



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

---

## DISEÑO Y REALIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA LA MEDIDA DEL UMBRAL DE DOLOR EN PACIENTES CON LESIONES MUSCULARES

**TRABAJO FINAL DEL**

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

**REALIZADO POR**

Sergio Marín Gimeno

**TUTORIZADO POR**

Dr. Salvador Ponce Alcántara

**CURSO ACADÉMICO: 2019/2020**

## **AGRADECIMIENTOS**

Dedicar un agradecimiento en especial a mi madre, ese apoyo incondicional ha hecho posible todo lo que este trabajo significa. Y es que, como dice mi hermano, Madre no hay más que una.

Agradecer también todo el trabajo y esfuerzo dedicado por mi tutor. Gracias, de verdad, Salva.

Además agradezco todo lo que esta titulación me ha enseñado, lo que me ha hecho evolucionar y las personas que me ha hecho conocer.

Y por último hacer una mención especial a esa familia que se elige. Ellas y ellos saben perfectamente quiénes son.

## Resumen

El algómetro o dolorímetro de presión es un instrumento de medición utilizado para conocer el umbral de dolor en pacientes con problemas musculares, en articulaciones, en tendones y ligamentos, o con hematomas. Se trata de un dispositivo que posee una notable importancia para verificar la evolución de pacientes con las comentadas patologías.

Permite conocer la presión mínima a partir de la cual el paciente siente dolor. Dicha presión se aplica con el comentado dispositivo de forma gradual y creciente.

El algómetro consiste en un medidor de presión de tamaño reducido, que puede manejarse con una mano, con un eje terminado en una punta redondeada con una superficie de 1 cm<sup>2</sup>. Dicha superficie se sitúa en la zona del cuerpo sobre la que se desea conocer el comentado umbral de dolor.

El algómetro se está realizando en colaboración con el Servicio de Medicina Física y Rehabilitación del Hospital General Universitario de Valencia. Cabe destacar que los modelos existentes en el mercado poseen un coste notable (superior a los XXX€ en la mayoría de los casos). Sin embargo, el que se pretende crear en el presente trabajo tendrá un precio reducido junto con unas altas prestaciones.

De acuerdo con lo expuesto, el presente Trabajo de Fin de Grado consistirá en el diseño y realización de un algómetro digital con un rango de medición entre 0 y 10 kg, una resolución igual o inferior a 50 gr, unidades de medida elegibles entre libras, kg y Newton, memoria de la presión máxima aplicada, medidor del nivel de batería disponible, y con un uso sencillo.

**Palabras clave:** Dispositivo digital, resolución, sensor de presión, dolor, músculos, rehabilitación, Arduino, batería

## **Abstract**

The algometer or dolorimeter is an instrument used to check the pain threshold in patients with muscular problems, in joints, in tendons and ligaments, or with bruises. This device has a considerable importance in order to verify the evolution of patients with the aforementioned pathologies.

It allows to know the minimum pressure from which the patient feels pain. That pressure is applied with the mentioned device in a gradual and increasing way. The algometer consists of a small pressure gauge, which can be used with one hand, with a shaft ending in a rounded tip with a surface area of 1 cm<sup>2</sup>. This surface is located in the area of the body where we want to know the aforementioned pain threshold.

This algometer is being carried out in collaboration with the Physical Medicine and Rehabilitation Service of the General University Hospital of Valencia. It should be noted that the existing models on the market have a remarkable cost (more than XXX€ in most cases). However, the one intended to create in this work will have a reduced cost accompanied by high performance.

Related to the previous paragraph, this Final Degree Project will consist on the design and development of a digital algometer with a measurement range between 0 and 10 kg, a resolution equal or lower than 50 gr, eligible units between pounds, kg and Newton, memory of the maximum applied pressure, battery level meter, and easy to be used.

**Keywords:** Digital device, resolution, pressure sensor, pain, muscles, rehabilitation, Arduino, Battery

## Resum

El algòmetre o dolorímetre de pressió és un instrument de mesurament utilitzat per a conèixer el llindar de dolor en pacients amb problemes musculars, en articulacions, en tendons i lligaments, o amb hematomes. Es tracta d'un dispositiu que posseeix una notable importància per a verificar l'evolució de pacients amb les comentades patologies.

Permet conèixer la pressió mínima a partir de la qual el pacient sent dolor. Aquesta pressió s'aplica amb el comentat dispositiu de manera gradual i creixent.

El algòmetre consisteix en un mesurador de pressió de grandària reduïda, que pot manejar-se amb una mà, amb un eix acabat en una punta arrodonida amb una superfície de 1 cm<sup>2</sup>. Aquesta superfície se situa en la zona del cos sobre la qual es desitja conèixer el comentat llindar de dolor.

Este algòmetre s'està realitzant en col·laboració amb el Servei de Medicina Física i Rehabilitació de l'Hospital General Universitari de València. Cal destacar que els algòmetres existents en el mercat posseeixen un cost notable (superior als XXX€ en la majoria de casos). No obstant, el que es pretén crear en el present treball tindrà un cost reduït acompanyat d'unes altes prestacions.

D'acord amb l'exposat, el present Treball de Fi de Grau consistirà en el disseny i realització d'un algòmetre digital amb un rang de mesurament entre 0 i 10 kg, una resolució igual o inferior a 50 gr, unitats de mesura elegibles entre lliures, kg i Newton, memòria de la pressió màxima aplicada, mesurador del nivell de bateria disponible, i amb un ús senzill.

**Paraules clau:** Dispositiu digital, resolució, sensor de pressió, dolor, músculs, rehabilitació, Arduino, Bateria

## Índice

1.	Introducción.....	9
1.1.	Objeto del trabajo.....	9
1.2.	Contexto.....	10
1.3.	Análisis del mercado.....	11
1.3.1.	Revisión de algómetros presentes en el mercado.....	15
2.	Diseño.....	18
2.1.	Introducción.....	18
2.2.	Sensor de presión.....	18
2.3.	Etapa acondicionamiento.....	29
2.4.	Microcontrolador.....	32
2.5.	Indicador nivel batería.....	37
2.6.	Módulo Pantalla.....	45
2.7.	Diagrama de bloques.....	49
2.8.	Programa.....	50
3.	Realización experimental.....	56
3.1.	Montaje.....	56
3.2.	Prototipo.....	60
3.3.	Calibración del equipo.....	64
4.	Conclusiones y puntos de mejora.....	67
5.	Planos.....	69
6.	Pliego de condiciones.....	74
7.	Presupuesto.....	76
8.	Bibliografía.....	78
	Referencias.....	78
	Anexos.....	79
	• Hojas de características de los componentes electrónicos.....	79

## Índice de Figuras

Figura 1. Emmanuel Libmann(1872-1946). Físico Estadounidense especializado en el campo de la medicina.....	11
Figura 2. Algómetro análogo comercial.....	12
Figura 3. Algómetro digital comercial 4.....	13
Figura 4. Algómetro digital AlgoMed 5.....	13
Figura 5. Algómetro digital Palpatrónico.....	15
Figura 6. Algómetro inalámbrico Commander Echo.....	15
Figura 7. Orchid Scientific's Algometer.....	16
Figura 8. Algómetro digital comercial Pain Test™ FPX 25.....	16
Figura 9. Algómetro Digital Wagner FPIXTM.....	17
Figura 10. Diagrama de bloques del algómetro planteado en este Proyecto.....	18
Figura 11. Funcionamiento de una célula de carga hidráulica.....	19
Figura 12. Esquema de una célula de carga neumática.....	20
Figura 13. Representación de la variación del valor de la resistencia en galgas extensiométricas 10 .....	21
Figura 14. Puente de Wheatstone.....	22
Figura 15. Célula de carga de compresión.....	23
Figura 16. Célula de carga de tensión/compresión.....	23
Figura 17. Célula de carga viga en S.....	23
Figura 18. Célula de carga de viga flexible.....	24
Figura 19. Célula de carga de plataforma y punto único.....	24
Figura 20. Célula de carga de cartucho.....	24
Figura 21. Célula de carga de viga en S.....	26
Figura 22. Celda de carga de viga flexible.....	26
Figura 23. Célula de carga de tipo botón.....	27
Figura 24. Célula de carga de tipo plataforma.....	27
Figura 25. Dispositivo HX711, necesario para adaptar la señal procedente de la celda de carga, de cara a su posterior conexión con un microcontrolador.....	29
Figura 26. Esquema de una comunicación típica I2C con un maestro y tres esclavos.....	30
Figura 27. Gráfico con las ondas SDA y SCL del bus de conexiones I2C .....	31
Figura 28. Placa de uno de los modelos más extendidos de Arduino, la Arduino UNO.....	33
Figura 29. Comparativa entre las placas de Arduino UNO y Arduino NANO.....	34
Figura 30. Esquema de la placa Arduino NANO 15 .....	36
Figura 31. Pila de 9V junto a su portapilas .....	38
Figura 32. Pilas AA de 1.5V junto a portapilas.....	38
Figura 33. Baterías recargables AA de 1.2V.....	39
Figura 34. Baterías de litio 18650 de 3.7V.....	39
Figura 35. Dos tipos de PowerBank de 5V.....	40
Figura 36. Dos tipos de baterías de NIMH presentes en el mercado.....	41

Figura 37. Batería de Litio de 3.7V.....	41
Figura 38. Módulo de carga TP4056.....	43
Figura 39. Módulo DFR0563 .....	44
Figura 40. Módulo MAX17043.....	45
Figura 41. Módulo LCD1602.....	46
Figura 42. Controlador LCD HD44780.....	46
Figura 43. Panel OLED SSD1306.....	46
Figura 44. Esquema de colores del módulo SSD1306.....	47
Figura 45. Esquema-representación de los ejes de coordenadas por pixeles del módulo SSD1306.....	48
Figura 46. Diagrama de bloques del Proyecto.....	49
Figura 47. Célula de carga de tipo viga de 10 kg.....	56
Figura 48. Vista superior del módulo HX711.....	57
Figura 49. Conexiones posibles de un pulsador a una entrada digital del microcontrolador: (a) a la referencia, o (b) al valor positivo de la fuente de alimentación.....	58
Figura 50. Interruptor de encendido/apagado.....	59
Figura 51. Vista superior del algómetro prototipo.....	60
Figura 52. Vista lateral y trasera del algómetro prototipo.....	61
Figura 53. Usuario manejando el Algómetro prototipo.....	62
Figura 54. Fotografía de la Pantalla y los pulsadores del algómetro prototipo.....	63
Figura 55. Parte inferior del algómetro prototipo.....	63
Figura 56. Pendiente de una recta que pasa por dos puntos.....	64
Figura 57. Extracto del código de programación diseñado para el presente Proyecto.....	65
Figura 58. Pantallas del Modo Calibración del algómetro. (a): Entrada en el modo de calibración. (b) y (c): Indicación de la colocación del primer y segundo peso.....	66

## 1. Introducción

### 1.1 Objeto del trabajo

El presente trabajo tiene como objetivo el diseño de un algómetro digital (también conocido como dolorímetro). Se trata de un instrumento utilizado para conocer el umbral de dolor en pacientes con problemas musculares, en articulaciones, en tendones y ligamentos, o con hematomas. Por ello, tiene una notable importancia para verificar la evolución de pacientes con las patologías comentadas. Para conocer dicho umbral, el instrumento posee una superficie circular para transferir una fuerza en forma de presión a los tejidos profundos que se desean examinar. De este modo se puede medir el umbral de presión y cuantificar el dolor que siente el paciente. La evolución de dicho dolor mediante la aplicación de medicinas paliativas y/o ejercicios de rehabilitación darán información al médico sobre los pasos a seguir de cara a la recuperación final del paciente.

En general, se puede clasificar los tipos de algómetros en dos grandes grupos: los analógicos y los digitales. Los analógicos basan su funcionamiento en resortes de forma totalmente analógica, en cuanto a los digitales a pesar de que poseen un sensor de presión analógico, toda la interfaz con el usuario está construida con componentes digitales como un módulo de pantalla y un microcontrolador. En cuanto a su precio puede oscilar entre los 300€ y los 2000€ independientemente del tipo que sean aunque en general los de más alto precio suelen ser digitales. El precio dependerá de muchos factores como el tipo de modelo, la sensibilidad, el rango de medida, los tipos de comunicación que tenga con el software de control (Bluetooth, USB, etc.), el fabricante y el país de origen.

Los componentes que posee el algómetro digital son una célula de carga (el sensor de presión), un microcontrolador (encargado de recoger los datos procedentes del sensor de presión para procesarlos), una pantalla(para mostrar la información en tiempo real al médico), una batería externa(necesaria para alimentar los componentes electrónicos), además de otros componentes que sean necesarios para cumplir nuestras especificaciones. Como por ejemplo, un módulo encargado de medir el nivel de la batería(capaz de comunicarse con el microcontrolador), otro módulo capaz de cargar la batería mediante una entrada Micro USB o similar, además de los pulsadores necesarios para comunicarnos con la interfaz programada. También se hace necesario el diseño del propio circuito de conexión además de realizar la programación correspondiente.

El microcontrolador que se utilizará será Arduino debido a su bajo coste, su simplicidad y las facilidades que nos ofrece su software libre. Además cabe destacar que se realizará el diseño tratando de que las prestaciones sean similares o superiores al de los equipos comerciales, pero siempre manteniendo un bajo coste.

## 1.2 Contexto

En el campo de la medicina es muy frecuente la utilización de diversos equipos empleados para el análisis de la salud de los pacientes. Estos equipos se encargan de cuantificar diferentes magnitudes físicas como por ejemplo la temperatura, el peso, la presión arterial, etc. El uso de dichos equipos y sistemas electrónicos, ya sean en versiones analógicas o digitales, está ampliamente extendido en cualquier centro de salud de la sociedad actual. De este modo podemos considerar la electrónica como una rama fundamental para el desarrollo de diferentes dispositivos, para conocer la evolución de enfermedades, así como tener una mejor forma de analizar y comprobar las mejoras en el estado de nuestra salud.

Dentro de estos equipos de cuantificación uno de los presentes en las unidades de rehabilitación de todos los hospitales es el algómetro. Éste se centra en cuantificar el umbral de dolor por presión, el cual ocurre al mínimo punto de transición cuando la presión aplicada es sentida como dolor. Las medidas de este umbral son usadas en procedimientos clínicos para determinar las áreas de mayor sensibilidad y diagnosticar diferentes tipos de enfermedades músculo-esqueléticas. Un ejemplo de estas enfermedades es el síndrome de dolor miofascial<sup>1</sup> Éste trastorno por dolor crónico se produce después de que un músculo se haya contraído de forma reiterada como puede ser en una lesión. El síndrome de dolor miofascial está caracterizado por presentar “puntos dolorosos” o “puntos gatillo” en el músculo los cuales pueden provocar tensión y dolor en todo el músculo.

Otro ejemplo donde cuantificar este umbral de dolor por presión puede llegar a ser muy útil es en el diagnóstico de hiperalgesia. La hiperalgesia<sup>2</sup> tiene como síntomas un aumento de la sensibilidad al dolor y la reacción extrema al dolor. Se presenta cuando se dañan los nervios o hay cambios en las vías nerviosas que participan en la percepción del dolor.

Otra de las aplicaciones donde es útil el uso del algómetro es en las lesiones deportivas o en las producidas a causa de accidentes. Realizando un seguimiento de dichas lesiones se puede analizar y comprobar fácilmente su evolución a lo largo del tiempo, de modo que pueda apreciar si el dolor va disminuyendo y con qué celeridad.

Como se ha indicado, la capacidad de poder medir los umbrales de dolor por presión y cuantificar la sensibilidad es muy útil en una gran variedad de situaciones clínicas.

Este concepto de cuantificación fue acuñado por Emanuel Libman en 1934<sup>1</sup>, aunque el umbral de dolor de la presión normal en los músculos esqueléticos lleva midiéndose desde 1980. Desde entonces, los algómetros de presión han sido sabiamente usados en prácticas clínicas.



Figura 1. Emanuel Libman (1872-1946). Físico Estadounidense especializado en el campo de la medicina.<sup>3</sup>

El dolorímetro, el cual empleaba balanzas para medir presión aplicada fue el primer modelo desarrollado. Desde ese entonces, el algómetro de presión se fue utilizando para evaluar afecciones musculares como el síndrome del dolor miofascial y otras enfermedades musculoesqueléticas. Se establecieron estándares para el umbral de dolor por presión en pacientes con el síndrome de dolor miofascial. Por ejemplo, el umbral de dolor por presión de un paciente era considerado anormal cuando este umbral en un cierto punto era al menos  $2 \text{ kg/cm}^2$  inferior al de otro punto, o era inferior al valor normal, o no era mayor de  $3 \text{ kg/cm}^2$ . Hoy en día, los algómetros se han convertido en un estándar para este tipo de enfermedades o incluso para analizar la evolución de golpes y hematomas producidos por ejemplo en un accidente o también de ciertas lesiones deportivas.

### 1.3 Características

Con el objetivo de comprender mejor el funcionamiento del algómetro, en este apartado se van a analizar los diferentes tipos y modelos que existen actualmente en el mercado. De este modo podremos comparar y contrastar las diferentes especificaciones que deberemos ser capaces de ofrecer con nuestro diseño.

A groso modo podemos decir que el algómetro es un equipo de medición de uso manual, el cual lo podemos separar en dos grandes grupos:

Analógicos: Como su nombre indica, no precisan de ningún tipo de componente electrónico. Su funcionamiento sería similar al de una balanza analógica, con el uso de resortes al aplicar presión estos resortes se contraen haciendo así moverse una aguja que indica la

presión aplicada en la leyenda. La Figura 2 muestra un algómetro analógico comercial. Su precio se sitúa en torno a los 600 €.<sup>4</sup>



Figura 2. Algómetro analógico comercial

Digitales: En este tipo de algómetros (Figura 3 y 4) aunque la señal es captada con sensores de forma analógica, sí que serán necesarios el uso de diferentes componentes electrónicos para realizar su función. Disponen de un sensor de presión basado en una célula de carga para detectar las variaciones en la presión ejercida. La célula de carga se conecta a un microcontrolador, el cual se encarga de procesar toda la información y de mostrarla en un display. Este es el tipo de algómetro que se va a diseñar. En los apartados posteriores se explicará con más profundidad cada uno de sus bloques necesarios para su realización.



Figura 3. Algómetro digital comercial<sup>5</sup>



Figura 4. Algómetro digital AlgoMed<sup>6</sup>

Las características pueden variar en las versiones digitales:

- El peso y el tamaño que pueda tener el equipo en general, además de su ergonomía. Un algómetro con una buena ergonomía permitirá ser utilizado con mayor facilidad.
- La sensibilidad. En el mundo de la electrónica se denomina sensibilidad a la mínima magnitud en la señal de entrada requerida para producir una determinada magnitud en la señal de salida. Así que para el caso del algómetro será el mínimo cambio que es capaz de ofrecernos el instrumento. Este valor se medirá en kilogramos y tendrá un rango que rondará las décimas de kg. Menores valores implican una mayor sensibilidad para el algómetro
- Repetitividad. Hace referencia a la habilidad que tenga el instrumento de entregar la misma lectura en aplicaciones repetidas del mismo valor.
- Capacidad. Es el rango de fuerza o presión aplicada en el cual se podrá utilizar el dispositivo. En el caso del algómetro, el valor máximo que se pueda aplicar. Según modelos este valor será de unos 10 o 20 kg.
- El precio que tenga el producto, el cual variará según características, fabricante o país de origen. Se ha encontrado un amplio rango de precios para diferentes modelos. Desde los 250€ hasta los 2500€.
- Conectividad. Hace referencia a las diferentes opciones que nos permiten conectar el aparato para enviar la información a un ordenador de modo que se puedan generar datos o gráficas.

### 1.3.1. Revisión de algómetros presentes en el mercado

Si buscamos en el mercado encontramos bastante variedad, con diferencias de precio sin duda significativas. Veamos algunos ejemplos:

Algómetro digital Palpatrónico <sup>7</sup>	
	<ul style="list-style-type: none"><li>● Capacidad 10 kg</li><li>● Sensibilidad 0,5 kg</li><li>● Batería Lipo 420 mAh</li><li>● Indicación duración de la batería</li><li>● Precio: 250 €</li><li>● Información mostrada mediante LEDs en intervalos de 0,5 kg, con 20 LEDs</li><li>● Sistema de sonidos periódicos para detectar la duración del tratamiento</li></ul>
Figura 5. Algómetro digital Palpatrónico	

Algómetro inalámbrico Commander Echo <sup>8</sup>	
	<ul style="list-style-type: none"><li>● Capacidad: 11 kg</li><li>● Sensibilidad: 0.1 kg</li><li>● Precio: 2275 €</li><li>● Importa los datos a una consola donde se muestran los resultados en forma de gráficas.</li><li>● Punta de medición intercambiable de 1 cm o 0,5 cm de diámetro</li></ul>
Figura 6. Algómetro inalámbrico Commander Echo	

### Orchid Scientific's Algometer<sup>9</sup>



Figura 7. Orchid Scientific's Algometer

- Capacidad: 20 kg
- Sensibilidad: 0.01 kg
- Precio: 400€
- Dispone de conectividad y software para PC
- Punta de medición de 1cm de diámetro
- Botón de puesta a cero.
- Baterías recargables.

### Pain Test™ FPX 25



Figura 8. Algómetro digital comercial Pain Test™ FPX 25

- Capacidad: 10 kg
- Sensibilidad de 0.03 kg
- Precio 500€
- Unidades seleccionables: lb, kg, N y oz.
- Picos de tensión/compresión guardados en la memoria
- Punta de 1 cm<sup>2</sup>
- Batería recargable 50 horas de NiMH
- Se puede continuar usando con el cargador
- Modo de bajo consumo
- Pantalla LCD con cuatro botones
- Peso de 225 g
- Dimensiones 130 x 70 x 30 mm

### Algómetro Digital Wagner FPIX™ 10



Figura 9. Algómetro Digital Wagner FPIX™

- Capacidad: 10 kg
- Sensibilidad de 0.02 kg
- Precio 675€
- Conexiones USB y RS232
- Punta de 1 cm<sup>2</sup>
- Cubierta firme y con agarre hecha de aluminio
- Posibilidad de medir la tensión y la compresión
- Pantalla LCD con cuatro botones
- Unidades seleccionables: lb, kg, N y oz.
- Picos de tensión/compresión guardados en la memoria
- Muestreo elegible entre 100 o 1000 muestras / seg
- Batería recargable de NiMH, 50 horas de uso
- Se puede continuar usando con el cargador
- Modo de bajo consumo
- Peso de 372 g
- Dimensiones 70 x 100 x 30 mm

Con el propósito de tener un producto similar de referencia para intentar asemejar lo máximo posible el presente proyecto a este producto se va a elegir un algómetro del mercado que cumpla las mismas especificaciones que habíamos impuesto para realizar el trabajo.

Aunque los algómetros presentados tienen características similares, se puede apreciar que el algómetro digital Wagner FPIX™ es superior en cuanto a precisión y a muestras por segundo, características que se traducen en un mayor precio. Sin embargo, el algómetro que hemos elegido para intentar replicar sus características es el Pain Test™ FPX 25.

El algómetro objetivo de este Proyecto será similar al comentado, mejorando algunas de sus características como la precisión, la batería, el peso del equipo. Además, será un equipo realizado con componentes accesibles y de bajo coste.

## 2. Diseño

### 2.1 Introducción

En este apartado se va a iniciar el diseño del algómetro. El primer paso para ello es realizar un diagrama de bloques genérico asociado al dispositivo a realizar. Dicho diagrama se muestra en la Figura 10. Posteriormente se asignará a cada bloque los componentes necesarios para realizar su función. Una vez contemplado esto se realizará un análisis y se buscarán las mejores opciones presentes en el mercado para dichos componentes.

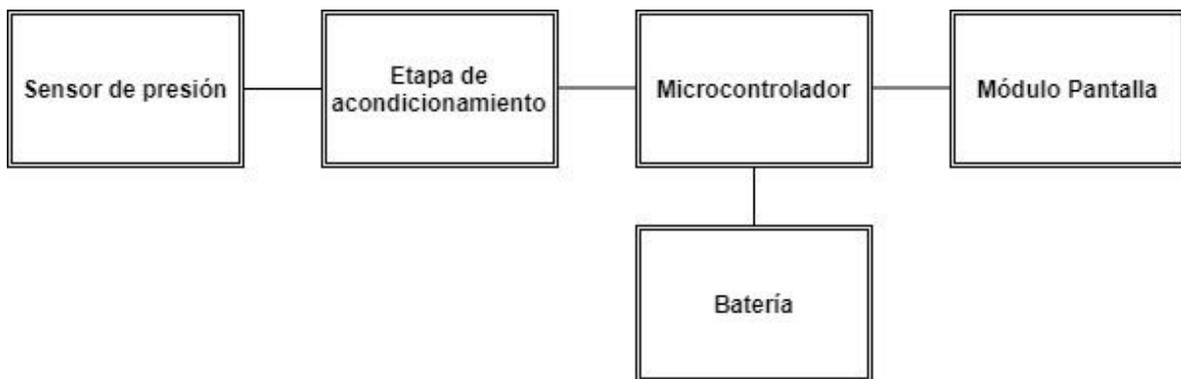


Figura 10. Diagrama de bloques del algómetro planteado en este Proyecto

Se tendrá en cuenta para cada elemento las características intrínsecas, su compatibilidad y su procedencia, ya que podrían existir inconvenientes por ejemplo de cara a su suministro. También se hará hincapié en el precio, ya que uno de los objetivos de este trabajo es que el equipo resultante posea altas prestaciones y un coste reducido. A continuación se contrastan las diferentes opciones estudiadas para cada bloque, incluyendo sus ventajas y sus puntos débiles.

### 2.2 Sensor de presión

El sensor de presión a utilizar es sin duda el componente más importante en este trabajo, ya que de ello dependerá que se cumplan la gran mayoría de las especificaciones.

Se parte de la base de que para este trabajo es necesario cuantificar el umbral de dolor, o en otras palabras la presión que estamos aplicando en una zona del cuerpo determinada. Es por ello que el tipo de sensor que se empleará será una célula de carga. En la actualidad, en general las células de carga dominan la industria del pesaje debido a su simplicidad, fiabilidad y su bajo precio.

Una célula de carga o celda de carga se basa en un sensor o transductor que convierte la fuerza aplicada sobre ella en una señal eléctrica medible. Se pueden diferenciar distintos tipos de células de carga dependiendo de dos factores: el tipo de señal que generan, y la manera en la que detectan el peso. Según la señal generada encontramos células de carga de tipo hidráulico, neumático y eléctrico. Y según la forma en la que detectan peso existen de flexión, cizalladura, compresión, tensión, etc.

Las **células de carga hidráulicas** son dispositivos de equilibrio de fuerzas que miden el peso como un cambio en la presión de un fluido interno. En las células de carga hidráulicas de tipo diafragma, la carga o fuerza actúa sobre una cabeza de carga que se transfiere a un pistón el cual comprime un fluido de llenado confinado dentro de una cámara de diafragma elastomérico. Al aumentar la fuerza, la presión del fluido hidráulico se eleva. La salida es lineal y relativamente no afectada por la cantidad del fluido de llenado o por su temperatura. La precisión de este tipo de células puede ser de 0,25% a escala completa o mejor, lo que resulta aceptable para la mayoría de las aplicaciones de pesaje de hasta 5000 toneladas. Debido a la ausencia de componentes eléctricos, este sensor es ideal para uso en áreas peligrosas. En la Figura 11 se muestra el funcionamiento de estas células.

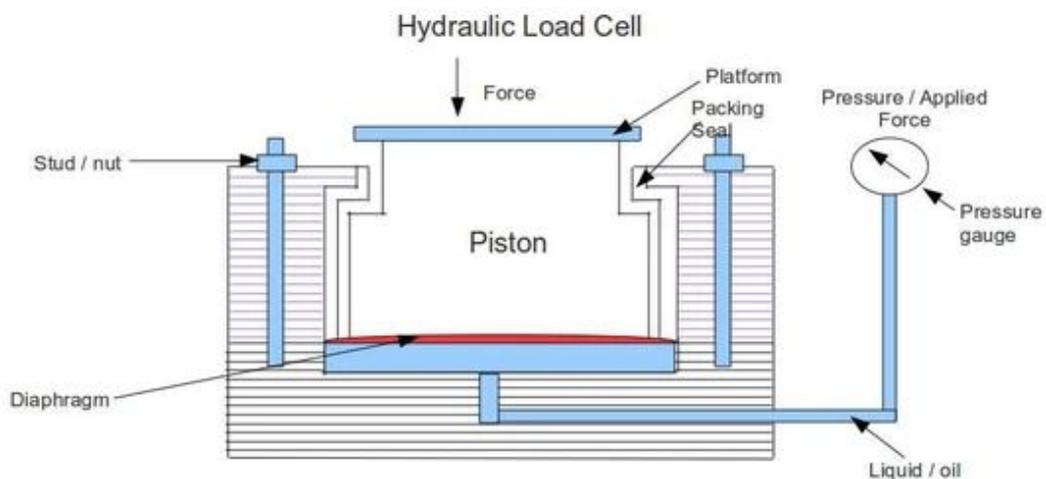


Figura 11. Funcionamiento de una célula de carga hidráulica.

Las aplicaciones típicas de células de carga hidráulicas incluyen el peso de tanques y recipientes de llenado usados en procesos industriales. Para tener una mayor precisión en la medida, el peso del tanque debe ser obtenido localizando una célula de carga en cada punto de soporte, y sumando sus salidas. El número ideal de puntos de soporte es tres ya que así definen un plano. Las salidas de las células son enviadas a un totalizador hidráulico, encargado de generar una salida que representa la suma de las respuestas de las tres

celdas de carga comentadas. Un inconveniente es que el diafragma elastomérico limita la fuerza que puede ser aplicada sobre el pistón a aproximadamente  $1020 \text{ kg/cm}^2$ .

Las **células de carga neumáticas** también operan en el principio de equilibrio de fuerzas. Estos dispositivos utilizan múltiples cámaras amortiguadoras por lo que proporcionan una precisión mayor que las células de carga hidráulicas. Las células de carga neumáticas se utilizan frecuentemente para medir pesos no muy altos (de hasta 1000 kg), sobre todo en las industrias donde la limpieza y la seguridad son la principal preocupación. En la figura 12 se muestra el funcionamiento de este tipo de células de carga.

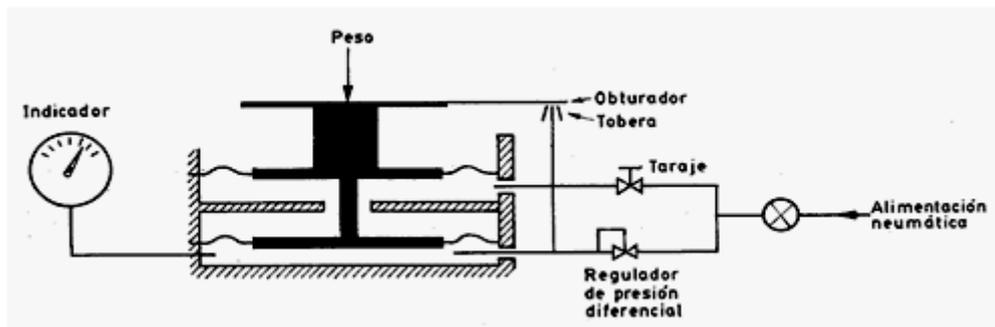


Figura 12. Esquema de una célula de carga neumática.

Las ventajas que podemos destacar de este tipo de Célula de carga son su resistencia a explosiones y su insensibilidad a las variaciones de temperatura. Además, no contienen líquidos que puedan contaminar una determinada zona en el caso de rotura de la membrana. Las desventajas incluyen la velocidad de respuesta relativamente lenta y la necesidad de aire limpio, seco, regulado o de nitrógeno para su correcto funcionamiento.

Las **células de carga extensométricas** convierten la carga que actúa sobre ellas en señales eléctricas. Los propios medidores están unidos a una viga o elemento estructural que se deforma cuando se le aplica un peso. En la mayoría de los casos, se utilizan cuatro medidores de deformación para obtener la máxima sensibilidad y compensación de temperatura. Dos de los medidores están por lo general en tensión, es decir que se recibirá información de este sensor cuando el cuerpo elástico donde esté colocado se deforme de manera que se genere una tensión. Y los otros dos en compresión, por lo que los sensores devolverán valores cuando la fuerza que se aplique comprima el cuerpo elástico donde estén colocados los sensores.

Por lo general en este tipo de células, se basan en el uso de galgas extensiométricas colocadas en su estructura. Las galgas extensiométricas son sensores cuya resistencia varía con la fuerza que se le aplique. Cuando se aplica una carga a la célula extensiométrica ésta se deforma y a su vez deforma la galga extensiométrica. Dicha deformación se debe a la aplicación de una fuerza de tensión o compresión. Más específicamente lo que ocurre cuando se aplica esta fuerza es que la galga se extiende o se contrae. Éste cambio en la longitud se refleja en aumentos o disminuciones en la resistencia eléctrica presente en la galga tal y como se muestra en la Figura 13. Las modificaciones en dicha resistencia pueden ser transformadas de forma sencilla en variaciones de tensión. Se obtienen de este modo señales eléctricas distintas según el peso del objeto colocado sobre la galga.

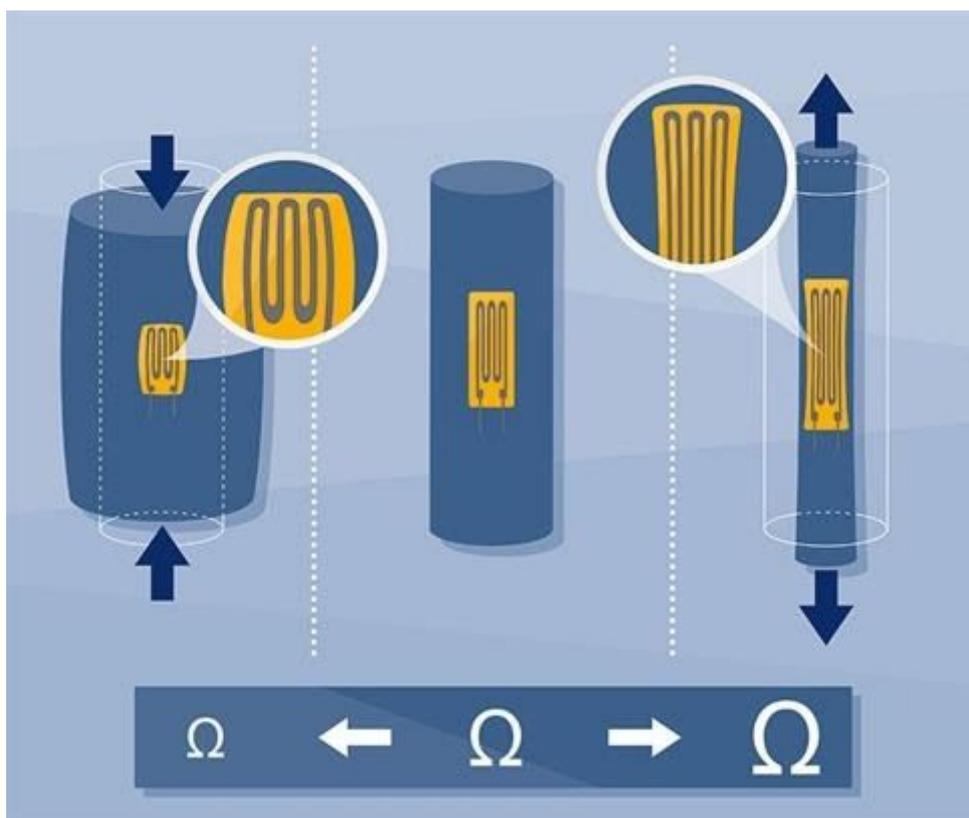


Figura 13. Representación de la variación del valor de la resistencia en galgas extensiométricas <sup>11</sup>

La comentada variación de la resistencia es de solamente unos ohmios. De cara a poder transformar dicha variación en una tensión fácil de procesar se emplea un puente de Wheatstone. El puente de Wheatstone (Figura 14) no es más que un circuito formado por cuatro resistencias dispuestas en forma de puente, donde una o varias de ellas pueden ser galgas extensiométricas. Se utiliza para determinar el valor de una de las resistencias. La configuración se realiza con las resistencias conectadas en dos series de dos resistencias. Se toman dos nodos para la polarización del puente y los otros dos nodos para medir la diferencia de tensión.

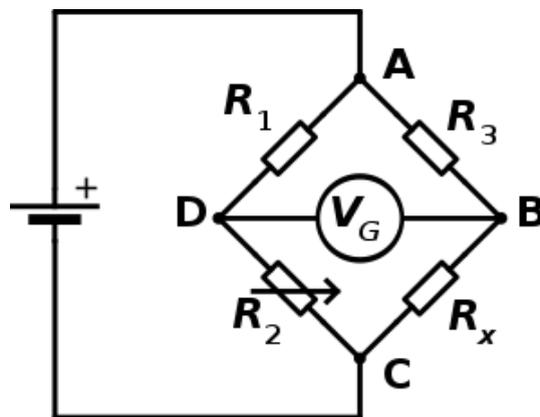


Figura 14. Puente de Wheatstone.

Las resistencias  $R_1$  y  $R_3$  están conectadas en el terminal positivo de la fuente de polarización. Las resistencias que están conectadas a la referencia son  $R_2$  y  $R_x$  siendo esta última la galga extensiométrica la cual irá variando. En general,  $R_1 = R_3$ , y  $R_2$  es una resistencia variable cuyo valor se ajusta para que sea igual al de la resistencia de la galga extensiométrica en ausencia de presión. Si nos fijamos, estos dos conjuntos de resistencias forman individualmente un divisor de tensión cada uno. Si suponemos la condición inicial de que todas las resistencias son iguales entonces el voltaje entre los nodos centrales de los divisores será igual a cero.

De este modo del puente de Wheatstone podemos sacar la siguiente expresión:

$$V_G = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_x}{R_x + R_3} \right) V_S \quad (1)$$

En la ecuación anterior,  $R_x$  es la resistencia galga extensiométrica. Al modificarse, variará también la tensión de salida del puente  $V_G$ .

A continuación se exponen algunos tipos de células de carga:

- Célula de carga de compresión (Figura 15): Este tipo de células son muy compactas ya que están diseñadas específicamente para aplicaciones donde el espacio es limitado. También son ideales para ser usadas en cargas de alta capacidad.



Figura 15. Célula de carga de compresión.

- Célula de carga de tensión/compresión (Figura 16): Como su nombre indica se pueden usar tanto para aplicaciones en tensión como en compresión. Tamaño reducido y de fácil instalación.



Figura 16. Célula de carga de tensión/compresión

- Célula de carga de viga en S (Figura 17): Llamadas así por su forma en S. Se pueden usar también para aplicaciones de tensión o de compresión.



Figura 17. Célula de carga viga en S.

- Célula de carga de viga flexible (Figura 18): Vienen con construcción de bajo perfil para integración en zonas restringidas.



Figura 18. Célula de carga de viga flexible.

- Célula de carga de plataforma y punto único (Figura 19): Ofrece lecturas precisas sin importar la posición de la carga en la plataforma.



Figura 19. Célula de carga de plataforma y punto único.

- Célula de carga de cartucho (Figura 20): Están herméticamente selladas para aplicaciones en áreas de lavado o con una alta humedad



Figura 20. Célula de carga de cartucho.

Una vez comentados los tipos de células de carga existentes en el mercado, y de cara a su uso para realizar un algómetro, se tienen las siguientes conclusiones:

Las células de carga de tipo neumático también se pueden descartar por motivos similares a las de las celdas hidráulicas. Están pensadas también para altas cargas y para trabajar en ambientes peligrosos, así como en la industria alimentaria. Además, se tiene una respuesta muy lenta, lo que sería un impedimento para los objetivos de este trabajo. Así mismo, el tamaño no es el más aconsejado para este tipo de aplicación.

Es por ello que el tipo de célula de carga elegida es del tipo extensiométrico, ya que tienen un diseño muy reducido y sencillo. Su rango de peso se adapta a las características indicadas, y además tienen un coste bastante reducido. También, y con respecto a lo comentado en párrafos anteriores, son las más precisas. De entre todos los tipos de células de carga extensiométricas se buscará una que cumpla las especificaciones comentadas en la introducción de este Trabajo: rango de peso de hasta 10 kg, y una sensibilidad mínima de 50 g. De cara a simplificar el diseño electrónico de todo el dispositivo, también se debe tener en cuenta que acepte una alimentación igual a la de los microcontroladores y posibles drivers necesarios para el correcto funcionamiento de todo el dispositivo.

Teniendo en cuenta todo lo comentado, se ha realizado una búsqueda de las opciones accesibles de cara a su compra, considerando además su precio, el mínimo número de unidades a pedir y los tiempos de entrega. A modo de resumen se presentan a continuación cuatro células de carga, las cuales, según el autor de este Trabajo, son las más acertadas en cuanto a que cumplen las especificaciones indicadas con anterioridad.

### Opción 1

#### Célula de carga de viga en S <sup>12</sup>

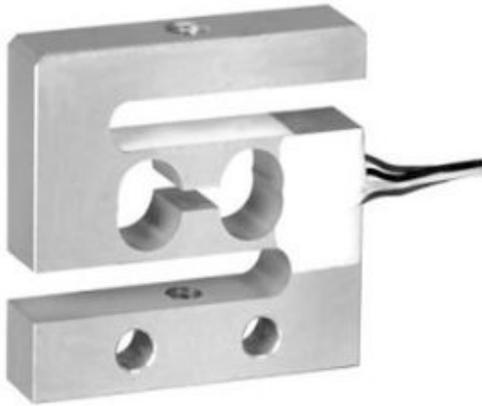


Figura 21. Célula de carga de viga en S

#### Características

- Capacidad: 10 kg
- País de procedencia: China
- Tipo: Viga en S
- Salida: 2 mV/V  $\pm$  10%
- Error de precisión: 0,03% F.S.(fondo de escala)
- Sobrecarga segura: 150% F.S.(fondo de escala)
- Alimentación: 3 - 12 V
- Dimensiones: 50x52x12 mm
- Precio: 10€ (07/2020)

### Opción 2

#### Célula de carga de viga flexible <sup>13</sup>

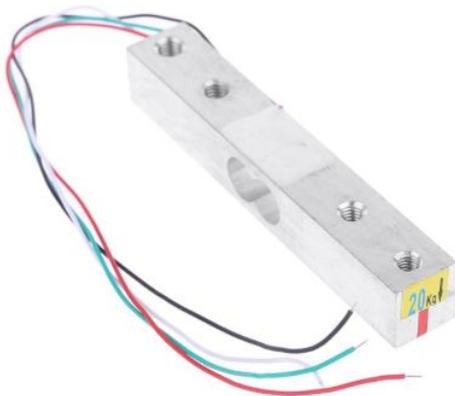


Figura 22. Celda de carga de viga flexible

#### Características

- Capacidad: 10 kg
- País de procedencia: China
- Tipo: Viga
- Salida: 1  $\pm$  0,1 mV/V
- Error de precisión: 0,05 % F.S.(fondo de escala)
- Sobrecarga segura: 150% F.S.(fondo de escala)
- Alimentación: 3 - 10 V
- Dimensiones: 81 x 13,5 x 13,5 mm
- Precio: 1,85€ (07/2020)

### Opción 3

#### Célula de carga de tipo botón <sup>14</sup>



Figura 23. Célula de carga de tipo botón

#### Características

- Capacidad: 10 kg
- País de procedencia: China
- Tipo: Botón
- Salida:  $1,5 \pm 0,5$  mV/V
- Error de precisión: 0,05% F.S.(fondo de escala)
- Sobrecarga segura: 150% F.S.(fondo de escala)
- Alimentación: 3 - 15 V
- Dimensiones: 75Ø x 25 mm
- Precio: 18,42€ (07/2020)

### Opción 4

#### Célula de carga de tipo plataforma <sup>15</sup>



Figura 24. Célula de carga de tipo plataforma.

#### Características

- Capacidad: 10 Kg
- País de procedencia: China
- Tipo: Medio Puente
- Salida:  $0,8 \pm 0,2$  mV
- Error de precisión: 0,05% F.S.(fondo de escala)
- Sobrecarga segura: 150% F.S.(fondo de escala)
- Alimentación: 10 V
- Dimensiones: 34x34x7 mm
- Precio: 2,09€ (07/2020)

De entre las celdas seleccionadas, cabe destacar que todos los fabricantes son chinos debido a dos factores: Uno es obviamente económico, ya que es la opción más barata en comparación con otros países europeos como Alemania. Otro se relaciona con el paso del artículo por la aduana, el cual supone un coste añadido.

Comparando cada una de las opciones se aprecia que algunas de las características, como la capacidad, pueden ser obviadas debido a que son similares para los cuatro casos. Entonces se elegirá el sensor en base a los siguientes tres factores principales:

- El error de precisión. Éste parámetro nos dirá la sensibilidad del sensor, es decir, el mínimo cambio que pueda detectar el sensor durante una medida. Si tenemos un error del 0,05% del fondo de escala (F.S), implica que si la capacidad máxima del sensor es de 10 kg, el 100% del fondo de escala es 10.000 g. Por ello, el error del 0,05% del F.S. es de 5 g en la medida realizada.
- Las dimensiones: El tamaño del algómetro ha de ser el mínimo necesario para que sea cómodo su uso con una sola mano. Éste es un parámetro muy a tener en cuenta a la hora de elegir el sensor.
- El precio. Se intentará reducir al máximo el presupuesto del proyecto, por lo que se considerará el sensor más económico, sin que ello implique una pérdida en sus prestaciones.

La opción 4 se descarta, porque es la única cuya alimentación supone un inconveniente añadido al diseño. En este sentido, la alimentación del comentado sensor es de 10 V, frente a los 5 V que se emplearán para alimentar el microcontrolador.

En cuanto a la de tipo botón, el inconveniente que tiene es su precio. Resulta extremadamente cara, ya que cuesta casi el doble que la célula de carga tipo S. Además, posee menos precisión. Por lo que la opción 3 también se ha descartado.

Así pues, el sensor requerido se deberá decidir entre la célula de carga de tipo viga y la tipo viga en S. La célula de carga en S tiene la ventaja que es la más precisa de todas ya que el cambio mínimo que podría detectar sería de solamente 3 gramos. Por otro lado, para nuestro diseño un error de precisión del 0,05% F.S. (un cambio mínimo de 5 gramos), es más que suficiente. Es así porque atendiendo a alómetros comerciales y a las especificaciones impuestas al comienzo del trabajo, se buscaba una sensibilidad mínima de 50 gramos. Ésta sensibilidad es la presente en los equipos comerciales, y se fija a dicho valor para evitar pequeñas desviaciones en la medida realizada debidas al efecto del pulso del médico. La de tipo viga tiene longitud superior (**81 x 13,5 x 13,5 mm**) con respecto a la de tipo en S (**50 x 52 x 12 mm**), por lo que con un diseño apropiado para cada una, ambas células de carga son apropiadas para la realización del algómetro. Por otro lado y atendiendo al precio, la tipo en S es 6 veces superior. Por lo tanto, el sensor de presión a utilizar va a ser el de tipo viga flexible.

### 2.3 Etapa acondicionamiento

El problema que se presenta ahora es que la célula de carga no debe comunicarse directamente con el microcontrolador, ya que las tensiones máximas proporcionadas por dicha célula se encuentran lejos del rango de entrada del convertor A/D. Además, trabajar con tensiones reducidas hace que el ruido y/o interferencias que puedan superponerse a la medida tengan una repercusión notable. De cara a solucionar ambos factores, se hace necesaria la adaptación de la señal procedente del sensor. Dicha adaptación se realiza mediante un dispositivo comercial denominado HX711 (Figura 25). Se utiliza este dispositivo debido a su accesibilidad ya que es ampliamente utilizado en aplicaciones con células de carga y a que su precio es muy reducido. Tanto es así que prácticamente carece de competidores para este tipo concreto de aplicación.

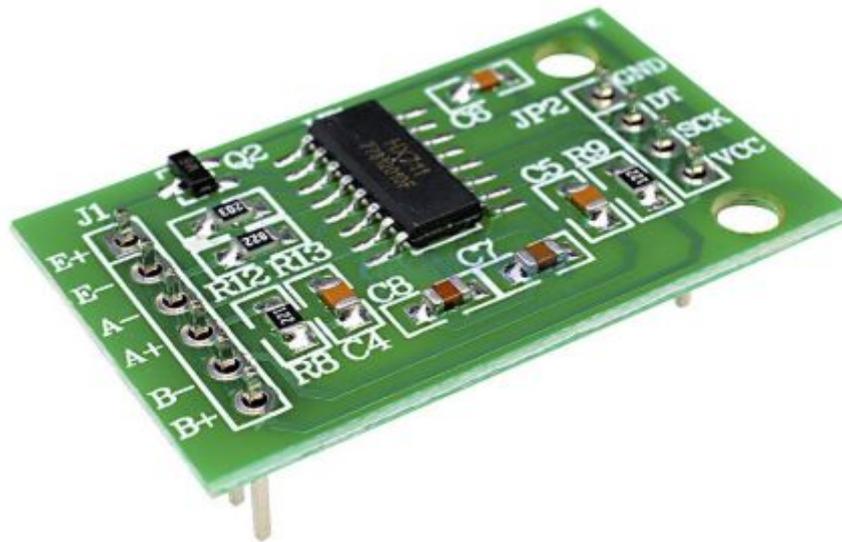


Figura 25. Dispositivo HX711, necesario para adaptar la señal procedente de la celda de carga, de cara a su posterior conexión con un microcontrolador.

El HX711 es un convertidor de señales analógicas a digitales (A/D) de 24 bits, que permite adaptar y digitalizar las tensiones procedentes de una célula de carga para que el microcontrolador las pueda recibir y procesar. Posee dos entradas diferenciales: el canal A, que puede ser programado con una ganancia de 128 o de 64, correspondiente a una entrada diferencial de fondo de escala de  $\pm 20\text{mV}$  o  $\pm 40\text{mV}$  respectivamente. Mientras que el canal B tiene una ganancia fija de 32.

La forma en la que se comunica con arduino es mediante una conexión I2C <sup>16</sup>. Inter-Integrated Circuit(Inter-Circuitos Integrados) o I2C es un bus de comunicaciones en serie que es comúnmente utilizado en la industria, especialmente para comunicar microcontroladores con sus periféricos en sistemas integrados. Su principal característica es que utiliza solamente dos líneas para transmitir la información: una para los datos(SDA) y otra para la señal de reloj(SCL). También sería necesario una tercera línea, la de referencia o masa pero como suelen comunicarse circuitos en una misma placa que comparten una misma masa esta tercera línea no suele ser necesaria.

El sistema original fue desarrollado por Philips a principios de 1980 con el fin de controlar varios chips en televisores de manera sencilla. Este tipo de comunicaciones permite hasta 1008 dispositivos conectados simultáneamente a modo de esclavos. Dos o más señales a través del mismo cable pueden causar conflicto, y ocurrirían problemas si un dispositivo envía un 1 lógico al mismo tiempo que otro envía un 0. Para evitarlo el bus es “cableado” con dos resistencias para dejarlo por defecto a nivel alto, mientras que los dispositivos envían solo niveles bajos. En la Figura 26 aparece un esquema de cómo quedarían éstas conexiones. Si se quiere enviar un nivel alto simplemente se comunica directamente al bus.

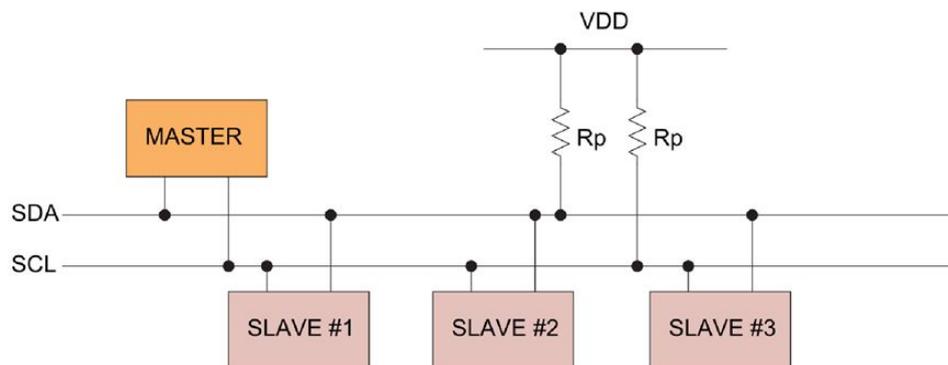


Figura 26. Esquema de una comunicación típica I2C con un maestro y tres esclavos.

Los dispositivos conectados al bus I2C tienen una dirección única para cada uno. También pueden ser maestros o esclavos. El dispositivo maestro inicia la transferencia de datos y además genera la señal de reloj. Pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo. Ésta característica se la pueden ir pasando los dispositivos que tengan esa capacidad. Por ello, al bus I2C se le denomine bus multimaestro.

El proceso de comunicación en el bus I2C se podría describir de la siguiente manera:

- El maestro comienza la comunicación enviando un patrón llamado “start condition”. Esto alerta a los dispositivos esclavos, poniéndolos a la espera de una transacción.
- El maestro se dirige al dispositivo con el que quiere hablar, enviando un byte que contiene los siete bits (A7-A1) que componen la dirección del dispositivo esclavo con el que se quiere comunicar, y el octavo bit (A0) de menor peso se corresponde con la operación deseada (L/E), lectura=1 (recibir del esclavo) y escritura=0 (enviar al esclavo).
- La dirección enviada es comparada por cada esclavo del bus con su propia dirección, si ambas coinciden, el esclavo se considera direccionado como esclavo-transmisor o esclavo-receptor dependiendo del bit L/E.
- Cada byte leído/escrito por el maestro debe ser obligatoriamente reconocido por un bit de ACK por el dispositivo maestro/esclavo.
- Cuando la comunicación finaliza, el maestro transmite una condición de parada para dejar libre el bus.

De manera representativa en la Figura 27 aparece un gráfico de todo el proceso.



Figura 27. Gráfico con las ondas SDA y SCL del bus de conexiones I2C

## 2.4 Microcontrolador

El microcontrolador que se va a utilizar en este proyecto es Arduino. Conocidísimo por toda la comunidad mínimamente interesada en el mundo de la electrónica por su sencilla programación. Se ha elegido este microcontrolador por muchos aspectos. Uno de ellos es la accesibilidad, aunque también podemos destacar otros como su bajo coste, la gran cantidad de componentes compatibles con este microcontrolador existentes en el mercado. Además de la gran cantidad de información que se puede encontrar fácilmente tanto del mismo, como de los componentes compatibles. Ésto es debido a que es ampliamente usado por miles de usuarios. En este sentido, a continuación se expone con más detalles qué es Arduino.

Arduino es una plataforma de creación de electrónica de código abierto, la cual está basada en hardware y software libre, flexible y fácil de utilizar tanto para los creadores como para los desarrolladores. El término hardware libre se refiere a los dispositivos cuyas especificaciones y diagramas son de acceso público, es decir que cualquiera puede replicarlos. Por ello, Arduino ofrece las bases para que cualquier otra persona o empresa pueda crear sus propias placas, pudiendo ser diferentes entre ellas, pero igualmente funcionales ya que parten de la misma base.

El software libre se refiere a los programas informáticos cuyo código es accesible por cualquiera para poder utilizarlo y modificarlo. Arduino también ofrece la plataforma Arduino IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), que es un entorno de programación con el que cualquiera puede crear aplicaciones para las placas Arduino, de manera que se les puede dar todo tipo de utilidades.

Como curiosidad, este proyecto nació en 2003 cuando varios estudiantes del Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea, Italia, con la finalidad de facilitar el acceso y uso de la electrónica y programación. Lo hicieron para que los estudiantes de electrónica tuvieran una alternativa más económica a las populares BASIC Stamp, unas placas que por aquel entonces costaban más de cien dólares. El resultado fue Arduino, una placa con todos los elementos necesarios para conectar periféricos a las entradas y salidas de un microcontrolador, y que puede ser programada en todas las plataformas, Windows, macOS y GNU/Linux. Un proyecto que promueve la filosofía 'learning by doing', que quiere decir que la mejor manera de aprender es haciéndolo.



Figura 28. Placa de uno de los modelos más extendidos de Arduino, la Arduino UNO.

Arduino es una placa basada en un microcontrolador ATMEL. Los microcontroladores son circuitos integrados en los que se pueden grabar instrucciones, las cuales se escriben con el lenguaje de programación que puedes utilizar en el entorno Arduino IDE. Estas instrucciones permiten crear programas que interactúan con los circuitos, sensores, actuadores, etc. que pueden conectarse a la placa.

El microcontrolador de Arduino posee una interfaz de entrada, que es una conexión en la que podemos conectar en la placa diferentes tipos de periféricos. La información de estos periféricos se trasladará al microcontrolador, el cual se encargará de procesar los datos que le lleguen a través de ellos. También cuenta con una interfaz de salida, que es la que se encarga de llevar la información que se ha procesado en el Arduino a otros periféricos.

Como se ha comentado, Arduino es un proyecto y no un modelo concreto de placa, por lo que existen diferentes tipos de placas. Probablemente la más conocida actualmente será Arduino Uno (Figura 28). Pero para el presente proyecto y por motivos de espacio se va a utilizar Arduino Nano.

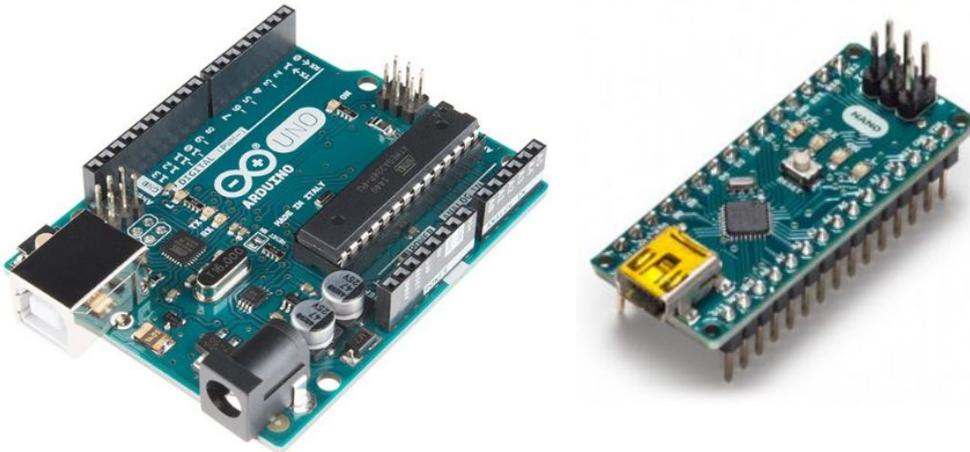


Figura 29. Comparativa entre las placas de Arduino UNO y Arduino NANO

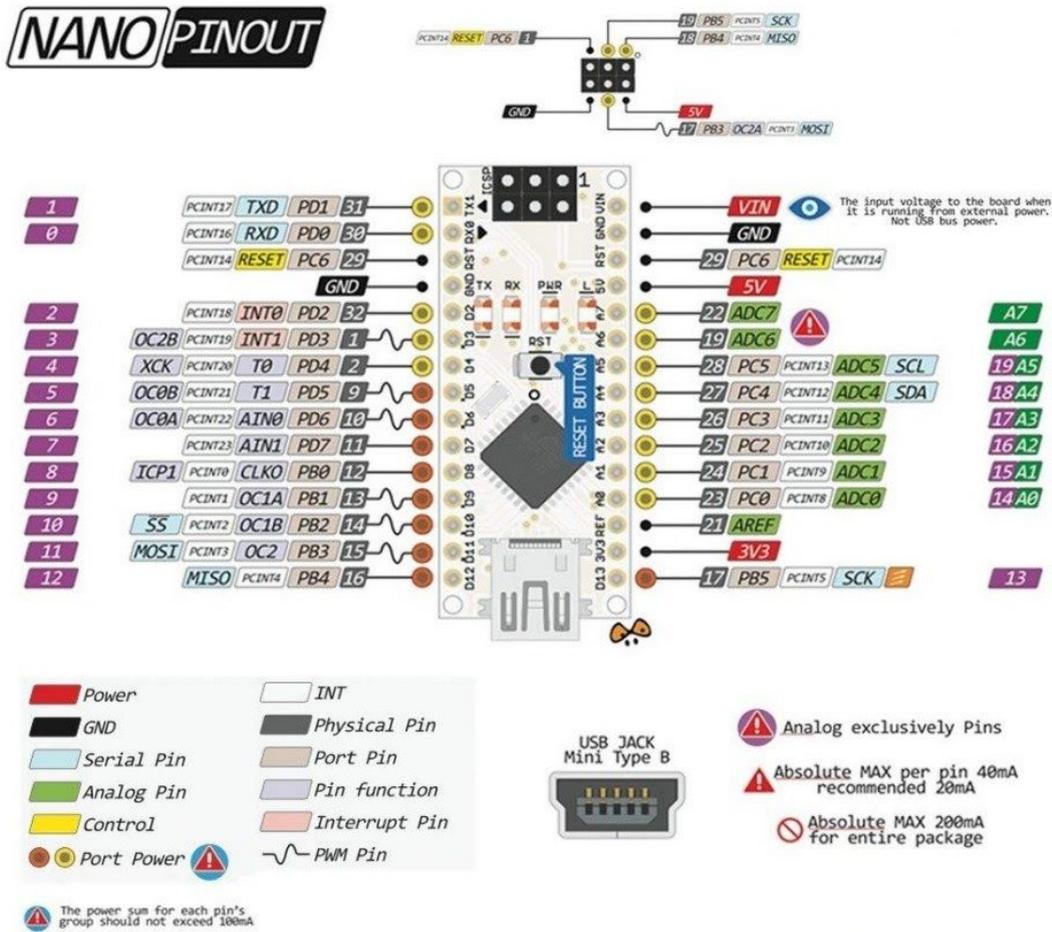
A continuación se expone una comparativa general entre las placas Arduino UNO y Arduino NANO (Figura 29):

- La principal ventaja de Arduino Nano es su tamaño, ya que tiene unas dimensiones de 43 mm x 18 mm, en comparación con los 68 mm x 53 mm que tiene la placa Arduino Uno. Además el conector principal que tiene es un micro USB, mucho más pequeño que el conector para alimentación DC de la Uno. Esta considerable reducción de tamaño será clave para poder reducir al máximo el tamaño general del algómetro.
- Ambas poseen el microcontrolador ATmega 328p por lo que todos los programas ejecutables en Arduino Uno se podrán ejecutar también en la Nano sin necesidad de realizar ninguna modificación. Además la placa Uno se presenta en forma de PDIP(Plastic Dual In line Package) con 30 pines y la arduino Nano en TQFP(Plastic Quad Flat Pack) con 32 pines.
- Ambos dispositivos funcionan con 5V aunque pueden ser alimentados con un voltaje mínimo de 3.3V, su frecuencia de reloj es de 16 MHz y su clasificación de corriente es de 40 mA.
- El número de entradas/salidas digitales es igual a 14 para las dos placas aunque la placa Arduino Nano posee 2 entradas analógicas más (8 en total) que Arduino Uno, la cual dispone solamente de 6.
- Además otra ventaja que supone la utilización de Arduino Nano es que su precio es inferior a la Uno.

En resumen, las especificaciones <sup>16</sup> de la placa arduino Nano son las siguientes:

- Microcontrolador ATmega328
- Arquitectura AVR
- Voltaje de operación 5V, aunque su voltaje de entrada puede variar entre 7-12V
- Memoria flash de 32KB de los cuales 2KB son utilizados por bootloader
- SRAM 2 KB
- Velocidad de reloj 16 MHz
- 8 pines de E/S analógicas
- 1 KB EEPROM
- Corriente continua por pines de entrada/salida 40mA
- Pines de E/S digitales 22
- 6 salidas PWM
- Consumo de energía 19 mA
- Tamaño de la placa de circuito impreso 18 x 45 mm
- Peso, 7g
- Conversor A/D de entrada de 10 bits, y de salida de 8 bits.
- Además, ofrece la posibilidad de emplear el protocolo de comunicación I2C.

En la Figura 30 aparece el esquema de conexiones de la placa Arduino Nano.



Descubrearduino.com

Figura 30. Esquema de la placa Arduino NANO <sup>16</sup>

En resumen, se ha utilizado Arduino como microcontrolador para este proyecto por su simplicidad, usabilidad y reducido precio. Y la versión Arduino Nano para poder reducir el tamaño final del dispositivo, manteniendo todas las funcionalidades. Además, su precio es bajo.

## 2.5 Alimentación e indicador del nivel de batería

En este apartado se presenta todo lo referente al circuito de alimentación, a la batería y a los componentes que serán necesarios tanto para alimentar el dispositivo como para conocer el nivel de carga disponible. Seguidamente se expone cada componente por separado.

### LA BATERÍA

Hay diferentes formas de proporcionar la alimentación a la placa de Arduino. A continuación vamos a ver estos tipos, para poder comparar y seleccionar el más adecuado a este proyecto.

La forma clásica de alimentar Arduino es mediante el cable USB conectado a una computadora. El puerto USB puede proporcionar una tensión de 5V y una corriente de 1A, lo cual es más que suficiente para la alimentación de la placa de Arduino. Otra forma podría ser alimentarlo directamente de la red eléctrica, mediante por ejemplo un cargador de un teléfono móvil y el mismo cable USB. Lo que hay que tener en cuenta es que si se usa el cable USB solamente se le podrá aplicar 5V.

En este proyecto va a ser necesario proporcionar alimentación tanto a la placa de Arduino como a todos los demás componentes. Dicha alimentación ha de ser independiente de la red eléctrica. Por ello se empleará una batería. A continuación se presentan diferentes tipos de baterías que pueden ser utilizadas:

- UNA PILA DE 9V

Utilizar una pila 9V (Figura 31) es una de las opciones más utilizadas, especialmente por los usuarios que se inician en el mundo de Arduino. Como ventajas tienen que son muy fáciles y accesibles de usar ya que se encuentran con facilidad. Como desventajas destacamos la baja densidad energética que disponen, ya que solamente tienen una capacidad de unos 500-600 mAh y proporcionan una intensidad máxima de unos 300 mA. Por ello solo se utilizan en proyectos donde la necesidad de la comentada corriente no sea elevada. Otra desventaja importante que sirve para descartar definitivamente esta opción, es que normalmente no son recargables. También por su tamaño y peso.



Figura 31. Pila de 9V junto a su portapilas

- 4 PILAS AA DE 1.5V

El uso de 4 pilas de 1.5V es otra de las opciones más sencillas y accesibles (Figura 32). Sumando la tensión de las cuatro pilas obtenemos 6V, suficiente para alimentar los componentes electrónicos presentes en este proyecto. Tienen una capacidad de entre 800-1500 mAh y una intensidad instantánea de 1700-2800 mA. Aunque igual que sucede con la pila de 9V, este tipo de baterías no suelen ser recargables. Además, su peso y el espacio que ocupan es notable, por lo que también se descarta.



Figura 32. Pilas AA de 1.5V junto a portapilas

- 5 BATERÍAS RECARGABLES AA DE 1.2V

La opción de utilizar 5 baterías recargables AA de 1.2V (Figura 33) es similar a la anterior con la diferencia que éstas son recargables. Su voltaje es un poco inferior a las pilas no recargables por lo que serían necesarias varias de ellas. Su capacidad es un poco inferior también, de unos 500-1000mAh y su intensidad instantánea sigue siendo superior a 1000 mA. Son bastante económicas. La desventaja aquí es

el tamaño ya que las 5 baterías junto al portapilas ocuparían un volumen considerable.



Figura 33. Baterías recargables AA de 1.2V

- BATERÍAS DE LITIO MODELO 18650 DE 3,7V

Las baterías 18650 (Figura 34) son bastante conocidas utilizadas en proyectos de electrónica que requieran de una alimentación independiente de la red eléctrica. En este caso habría un problema de espacio ya que este tipo de baterías son más grandes que las mencionadas anteriormente: como su nombre indica tienen un diámetro de 18 mm y una longitud de 65 mm. Su ventaja es que nos ofrecen una alta capacidad siendo esta de unos 4800mAh. La intensidad que proporciona también es muy alta, siendo ideal para proyectos que requieran una alta corriente. Otra ventaja es que son recargables. Como desventaja cabe destacar su precio, ya que es más alto que el resto de las opciones, de unos 5€ la unidad.



Figura 34. Baterías de litio 18650 de 3.7V

- POWER BANK USB DE 5V

También se ha estudiado la opción de utilizar baterías tipo Power Bank (Figura 35), usualmente empleadas para cargar teléfonos móviles. Una de sus ventajas es que proporcionan 5V regulados, por lo que podemos alimentar arduino mediante el cable USB. Este tipo de baterías son recargables y podemos encontrar de todo tipo de capacidades, desde 1500 mAh hasta 30000 mAh, aunque su tamaño se incrementará contra más alta sea su capacidad. Una batería de este tipo con una capacidad de unos 2000 mAh puede tener un coste de unos 10€ por lo que su precio lo podemos considerar como una desventaja. También la distribución que tienen de sus puertos de entrada y salida, ya que se encuentran normalmente juntos. Esto supone un problema en este proyecto, debido a la dificultad a la hora de dirigir los cables de alimentación procedentes del conector USB hacia los componentes electrónicos del algómetro, y a la vez disponer del puerto micro USB accesible desde el exterior de la carcasa del comentado dispositivo.



Figura 35. Dos tipos de PowerBank de 5V

- BATERÍAS DE NIQUEL-METALHIDRURO (NIMH)

Esta solución es similar al caso de las baterías AA pero con la diferencia que están ya integradas y como un solo componente. Además, tiene ya los conectores integrados por lo que se ahorra en espacio. Existen varias opciones diferenciando el número total de baterías y el voltaje que proporciona que puede ser de entre 6 y 9,6V. Pueden poseer una capacidad de hasta 5000mAh y una intensidad instantánea de hasta 15A. Como desventajas se puede destacar también su precio ya que puede llegar a ser de hasta tres veces superior al precio de algunas de las opciones que se han presentado, y su tamaño ya que a pesar de estar todas integradas sin la necesidad de utilizar portapilas sigue teniendo un tamaño excesivo para nuestro proyecto. Además, su peso también es superior al resto de opciones.



Figura 36. Dos tipos de baterías de NIMH presentes en el mercado

- BATERÍAS DE POLÍMERO LITIO (LIPO)

Las baterías de Polímero de litio (Figura 37) proporcionan un voltaje nominal de 3,7V aunque el máximo voltaje que puede proporcionar es 4,2V. Este tipo de baterías presentan la densidad de energía más alta que el resto de opciones presentadas. Pueden encontrarse con capacidades desde 500 hasta 5000mAh. Además, proporcionan intensidades muy altas de hasta 1A, y su precio es bajo. En cuanto al tamaño, su alta densidad energética posibilita encontrar una batería con capacidad suficiente y un tamaño muy reducido, de modo que podrá ser ubicada en el algómetro con mucha facilidad. Por ello, las baterías de Polímero Litio son la opción más avanzada para alimentar el presente proyecto.



Figura 37. Batería de Litio de 3.7V

Así pues, la opción que se va a elegir finalmente para alimentar los distintos componentes electrónicos presentes en el algómetro es mediante dos baterías de Polímero Litio conectadas en serie. Esta opción es la que permite más facilidades en cuanto a espacio. Ya que, a pesar de ser dos, tienen un tamaño muy reducido si su capacidad no supera los 300 mAh. Además, para una batería Lipo con esta capacidad su precio no superará los 4€.

En cuanto al voltaje, se sabe que el voltaje de operación de Arduino es de 5V. Al conectar las dos baterías en serie los voltajes se suman por lo que se obtendrá una tensión de 7,4V la cual será más que suficiente para alimentar todos los componentes. También este tipo de batería posee mucha versatilidad para colocar y conectar el resto de componentes que integran el algómetro, incluidos el de la carga de la misma batería y el necesario para medir su nivel de carga. Se profundizará más en estos componentes a continuación.

### **LA CARGA DE LA BATERÍA**

Como ya se ha apuntado en las especificaciones del proyecto, la batería del algómetro ha de ser recargable. Existen en el mercado módulos especialmente diseñados para la carga de baterías de este tipo. En este sentido para este tipo de aplicación el mercado está dominado por un módulo en concreto, el TP4056. Aunque para el mismo módulo existen diversos fabricantes, el módulo seguirá siendo el mismo, cambiando en algunas ocasiones el conector de entrada entre Micro USB(TP4056) y tipo C (TC4056), o añadiendo un circuito de protección frente a sobrecorrientes. Además, lo podremos encontrar con una o varias entradas de carga, según si se quiere cargar una o dos baterías de manera simultánea..

El TP4056(Figura 38) es un chip encapsulado en formato SOP-8 que es capaz de gestionar la carga de la batería. O lo que es lo mismo, adapta la señal de entrada para mantener una corriente estable de 1 A, que es el estándar para las baterías de Litio. Además, también es capaz de controlar la temperatura del dispositivo.

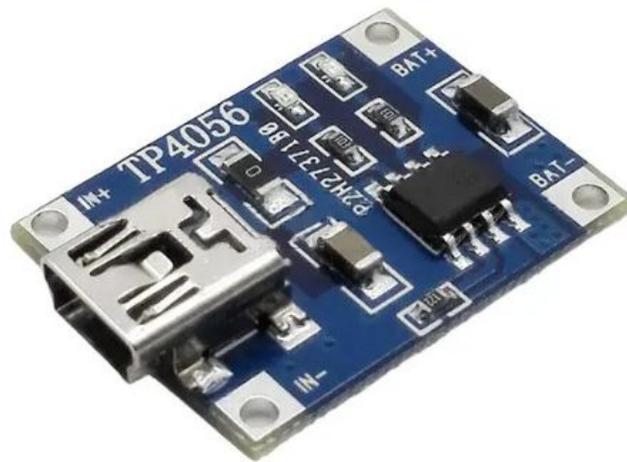


Figura 38. Módulo de carga TP4056

Éste módulo permite conectarle una fuente de alimentación a su entrada y una batería a su salida para que pueda cargarse de forma adecuada. El TP4056 es similar a los módulos de carga que tienen integradas las baterías de tipo Power Bank, aunque en este proyecto no se precisa de la salida USB. Y es que se conectará la batería directamente a los pines de Arduino. A continuación se expone los distintos componentes presentes en el módulo TP4056:

- El puerto Micro USB que resulta muy útil para poder cargar la batería con un simple cable conectado a la computadora o a un cargador estándar de un teléfono móvil. Sin embargo, el módulo también cuenta con dos bornes a los lados el puerto Mini USB si se quisiera conectar directamente la fuente con dos cables o incluso una placa solar o similar, para realizar la carga de la batería
- Posee dos Leds que indican si se está cargando o en su defecto si la carga ya se ha completado.
- Dispone de dos bornes de salida BAT+ y BAT- que irán conectados a los bornes de la batería.

Debido a su simplicidad y reducido tamaño de unos 28x17 mm, y su bajo coste de unos 0,23 €, esta ha sido la opción perfecta para controlar la carga de la batería.

## MEDIDOR DEL NIVEL DE LA BATERÍA

Como ya se indicó en las especificaciones del proyecto, el algómetro ha de ser capaz de mostrar el nivel de batería restante. Este punto ha sido complicado de solucionar, ya que Arduino no posee ninguna función con esta finalidad. Por ello ha sido necesario buscar otro

componente de cara a conocer el nivel de batería disponible, y mediante Arduino mostrarla en la pantalla LED. En el mercado existen diferentes opciones capaces de ofrecer una solución:

El módulo DFR0563 (Figura 39) está diseñado para medir el nivel de batería especialmente las baterías de Litio de 3,7V. Aunque permite un voltaje mínimo de entrada de 2,5V y un máximo de 4,2V. Este dispositivo se comunica con Arduino mediante el bus de conexiones I2C, el cual ya se explicó en apartados anteriores. Tiene unas dimensiones de 22x30 mm y su precio es de unos 8€.



Figura 39. Módulo DFR0563

El MAX17043 (Figura 40) es un sistema de medición de nivel ultra compacto y de bajo coste para baterías de ion de Litio. En concreto el MAX17043 está configurado para operar con una sola batería. Existe una segunda versión, el MAX17044 que puede operar con baterías de doble celda. Utiliza un sofisticado esquema de modelado para baterías de ion Litio llamado ModelGauge. Se conecta a Arduino mediante el bus de conexiones I2C, al igual que el módulo de adaptación de la señal de la célula de carga, ya explicado en el apartado 3 de este capítulo. Tiene unas dimensiones de 24,1x10,2 mm y su precio ronda los 2€.

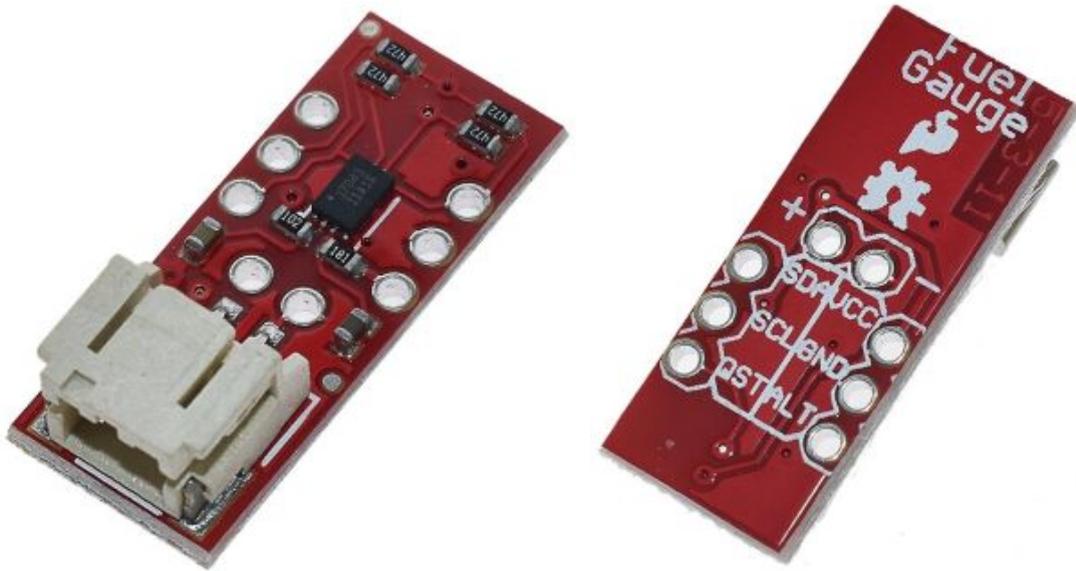


Figura 40. Módulo MAX17043

Comparando las dos opciones, se va a elegir el MAX17043 debido a que sus dimensiones del MAX17043 (24,1x10,2 mm) son inferiores a las del módulo DFR0563 (22x30 mm) y su precio también es inferior por unos 6€ de diferencia. Además el MAX17043 es más utilizado por la comunidad de Arduino por lo que se ha encontrado mucha más información que será muy útil a la hora de implementar el Proyecto, y a la hora de realizar la programación.

## 2.6 Módulo Pantalla

También será necesario utilizar un panel por el que mostrar toda la información al usuario mediante una interfaz clara, sencilla y visual. Para ello, en este apartado se va a hacer una comparación entre varios posibles paneles a utilizar.

Para la elección del módulo gráfico se ha tenido en cuenta su tamaño, de cara a poder incorporarlo fácilmente en el dispositivo final. También que fuera fácilmente visible y que su precio no fuera elevado. Con estas premisas en mente, se ha encontrado varias opciones:

Una opción sería la de utilizar un módulo LCD1602 (Figura 41) el cual es muy conocido y utilizado por toda la comunidad de microcontroladores y Arduino. Dispone de dos filas de 16 caracteres cada una, y cada carácter posee una matriz de 5 por 7 píxeles. A pesar de que este modelo presenta 16 conectores existe la posibilidad de conectar el controlador de

pantallas LCD HD44780 (Figura 42) que permitiría una conexión I2C entre el módulo LCD y Arduino con solamente 4 pines necesarios.

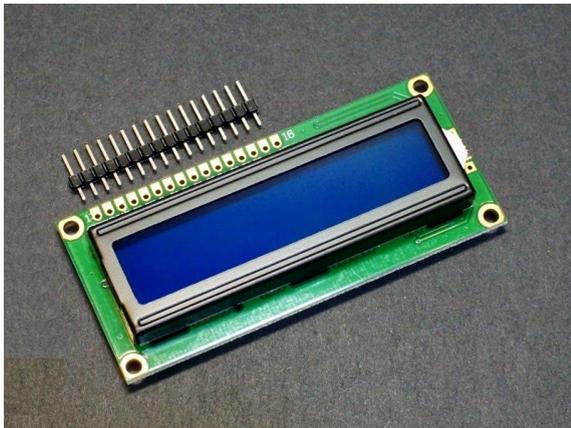


Figura 41. Módulo LCD1602

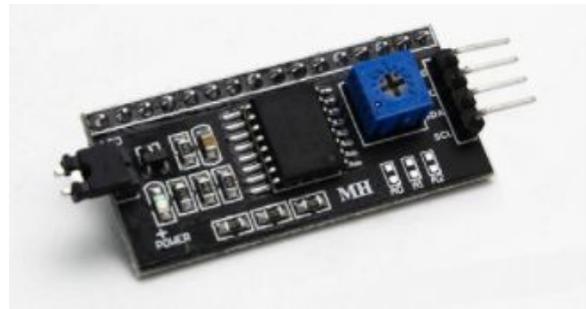


Figura 42. Controlador LCD HD44780

La otra opción que se presenta se trata de un panel OLED 128x64 píxeles bicolor SSD1306 de 0,96 pulgadas con conexión bus I2C (Figura 43).



Figura 43. Panel OLED SSD1306

Como su nombre indica el módulo SSD1306 dispone de un panel OLED, cuyas siglas en inglés quieren decir Diodo Emisor de Luz Orgánico. Ésta tecnología permite que no requiera una iluminación posterior, como ocurre con los LCD's tradicionales, con el consiguiente ahorro energético. El tamaño de la pantalla es de 0,96 pulgadas lo que equivale a una diagonal de 24,4 mm. Dispone de 128 píxeles de largo por 64 píxeles de alto, y como se trata de un display gráfico, es posible encender de forma individual cualquiera de sus 8192 píxeles. La conexión del tipo I2C permite una comunicación extremadamente simple y directa con arduino, empleando solamente dos cables. Éste panel tiene además una característica especial, y es que es capaz de mostrar dos colores. Por ello se referencia como bicolor. Ésto no quiere decir que sea posible elegir el color de cada píxel, sino que el display está configurado de la forma como se muestra en la siguiente figura, de modo que las filas de los 16 píxeles superiores solo se podrán iluminar de color amarillo y el resto de filas solamente de color azul cian, tal y como se muestra en la Figura 44.

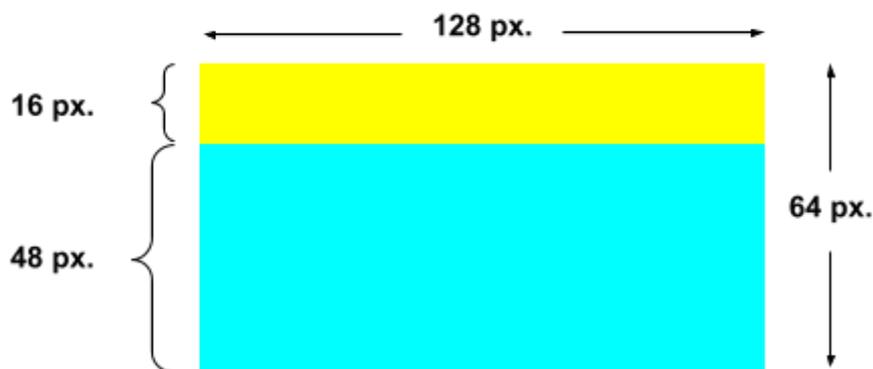


Figura 44. Esquema de colores del módulo SSD1306

El sistema de coordenadas es el tradicional, encontrando el punto (0,0) en la esquina superior izquierda e incrementa el eje x hacia la derecha y el eje y hacia abajo (Figura 45).



Figura 45. Esquema-representación de los ejes de coordenadas por píxeles del módulo SSD1306

La pantalla utiliza un circuito integrado modelo SSD1306, el cual está presente dentro del propio vidrio de la pantalla. Es lo que se denomina chip on glass (COG). Por este motivo se consigue que el panel sea muy delgado.

La ventaja de un panel OLED frente a un LCD es que no requiere retroiluminación global posterior. En la OLED se ilumina solo el píxel que se necesita en cada momento y, deja el resto apagado, en lugar de bloquear la luz como lo haría un LCD. De esta manera se logra un gran contraste de los colores, un excelente ángulo de visión y un reducido consumo de energía. Es por esto, además de porque el panel OLED que se presenta tiene un coste reducido de unos 3€ y un tamaño también muy reducido que se va a elegir para ser utilizado en este Proyecto.

## 2.7 DIAGRAMA DE BLOQUES

Así pues, una vez indicados todos los componentes a utilizar en la Figura 46 se presenta el diagrama de bloques final del algómetro, para tener una visión global de cómo quedan conectadas las distintas etapas que lo componen.

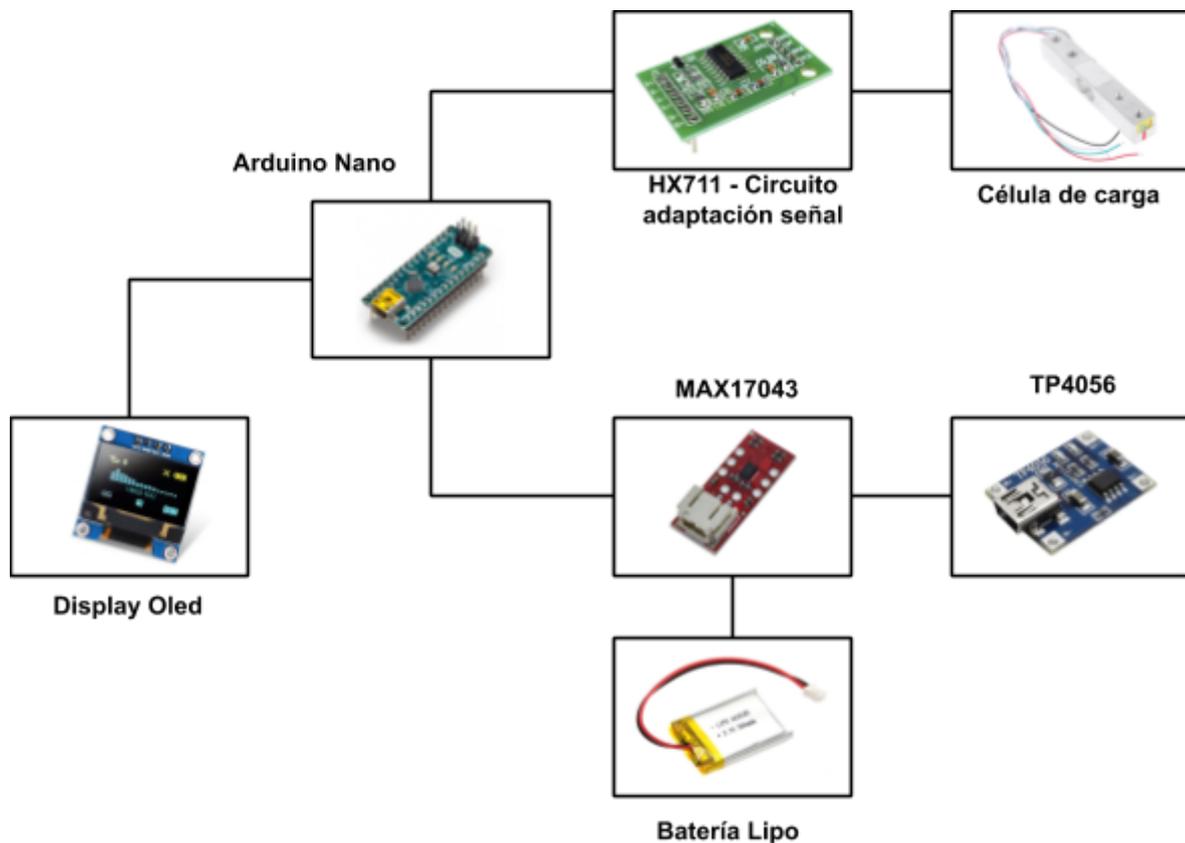


Figura 46. Diagrama de bloques del Proyecto.

Más adelante, en la realización experimental se explicará más detalladamente la forma de conectar los distintos bloques presentes en el dispositivo.

## 2.8 Programa

```
#include <MAX17043.h> //Incluimos librerías para utilizar el MAX17043
#include<MAX17044.h>
#include<MAX1704X.h>

#include <EEPROM.h> //Incluimos librería para la memoria EEPROM

#include "HX711.h" //Incluimos librería para el conversor A/D HX711

#define LOADCELL_DOUT_PIN 3 //Definimos los pines del HX711
#define LOADCELL_SCK_PIN 2

#include <Wire.h> //Librería Wire.h necesaria para la conexión I2C
#include <Adafruit_GFX.h> //Librerías de la pantalla OLED
#include<Adafruit_SSD1306.h>

#define ANCHO 128 //parámetros para el uso de la pantalla OLED
#define ALTO 64
#define OLED_RESET 4

HX711 scale;
MAX17043batteryMonitor;

int page = 1;

boolean volatile up = true; //Variables para el estado de los
pulsadores
boolean volatile down = true;
int right=1;

float calibration_factor; //Variables para el factor de calibración
floatcalibration_factor1;
floatcalibration_factor2;
float a; //variable para mostrar las mediciones en
tiempo real
float b=0; //variable para almacenar el máximo valor
medido
double stateOfCharge = 0;

int i;
int tick=0;
int eeAddress = 0;
int upButtonState = 0;
```

```
int downButtonState = 0;
int lastDownButtonState = 0;
int lastUpButtonState = 0;

Adafruit_SSD1306 oled(ANCHO, ALTO, &Wire, OLED_RESET);

void setup() {

    Serial.begin(115200);                //iniciamos el
puerto serial
    scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN); //iniciamos el
modulo HX711
    scale.set_scale();
    scale.tare();

    pinMode(5, INPUT_PULLUP);           //configuramos los dos pines de
entrada para los pulsadores
    pinMode(6, INPUT_PULLUP);
    Wire.begin();                       //iniciamos la conexión I2C
    FuelGauge.begin();                  //iniciamos el medidor de batería
    batteryMonitor.reset();
    batteryMonitor.quickStart();
    oled.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C); //iniciamos la pantalla
OLED
    oled.clearDisplay();
    oled.display();
}

void loop() {

    drawMenu();

    checkIfUpButtonIsPressed();
    checkIfDownButtonIsPressed();

    if(upButtonState != lastUpButtonState){ //condición para la
variable que almacena el número de veces que se ha accionado el
pulsador

        tick++;

        if(tick>3){
```

```
        tick=0;
    }
}

if(tick == 0){    //Si no se pulsa nada Página 1
    page=1;
}

if(tick == 1){    //Si se pulsa una vez primera parte del modo
calibración

    page=2;

}

if(tick == 2){    //Si se vuelve a pulsar segunda parte del modo
calibración
    page=3;
}

if(down == 1){    //Si se acciona el pulsador de puesta a cero se
igual a 0 la variable que guarda el valor máximo medido
    b=0;
}

}

void checkIfDownButtonIsPressed() //Comprueba el estado del pulsador
{
    downButtonState = digitalRead(6);
    if ((downButtonState == 1) && (lastDownButtonState == 0))
    {
        down = 1 - down;
        delay(10);
    }
    lastDownButtonState=digitalRead(6);
}

void checkIfUpButtonIsPressed() //Comprueba el estado del pulsador
```

```
{
  upButtonState = digitalRead(5);
  if ((upButtonState == 1) && (lastUpButtonState == 0))
  {
    up = 1 - up;
    delay(1000);
  }
  lastUpButtonState=digitalRead(5);

}

void drawMenu() //Esta función dibuja en la pantalla OLED según
el valor de la variable page
{

  if (page==1) //Página 1. Muestra los valores de la presión
aplicada en tiempo real y el máximo
  {
scale.set_scale(calibration_factor);
a=(scale.get_units(5));

  if (a>b){
    b=a;
  }
  if (a<0){
    a=0;
  }
oled.clearDisplay();
oled.setCursor(0,17);
oled.setTextSize(2);
oled.print(a, 3); //Presión aplicada en tiempo real
oled.setCursor(72,17);
oled.print("kg");

oled.setTextSize(1);
oled.setCursor(0, 56);
oled.print("Max: ");
oled.setCursor(30, 48);
oled.setTextSize(2);
oled.print(b, 3); //Valor máxima presión aplicada
oled.setCursor(104, 48);
oled.print("kg");
```

```
oled.drawRect(97, 0, 28, 14, WHITE);
oled.fillRect(125, 4, 3, 6, WHITE);

stateOfCharge = batteryMonitor.getSoC()*0.39; //Muestra el nivel de
la batería
oled.setTextSize(1);
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(99,3);
oled.print(stateOfCharge,0);
oled.println("%");
oled.display();
delay(1000);

}

if (page==2) //MODO CALIBRACIÓN
{
scale.set_scale();
scale.tare();
calibration_factor = 1;
if(i<1){
oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(40,0);
oled.setTextSize(2);
oled.println("MODO");
oled.setCursor(16,16);
oled.println("CALIBRAR");
oled.display();
delay(2000);
}
i++;
oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(0,16);
oled.setTextSize(2);
oled.println(" Coloque peso 1 kg y pulse");
```

```
oled.display();
calibration_factor1 = scale.get_units(10); //Se guarda el
primer punto de la pendiente
}

if (page==3)
{

oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(0,16);
oled.setTextSize(2);
oled.println(" Coloque peso 0.5 kg y pulse");
oled.display();
calibration_factor2 = scale.get_units(10); //Se guarda el
segundo punto de la variable
calibration_factor = ((calibration_factor1 -
calibration_factor2)/(0.5)); //Se aplica la ecuación de la
pendiente para calcular el factor de calibración
i=0;

EEPROM.put( eeAddress, calibration_factor ); //Guarda la
variable del factor de calibración en la memoria EEPROM
eeAddress += sizeof(float);
if(eeAddress >= EEPROM.length()) eeAddress = 0;

}
}
```

### 3. Realización experimental

En este apartado se explicará todo el proceso de ensamblaje, funcionamiento y calibración del equipo con todos los inconvenientes y soluciones aportadas. También se analizarán los resultados y se presentará un prototipo final del proyecto.

#### 3.1 Montaje

Para comenzar con el montaje se conectará la célula de carga al módulo HX711 (Figura 47). La célula de carga dispone de cuatro cables: los cables rojo y negro son los encargados de alimentar el puente de Wheatstone, por lo que el cable rojo se conectará al punto A y el negro al C, tal y como se muestra en la Figura 14. Los cables verde y blanco equivaldrían a los puntos D y B del puente, los cuales serán los encargados de proporcionar la diferencia de voltaje generada por el cambio en el valor de la resistencia de la galga extensiométrica.



Figura 47. Célula de carga de tipo viga de 10 kg

El módulo HX711 es necesario para amplificar y digitalizar las tensiones procedentes de la célula de carga (Figura 47) que dispone de seis pines de entrada. Los pines llamados E+ y E- son los pertenecientes a la alimentación. Este módulo dispone de varios canales de entrada (A y B). En función de a cuál lo conectemos, conseguiremos una ganancia diferente por parte del amplificador, tal y como se indicó en el apartado 2.3. En el caso de este Proyecto, utilizaremos el canal A por defecto ya que con la máxima ganancia (128 V/V) se obtendrá un rango de valores de salida más alto, pudiendo de este modo ajustar el factor de calibración con mayor exactitud. Por lo que los cables verde y blanco de la célula de carga se deberán conectar a los pines A- y A+. El orden entre uno y otro no es relevante. Lo único que se deberá cambiar es el signo del factor de calibración de la célula a lo hora de realizar el programa de Arduino.

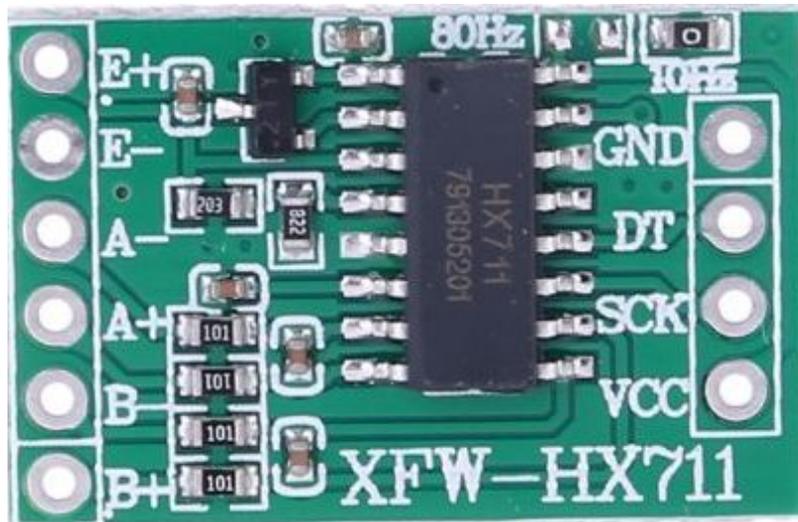


Figura 48. Vista superior del módulo HX711

A la salida del módulo HX711 hay cuatro pines. El pin VCC se deberá conectar a la salida de 5V del Arduino Nano, y el pin de GND, como su nombre indica, se conecta al pin de masa o referencia de Arduino. En cuanto a los pines DT (datos) y SCK (Serial Clock), han de conectarse a dos pines configurados como entrada digital en Arduino. En este proyecto se utilizarán los pines D3 y D2 respectivamente.

Por otro lado, el panel OLED (Figura 43) también dispone de cuatro pines: el pin VCC para la alimentación de entre 3 y 5V, el GND para la masa, y los pines SCL(señal de reloj) y SCA(datos), los cuales son los encargados de realizar la conexión tipo I2C. Por lo que estos dos pines se conectarán a los pines A5 y A4 respectivamente de Arduino, ya que para el caso de Arduino Nano estos dos pines son los configurados para este tipo de conexión.

La conexión entre Arduino y el módulo MAX17043 (Figura 40) es similar a la vista para el panel OLED. Los dos pines de alimentación VCC y GND se conectarán a los pines correspondientes de Arduino, y los asociados a la conexión I2C, SCL y SDA, a las dos entradas analógicas A5 Y A4. El MAX17043 dispone de otros dos pines adicionales para la función de "Alerta" los cuales envían una señal al microcontrolador cuando el nivel de batería es inferior a un cierto valor ajustable, pero para este proyecto no se van a utilizar.

La batería se deberá de conectar también al módulo de carga MAX17043, bien por el conector que dispone para ello, o bien mediante los pines positivo "BAT+" y negativo "BAT-" que se pueden apreciar en la Figura 38. A estos dos pines, correspondientes a los terminales positivo y negativo de la batería, también se tendrá que conectar el módulo TP4056 para la carga de la batería.

También se incluirá para la calibración del equipo y para realizar la puesta cero dos pulsadores. Para evitar el uso de resistencias se utilizará una conexión directa (Figura 49 (a)), es decir que se conectará uno de los pines del pulsador directamente a una entrada digital de Arduino y el otro pin a la referencia. De este modo la entrada digital tendrá un valor "Alto" y cuando se accione el pulsador al estar conectado a la referencia tendrá un valor "Bajo".

Del mismo modo se podría conectar a la alimentación en lugar de a la referencia (Figura 49 (b)) solo que los valores se invertirán. Al no colocar resistencia se deberá configurar en la programación la entrada digital a modo de Alta Impedancia y se deberá realizar la programación teniendo en cuenta los valores que se tendrán cuando el pulsador esté o no accionado.

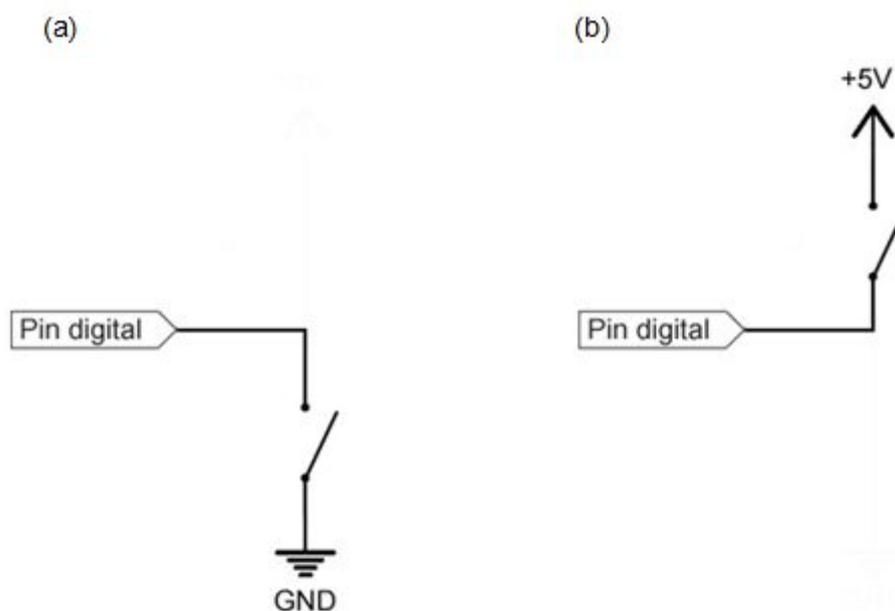


Figura 49. Conexiones posibles de un pulsador a una entrada digital del microcontrolador: (a) a la referencia, o (b) al valor positivo de la fuente de alimentación.

También se va a añadir un interruptor (Figura 50) para encender y apagar el equipo. Se conectará entre el positivo del módulo de carga (TP4056) y el punto común de alimentación. De este modo se conseguirá poder encender y apagar el equipo sin que interfiera en la carga de la batería.



Figura 50. Interruptor de encendido/apagado.

### 3.2 Prototipo

Como resultado visible de este Proyecto se ha llevado a cabo el diseño de un prototipo. Mediante el uso de impresión 3D se ha diseñado una carcasa donde poder colocar todos los componentes de forma que el conjunto resulte un equipo usable, práctico y ergonómico. Las figuras 51, 52 y 53 muestran fotografías del equipo finalizado.



Figura 51. Vista superior del algómetro prototipo.



Figura 52. Vista lateral y trasera del algómetro prototipo.

La carcasa está compuesta de tres partes: una pieza central que compone las paredes del algómetro, una tapa superior y una tapa inferior. Las tres piezas se unen mediante el uso de tornillos de precisión métrica 2 colocados en los bordes.



Figura 53. Usuario manejando el Algómetro prototipo

En la parte superior de la caja encontramos la pantalla OLED (Figura 54). En ésta posición, el usuario va a poder ver los resultados de las mediciones de forma sencilla. Justo debajo se encuentran los dos pulsadores. Como ya se comentó anteriormente, uno se utiliza para el calibrado del sensor de presión, y el otro para la puesta a cero después de cada medida.



Figura 54. Fotografía de la Pantalla y los pulsadores del algómetro prototipo

En la parte trasera (Figura 52) se puede apreciar la punta de mediciones de 1cm<sup>2</sup> de superficie. Finalmente, en la parte inferior del algómetro (Figura 55) se puede apreciar el interruptor de encendido/apagado junto al puerto micro USB para la carga de la batería.



Figura 55. Parte inferior del algómetro prototipo

### 3.3 Calibración del equipo

La forma de calibrar el equipo es ajustando a un cierto valor el factor de calibración de la celda de carga. Éste valor es una variable que podemos modificar en el código de programación.

Con el objetivo de conseguir una mayor precisión a la hora de calibrar el equipo, el método utilizado ha sido el de hallar la pendiente de la recta que forma el factor de calibración de la celda, es decir, el valor que nos devuelve la celda de carga en función del peso que se coloque.

La Figura 56 muestra la pendiente del factor de calibración. Siendo  $x_1$  y  $x_2$  dos pesos conocidos que se colocarían en la celda de carga, e  $y_1$  e  $y_2$  dos valores que proporciona la lectura de la celda de carga podemos calcular con la pendiente conociendo la ecuación de una recta que pasa por dos puntos:

$$p = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2)$$

Ajustando el valor del factor de calibración al de la pendiente se consigue una calibración de la celda de carga más precisa que si solo se ajustara a un solo punto y con un solo peso. De este modo se corrigen posibles no idealidades en la lectura presentes al variar la presión ejercida durante un test real con un paciente.

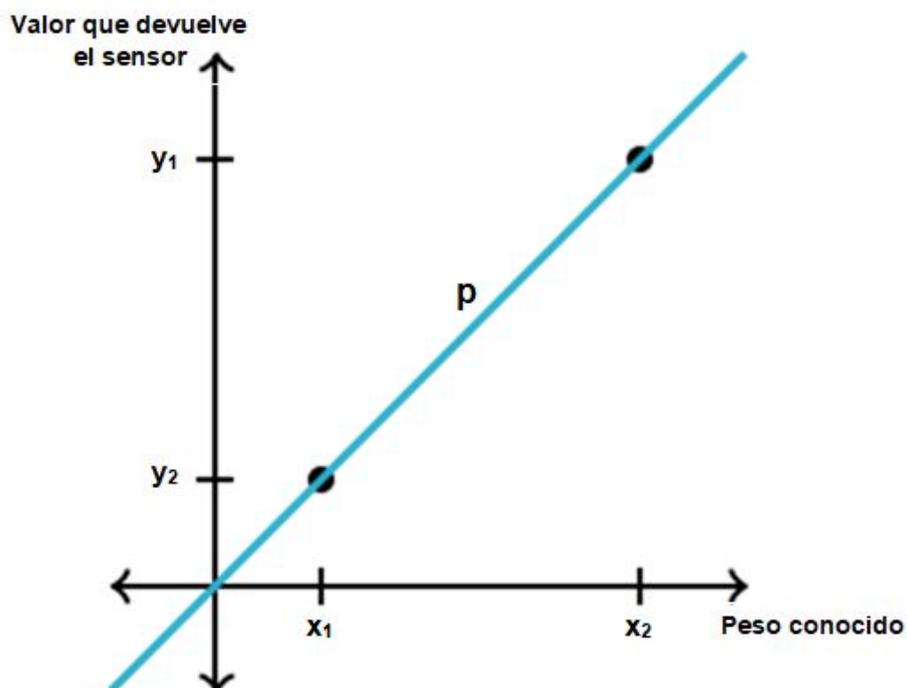


Figura 56. Pendiente de una recta que pasa por dos puntos.

La figura 57 muestra la parte del código empleada para realizar la comentada calibración.

```
oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(0,16);
oled.setTextSize(2);
oled.println(" Coloque peso 1 kg y pulse");
oled.display();
calibration_factor1 = scale.get_units(10);

oled.clearDisplay();
oled.setTextColor(WHITE);
oled.setCursor(0,16);
oled.setTextSize(2);
oled.println(" Coloque peso 0.5 kg y pulse");
oled.display();
calibration_factor2 = scale.get_units(10);
calibration_factor = ((calibration_factor1 - calibration_factor2)/(0.5));
```

Figura 57. Extracto del código de programación diseñado para realizar la calibración de la celda de carga

La lectura de la celda de carga se almacena en dos variables del tipo float, mediante el uso de la función `scale.get_units()`. Finalmente se guarda el factor de calibración calculado con la ecuación de la pendiente en otra variable `calibration_factor`. Los valores de los pesos conocidos que se han impuesto son de 1,0 kg y 0,5 kg de ahí que en el código se esté dividiendo entre 0,5.

Como se muestra en la Figura 58 (a), al presionar el pulsador de calibración se entra en el "Modo Calibración" apareciendo el título así en el display. A continuación (Figura 58 (a)) aparece un texto que avisa de que se coloque el peso conocido de un 1,0 kg. Se presiona el pulsador y se guarda la primera variable. Seguidamente (Figura 58 (c)) aparece otro texto para advertir que ya se puede colocar el peso de 0,5 kg, y al volver a presionar se guarda la segunda variable teniendo así las dos variables guardadas. Con ellas se genera el valor para la variable del factor de calibración el cual se almacena en la memoria EEPROM de Arduino. De modo que se quedará guardada incluso si apagamos el equipo. De este modo ajustamos el factor de calibración a un valor que permitirá que se puedan obtener medidas ajustadas y precisas.

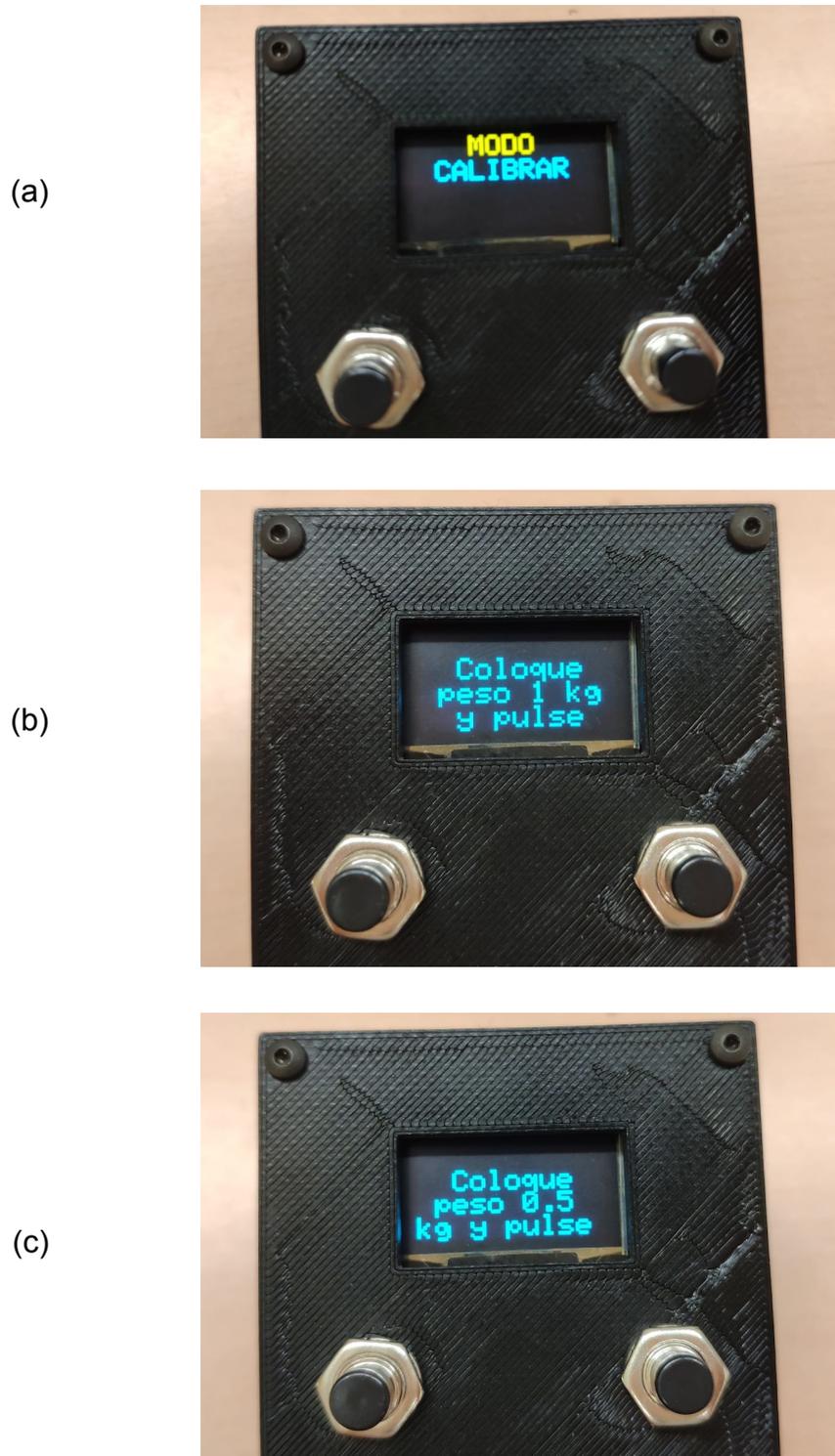


Figura 58. Pantallas del Modo Calibración del algómetro. (a): Entrada en el modo de calibración. (b) y (c): Indicación de la colocación del primer y segundo peso.

#### 4. Conclusiones y puntos de mejora

El objetivo de este trabajo ha sido diseñar un algómetro con componentes de fácil acceso en el mercado. Un algómetro es un instrumento utilizado en centros médicos y de rehabilitación para cuantificar el umbral de dolor por presión. El algómetro resultante debe cumplir las siguientes especificaciones. Una resolución igual o inferior a 50 gr, memoria de la presión máxima aplicada e indicación del nivel batería restante. Todo ello con un reducido coste.

En cuanto a los componentes, se ha elegido una celda de carga extensiométrica ya que las de este tipo se adaptan mejor al tipo de proyecto. De entre varias opciones se eligió una celda de carga de tipo viga flexible con buenas características. Para adaptar la señal de la celda de carga para que pudiera comunicarse con el microcontrolador se ha añadido un módulo basado en un conversor A/D (HX711). Módulo que domina el mercado por su coste y disponibilidad. Como microcontrolador se ha utilizado Arduino por su sencillez de programación y su accesibilidad. También se ha elegido una batería de polímero de litio por su reducido tamaño y su alta capacidad. Para medir el nivel de su carga se ha utilizado el módulo MAX17043, ya que tiene un coste reducido y es también muy accesible. Y para la carga se ha utilizado el módulo TP4056, el cual tiene un gran dominio para su uso en este tipo de baterías.

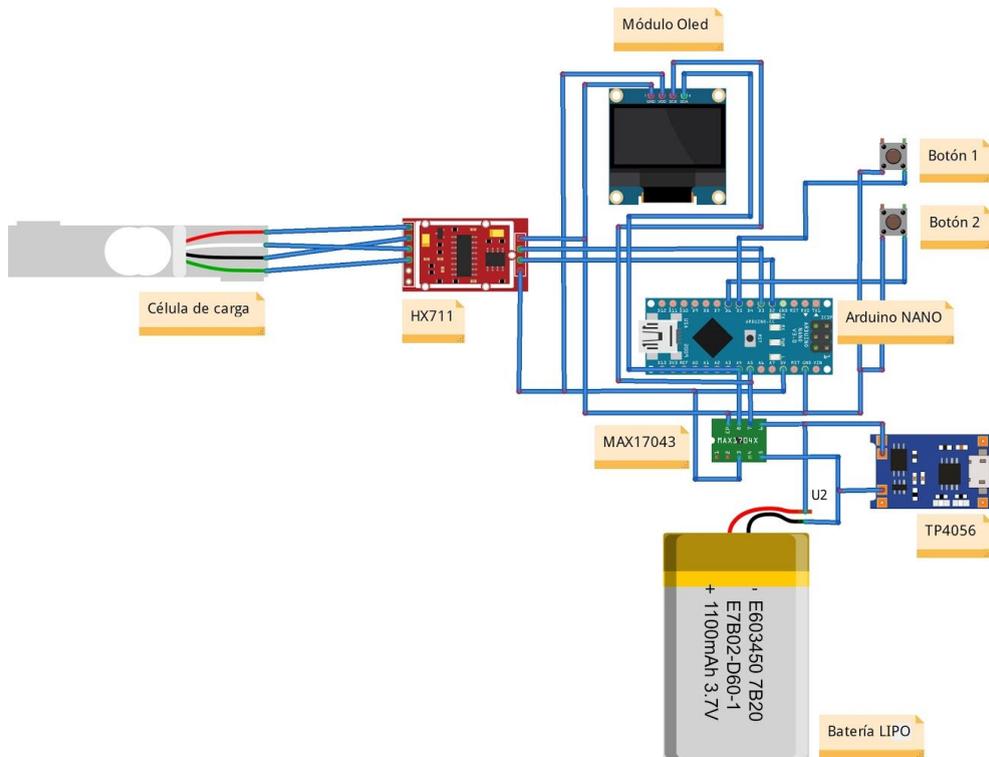
Además, se ha diseñado una carcasa con el uso de impresión 3D para crear un prototipo. Aunque este prototipo todavía se encuentra en fase de prueba.

Uno de los objetivos del Trabajo es la indicación de la carga de la batería. Para este fin se utilizó un módulo basado en el circuito integrado MAX17043. Éste es indicado para dicha aplicación, si bien los resultados obtenidos no fueron los deseados. Aun empleando distintas librerías específicas realizadas para ser utilizadas con Arduino, los resultados no fueron los esperados. En este sentido, la lectura siempre devolvía que la carga de la batería era del 256%, con independencia del tipo de batería utilizada y de su estado de carga. Por ello, cabe la posibilidad de que el comentado módulo estuviese defectuoso. Como plan de contingencia se procedió a pedir otro módulo similar al comentado, y uno distinto, referenciado como DFR0563. Éste es específico para baterías LIPO de 3,7V. Pero el tiempo de envío ha sido incompatible con la entrega de este trabajo. Cabe resaltar que estos tiempos de entrega se han prolongado por motivos relacionados con la pandemia.

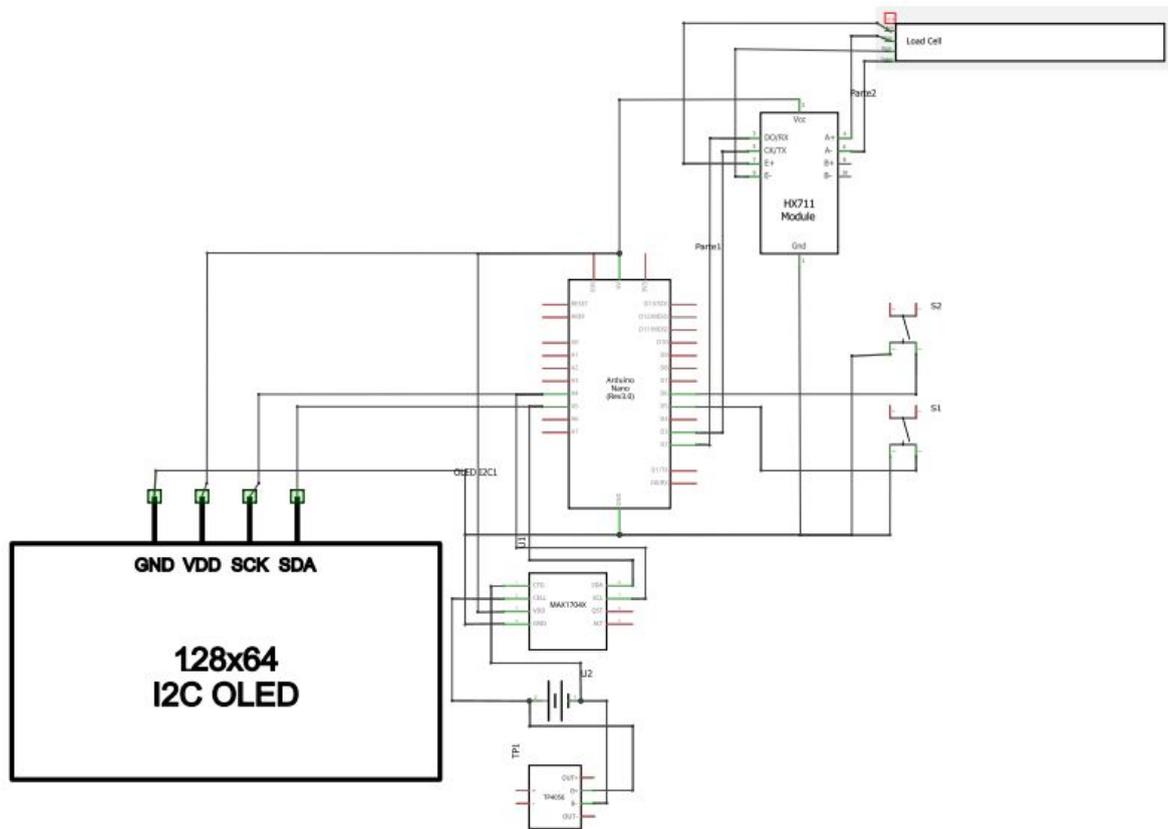
Con el resto de componentes no se ha tenido ningún problema ni inconveniente, todo ha funcionado tal y como se esperaba.

Como conclusión, el proyecto ha obtenido resultados positivos. Se ha conseguido diseñar un prototipo funcional el cual aún se encuentra en fase de pruebas para detectar todos los fallos y carencias que pueda tener. El objetivo de este prototipo es el de entregarlo al Servicio de Medicina Física y Rehabilitación del Hospital General de Valencia para su uso con pacientes reales.

## 5. Planos

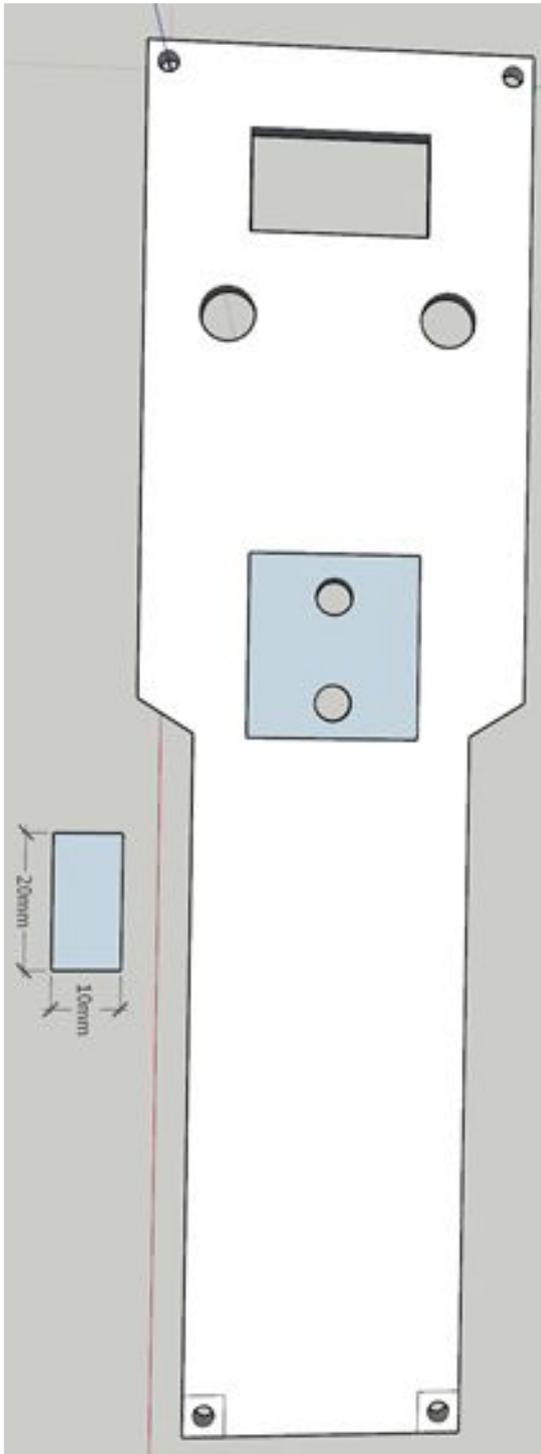


Esquema gráfico diseñado con Fritzing de todos los componentes del Proyecto.

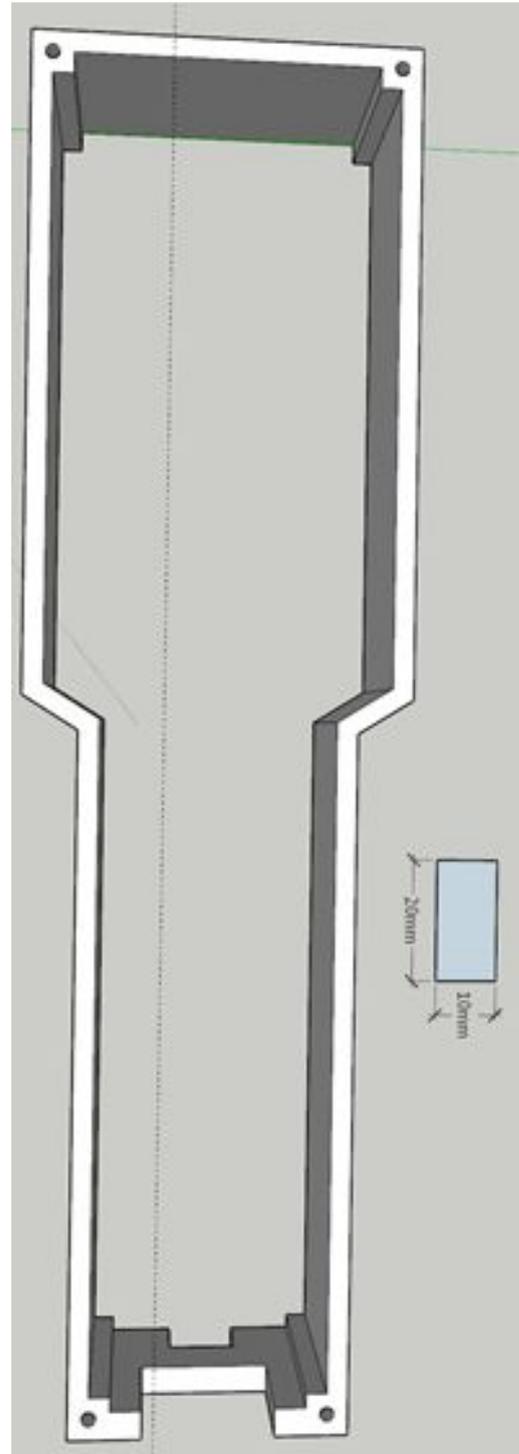


Esquema eléctrico del Proyecto.

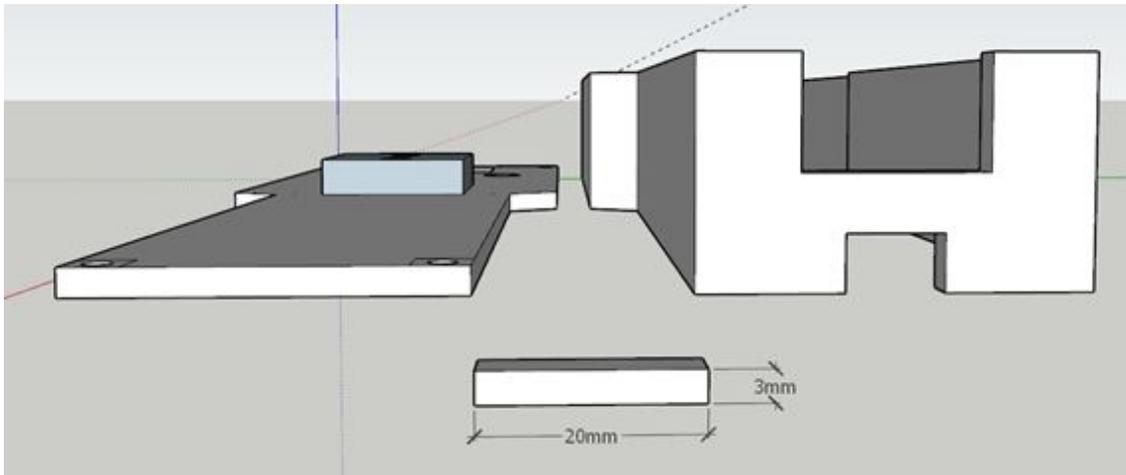
Planos de la carcasa del algómetro. Se incluye una regla para poder obtener todas las medidas del soporte de forma indirecta.



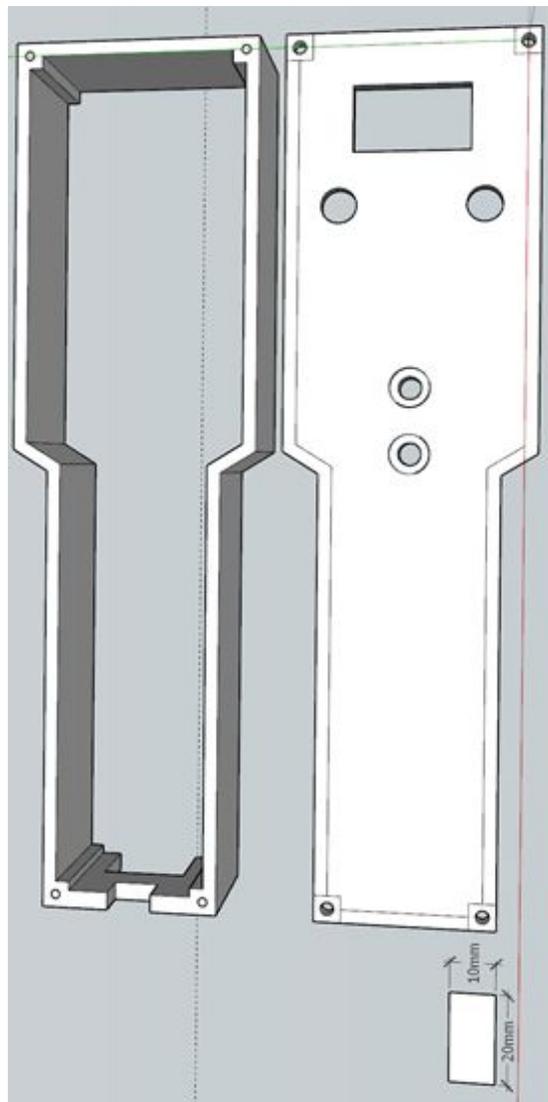
Tapa superior, vista interior.



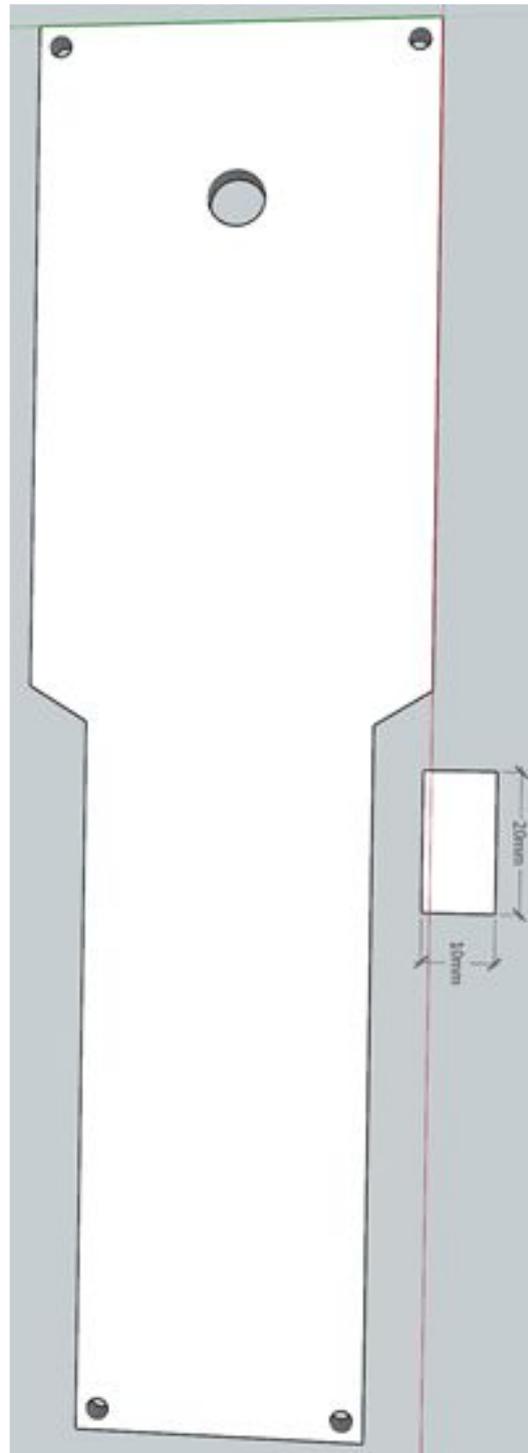
Paredes del algómetro



Vista lateral de la tapa superior y de las paredes del algómetro



Tapa superior, vista superior; Paredes del algómetro



Tapa inferior del algómetro

## 6. Pliego de condiciones

El objetivo de este documento es el de establecer las condiciones y garantías para el correcto funcionamiento del equipo, así como de garantizar la seguridad de las personas y de los materiales utilizados.

- Microcontrolador

Especificaciones que debe tener el microcontrolador que se utilice en este proyecto:

- Disponer de al menos 2 entradas analógicas aptas para la comunicación I2C
- Disponer de al menos 4 pines de E/S digitales
- Tensión de alimentación de 5V
- Compatible con programación C o C++.
- Conexión USB
- Placa con un reducido tamaño
- Conversor A/D de 10 bits

- Célula de carga

Especificaciones que debe cumplir la célula de carga:

- Célula de carga de tipo viga
- Capacidad de 10 kg
- Error máximo de 0.5%F.S.
- Compatible con una alimentación de 5V
- Sobrecarga máxima del 150%
- Tamaño y peso reducido

- Batería

Especificaciones que debe cumplir la batería utilizada:

- Tensión mínima de 5V
- Tensión máxima de 12V
- Tamaño y peso muy reducido

- Precauciones

No se debe tocar ninguno de los componentes a excepción de los pulsadores y el interruptor durante el montaje del equipo si éste se encuentra en funcionamiento.

Imprescindible tener el equipo apagado cuando se vaya a cargar la batería. De lo contrario se podrían producir daños irreversibles en el equipo.

- Normativa
  - UNE EN 61010-1. Requisitos de seguridad de equipos de medición, control y su uso en el laboratorio.
  - ITC-BT-24. Protección contra contactos directos e indirectos.
  - CEM, 2004/108/CE. Compatibilidad Electromagnética.
  - LVD, 2006/95/CEE. Circuitos de baja tensión.
  - ISO 13485:2016. Gestión de la calidad de dispositivos médicos.

## 7. Presupuesto

### Presupuesto de los componentes

	Precio/unidad (€)	Unidades	Total (€)
Módulo de pantalla OLED IIC	3,16	1	3,16
Arduino Nano 3.0 Atmega328	3,17	1	3,17
Célula de carga 10 kg + Módulo AD HX711	3,92	1	3,92
Módulo de detección de batería de litio I2C MAX17043	3,01	1	3,01
Batería LIPO 3,7V 700mAh 702050	5,62	1	5,62
TP4056 Módulo cargador de baterías Lúcio Micro USB	1,7	1	1,7
Botón pulsador momentáneo 7mm	0,8	2	1,6
Interruptor de encendido/apagado	0,554	1	0,554
<b>Total =</b>			<b>22,73 €</b>

### Presupuesto del software Google Sketchup

Licencia Euros/año	Días de trabajo al año	Horas/Día	Total horas al año	Horas uso programa	Precio final (€)
450	273	8	2184	20	4,12

### Presupuesto Impresora 3D

Plástico	Precio kg (€)	Masa utilizada (g)	Coste plástico de la pieza (€)
	25	80	2

**DISEÑO Y REALIZACIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO PARA LA MEDIDA DEL UMBRAL DE DOLOR EN  
PACIENTES CON LESIONES MUSCULARES**

---

Uso de la impresora										
Precio impresora (€)	Mantenimiento anual	Años de uso	Días de trabajo al año	Horas/día	Total horas al año	Tiempo de uso de la impresora	Horas disponibles al año	Total horas de uso de la impresora 3D	Tiempo de uso de la impresora (h)	Coste asociado a la impresora 3D (€)
300	50	2	273	24	6552	70%	4586,4	9172,8	12	0,52

Presupuesto horas de trabajo

Horas de trabajo (h)	€/hora	Total (€)
300	35	10500€

Presupuesto total del Proyecto	10529,37 €
--------------------------------	------------

## 8. Bibliografía

- <https://www.mayoclinic.org/es-es/diseases-conditions/myofascial-pain-syndrome/symptoms-causes/syc-20375444#:~:text=El%20s%C3%ADndrome%20de%20dolor%20miofascial,se%20denomina%20%C2%ABdolor%20diferido%C2%BB>
- <https://www.lcmsystems.com/how-to-select-a-load-cell>
- <http://www.wagnerinstruments.com/products/Pain-Test-Algometers/fpix>
- <https://programafacil.com/blog/arduino-blog/hx711-arduino-bascula-digital/>
- <https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html>
- <https://www.luisllamas.es/alimentar-arduino-baterias/>
- <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/07/09/i2c/>
- <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/hiperalgesia>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3309218/>
- <https://descubrearduino.com/arduino-nano-pinout/>

## Referencias

- 1 Giburm Park, M.D., Chan Woo Kim, M.D., Si Bog Park, M.D., Mi Jung Kim, M.D., and Seong Ho Jang, M.D. Reliability and Usefulness of the Pressure Pain Threshold Measurement in Patients with Myofascial Pain. NCBI. 2011
- 2 <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/hiperalgesia>
- 3 <https://www.historiadelamedicina.org/libman.htm>
- 4 <https://tienda.fisaude.com/algometro-analogico-fpk-60-p-47754.html>
- 5 <http://www.wagnerinstruments.com/products/Pain-Test-Algometers/fpx>
- 6 <https://www.medoc-web.com/algomed>
- 7 <https://www.fisioshop.es/accesorios-diagnostico-medicion/algometro-digital.html>
- 8 <https://tienda.fisaude.com/algometro-inalambrico-commander-echo-p-35896.html>
- 9 <https://orchidscientific.com/product/algometer/#:~:text=Orchid%20Scientific's%20Algo%20meter%20easily%20measures,pain%20tolerances%20reported%20by%20patients.&text=Algometer%20are%20designed%20to%20quantify,sensitivity%20via%20pain%20tolerance%20measurement.>
- 10 <http://www.wagnerinstruments.com/products/Pain-Test-Algometers/fpix>
- 11 <https://midebien.com/que-son-y-para-que-sirven-las-galgas-extensiométricas/>
- 12 <https://spanish.alibaba.com/product-detail/as-a-2kg-5kg-10kg-20kg-30kg-50kg-100kg>

-aluminum-alloy-s-type-load-cell-60685271690.html?spm=a2700.md\_es\_ES.deiletai6  
.10.3dd53082eZbt1L

13

<https://es.aliexpress.com/item/33041504449.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.2a0c63c0CJLLoO>

14

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/10kg-100kg-200kg-spoke-type-round-compression-load-cell-for-belt-scale-846191987.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.28a3205c013WFh>

15

<https://spanish.alibaba.com/product-detail/half-bridge-mini-miniature-human-scale-low-cost-load-cell-10kg-30kg-50kg-62238376975.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.28a3205c013WFh>

16 <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2017/07/09/i2c/>

17 <https://descubrearduino.com/arduino-nano-pinout/>

## Anexos

- Hojas de características de los componentes electrónicos
  - <https://roboromania.ro/datasheet/Arduino-Nano-roboromania.pdf>
  - [https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711\\_english.pdf](https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf)
  - <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
  - <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX17043-MAX17044.pdf>
  - [https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0563\\_Web.pdf](https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/DFRobot%20PDFs/DFR0563_Web.pdf)
  - <https://www.elektronik.ropla.eu/pdf/stock/aky/aky0073.pdf>
  - <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>