionamiento. Después probamos diferentes tipos de circuitos acondicionadores descritos en este trabajo hasta dar con el más idóneo para nuestro caso. Todos los imprevistos ocurridos durante esta etapa quedan recogidos en el Apartado 5.5.

Por último, se comprobó cómo respondían los sensores en el caso de la fabricación de una báscula en la que se utilizaron cuatro de esos sensores junto con una plataforma diseñada exclusivamente para este proyecto a partir de una impresora 3D. Con esto se pudo ver que el resultado era mucho más satisfactorio cuando se colocaban

las muestras en la posición central y en los casos en los que se utilizaron masas de magnitud elevada. Se comprobó que los sensores son muy sensibles con respecto a la posición en la que se coloca el peso en la plataforma. Además la respuesta posee una gran variabilidad por lo que quizá no sea el tipo de sensor más adecuado para llevar a cabo la idea inicial que se planteaba. Dejamos pendiente la posibilidad de utilizar tipo de sensores más adecuados, como las células de carga, que consiguiera unos mejores resultados en comparación con los obtenidos con los sensores FSR 400 [6].

7.1. Líneas futuras.

Como línea de futuro dejamos abierta la posibilidad de crear un software capaz de dar cualquier resultado comparando la respuesta de los sensores individuales con la que se obtiene al colocarlos en la plataforma de medida. Por otro lado, se deja pendiente el estudio del proceso de acondicionamiento a través de amplificador operacional LM336 [19] que trabaja en modo single supply. También se podrían optimizar los resultados obtenidos mejorando la fabricación de las piezas creadas por la impresora 3D, ya que se ha visto que no era del todo efectiva y ocasionó problemas al realizar las medidas.

Bibliografía

- [1] MAYNÉ, J. (2003): *Sensores acondicionadores y procesadores de señal. SILICA*
- [2] ROSE, K., ELDRIDGE, S. Y CHAPIN, L. (2015): *El Internet de las cosas - Una breve reseña. Internet Society*
- [3] LEON 3D. ALL ABOUT 3D PRINTING <https://www.leon-3d.es>
- [4] PALLÀS ARENY, RAMÓN (2004): *Sensores y acondicionadores de señal, Marcombo Boixareu Editores.*
- [5] BLAKE, K. (2005): *Aplication Note 990. Analog Sensor Conditioning Circuits. Microchip Technology*
- [6] INTERLINK ELECTRONICS *FSR 400 Series Datasheet*
- [7] ARDUINO INTRODUCTION <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>
- [8] TINKECARD <http://www.educoteca.com/tinkercad.html>
- [9] BAKER, B.C (1999): *Aplication Note 722. Operational Amplifier Topologies and DC Specifications. Microchip Technology*
- [10] PARDO COLLANTES, D. Y BAILÓN VEGA, L.A (2007): *Elementos de electrónica. Universidad de Valladolid*
- [11] PÉREZ GARCÍA, MIGUEL A. (2004): *Instrumentación Electrónica. Ed Thomson*
- [12] NARES, CARLOS. HETER-PRO STORE <https://hetprostore.com/TUTORIALES/sensor-de-fuerza-o-presion-mf01/>
- [13] HAMBLEY, ALLAN R. (2006): *Electrónica. Prentice-Hall*
- [14] KITTEL, CHARLES (2005): *Introduction to solid state physics*
- [15] NUEDECK, GEROLD W. (1989): *The PN juntion diode. Volume II. Addison-Wesley publishing company*
- [16] AMPLIFICADOR OPERACIONAL UA741 *SGS-Thomson microelectronics*
- [17] TEXAS INSTRUMENTS DATASHEET *Amplificador operacional TL082*
- [18] TEXAS INSTRUMENTS (2013) *TL082 Wide Bandwidth Dual JFET Input Operational Amplifier*
- [19] TEXAS INSTRUMENTS DATASHEET *Amplificador Operacional LM336*

- [20] ASHLOCK, D. Y WARREN, A. (2015): *Guía de acondicionamiento de señal para ingenieros. NATIONAL INSTRUMENTS*
- [21] DRAKE MOYANO, J. M. (2005): *Departamento de electrónica y Computadores. Apuntes instrumentación electrónica de comunicaciones (ETSIT, Universidad de Cantabria)*

Anexo A

Código utilizado para la lectura de datos del sensor a través del Arduino [12]

```
int AnalogPin = 0; // Sensor conectado a Analog 0
int LEDpin = 6; // LED conectado a Pin 6 (PWM)
int ResRead; // La Lectura de la Resistencia por División de Tensión
int BrilloLED;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  // Enviaremos la información de depuración a través del Monitor de Serial
  pinMode(LEDpin, OUTPUT);
}
void loop()
{
  ResRead = analogRead(AnalogPin);
  // La Resistencia es igual a la lectura del sensor (Analog 0)

  Serial.println(ResRead);

  BrilloLED = map(ResRead, 0, 1023, 0, 255);
  //Cambiar el rango de la lectura analógica (0-1023)
  // Utilizamos en analogWrite 8 bits (0-255) configurados en el map
  analogWrite(LEDpin, BrilloLED);

  delay(10);
  //Diez ms de espera en cada lectura
}
```

Código utilizado para el almacenamiento de datos

```
from pip._internal import main as pipmain
import platform
import os
from os.path import expanduser
import sys
try:
import serial
except ImportError as err:
pipmain(['install', 'pyserial'])
finally:
import serial

# Puerto USB de Arduino
usb_port = 'COM3'
# Baudrate de puerto Serial de Arduino
baudrate = 9600
# Nombre de fichero de salida
output_filename = 'values.csv'
output_filepath = os.path.join(expanduser('~'), 'Documents', output_filename)
# Número de valores que toma
n_values = 100

ser = serial.Serial(usb_port, baudrate)
values = []

for i in range(n_values):
try:
value = ser.readline().decode('utf-8') # "num1 num2 num3 num4"
value = value.split() # [num1,num2,num3,num4]
value = ';'.join(value) # "num1,num2,num3,num4"
values.append(value)
except ValueError as err:
print("Unable to read ", value)

ser.close()
print("Ready: writing values")
file = open(output_filepath, 'w+')
for value in values:
file.write(str(value))
file.write('\n')
file.close()

print("Values saved at: ", output_filepath)
```

