



Universidad de Valladolid



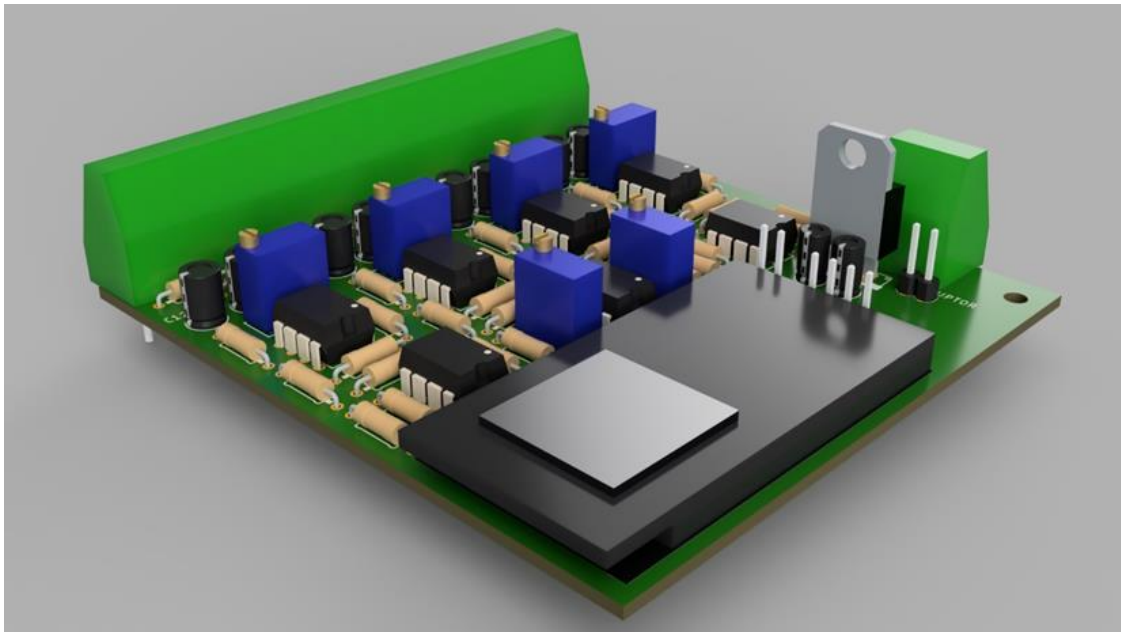
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES

Universidad de Valladolid

Escuela de Ingenierías Industriales

Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática

# DISEÑO DE UN EQUIPO PORTÁTIL PARA PESAR GRANDES OBJETOS



Autor: Pedro Blanco Fragua





**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería en Electrónica Industrial y Automática**

**Diseño de un equipo portátil para pesar  
grandes objetos**

**Autor:**

**Blanco Fragua, Pedro**

**Tutor:**

**Buey Cuesta, José Julio  
Departamento de Tecnología  
Electrónica**

**Valladolid, junio 2021**



## RESUMEN

Actualmente, la oferta de básculas industriales es visiblemente amplia. Sin embargo, escasean en comparación las opciones de equipos pequeños y portables que permitan el pesaje de grandes objetos. Los que existen están además más enfocados al pesaje de vehículos y dependen de un costoso visor electrónico para cumplir su función. Las plataformas de pesaje de vehículos aparentan ser un mercado en expansión que todavía no ha desarrollado todo su potencial.

Por ello, el presente trabajo tiene como objetivo presentar una alternativa económica a estos equipos que sea de uso más cómodo y accesible para el gran público. Además, se aspira a aportar al lector los conocimientos necesarios para comprender el funcionamiento de un equipo de pesaje y a ofrecer la suficiente información como para que cualquiera pueda construirlo y utilizarlo si cuenta con los medios materiales.

## Palabras clave

Báscula, célula de carga, medida, instrumentación, amplificador, Eagle

## ABSTRACT

Nowadays, the offer of industrial scales is noticeably wide. However, they scarce in comparison the options of small and portable devices which allow the weighting of large objects. Besides, the ones which do exist are more focused on the weighting of vehicles and depend on a costly electronic visor to achieve their function. The platforms for vehicle weighting appear to be a market in expansion which has yet to develop it's potential.

Thus, the present work has as a goal to present an economic alternative to these devices that would be of easier use and more accessible for the big public. Furthermore, it is strived to provide the reader with the knowledge needed to understand the performance of a weighting system and offer enough information as to allow anyone to build and use it if they count with the material means.

## Keywords

Scale, load cell, measure, instrumentation, amplifier, Eagle



## ÍNDICE

RESUMEN/ABSTRACT .....	3
Palabras clave/Keywords .....	3
INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS .....	11
DESARROLLO DEL TFG .....	13
1. ESTADO DEL ARTE: BÁSCULAS INDUSTRIALES .....	13
1.1. Paquetería/de mesa .....	14
1.2. Cuentapiezas .....	14
1.3. De plataforma .....	15
1.4. Barras pesadoras .....	16
1.5. Transpaletas pesadoras.....	16
1.6. Ganchos pesadores.....	17
1.7. Básculas puente .....	17
1.8. Básculas portátiles para vehículos .....	18
1.8.1. Báscula Reich .....	19
1.8.2. Serie PR.....	19
1.8.3. Serie WWS.....	21
1.8.4. Serie BPR .....	23
1.8.5. Serie RW.....	24
2. ESTUDIO DE LAS CÉLULAS DE CARGA .....	25
2.1. Fundamento físico.....	25
2.2. Galgas extensiométricas.....	27
2.2.1. Galgas piezorresistivas .....	28
2.2.2. Galgas piezoeléctricas .....	30
2.2.3. Otras galgas .....	32
2.3. Puente de Wheatstone.....	33
2.4. Principio de funcionamiento .....	37
2.5. Tipos de células de carga .....	39
2.5.1. Células de viga de flexión .....	39
2.5.2. Células de viga de flexión doble .....	41
2.5.3. Células de viga de flexión plana .....	42
2.5.4. Células de compresión.....	43
2.5.5. Células tipo S .....	44

2.5.6. Células de carga hidráulicas .....	45
3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA .....	47
3.1. Solución general mercado.....	49
3.2. Solución escogida .....	51
3.2.1. Propuesta inicial .....	51
3.2.2. Propuesta final .....	52
4. DISEÑO DEL SISTEMA DE PESADO .....	54
4.1. Selección de célula de carga .....	54
4.2. Acondicionamiento .....	57
4.2.1. Filtrado.....	57
4.2.1.1. Filtro paso bajo .....	58
4.2.1.2. Filtro diferencial .....	60
4.2.1.3. Diseño del filtro .....	61
4.2.2. Amplificación .....	63
4.2.2.1. Rechazo del modo común (CMRR).....	63
4.2.2.2. Dos etapas .....	64
4.2.2.3. Amplificadores de instrumentación.....	66
4.2.2.4. Diseño teórico del amplificador .....	70
4.2.2.5. Selección de componentes del AI.....	73
4.2.3. Sumador no inversor .....	76
4.2.3.1. Diseño del sumador.....	77
4.3. Alimentación.....	79
4.3.1. Batería .....	79
4.3.2. Regulador de tensión.....	86
4.3.2.1. Diodo Zener .....	86
4.3.2.2. Regulador de tensión .....	88
4.4. Procesador .....	89
4.4.1. Microcontrolador Arduino .....	89
4.4.1.1. Arduino Nano.....	90
4.4.1.2. Arduino Yún Rev 2 .....	91
4.4.2. Microcontrolador ESP32 .....	91
4.4.2.1. El problema con el ADC del ESP32.....	93
4.4.3. Apunte sobre los métodos de transmisión .....	96
4.4.3.1. RS-232.....	96



4.4.3.2. RS-422 .....	96
4.4.3.3. RS-485 .....	97
4.4.3.4. Bluetooth.....	97
4.4.3.5. WiFi.....	98
4.5. Programación del ESP32 .....	99
4.5.1. Introducción y montaje.....	102
4.5.2. Software en ESP32 .....	103
4.5.3. Software en Android .....	109
4.5.4. Pruebas del modelo .....	112
4.6. Diseño PCB .....	116
4.6.1. Herramienta utilizada: Autodesk Eagle.....	116
4.6.1.1. Otras opciones consideradas .....	118
4.6.2. Circuito completo.....	119
4.6.2.1. Simulación .....	121
4.6.2.2. Lista de componentes.....	126
4.6.2.3. Trazado PCB.....	129
4.7. Aproximación al montaje físico.....	132
4.7.1. Modelado 3D del circuito.....	132
4.7.2. Diseño y modelado 3D de la plataforma .....	133
4.7.2.1. Estructura base .....	133
4.7.2.2. Alojamiento de componentes electrónicos .....	134
4.7.2.3. Células de carga .....	135
4.7.2.4. Conjunto.....	136
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>139</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>141</b>
1. Libros .....	141
2. Artículos y pdf online .....	141
3. Páginas web .....	142
4. Productos .....	143
4.1. Básculas.....	143
4.2. Células de carga .....	145
4.3. Componentes.....	146
4.3.1. Amplificadores operacionales/de instrumentación.....	146
4.3.2. Diodos Zener.....	147

4.3.3. Reguladores de tensión.....	147
4.3.4. Baterías .....	148
4.3.5. Procesadores .....	149
4.3.6. Componentes pasivos .....	150
4.3.7. Otros.....	150

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Balanza romana.....	11
Ilustración 2: ICS465k-6SM/f, Mettler Toledo .....	14
Ilustración 3: PCE-TB 6C, PCE Intruments .....	15
Ilustración 4: K2 XBengal, Gram .....	15
Ilustración 5: ZFI, Baxtran .....	16
Ilustración 6: Basic, Jungheinrich.....	16
Ilustración 7: SBS-KW-3/1K, Steinberg Systems .....	17
Ilustración 8: Báscula puente .....	18
Ilustración 9: Báscula Reich .....	19
Ilustración 10: Plataformas serie PR, Gram .....	20
Ilustración 11: Célula H8C-C3, Zemic Europe .....	20
Ilustración 12: Corte plataformas serie PR.....	20
Ilustración 13: Indicador MK3, Gram.....	21
Ilustración 14: Plataforma serie WWS sin display, Dini Argeo .....	22
Ilustración 15: Plataforma serie WWS con display, Dini Argeo .....	22
Ilustración 16: Indicador 3590ETKR, Dini Argeo .....	22
Ilustración 17: Plataformas WWS con módulos de nivelación, Dini Argeo .....	23
Ilustración 18: Plataforma serie BPR de bajo perfil, Giropes.....	23
Ilustración 19: Plataforma serie BPR de perfil estándar, Giropes .....	23
Ilustración 20: Indicador GI620, Giropes .....	24
Ilustración 21: Plataformas serie RW, HKM .....	24
Ilustración 22: Gráfica deformación - tensión .....	26
Ilustración 23: Deformación sólido rígido.....	27
Ilustración 24: Deformación sobre galgas resistivas.....	28
Ilustración 25: Resistividad .....	29
Ilustración 26: Condensador en galgas capacitivas .....	31
Ilustración 27: Puente de Wheatstone con una resistencia variable .....	33
Ilustración 28: Puente de Wheatstone con dos resistencias variables.....	35
Ilustración 29: Puente de Wheatstone lineal .....	35
Ilustración 30: Análisis de fuerzas en una viga empotrada .....	37
Ilustración 31: Galgas sobre viga empotrada .....	38
Ilustración 32: Fuerzas en células tipo viga de flexión .....	40

Ilustración 33: SB8, Flintec .....	40
Ilustración 34: Fuerzas en células tipo viga de flexión doble .....	41
Ilustración 35: 460, Utilcell .....	41
Ilustración 36: Fuerzas en células tipo viga de flexión plana .....	42
Ilustración 37: L6P, Zemic Europe.....	42
Ilustración 38: Fuerzas en células tipo compresión.....	43
Ilustración 39: DL, Eilersen .....	44
Ilustración 40: Fuerzas en células tipo S .....	44
Ilustración 41: S21S, Bosche.....	45
Ilustración 42: Sección célula de carga hidráulica.....	45
Ilustración 43: HLC-6050, GeoSense.....	46
Ilustración 44: Estructura equipos de instrumentación.....	47
Ilustración 45: Diagrama de bloques básculas del mercado .....	49
Ilustración 46: Diagrama de bloques primera solución escogida .....	51
Ilustración 47: Diagrama de bloques propuesta final .....	52
Ilustración 48: Resonancias tiempo – frecuencia.....	58
Ilustración 49: Filtro de paso bajo .....	58
Ilustración 50: Filtro diferencial .....	60
Ilustración 51: Bode del filtro diferencial .....	62
Ilustración 52: Diferenciador y amplificador .....	64
Ilustración 53: Amplificador de instrumentación de 2 operacionales .....	67
Ilustración 54: Amplificador de instrumentación de 3 operacionales .....	68
Ilustración 55: Simulación AI a 10 mV .....	72
Ilustración 56: Simulación AI a 100 mV .....	72
Ilustración 57: INA110, Texas Instruments.....	73
Ilustración 58: INA101, Texas Instruments.....	74
Ilustración 59: LM358N, Texas Instruments .....	75
Ilustración 60: Sumador no inversor .....	76
Ilustración 61: Simulación sumador no inversor .....	78
Ilustración 62: LM741, Texas Instruments .....	78
Ilustración 63: Resistencias Wheatstone en paralelo.....	80
Ilustración 64: Montaje Simulink batería .....	82
Ilustración 65: Simulación Zippy S2 .....	83
Ilustración 66: Simulación Zippy S3 .....	83
Ilustración 67: Simulación batería bloque 9 V.....	84
Ilustración 68: Simulación bloques 9 V en paralelo.....	84
Ilustración 69: Batería bloque y batería Zippy .....	85
Ilustración 70: Diodo Zener .....	87
Ilustración 71: L7805CV, STMicroelectronics.....	89
Ilustración 72: Arduino Nano .....	90
Ilustración 73: Módulo bluetooth HC-06.....	91
Ilustración 74: ESP32 .....	93
Ilustración 75: Respuesta ADC ESP32 .....	94

Ilustración 76: Modificación de respuesta ADC ESP32.....	95
Ilustración 77: Pinout RS-232 .....	96
Ilustración 78: Estructura Bluetooth .....	97
Ilustración 79: Trama WiFi .....	98
Ilustración 80: Diagrama de flujo del software .....	100
Ilustración 81: Estructura red de plataformas .....	101
Ilustración 82: Estructura URL de la red.....	101
Ilustración 83: Esquema de conexión ESP32 .....	102
Ilustración 84: Diseño App Inventor .....	111
Ilustración 85: Programa bloques App Inventor .....	111
Ilustración 86: Montaje ESP32 protoboard .....	112
Ilustración 87: Display pesos.....	112
Ilustración 88: Tara en monitor serie.....	113
Ilustración 89: Prueba página HTML.....	114
Ilustración 90: Prueba App Android .....	115
Ilustración 91: Pantalla esquema eléctrico Eagle.....	117
Ilustración 92: Pantalla diseño PCB Eagle .....	117
Ilustración 93: Pantalla general Fusion360 .....	118
Ilustración 94: Diseño circuito completo .....	121
Ilustración 95: Circuito completo simulable .....	123
Ilustración 96: Configuración simulación .....	124
Ilustración 97: Simulación (0, 0'01) V.....	124
Ilustración 98: Simulación (0, 0'1) V .....	125
Ilustración 99: Diseño PCB .....	131
Ilustración 100: Modelo 3D automático Fusion360.....	132
Ilustración 101: Render modelo 3D PCB.....	133
Ilustración 102: Estructura base.....	134
Ilustración 103: Alojamiento dispositivos electrónicos .....	135
Ilustración 104: Placa ajustable células de carga .....	136
Ilustración 105: Render modelo 3D plataforma completa.....	136

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Células de carga.....	56
Tabla 2: Baterías.....	81
Tabla 3: Diodos Zener .....	87
Tabla 4: Reguladores de tensión.....	88
Tabla 5: Errores de medida .....	126
Tabla 6: Listado de componentes .....	127
Tabla 7: Listado de componentes externo a la PCB .....	128
Tabla 8: Previsión componentes plataforma.....	137

## INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Cuando pensamos en básculas, nos viene pronto a la mente la imagen del instrumento básico que podemos encontrarnos día a día en la cocina o el supermercado. Es un instrumento de medida con una larga historia ligada intrínsecamente al desarrollo del comercio. Es necesario, a fin de cuentas, conocer la masa de cierta cantidad de producto en venta para tasar su precio frente a distintas cantidades de ese mismo producto.

El modelo de báscula más popular y empleado hasta el siglo XX, era la balanza romana. Basada en encontrar el equilibrio entre los momentos producidos por dos pesos, consta de un mástil, con el punto del del que se colgaba la balanza desviado respecto del centro. En uno de los lados, se colgaban los productos a pesar, y en el otro se desplazaba un peso fijo por unas marcas hasta encontrar el punto de equilibrio.

Como indica su nombre, el Imperio Romano fue responsable de su extensión por Europa, aunque se traza su origen hasta Egipto. El contrapeso recibía el nombre de aequipondium, cuya masa estaba regulada dentro del marco de la Lex Silia. Esto relaciona la balanza romana con el Derecho Romano, del que evoluciona el nuestro propio.



*Ilustración 1: Balanza romana*

A partir del siglo pasado, el desarrollo y popularización de básculas mecánicas de muelles desplazó el uso de estos modelos más sencillos, y tomaron el lugar en las aplicaciones industriales. Más adelante, llegaría la revolución electrónica y cualquier otro tipo de báscula queda relegado a un uso de nicho. Las básculas electrónicas son más precisas, más compactas, permiten operar sobre las medidas, comunicarse con sistemas de control... En resumen, en una sociedad tecnificada es la mejor solución en casi cualquier ámbito.

Como simple nota a pie de página, comentar que, en el lenguaje coloquial, nos referimos a los aparatos de medida de peso con los términos “balanza” y “báscula” indiferentemente. Balanza proviene del latín bilanx, que se degradó a latín vulgar bilancia y de ahí evolucionó al castellano. Hace referencia a un aparato que sirve para pesar. Báscula, por otra parte, proviene del francés bascule, lo que implica que es un término que se incorporó posteriormente al lenguaje como préstamo. También se refiere a un aparato que sirve para medir pesos, pero concretando en pesos elevados. A lo largo de este trabajo se respetará la referencia lingüística, usando como término general báscula, que es el más extendido y reduciendo el uso de balanza a momentos concretos.

El objetivo último de este trabajo viene descrito por el propio título, “Diseño de un equipo portátil para pesar grandes objetos”. El equipo deberá además poder pesar cuerpos que, por su estructura, forma o composición; no puedan ser trasladados a una báscula industrial de gran tamaño, y que por tanto deben de pesarse in situ. Para ello, habrá de estar el sistema conformado, previsiblemente, por dos o más plataformas de pesaje que envíen el valor del peso a un dispositivo que actúe de nexo. Estudiaremos las opciones disponibles actualmente en el mercado para el pesaje industrial y desarrollaremos de forma íntegra el diseño teórico de un equipo propio. Para ello, analizaremos cada una de las partes formantes de un equipo de pesado y su electrónica de instrumentación y asignaremos componentes reales con los que pudiera fabricarse el diseño. El diseño irá apoyado por cálculos teórico y simulaciones de las partes del circuito. Culminará el trabajo con una propuesta completa del equipo, incluyendo diseño de la PCB, que pudiera ser un prototipo construible si se deseara.

En cuanto a la estructura del trabajo en sí, primeramente, veremos un estudio del estado del arte del pesaje, es decir, de la oferta general de básculas para aplicaciones industriales. Dentro de este apartado incluiremos uno más específico sobre las básculas portátiles para pesaje de vehículos, basadas en plataformas independientes y las que más se asemejan al objetivo final. A continuación, haremos un estudio de las células de carga, el sensor principal de cualquier sistema de pesado, así como su propia clasificación y estado del arte. Por último, desarrollaremos lo que es el cuerpo principal del trabajo y diseñaremos el equipo, justificando las elecciones tomadas y aportando una introducción teórica de las partes en uso. Se estructurará siguiendo el camino de una medida en un circuito de instrumentación. Haremos uso principalmente de las herramientas de Matlab y Autodesk Eagle para la simulación de los componentes y el diseño del circuito.

## DESARROLLO DEL TFG

### 1. ESTADO DEL ARTE: BÁSCULAS INDUSTRIALES

Hoy en día, las balanzas son un elemento común, extendido fuera de los mercados. Con la digitalización del aparato, se han vuelto un instrumento barato que cualquiera puede tener en su casa. Así, nos encontramos modelos básicos de balanzas de baño o de cocina. También se ha extendido su uso en los comercios como pescaderías, carnicerías y fruterías, aprovechando funciones tales como la impresión de tickets para favorecer el autoservicio.

Con el desarrollo industrial, nuevas necesidades de pesaje surgieron, lo que llevó a una especialización en los modelos. El resultado es que actualmente existe un amplio abanico de modelos especializados en una operación concreta, como el pesado de palés. La diferenciación entre estos modelos es principalmente la forma, tamaño y posición de la plataforma de pesaje. Pueden presentar modificaciones extras sobre el tipo base, como un aislamiento específico contra el polvo, el grado de impermeabilidad o el material constructivo de la plataforma, dependiendo de la aplicación concreta. Estas modificaciones pueden ser muy relevantes en industrias con características especiales de higiene y sanidad, como la veterinaria y la alimenticia. Además, el peso reducido frente a modelos mecánicos habilita que la gran mayoría de las básculas industriales no sean fijas, permitiendo la recolocación del dispositivo en casi cualquier momento.

El visor de la medida puede estar o no acoplado a la plataforma de pesaje. En modelos sencillos, lo normal es que formen una sola unidad. Sin embargo, en modelos de mayor tamaño o más especializados, como en barras pesadoras o plataformas de suelo de gran tamaño, el visor va a parte. Esto posibilita seleccionar un visor adecuado a las necesidades, con mayor o menor resolución (si la plataforma utilizada lo permite), la inclusión de una impresora de medidas o una memoria interna que almacene cierto número de medidas previas. Estos visores externos se alimentan normalmente por pilas o baterías recargables.

Algunos productores ofrecen una capacidad amplia de personalización de equipo, permitiendo elegir características tales como el rango, la resolución, el tamaño de la plataforma y el visor.

A continuación, enumeraremos los ocho tipos de básculas de uso industrial en que se ha clasificado la amplia oferta del mercado. Se aportarán para cada uno de los tipos ejemplos de alguna serie comercial, para dar una idea del estado del mercado, pero siendo imposible profundizar más debido a

la gran amplitud del mismo. En la bibliografía se aportan enlaces a la página del distribuidor, dónde se presentan las características en mayor profundidad.

### 1.1. Paquetería/de mesa

Agrupamos en esta subcategoría tanto a las de mesa, que estéticamente se asemejan más a la idea de báscula del día a día; como las de suelo, de diseño más simplificado en comparación. Incluimos en esta categoría a aquellas básculas utilizadas para pesar elementos de tamaño pequeño o medio, tales como paquetes, sacos o cubos con líquido. Constan de una única plataforma de pesado, generalmente rectangular y metálica, de lado inferior a 1 m. La capacidad de carga está por debajo de la tonelada, oscilando el máximo entre los 30 y los 150 kg. Suelen tener una sola célula de carga. El visor puede ir acoplado al frontal, formando un único cuerpo con la plataforma, estar colocado en una columna en la parte posterior, especialmente en el caso de las de suelo; o ser independiente de la plataforma. Las de suelo tienen mayor capacidad que las de mesa, pero las incluimos en esta categoría por no llegar a los pesos de las de plataforma.

Un ejemplo es el modelo ICS465k-6SM/f de Mettler Toledo.



*Ilustración 2: ICS465k-6SM/f, Mettler Toledo*

### 1.2. Cuentapiezas

Son una variante sobre el tipo anterior, pero con una diferencia importante, su diseño gira entorno a ser utiliza para contar piezas de pequeño tamaño. En base a una muestra del peso de una pieza, calcula cuántas del mismo tipo se ha colocado sobre la balanza. Por lo general, almacenan en memoria varios tipos de piezas distintas seleccionables para ser contadas. Su uso está bastante extendido en especial en el ámbito carpintero-ferretero, con presencia en otras industrias. Tienden a tener menos capacidad de carga, pero más resolución que las del tipo anterior, condición necesaria para prestar el servicio que se espera de ellas.



Un ejemplo es el modelo PCE-TB 6C de PCE Instruments.



*Ilustración 3: PCE-TB 6C, PCE Instruments*

### 1.3. De plataforma

Son básculas de alta capacidad, hasta los 3000 kg, utilizadas para pesar paquetes o piezas de grandes dimensiones. Tienen una resolución menor que los modelos anteriores. Es una característica en general de los equipos de pesado, a mayor capacidad de carga, menor resolución. Este tipo llega ya a utilizar 4 células de carga para elevar la capacidad de carga. Pueden ir colocadas sobre el suelo, con una corta rampa para facilitar el acceso y permitiendo su movilidad, o empotradas en el suelo, quedando fijas. El visor electrónico generalmente va a parte, conectado a la plataforma normalmente por cableado.

Un ejemplo es el modelo K2 XBengal de Gram.



*Ilustración 4: K2 XBengal, Gram*

## 1.4. Barras pesadoras

Especializadas en el pesaje de palés, pueden aparecer configuradas como dos barras individuales o en una forma de U. Se debe establecer una comunicación entre las partes cuando las barras están separadas para el sumado del peso. Su forma está pensada para facilitar la colocación de palés que porten con distintas cargas sobre ellos. La capacidad de carga y resolución sigue la misma línea que en las de plataforma, la diferencia está en la forma y que estas son en todo caso móviles. Suele haber dos células de carga en cada barra, para un total de cuatro. Igualmente, el visor electrónico va a parte.

Un ejemplo es el modelo ZFI de Baxtran.



*Ilustración 5: ZFI, Baxtran*

## 1.5. Transpaletas pesadoras

Puede considerarse una variación de las barras pesadoras. Integran el sistema de pesaje y el visor electrónico sobre la propia transpaleta utilizada para mover los palés. Permiten ahorrar tiempo en la operación de transporte y pesado, pero a cambio tienen una capacidad de carga menor que las barras o las plataformas, quedándose entorno a los 2000 kg máximo.

Un ejemplo es el modelo Basic de Jungheinrich.



*Ilustración 6: Basic, Jungheinrich*

## 1.6. Ganchos pesadores

En este caso, la carga en lugar de colocarse sobre el aparato, se cuelga de un gancho. La célula de carga, en vez de comprimirse, se tracciona. Es un dinamómetro digital de alta capacidad, con una sola célula de carga, de 10 hasta incluso 30.000 kg según el modelo. La resolución es reducida respecto a otros tipos, en gran parte debido a la alta capacidad. El visor electrónico suele estar incorporado en el propio gancho y es habitual un mando a distancia para interactuar con el gancho. Son bastante flexibles, pudiendo encontrarlos incorporados en grúas puente o siendo modelos más pequeños, priorizando la portabilidad.

Un ejemplo es el modelo SBS-KW-3/1K de Steinberg Systems.

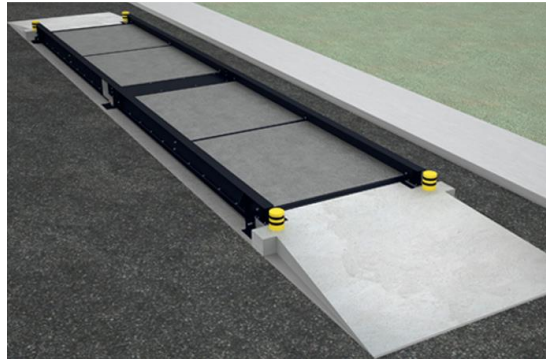


*Ilustración 7: SBS-KW-3/1K, Steinberg Systems*

## 1.7. Básculas puente

Ideadas para el pesaje de camiones o remolques. Son las de mayor capacidad (decenas de toneladas), y menor resolución en consecuencia, del mercado. Es prácticamente obligatorio tener que realizar obras in situ para establecer la báscula y facilitar el acceso, sea soterrando parte o construyendo rampas, aunque muchos modelos están en gran parte prefabricados. La plataforma se construye en acero y hormigón para soportar el elevado peso. Actualmente existen algunos modelos portátiles, pero lo más habitual es que sean fijas. Su construcción es bastante personalizable, con un número de células de carga variables dependiente de la capacidad. Requieren un mantenimiento consistente a lo largo de su vida útil.

Hay empresas especializadas en el montaje y mantenimiento de este tipo de básculas, como PG, mientras que otras grandes empresas de básculas que se diversifican a este nicho, como Mettler Toledo y Giropes.



*Ilustración 8: Báscula puente*

### 1.8. Básculas portátiles para vehículos

No existen muchos modelos disponibles en el mercado de esta variante, al menos comparado con los otros tipos que hemos visto. Sin embargo, es la que más nos interesa, pues es la más similar al objetivo que perseguimos en este trabajo. Los diseños están protegidos por patentes privadas, de modo que trataremos de obtener información a partir de las características públicas de venta y de la observación del diseño externo.

En líneas generales, son básculas ideadas para el pesado de vehículos a través de la suma de valores registrados en dos o más plataformas. Estas plataformas se colocan bajo las ruedas del vehículo y contienen las células de carga. Dependiendo del tipo de vehículo, las células estarán seleccionadas para soportar mayor o menor peso. El valor pesado se envía al visor electrónico, en donde los valores de las diferentes plataformas se suman y ofrecen al usuario. Veamos unos algunos ejemplos.

De nuevo podrán encontrarse las direcciones web de los productos analizados aquí o del catálogo online de los mismos referenciados en la bibliografía de este trabajo.

### 1.8.1. Báscula Reich

Un primer acercamiento a este tipo de básculas sería la báscula para caravanas Reich, vendida por Obelink. Existe otro modelo prácticamente idéntico vendido por PCE Ibérica. Es la variante que menos se parece a la descripción general dada anteriormente. El pesaje en caravanas se suele hacer en el eje de enganche con el vehículo, por medio de una báscula alargada. Sin embargo, este modelo se coloca debajo de la rueda de la caravana y extrapola el peso total de la caravana. Hay dos variantes, una soporta 1000kg y otra 1500kg, ambas con una resolución de 1kg. Utiliza dos células de carga. Se alimenta simplemente con tres pilas AAA.

La característica más interesante es que con una sola plataforma se puede pesar el vehículo completo. La manera de obtener el peso total es la siguiente: se coloca el dispositivo en el suelo frente a una de las ruedas y se hace pasar la caravana por encima. Registra el peso máximo en esa pasada y lo almacena en memoria. Se repite la operación para la rueda del lado opuesto y calcula el peso total a partir de esos dos datos. Permite seleccionar el número de ejes (2 o 4) y la posición de los mismos para realizar el cálculo del peso. Este método de pesado no nos es interesante para nuestra aplicación, de modo que descartaremos un diseño inspirado por este modelo.



Ilustración 9: Báscula Reich

### 1.8.2. Serie PR

Esta serie de plataformas, desarrolladas por Gram, se asemejan ya más a la definición general que dábamos sobre las básculas portátiles para vehículos. Las plataformas tienen dos pequeñas rampas de acceso fijas y solamente contienen las células de carga. No dan ninguna indicación por sí solas ni tienen alimentación propia. Su diseño es compacto y portable, incluyendo asas y ruedas para el transporte. El material utilizado es duraluminio, para resistencia y ligereza.



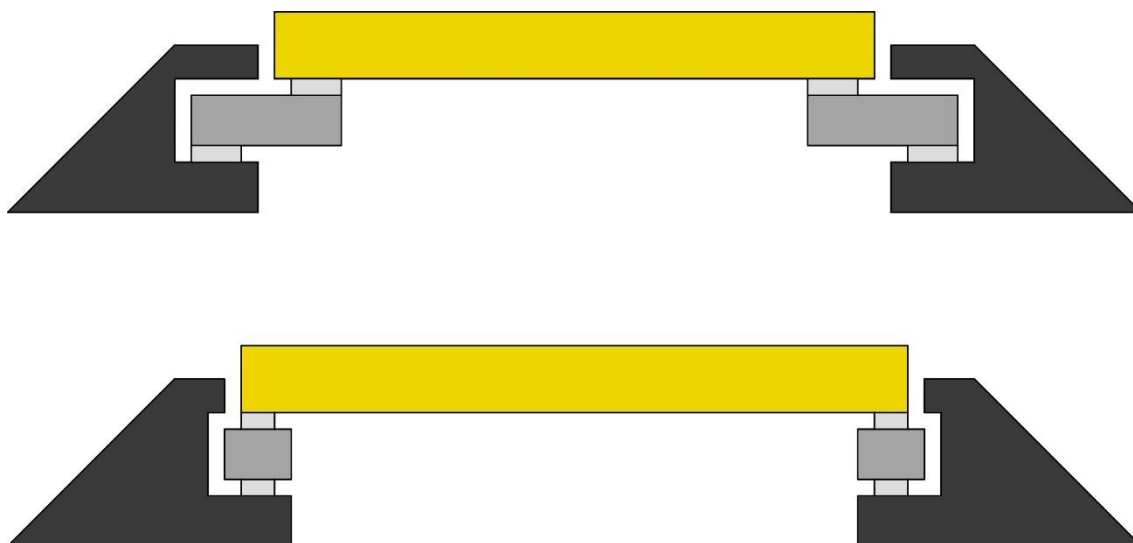
*Ilustración 10: Plataformas serie PR, Gram*

Hay cuatro tamaños por capacidad máxima por plataforma, de 3t (4 células), 10t (4 células), 15t (6 células) y 20t (8 células). El número de células de carga aumenta con el peso máximo para que la plataforma sea capaz de soportarlo y medirlo. Las células utilizadas son de viga de flexión, modelo H8C-C3 de Zemic Europe, pensadas para básculas industriales.



*Ilustración 11: Célula H8C-C3, Zemic Europe*

Gracias a las imágenes y datos del fabricante, podemos deducir cómo están colocadas las células. Se disponen simétricamente a ambos lados de la plataforma, manteniendo la base alzada y utilizando como apoyo las rampas laterales, fijas al suelo. En corte lo visualizaríamos como en la figura inferior. Si en lugar de utilizarse células de viga se utilizasen células de compresión, el diseño no cambiaría mucho en esencia.



*Ilustración 12: Corte plataformas serie PR*

El sistema está pensado para el pesado por ejes, de modo que el paquete de venta incluye solamente dos plataformas y un indicador. Este indicador, el MK3, puede incluir (MK3i) o no impresora de tickets. Se comunica con las plataformas por protocolo RS-232 y las alimenta la potencia necesaria para su funcionamiento. Tiene una batería propia, recargable por tensión de pared. Se pueden conectar hasta 4 plataformas individuales en un solo indicador.



*Ilustración 13: Indicador MK3, Gram*

La metodología de pesado con este modelo es: se avanza con el vehículo hasta que el primer eje de ruedas esté sobre la plataforma. Se registra el peso en el indicador. La operación se repite por cada eje, y una vez completo, se le pide al indicador el cálculo final. Alternativamente, se puede pesar a las 4 ruedas simultáneamente utilizando sendas plataformas.

### 1.8.3. Serie WWS

Esta serie, patentada y producida por Dini Argeo, es bastante similar a la anteriormente vista, pero las variantes más avanzadas de la serie introducen modificaciones interesantes. La variabilidad entre submodelos es mayor que en la serie anterior, yendo las capacidades máximas por plataforma de los 600 kg hasta las 25 t. Además, hay dos vertientes para la comunicación entre plataformas e indicador.

La primera son las plataformas cableadas. Se reparten en series WWSB, WWSC, WWSE, WWSD y WWSF. Tamaño y capacidad máxima de plataforma aumentan con cada serie para adecuarse a vehículos de mayor peso. La comunicación con el indicador se lleva a cabo por protocolo RS-232 u opcionalmente, RS-485. El diseño es similar a las de la Serie PR, con las células de carga en los laterales, sin alimentación propia y con asa y ruedas para la movilidad.



*Ilustración 14: Plataforma serie WWS sin display, Dini Argeo*

Se ofrecen también las series WWSCRF, WWSERF y WWSDRF, que son inalámbricas. Estas plataformas tienen una batería interna de 40 h y un indicador digital del peso, además de una botonera para los controles. Pueden transmitir tanto a un indicador electrónico del productor como a un dispositivo móvil personal, a través de una aplicación propia.



*Ilustración 15: Plataforma serie WWS con display, Dini Argeo*

El visor electrónico, serie 3590ETKR, ofrece conexión a 4 plataformas simultáneamente para un procedimiento de pesado idéntico al que narrábamos para la serie PR. Incluye además una impresora integrada y la posibilidad de conexión directa con un PC para manejo de datos utilizando una aplicación de la propia compañía. Puede o no tener pantalla táctil.



*Ilustración 16: Indicador 3590ETKR, Dini Argeo*

Por último, el productor ofrece módulos de nivelación para vehículos largos y rampas laterales alternativas para facilitar el acceso a las plataformas.





*Ilustración 17: Plataformas WWS con módulos de nivelación, Dini Argeo*

#### 1.8.4. Serie BPR

La compañía Giropes produce dos vertientes de plataformas. La primera vertiente es la que más se diferencia de las que hemos visto con anterioridad, si bien sigue la misma lógica. Se trata de los modelos BPRC, BPRF y BPRE de plataformas de bajo perfil. Soportan de 1000kg a 5000kg por plataforma, según el modelo. Su característica principal es que apenas se elevan 20mm sobre el suelo, facilitando el acceso a los vehículos pesados.



*Ilustración 18: Plataforma serie BPR de bajo perfil, Giropes*

La segunda son tres series, PMR, PMS Y PMT, que son ya más similares a las vistas con anterioridad, plataformas de sobresuelo de mayor altura. Las capacidades van de los 1500 a los 20000 kg según modelo. La transmisión al indicador es cableada.



*Ilustración 19: Plataforma serie BPR de perfil estándar, Giropes*

Ambos tipos se comunican con el indicador GI620. Tiene cuatro canales RS-232 y batería interna recargable. Permite selección entre pesaje de ejes y de ruedas. Puede transmitir a un PC por USB o WiFi para análisis mediante una aplicación propia. Una de las funciones especiales que ofrece es el cálculo de centro de gravedad.



Ilustración 20: Indicador GI620, Giropes

Por último, para la nivelación de vehículos sobre las plataformas, Giropes ofrece esterillas de 0'5 o 3 metros, más fácilmente transportables que los módulos de aluminio de Dini Argeo. El fabricante recomienda realizar los pesajes manteniendo la nivelación al menos entre ruedas que estén a 1 m de distancia. También ofrece marcos para facilitar el empotramiento de las plataformas si se desea hacer un sistema fijo.

### 1.8.5. Serie RW

Hay tres subdivisiones de esta serie, producida por HKM Messtechnik, RW 2.0 (100 - 500 kg), RW 8.1 (1000 - 8000 kg) y RW 9.1 (10000 kg). El fabricante las recomienda para todo tipo de vehículos, incluyendo aviones. Son plataformas autónomas, cada una tiene una batería propia de NiMH. Pero la característica definitoria de esta serie es el enfoque a la utilización de múltiples plataformas simultáneamente. Se puede comprobar el peso con un indicador de mano, pero están ideadas para conectarse a un ordenador. La conexión puede ser por cable (hasta 20 plataformas) o inalámbrica (hasta 8 plataformas). Para la conexión inalámbrica, se acopla un módulo de radio RFT 5.0 a cada plataforma y un receptor al ordenador. Desde él, se puede monitorizar la carga de cada célula simultáneamente y exportar los datos para trabajo en Excel.



Ilustración 21: Plataformas serie RW, HKM

## 2. ESTUDIO DE LAS CÉLULAS DE CARGA

Una célula/celda de carga es un sensor (o transductor) que convierte la fuerza que se aplica sobre ella en una señal eléctrica medible y proporcional a dicha fuerza. Existen dos ramas principales de células de carga, las hidráulicas/neumáticas y las extensiométricas, basadas en galga. Las primeras miden el peso según la presión de un fluido desplazado al someter la célula a un esfuerzo de compresión. Las segundas, lo miden a partir de la deformación elástica de la célula, medida por la galga. Son el tipo más común y a las que nos referiremos de forma predeterminada.

En este apartado diseccionaremos este sensor que es el corazón de todo sistema de medida de peso. Comenzaremos desde el componente más básico, las galgas extensiométricas, e iremos subiendo de nivel para ver cómo se implementa el sistema y se aprovechan diferentes propiedades físicas de los materiales para obtener la medida y acabaremos viendo los diferentes modelos de célula del mercado.

### 2.1. Fundamento físico

Las células de carga basadas en galga comparten entre sí y, a menor escala, con las galgas el mismo fundamento físico: la deformación elástica de sólidos deformables. Este principio es aplicable a sólidos homogéneos (las propiedades del material son iguales en todo su volumen) e isotrópicos (las propiedades del material son independientes de la dirección).

Estos sólidos, sometidos a un esfuerzo de compresión o de tracción se deforman elásticamente, es decir, cuando la fuerza desaparece, recuperan su forma original. Si la fuerza es de tracción, el sólido se elongará y estrechará. Si es de compresión, se comprime y ensancha. Esto es cierto hasta que el esfuerzo alcanza cierto punto a partir del cual la deformación del sólido es permanente (deformación plástica).

El grado de deformación elástica de un sólido sometido a un esfuerzo uniaxial de tracción o compresión " $\sigma$ " sufre una deformación " $\epsilon$ " proporcional, según la ley de Hooke. La constante de proporcionalidad " $E$ " entre estos dos términos es el módulo de elasticidad o módulo de Young, que depende del material. A mayor módulo de Young, más rígido es el material. La deformación en el material es la diferencia de longitud inicial (sin fuerza aplicada) y final (con la fuerza aplicada), partida por la longitud final. El esfuerzo se expresa como la fuerza aplicada partido el área de aplicación en el sólido.

La relación de proporcionalidad se considera que se guarda mientras se mantenga la propiedad elástica del sólido (límite elástico). A partir de ese punto, la relación deja de ser proporcional. Si se mantiene el esfuerzo, se alcanzará el límite plástico, a partir del cual el material no recuperará su forma original. Si el esfuerzo continúa aplicándose más allá del límite plástico, se llega eventualmente a la fractura.

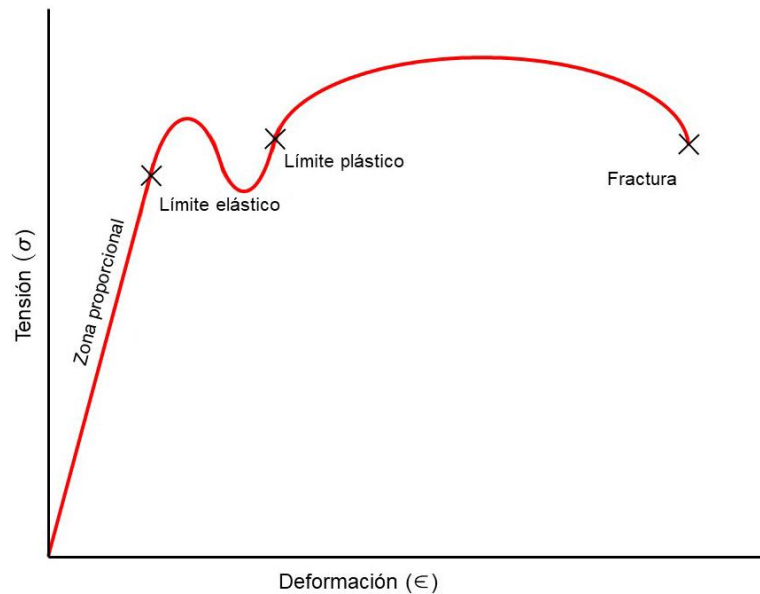


Ilustración 22: Gráfica deformación - tensión

La carga axial induce una deformación “ε” en las direcciones perpendiculares a la de aplicación de la fuerza. Esta relación se denomina coeficiente de Poisson. El volumen del sólido permanece en todo momento constante. La dirección de la deformación en la perpendicular es de signo opuesto a la de aplicación.

Ley de Hooke: 
$$\sigma = E\epsilon \rightarrow \frac{F}{A} = E \frac{l - l_0}{l}$$

Coefficiente de Poisson: 
$$\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

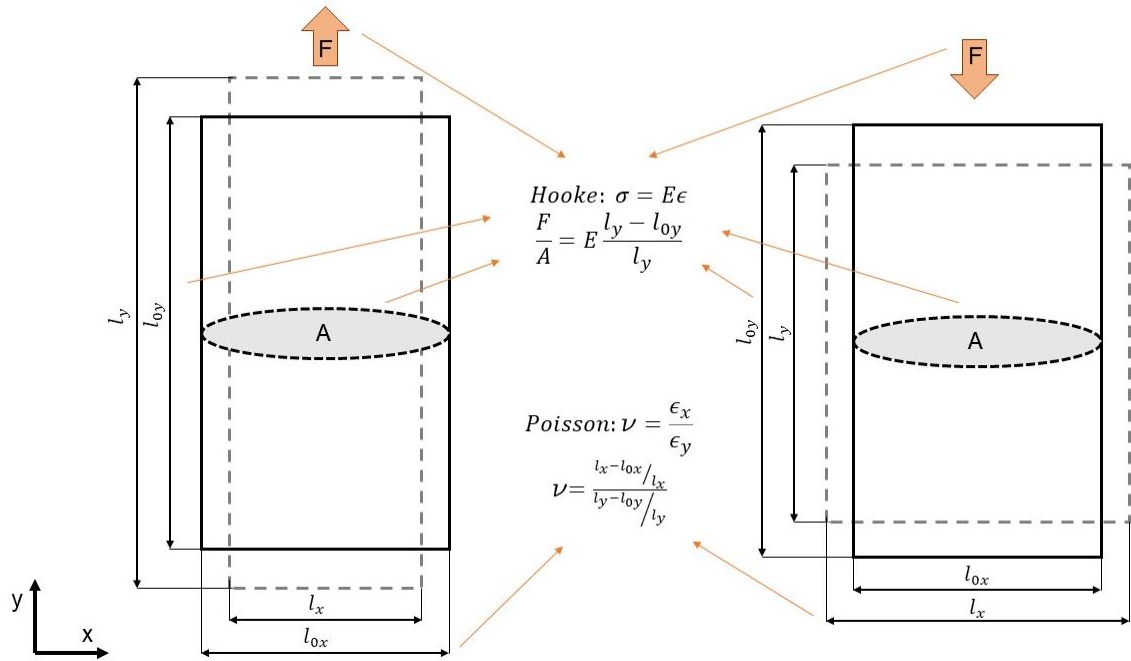


Ilustración 23: Deformación sólido rígido

Esta propiedad elástica de los sólidos es el fundamento básico de las células de carga, que buscan encontrar la fuerza que las deforma para dar el peso. La desviación en la longitud se mide utilizando galgas extensiométricas, que se aprovechan también de esta propiedad, aplicada sobre el conductor de las galgas, para la obtención de la señal eléctrica.

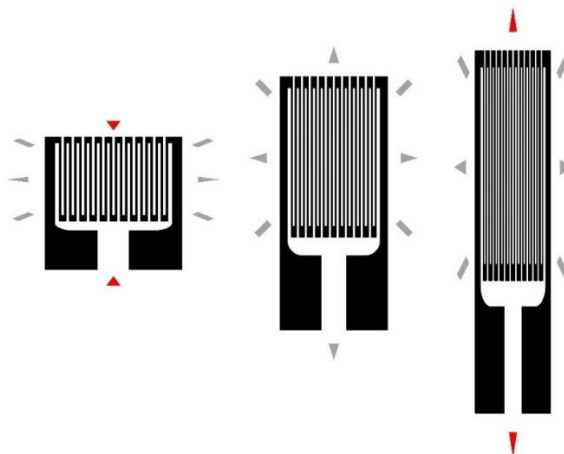
## 2.2. Galgas extensiométricas

Son el sensor por excelencia para la medida de deformación. Se trata de sensores que se adhieren a una superficie y detectan la deformación que se produce sobre ella. Es por eso que era interesante conocer primero las características elásticas de los sólidos, puesto que esa deformación es precisamente la que detectan las galgas. Como salida, proporcionan una señal eléctrica, como todo sensor de instrumentación, pero la forma de obtenerla varía entre los diferentes tipos.

Hay una amplia oferta de galgas especializadas en diferentes usos y de distinta capacidad y calidad en el mercado, pero no haremos un estudio. El motivo es que nuestro interés está en comprender el funcionamiento del componente integrado en la célula de carga que buscaremos. Veremos por encima los diferentes tipos de galgas que existen, pero solamente nos extenderemos en el análisis de las galgas piezorresistivas, que son las de uso más común y las empleadas en la construcción de células de carga.

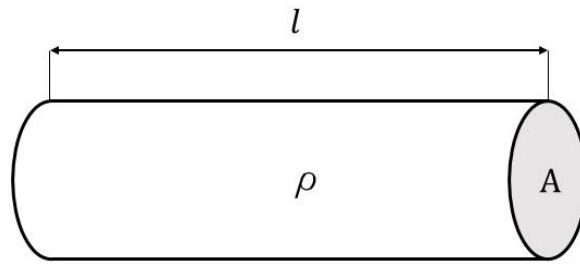
### 2.2.1. Galgas piezorresistivas

La señal eléctrica proporcional se obtiene por una variación de resistencia proporcional a la deformación de la galga. Tienen forma rectangular y se componen de una matriz de poliamida (para aislamiento térmico y eléctrico) que alberga una “rejilla” (una especie de zig-zag) conductora, con dos contactos en los extremos para el cableado. El conductor más utilizado es el constantán, una aleación de 55% de cobre y 45% de níquel, caracterizada por su resistividad eléctrica ( $4,9 \cdot 10^{-7} \Omega m$ ), constante en un margen amplio de temperatura. Otros materiales utilizados son por ejemplo la manganina, otra aleación (80% cobre, 12% manganeso, 4% níquel) de bajo coeficiente de temperatura, y el silicio y germanio como semiconductores. La rejilla se dispone de tal forma que solo sea sensible a la deformación en su longitud, con el lado mayor del conductor a favor de la dirección del esfuerzo a medir. La deformación en los contactos para el cableado debería ser solamente longitudinal. Rejilla y matriz interna de poliamida se cubren con una lámina externa de poliamida para mayor aislamiento. Este aislamiento exterior debe impedir la interferencia entre el circuito y la especie medida. Su resistencia debe ser del orden de megaohmios. El objetivo es que la galga mida solamente la deformación longitudinal, en el sentido de la medida, viéndose afectada lo menos posible por desviaciones térmicas y deformación transversal.



*Ilustración 24: Deformación sobre galgas resistivas*

La variación de resistencia en la galga que permite relacionarla con la deformación de la superficie a la que esté fijada, y por ende con el esfuerzo que sobre ella se aplique, se debe al efecto piezorresistivo. Fue descubierto por Lord Kelvin en 1856. La base de este efecto está en el cambio de configuración en la red cristalina del conductor. En términos prácticos: la resistencia “R” de una sección de hilo metálico (u otro material conductor) de resistividad “ $\rho$ ” es directamente proporcional a su longitud “l” e inversamente proporcional a al área “A” de su sección.



$$R = \rho \frac{l}{A}$$

Ilustración 25: Resistividad

Sometida a un esfuerzo longitudinal, como veíamos en el apartado anterior que se aplica sobre las galgas, tanto longitud como área cambiarán, dándonos la variación de resistencia que buscábamos. Este es el motivo que la rejilla de las galgas tenga varias vueltas, para potenciar esta variación lo máximo posible. Esa variación se expresa con la ecuación diferencial:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad \rightarrow \quad \frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dA}{A}$$

Si asumimos, por simplicidad, que el hilo conductor de la galga tiene una sección circular de diámetro "D", sustituimos el área "A". La variación del área "A" se relaciona con la variación de longitud "l" a través del coeficiente de Poisson "n", como veíamos en el fundamento físico. El signo del coeficiente dependerá de si el esfuerzo es de tracción (-) o de compresión (+).

$$A = \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{dD}{D} = \pm 2\nu \frac{dl}{l}$$

La variación de resistividad "ρ" de un conductor depende del volumen "V" y es proporcional a la constante de Bridgman "C", que depende a su vez del material. Oscila habitualmente entre 1'13 y 1'15 en las galgas. La variación de volumen "V" se puede expresar dependiente de la variación de longitud "l" y del área "A", a su vez expresado por el diámetro "D".

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad ; \quad V = \pi l \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dD}{D} = \frac{dl}{l} (1 \pm 2\nu)$$

Reuniendo todo lo anterior, sustituimos en la ecuación inicial y logramos que la variación de resistencia sea proporcional a la variación de longitud según una constante “K”. Esta constante se denomina factor de galga y es propia de cada una de ellas dependiendo de material y tamaño del filamento conductor. La variación de longitud del hilo es la deformación “ $\epsilon$ ”.

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} [1 + 2\nu + C(1 \pm 2\nu)] = K \frac{dl}{l} = K\epsilon$$

Para pequeñas deformaciones, podemos expresar la resistencia “R” de la galga bajo un esfuerzo como una diferencia proporcional sobre la resistencia en reposo “ $R_0$ ” (nominal) de la galga. La relación es directa (+) en tracción e inversa (-) en compresión.

$$R = R_0(1 \pm K\epsilon) = R_0(1 \pm x)$$

Esta resistencia nominal y factor de galga es la información que se suele utilizar para los cálculos de circuito y la que proporcionan los fabricantes. Puede verse el uso de este factor por ejemplo en el catálogo de galgas de Zemic Europe. La variación relativa de resistencia se mide utilizando un puente de Wheatstone, que analizaremos detenidamente en el siguiente apartado. Las galgas pueden disponerse en diversas configuraciones para obtener la medida de esfuerzos no uniaxiales o complementarse en la medida. También pueden encontrarse rejillas con diferentes direcciones en el mismo empaquetamiento.

### 2.2.2. Galgas piezoeléctricas

Este tipo de galgas se basan en la variación de capacitancia en lugar de la variación de resistencia. Son básicamente un condensador de placas en paralelo cuya carga varía de forma proporcional al esfuerzo aplicado. La variación de la carga se produce por la deformación del material dieléctrico dispuesto entre las placas. No se consideran muy precisos para medidas cuantitativas de deformación y, además, por la naturaleza del condensador, la carga va decayendo con el tiempo, descargándose hacia el circuito de medida. El material dieléctrico más habitual es el PVDF (fluoruro de polivinilideno, un termoplástico inerte), siendo otro material común el cuarzo, más precisos que los anteriores, pero manteniendo el problema de la fuga de carga. Las placas o electrodos del condensador son de metal conductor, como cobre o latón. Conectan con el circuito de instrumentación, de cuya resistencia de entrada dependerá la velocidad de descarga del condensador.



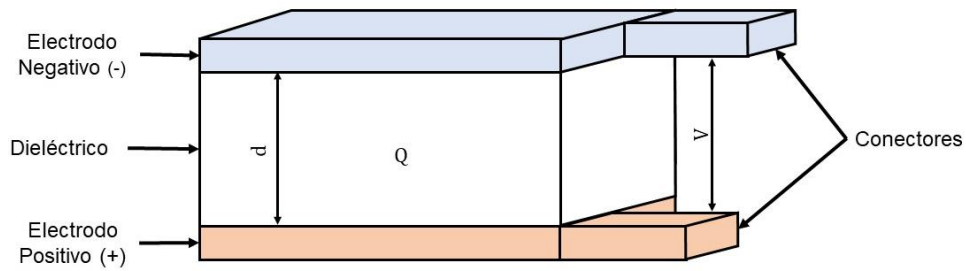


Ilustración 26: Condensador en galgas capacitivas

En un condensador, la tensión entre sus extremos “V” es dependiente de la carga “Q” que contenga en un momento dado y de la capacitancia “C” del condensador. La capacitancia depende proporcionalmente de la constante dieléctrica “ $\epsilon$ ” del material y el área “A” de las placas, e inversamente de la distancia “d” entre ellas. Con la deformación de la galga, varía la capacitancia del condensador, lo que resulta en la variación de tensión medible. Al depender esta medida de la carga y perderse esta con el tiempo, es de donde surgen los problemas de precisión que comentábamos.

$$V = \frac{Q}{C} \rightarrow \Delta V = \frac{1}{Q} \epsilon \frac{\Delta A}{\Delta d}$$

### 2.2.3. Otras galgas

Reuniremos aquí un resumen de los otros tipos de galgas existentes, pero que no se consideran relevantes para el objetivo de este trabajo.

- **Galgas de fibra óptica**

Utilizados en aplicaciones muy específicas en que se requiere una medición de deformaciones muy pequeñas. Son interferómetros, instrumentos que utilizan la interferencia de ondas para medir longitudes con gran precisión, en miniatura. En el que se suelen basar las galgas es el interferómetro de Fabry-Parot, una cavidad óptica (cámara de resonancia de superficies reflectantes enfrentadas). El sensor está formado por la cavidad deformable, una fuente de luz láser, una fibra óptica que dirige la luz y un fotodetector. El haz de luz cruza la fibra hacia la cámara. Al llegar al final de la fibra, una parte se refleja y vuelve y otra atraviesa la cámara. La longitud de la cámara depende de la deformación. El haz que llega a la cámara la cruza y rebota de vuelta, reentrando en la fibra que ahora porta dos haces de frecuencia ligeramente distinta. La medida de deformación se obtiene a partir de la diferencia de frecuencia entre estos dos haces, dependiente de la distancia que haya recorrido el que ha entrado en la cámara.

- **Galgas de birrefringencia**

La birrefringencia es la propiedad de algunos materiales de reducir la velocidad de la luz una cantidad diferente según la dirección que siga dentro del sólido, llevando a la descomposición de la misma. En algunos materiales, la birrefringencia se puede inducir con la deformación, relacionándose la cantidad de birrefringencia con la magnitud de la fuerza. La regulación de la luz se hace a través de polarizadores.

- **Galgas de bandas de moiré**

Se basan en la interferencia que se produce al desplazar dos rejillas con bandas regulares, que alternen regiones opacas y transparentes, una sobre otra. El resultado es una interferencia en que la intensidad de la luz depende del desplazamiento de una rejilla sobre la otra, siendo máxima cuando se superpongan las regiones opacas y transparentes de una con la otra y mínima cuando las opacas coincidan con las transparentes. Una rejilla está fija y la otra se desplaza con la deformación a medir y se calcula la intensidad de la luz.

## 2.3. Puente de Wheatstone

Las células de carga disponen las galgas extensiométricas siguiendo el esquema de un puente de Wheatstone para obtener la medida.

Es un montaje de circuito eléctrico utilizado para medir la variación de una resistencia desconocida a partir del equilibrio de las dos ramas que conforman el circuito. Es un montaje muy común para mediciones de sensores resistivos, como las galgas extensiométricas, por sus resultados muy precisos junto a la sencillez del montaje. La señal eléctrica se obtiene de medir la tensión entre ambas ramas del circuito ( $V_s$ ), dependiente de la magnitud  $x$  medida por el sensor resistivo. Existen variantes sobre el montaje básico, representado en la siguiente ilustración, según la alimentación del puente se haga a tensión constante o a corriente constante y según el número de transductores resistivos utilizados.

En equilibrio, con  $x = 0$ , se debe de cumplir que las dos ramas del circuito sean proporcionales. Se considera que el circuito está en equilibrio si  $V_s = 0$ . En este equilibrio, la resistencia a medir, la del sensor resistivo, se encuentra en estado de reposo ( $x = 0$ ). En equilibrio, se conocen los valores de dos de las resistencias, que tendrán uno de los valores normalizados y el valor de la resistencia del sensor en reposo. Para asegurar la condición de equilibrio, una de las resistencias (normalmente  $R_4$ ) se sustituye por un potenciómetro, a fin de asegurar el cumplimiento de la relación.

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{R_2}{R_1}$$

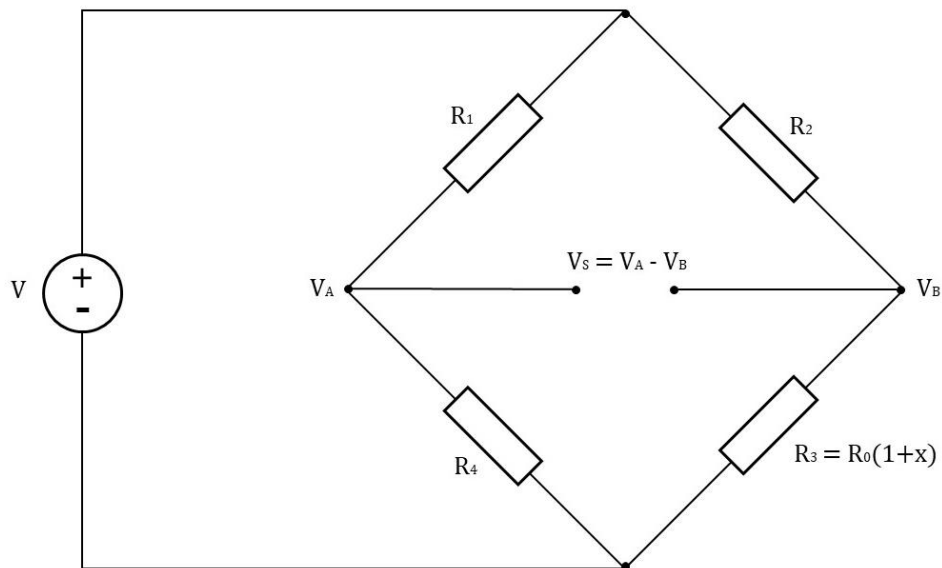


Ilustración 27: Puente de Wheatstone con una resistencia variable

Calculando la tensión de salida aplicando leyes de Kirchoff al circuito, llegamos a la relación entre la tensión de salida  $V_S$  y la magnitud medida  $x$ . Primero calculamos  $V_S$  a partir de las tensiones  $V_A$  y  $V_B$  en las ramas, dependientes de las resistencias en las mismas.

$$V_A = V \frac{R_4}{R_1 - R_4} \qquad V_B = V \frac{R_3}{R_2 - R_3}$$

$$V_S = V_B - V_A = V \left( \frac{R_3}{R_2 - R_3} - \frac{R_4}{R_1 - R_4} \right) = V \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_2 - R_3)(R_1 - R_4)}$$

Aplicando la condición de equilibrio, obtenemos una la contante  $K$  que relaciona las resistencias del circuito. Hallamos la tensión de salida  $V_S$  en relación a la de alimentación  $V$ , a la contante del circuito  $K$  y a la magnitud  $x$ .

$$V_S|_{x=0} = (R_1 R_3 - R_2 R_4)_{x=0} = 0 \rightarrow (R_1 R_0(1+x) - R_2 R_4)_{x=0} = 0$$

$$R_1 - R_0 - R_4 R_2 = 0 \rightarrow K = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_0}$$

$$V_S = V \frac{KR_4 R_0(1+x) - KR_0 R_4}{(KR_0 + R_0(1+x))(KR_4 + R_4)} \rightarrow V_S = V \frac{Kx}{(K+1+x)(K+1)}$$

El problema que tiene la utilización de un solo transductor resistivo es que la tensión de salida solamente es proporcional a los cambios en la resistencia cuando se cumple que  $x \leq k+1$ . Esto limita el rango de aplicación del puente de Wheatstone, ya que nos interesa que la salida siga una relación lineal con la magnitud medida y reduce la sensibilidad. Se puede linealizar la salida haciendo uso de amplificadores operacionales, pero no es este el método escogido en las células de carga. Es aquí donde entran en juego las otras configuraciones posibles.

Si el puente se prepara con dos transductores de iguales características pero que varían de forma opuesta, se logra linealizar la salida, que ahora es directamente proporcional, sin la necesidad de componentes extra y se mejora la sensibilidad. Este montaje sí que se utiliza ya en alguna aplicación con galgas, asegurándose de que la deformación las afecte de manera opuesta.

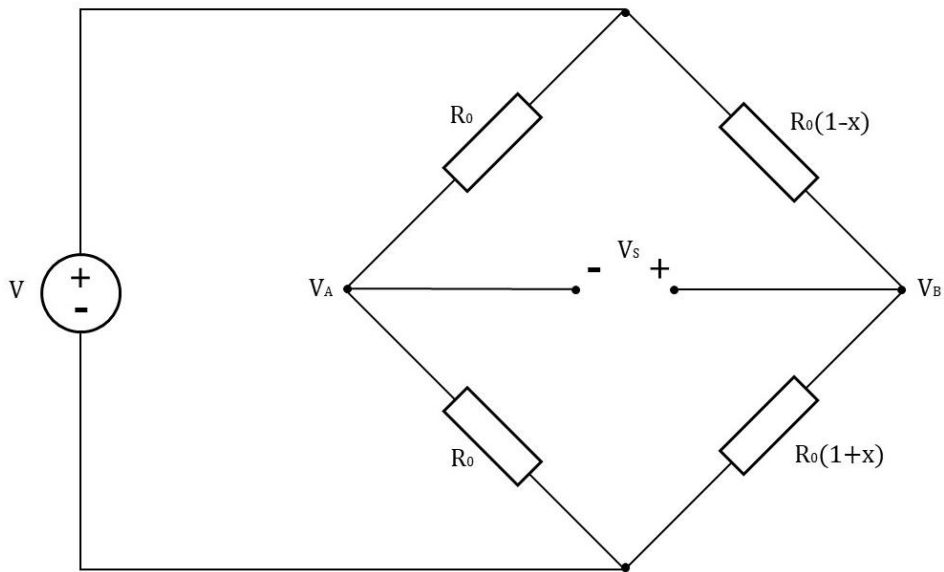


Ilustración 28: Puentes de Wheatstone con dos resistencias variables

$$V_s = V \frac{R_0(1+x)}{R_0(1+x) + R_0(1-x)} - V \frac{R_0}{R_0 + R_0} = V \left( \frac{1+x}{2} - \frac{1}{2} \right) = V \frac{x}{2}$$

Si duplicamos los sensores que varían de forma opuesta, obtenemos la mejor salida posible de este montaje. Conseguimos duplicar la tensión de salida y la sensibilidad respecto al caso anterior, manteniendo además la linealidad en la salida.

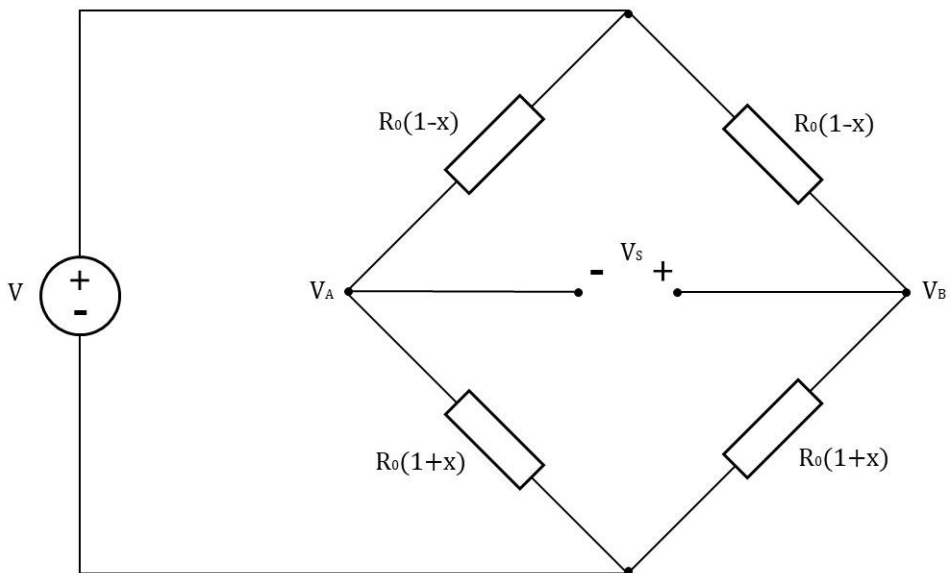


Ilustración 29: Puentes de Wheatstone lineal

$$\begin{aligned} V_S &= V \left( \frac{R_0(1+x)}{R_0(1+x) + R_0(1-x)} - V \frac{R_0(1+x)}{R_0(1+x) + R_0(1-x)} \right) \\ &= V \left( \frac{1+x}{2} - \frac{1-x}{2} \right) = Vx \end{aligned}$$

Este último es el montaje de puente de Wheatstone que se utiliza por lo general en las células de carga, por su mejor comportamiento. La idea es que las cuatro galgas tienen las mismas características, para poder aplicar el cálculo, y que dos trabajen a compresión y las otras dos a tracción. De esta forma, se consigue la configuración según el esquema superior. La importancia entonces recae en dónde se colocan las galgas en la célula de carga para conseguir este efecto opuesto. Veremos la aplicación de esto en el apartado siguiente, en cómo se disponen las galgas para lograr el efecto.

## 2.4. Principio de funcionamiento

En las células de galgas, el comportamiento puede asimilarse en casi todos los casos con el de la flexión de una barra o viga recta en condiciones ideales o la interacción entre varias. Conociendo el comportamiento de esta barra ideal ante un esfuerzo de flexión, podemos deducir que partes de su superficie se verán sometidas a deformaciones por tracción o por compresión, y por tanto, donde se colocan las galgas para conseguir el formato del puente de Wheatstone lineal deseado.

Supongamos que tenemos una barra prismática que cumple que su material es homogéneo e isótropo y su comportamiento lineal y elástico. Está completamente restringida en un extremo, impidiendo desplazamiento y rotación. Este sería el extremo fijo en una célula de carga. En el otro extremo, se le aplica una fuerza. En la célula de carga, esta fuerza sería el peso que se aplique sobre ella. La resistencia al desplazamiento por estar la viga fija nos da la siguiente distribución de fuerzas y momentos en la longitud de la viga:

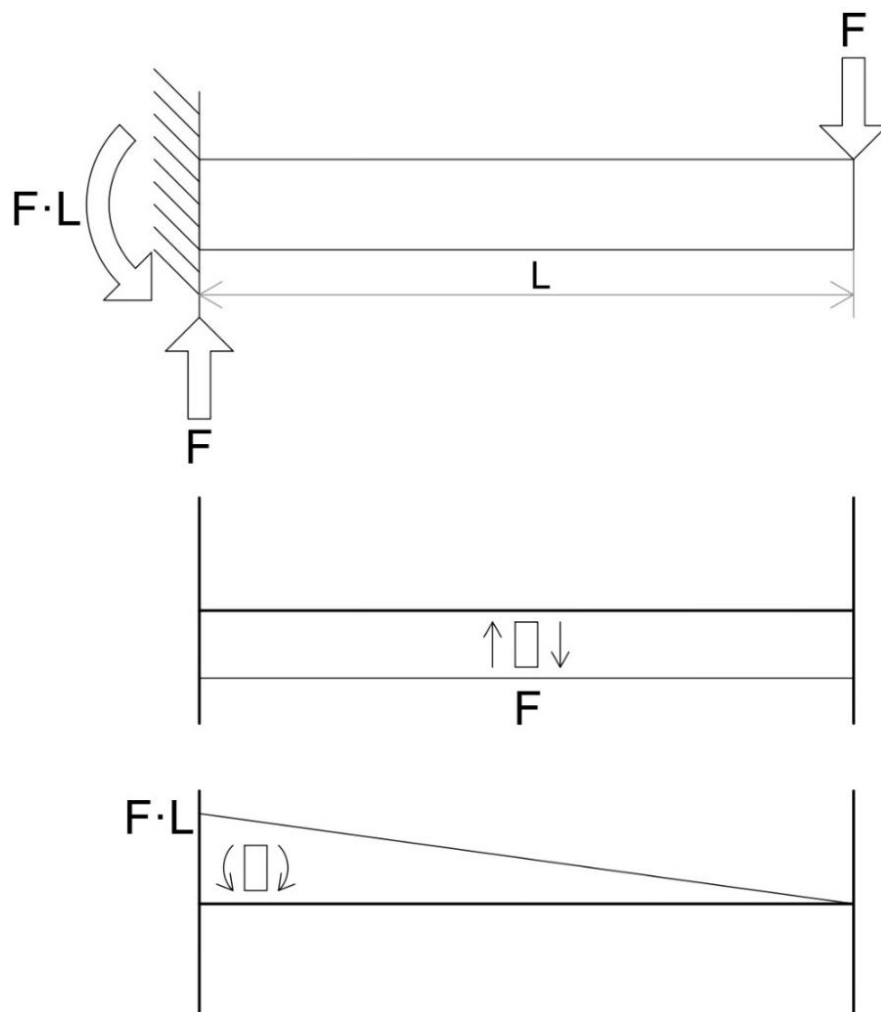
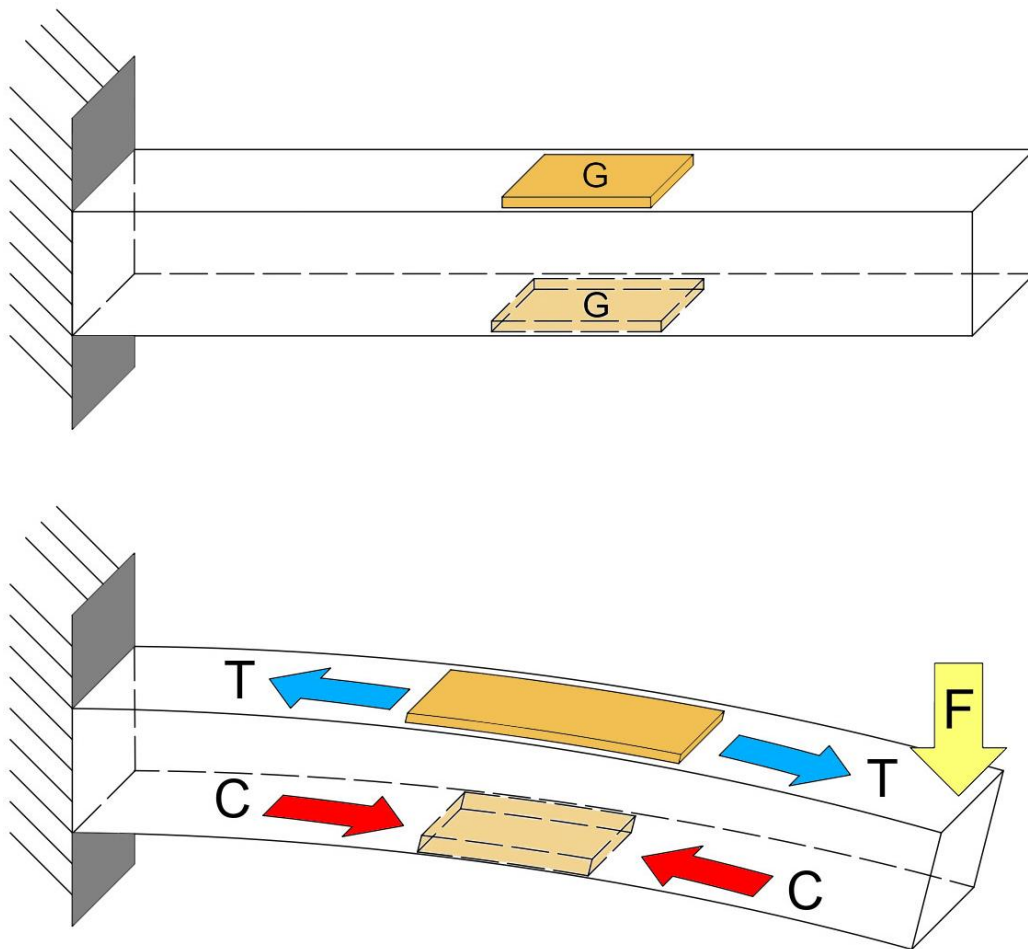


Ilustración 30: Análisis de fuerzas en una viga empotrada

Conocida la distribución de fuerzas, pasamos a representar la flexión de la viga asumiendo que las secciones transversales de la viga son indeformables (hipótesis de Navier-Bernouilli) y que estas se mantienen perpendiculares al eje horizontal central (hipótesis de Timoshenko), aunque este pase a formar un ángulo por el esfuerzo cortante.

Con esta representación visual y recordando la deformación del sólido elástico que vimos en su apartado, se deduce que la flexión de la viga induce en la superficie superior un esfuerzo de tracción y uno de compresión en la inferior. Es en estas caras que se situarán las galgas para cumplir con el esquema del puente de Wheatstone lineal.



En el apartado siguiente veremos dónde se colocan las galgas en los tipos principales de células de carga disponibles en el mercado para el registro de los esfuerzos.



## 2.5. Tipos de células de carga

Veremos los principales tipos de células de carga justo con algunos ejemplos comerciales en una suerte de “estado del arte”. De forma paralela a lo que hacíamos con los tipos de básculas, reunimos una clasificación de los tipos más destacables. Existen otros modelos más complejos y específicos. Así mismo, la localización de las galgas se ha tenido que inferir en muchos casos a partir de planos mecánicos y modelos 3D.

Los fabricantes aportan en la hoja de datos (datasheet) las medidas mecánicas, capacidad, tensión de alimentación y cableado de conexión para la inclusión de las células en el sistema personalizado. Las células de carga no tienen una tensión única de alimentación, sino un rango. Por ello, la manera de dar la tensión de salida del puente es mediante una relación de  $mV/V$ , que corresponde a los milivoltios de tensión de salida partido por los voltios de entrada bajo carga nominal.

Mencionar que por lo general se ha encontrado una discrepancia notable entre la manera de clasificar las células de unos fabricantes a otros. La clasificación dada aquí se ha creado considerando las similitudes entre las clasificaciones de los fabricantes y la forma y uso general dados a cada tipo de los presentados.

### 2.5.1. Células de viga de flexión

Este tipo de células de carga son las que siguen más próximamente el modelo visto en el apartado anterior de la viga de flexión, de ahí su nombre. Se utilizan cuatro galgas, dos en la superficie sometida tracción y dos en la de compresión. Se fijan por atornillado en los extremos, uno en el cuerpo fijo y otro en la plataforma móvil (punto de aplicación de la fuerza). Para amplificar la deformación, se ahueca la zona de la viga sobre la que se fijan las galgas, habitualmente por taladrado para facilitar el mecanizado. La distancia entre galgas depende del diseño de la célula, así como el ancho de la viga y el vaciado, según la capacidad máxima buscada. En algunos modelos, las galgas se fijan dentro del agujero, que en este caso estará desviado del centro de la viga. Hay modelos que tienen un elemento de muelle, una especie de acordeón metálico, para el control de la flexibilidad de la viga.

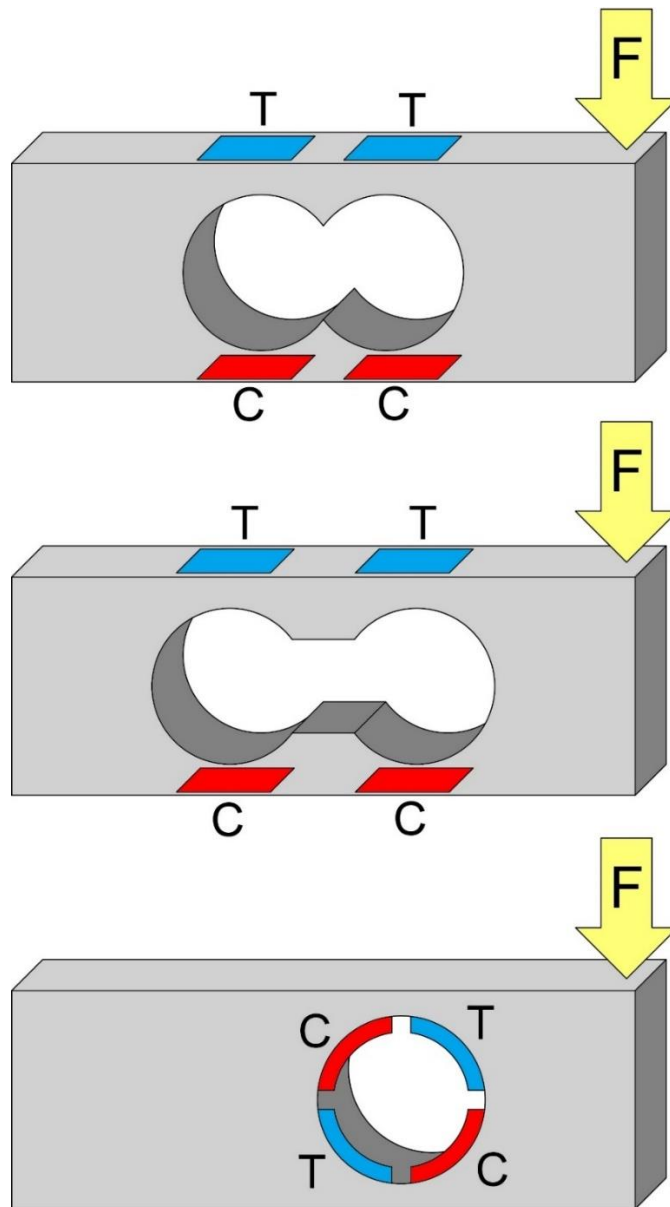


Ilustración 32: Fuerzas en células tipo viga de flexión

Un ejemplo es el modelo SB8 de Flintec, con un rango de capacidad de 10 a 500kg.



Ilustración 33: SB8, Flintec

## 2.5.2. Células de viga de flexión doble

Este tipo tiene una estructura que podría descomponerse en la unión de dos vigas de flexión normales como las vistas anteriormente. Esto permite alcanzar una mayor capacidad de carga máxima. La fuerza normalmente se aplica sobre el centro de la célula, aunque puede repartirse entre dos extremos.

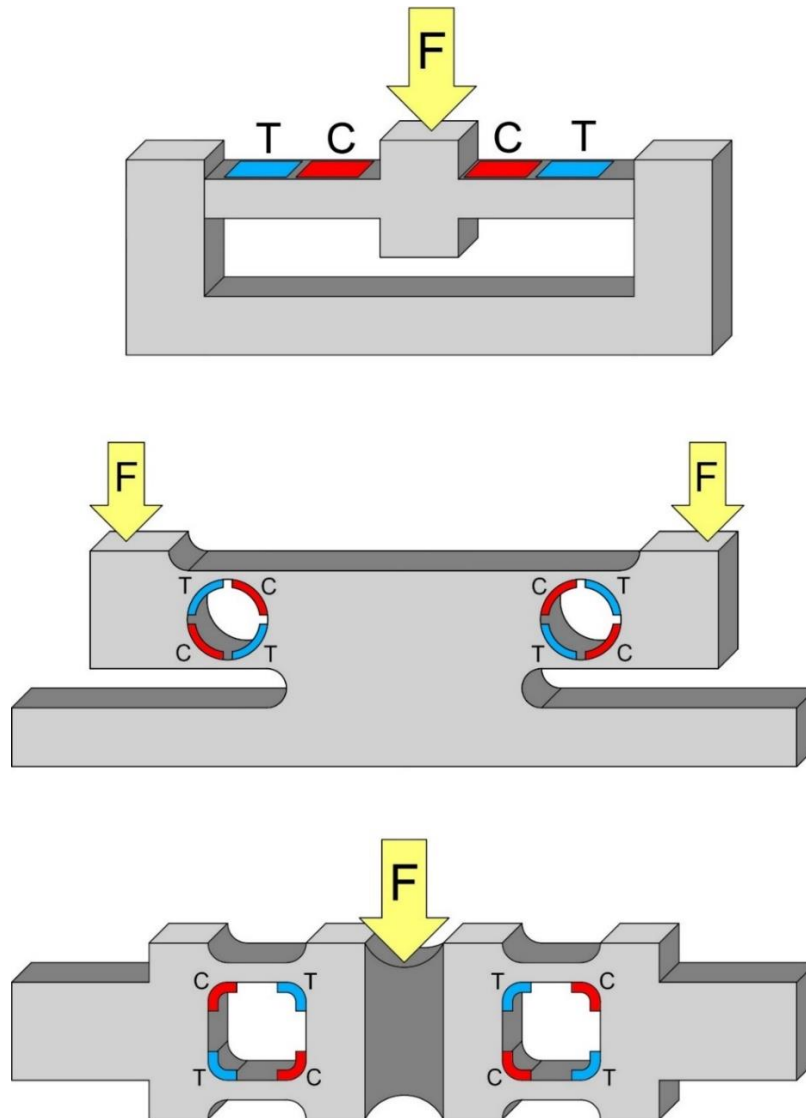


Ilustración 34: Fuerzas en células tipo viga de flexión doble

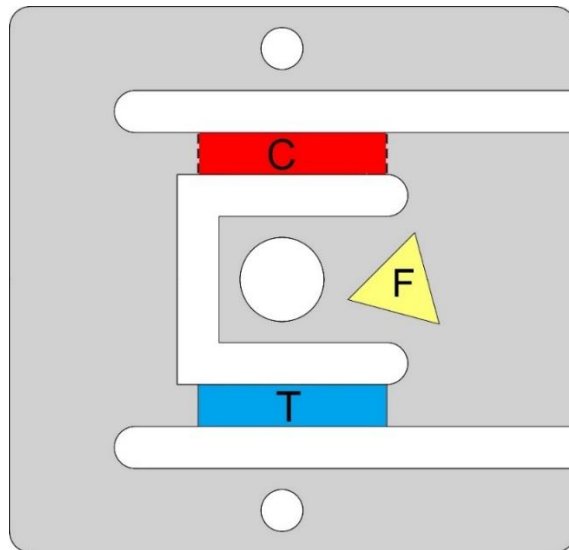
Un ejemplo es el modelo 460 de Utilcell, con capacidades de 5 a 100t, bastante superior a lo que se puede conseguir con una viga de flexión simple.



Ilustración 35: 460, Utilcell

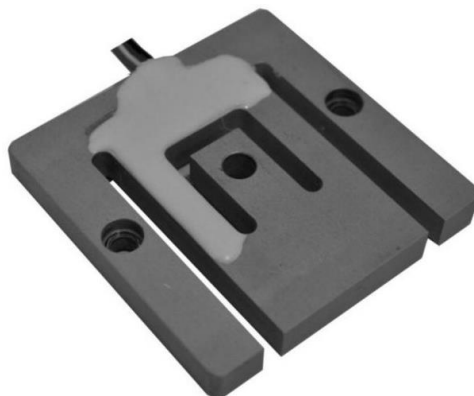
### 2.5.3. Células de viga de flexión plana

Este tipo de células tienen una capacidad de carga reducida, pero están diseñadas para tener un perfil muy bajo. La fuerza aplicada se transmite por el diseño a dos pequeñas vigas de flexión paralelas, según se ve en la imagen inferior. Una de las regiones (inferior) está sometida exclusivamente a compresión y la otra (superior) a tensión. La configuración del puente de Wheatstone se consigue por el cableado.



*Ilustración 36: Fuerzas en células tipo viga de flexión plana*

Un ejemplo es el modelo L6P, de Zemic Europe, con una capacidad de 22 a 110kg, bastante inferior a lo alcanzable por el resto de tipos.



*Ilustración 37: L6P, Zemic Europe*

### 2.5.4. Células de compresión

Es una familia de células de carga en la que hay una gran variabilidad en el diseño capacidad, precisión y tamaño de la célula. Se puede reducir su funcionamiento a la interacción de vigas o arcos simples, que siguen la deformación anteriormente vista (en ilustración, superior izquierda y derecha). En otros diseños sencillamente se mide la deformación de un cilindro sometido a compresión según el modelo de sólido elástico (inferior izquierda). Otra variante más es la célula de carga de anillo (inferior derecha), que puede medir pesos tanto a compresión como a tracción.

Existe una subvariante que son las células de compresión de anillo de torsión. Por lo general, son las que tienen una mayor capacidad de carga gracias a este elemento. No se ha podido encontrar un esquema que precise su funcionamiento.

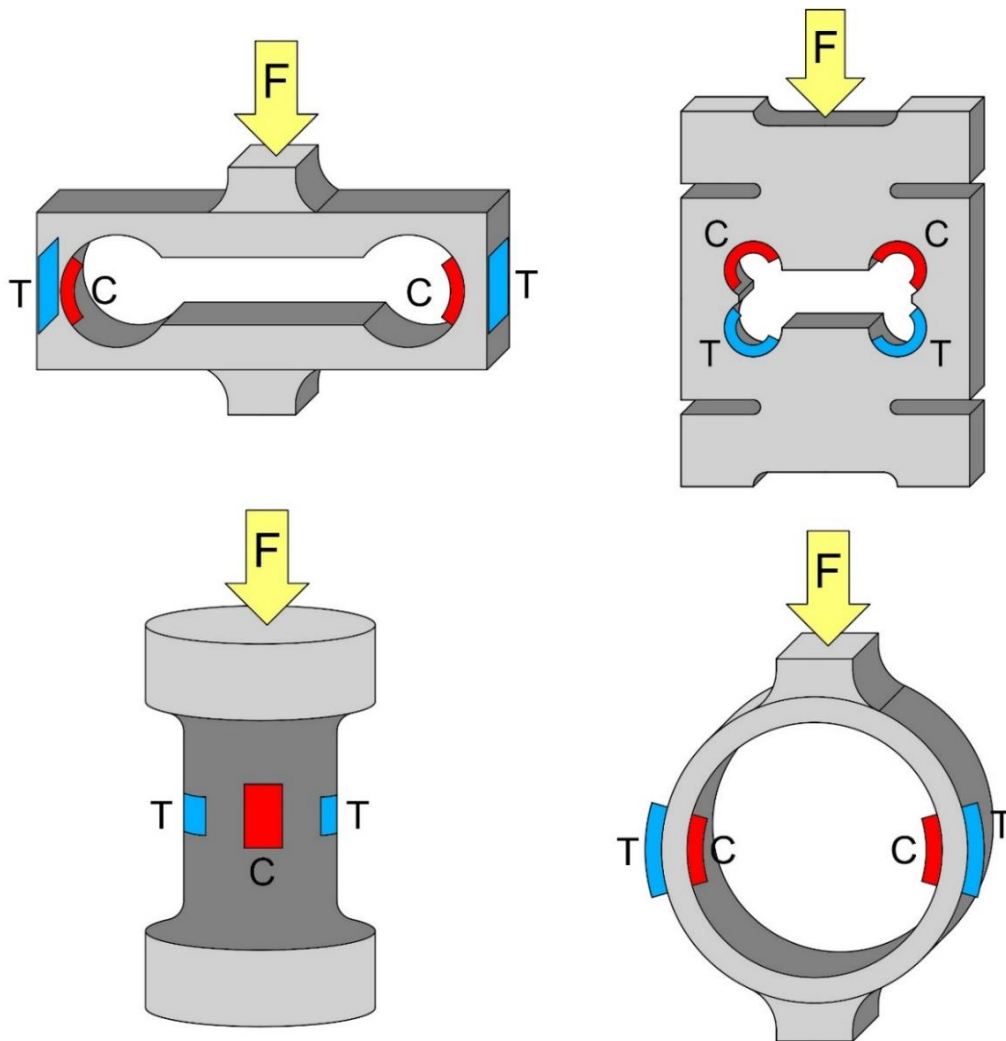


Ilustración 38: Fuerzas en células tipo compresión

Un ejemplo es el modelo DL de Eilersen, con capacidad de 50 a 5000kg.



Ilustración 39: DL, Eilersen

### 2.5.5. Células tipo S

Las células de carga de tipo S tienen un uso muy extendido, pero pueden ser las más contraintuitivas de entender según el modelo de la viga simple. Su virtud es que pueden medir cargas tanto a tracción como a compresión, con un diseño de tamaño reducido, elevada capacidad de carga y amplia flexibilidad de aplicación. En un vaciado en la parte central se colocan las cuatro galgas extensiométricas del puente. La fuerza aplicada se transmite de las ramas superior e inferior a la sección central, donde causa una deformación por cizalladura, desplazando el lado derecho e izquierdo del círculo en direcciones opuestas. Este esfuerzo se traduce en los cuartos de la sección circular en las deformaciones de tracción-compresión que vemos representados en la figura.

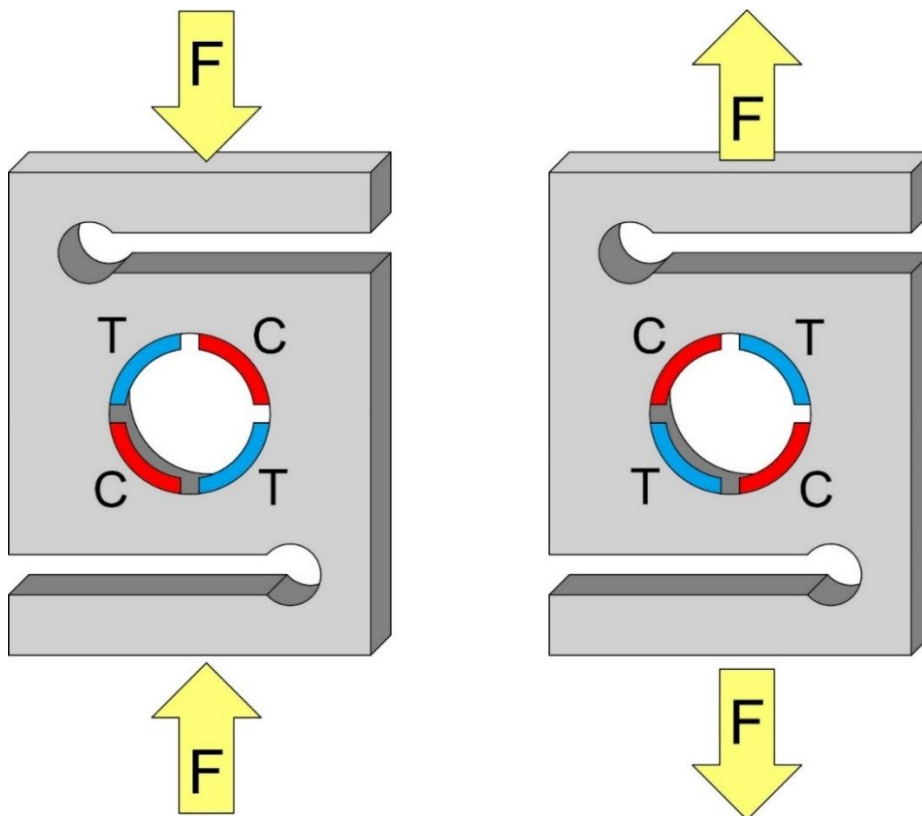


Ilustración 40: Fuerzas en células tipo S

Un ejemplo es el modelo S21S de Bosche, con capacidad de 2000 a 5000 kg.



Ilustración 41: S21S, Bosche

### 2.5.6. Células de carga hidráulicas

Hay una variante de células de carga que no utilizan galgas extensiométricas, sino galgas de presión. Suelen ser capaces de medir mayores pesos y tienen la característica especial de no utilizar componentes eléctricos en la célula en sí. Por otra parte, son sensibles a cambios de presión y temperatura y solamente pueden ser utilizadas a compresión.

El funcionamiento normal de este tipo de células es que en el interior de un encapsulado metálico (1) se desplaza un pistón (2), sobre el que se ejerce la fuerza a medir. Este pistón actúa sobre un diafragma deformable (3) que transmite la presión a un fluido presurizado (4) almacenado en el interior de la célula. La presión se transmite entonces a un sensor de medida a parte (5) en donde se obtendrá la señal eléctrica. El fluido puede ser agua, aceite o incluso aire (células neumáticas).

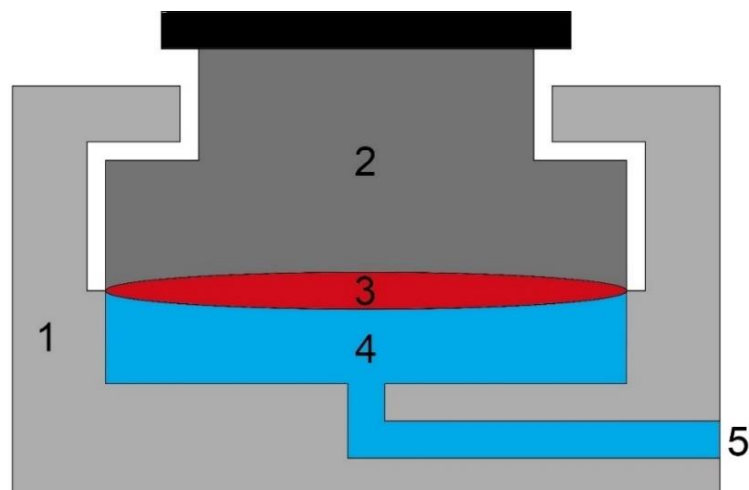


Ilustración 42: Sección célula de carga hidráulica

Los sensores utilizados para convertir presión en una señal eléctrica que se pueda manipular son clasificables en tres grupos:

- **Tubos de Bourdon:** Hay diversas configuraciones, pero en esencia, consisten en un tubo en espiral asociado a la presión. La variación de presión hace que el tubo se desplace y esto es aprovechado por sensores resistivos o inductivos.
- **Capacitivos:** Más precisos que los anteriores. La presión varía la distancia a que se encuentran dos placas que constituyen un condensador. Los de este tipo pueden ir integrados en la propia célula.
- **Piezorresistivos:** Convierten la presión en una deformación medible por una galga extensiométrica mediante, por ejemplo, un diafragma.

Son unas células para unos usos bastante específicos y pueden llegar a soportar unas cargas muy elevadas. No las consideraremos para el desarrollo de nuestra aplicación por los inconvenientes que presentan. Un ejemplo de este tipo en el mercado es la serie HLC-6050 de GeoSense, con rango de 1000 a 10000 kN.



*Ilustración 43: HLC-6050, GeoSense*



### 3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

Recuperado lo dicho en la introducción, el objetivo de este trabajo es el “Diseño de un equipo portátil para pesar grandes objetos”. El equipo debe de ser escalable, que se pueda ajustar a mayores pesos; portable, para comodidad de usuario y mayor rango de aplicación; y basado en varias plataformas de báscula, para poder adaptarse a volúmenes y formas diversos.

Para cumplir con este objetivo, nos fijaremos en los ejemplos comerciales existentes en el mercado que hemos visto en el estado del arte, nos valdremos de varias herramientas de diseño y simulación y aplicaremos los conocimientos adquiridos en el grado, es especial los referidos a la electrónica.

Un sistema de medida cualquiera tiene por objetivo obtener información de un proceso físico y presentarla a un observador o sistema de forma que pueda ser interpretado. La operación se realiza a través de una electrónica de instrumentación. Tienen por regla general tres partes fundamentales para esa transformación de la información, aunque según el sistema pueden encontrarse combinadas o faltar alguna de ellas.

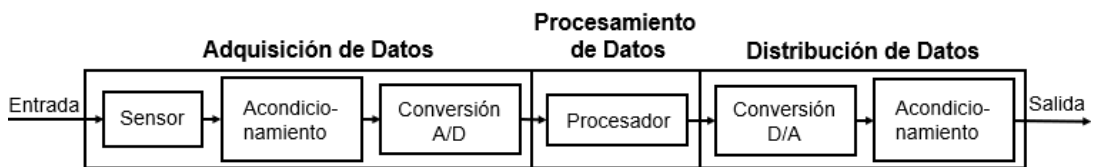


Ilustración 44: Estructura equipos de instrumentación

- **Adquisición de datos.** Obtiene información de la variable medida y la transforma en una señal eléctrica. A su vez está conformado por los bloques de:
  - **Sensor.** También referido como transductor, es la parte en sí misma que transforma la variable física en una señal eléctrica.
  - **Acondicionamiento.** Esta etapa prepara la señal del sensor para ser procesada, pero sin alterar la información de la señal original. Se le aplica a la salida del sensor una o varias de estas operaciones:
    - **Amplificación.** Aumentar la magnitud de la señal o su potencia.
    - **Filtrado.** Eliminar componentes no deseados o no relevantes.
    - **Modulación/ Demodulación.** La modulación consiste en modificar la forma de la señal para permitir su transporte o reducir su sensibilidad a interferencias. La demodulación es la operación inversa.

- **Linealización.** Lograr que la señal eléctrica de salida varíe linealmente con la variable física de entrada.
- **Operaciones matemáticas.** Comprende operaciones varias que se quieran hacer sobre la señal, como conversión logarítmica o sumado de varias señales.
- **Conversión A/D.** La señal de salida de un sensor es normalmente analógica, mientras que los procesadores pueden leer solamente señales digitales. Esta etapa hace legible para el procesador la señal del sensor mediante un muestreo, cuantización y binarizado de la misma.
- **Procesamiento de datos.** Es la selección, tratamiento y manipulación de los datos por parte de un procesador de acuerdo a un programa establecido. El procesador puede ser un ordenador, un microcontrolador o un microprocesador. Dependerá del sistema medido y el destino de los datos.
- **Distribución de datos.** Provee de los datos medidos al sistema o sistemas objetivo. Dependiendo de cuál sea el fin de los datos, la salida será de indicación, registro o control. Es habitual que esté dividido en:
  - **Conversión D/A.** La situación es inversa a la fase de adquisición de datos. La señal digital de salida del procesador debe convertirse en analógica para poder ser utilizada por el actuador (o transductor de salida) que utilice los datos.
  - **Acondicionamiento.** Esta etapa es muy dependiente de quién sea el destinatario de los datos. Puede ser desde un display digital a un motor eléctrico. Pero lo normal es que se deba tratar la señal eléctrica de salida del procesador para adaptarla al actuador.

Dentro de cada uno de estos bloques generales, hay que tener en cuenta que existen posibilidades casi ilimitadas de implementación y una oferta muy amplia en el mercado de cada uno de los componentes reales a utilizar. Además, alguno de los pasos puede no ser necesario o los bloques se deben de dividir en diversos subsistemas. Sin embargo, este modelo nos aporta una referencia sobre la que comparar y plantear el funcionamiento de cualquier equipo de medida.

### 3.1. Solución general mercado

Conocidos las funciones que debe cumplir un sistema de medida para considerarlo como tal, y habiendo visto la oferta de básculas en el mercado en el apartado correspondiente, podemos inferir el esquema general de funcionamiento de una báscula cualquiera.

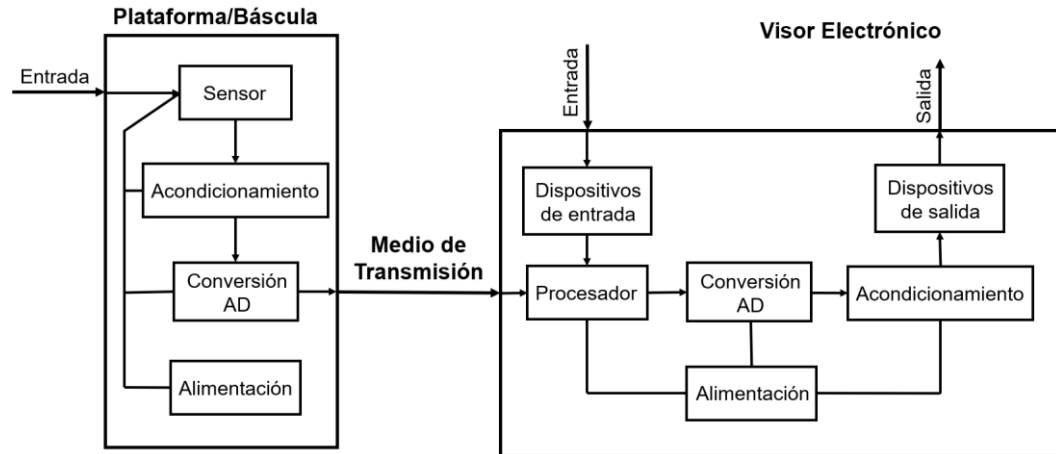


Ilustración 45: Diagrama de bloques básculas del mercado

Se dividen en dos partes principales, la plataforma de la báscula, en donde se depositan los objetos a pesar; y el visor electrónico, que muestra los resultados de la medida y puede realizar alguna operación extra sobre ellos. Estas dos partes constituyentes se comunican entre sí a través de un medio cuya naturaleza depende de la distancia o manera de acoplar plataforma y visor, siendo lo más frecuente una conexión cableada a distancia con RS-232.

- **Plataforma de la báscula.** Aunque su forma depende del tipo de báscula, el factor común es que en ella se llevan a cabo todas las funciones de adquisición de datos.
  - **Sensor.** Para la medida de peso, el sensor utilizado es invariablemente la célula de carga, variando modelos según las necesidades. Podemos ver un estudio sobre ellas en el apartado correspondiente.
  - **Acondicionamiento.** Consiste en un filtrado sobre la medida del sensor, para eliminar ruido, y una amplificación de la misma. Si la báscula tiene varias células de carga, también engloba la suma de las medidas.
  - **Conversión AD.** Comprende todas las operaciones sobre la medida para su lectura por el procesador del visor. Si la transmisión es a distancia, se requerirá de un procesador extra en la plataforma para poder aplicar el protocolo de comunicación.

- **Alimentación.** Proporciona energía a todos los sistemas. Es posible que a cada bloque haya que proporcionarle un nivel de tensión diferente. Puede ser o no compartida con el visor. Las opciones son batería o transformador de la tensión de red.
- **Medio de transmisión.** Si plataforma y visor comparten encapsulamiento, la comunicación de la señal es directamente por cableado. Si se encuentran a distancia, se aplica un protocolo de comunicación, siendo los más comunes el RS-232 y sus variantes, aunque también se pueden encontrar Ethernet y WiFi.
- **Visor electrónico.** Comprende las funciones de procesamiento y distribución de datos. Es más o menos complejo según las funciones que deba cumplir. Según el modelo, en los no integrados en la misma envolvente, puede dar servicio a una o más plataformas.
  - **Procesador.** Se encarga de desentramar la medida recibida y prepararla para ser entregada al usuario, controlando además los dispositivos que hacen posible esa entrega. Puede ir acompañado de una memoria si es necesario guardar medidas.
  - **Conversión AD.** Prepara la señal de salida del procesador para los dispositivos analógicos con que se comunica. La mayoría de procesadores tienen el conversor integrado.
  - **Acondicionamiento.** Es posible que haya que cambiar los niveles de tensión u otras operaciones para operar los dispositivos de salida.
  - **Dispositivos de entrada.** Permiten al usuario comunicarse con el procesador para hacer ciertas peticiones, como un botón de tara o de cambio de unidades.
  - **Dispositivos de salida.** De función opuesta a los anteriores, transmiten la medida al usuario. Varían en complejidad según los modelos, yendo desde un visor digital a una impresora integrada, lo que condicionará el resto de elementos del visor electrónico para que pueden dar servicio a estos dispositivos.

### 3.2. Solución escogida

Conocidas las características de un sistema de medida y analizada la solución general del mercado, podemos plantear la solución propia a este problema. Sirva este apartado como introducción a los apartados de diseño posteriores.

#### 3.2.1. Propuesta inicial

Partiendo del diagrama deducido del mercado, planteamos una primera posibilidad para el diseño, representada en diagrama de bloques funcionales. Señalar que esta es el primer diseño sobre el que se comenzó a trabajar, antes de ahondar en las opciones y problemas de diseño, pero se ha considerado que tiene valor para mostrar el punto de partida del desarrollo del trabajo y compararlo con como ha finalizado.

Presentamos aquí solamente el diagrama para ofrecer comparativa. En el siguiente apartado expandiremos en la correlación entre el diseño del mercado, el diseño inicial y el final.

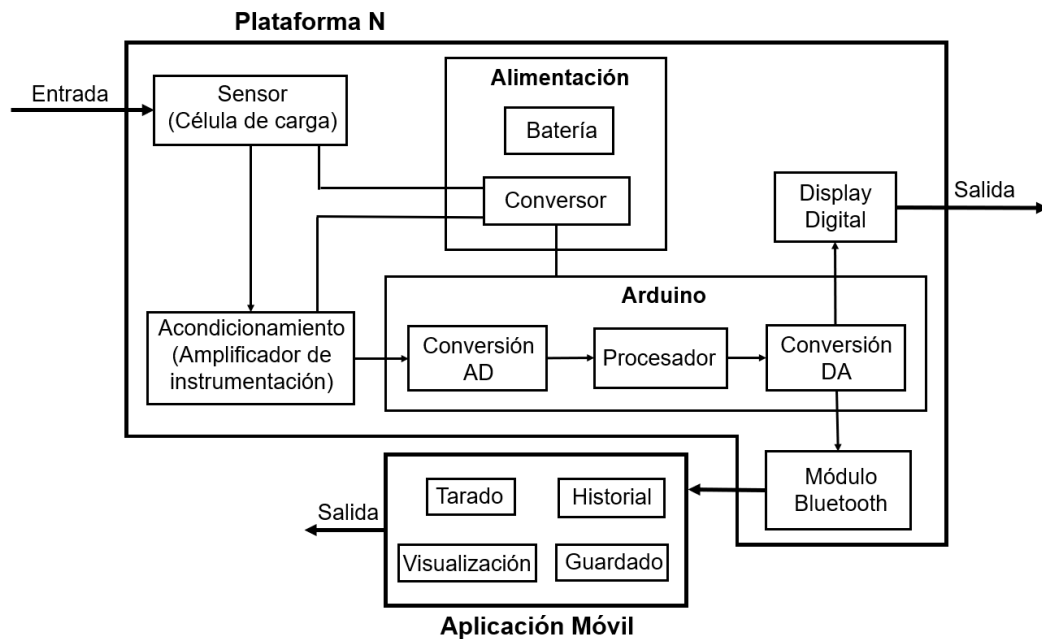


Ilustración 46: Diagrama de bloques primera solución escogida

### 3.2.2. Propuesta final

Según avanzaba el proceso de investigación y diseño, se iban haciendo patentes la necesidad de modificar la idea inicial del diseño. En este apartado comentaremos muy por encima el por qué de las decisiones, en los apartados del componente concreto puede encontrarse el razonamiento completo.

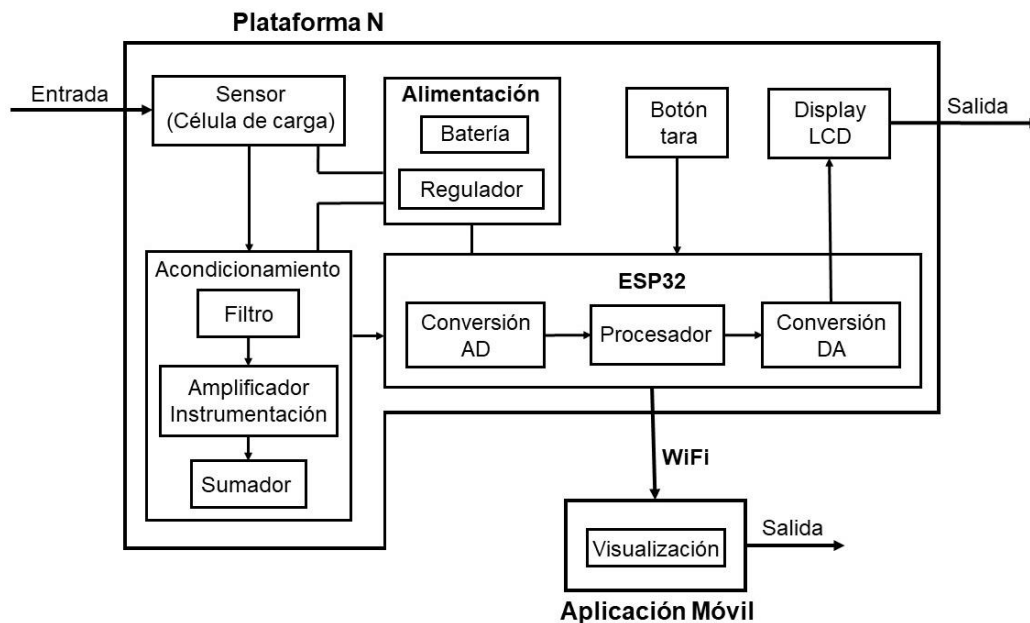


Ilustración 47: Diagrama de bloques propuesta final

- **Plataforma N.** El sistema se ha diseñado con la idea de utilizar 2 o más plataformas de forma conjunta, de forma que se puedan pesar grandes objetos irregulares, sumando los pesos de este conjunto de plataformas. Cada una de ellas sigue el mismo esquema.
  - **Sensor.** Inicialmente se iba a utilizar una sola célula de gran capacidad por plataforma. El diseño final emplea 4 células de compresión para reducir el error de posicionamiento.
  - **Acondicionamiento.** Inicialmente, se plateó solamente un amplificador de instrumentación por plataforma. Es obligatoria usar un circuito de acondicionamiento por sensor, con lo que debe cuadruplicarse.
    - **Filtro.** Se considera necesario para reducir los errores por ruido. Es necesario que sea diferencial por la salida de las células.
    - **Amplificador de Instrumentación.** Con menor ganancia de lo que se estimaba en un inicio, debe admitir un rango de células.
    - **Sumador.** Obligatorio componente para reunir las señales tratadas de las cuatro células.

- **Procesador.** El escogido ha sido el ESP32, por ofrecer el mejor conjunto general de especificaciones, resulta preferible sobre el Arduino planteado inicialmente. Como microcontrolador nos ofrece integradas en la propia placa las funciones de:
  - **Conversor AD.** En este caso es de 12 bits, con ciertos inconvenientes a resolver.
  - **Procesamiento.** Es programable con lenguaje e IDE de Arduino.
  - **Transmisión.** Tiene un módulo WiFi integrado que permite interconectar varias plataformas.
  - **Interfaz.** El botón de tara es necesario en todo sistema de pesado y el display es una alternativa para visualizar peso.
- **Alimentación.** Es imprescindible un regulador de tensión para asegurar el funcionamiento y estabilidad de los sensores. Se necesita una batería de cierta capacidad para alimentar el procesador.
- **Aplicación móvil.** Cumple la función del visor electrónico de los modelos comerciales, pero en una aplicación móvil. Ha de ser complementado por el botón de tara y el display LCD.

## 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE PESADO

Este gran apartado consiste en el grueso del presente trabajo. La manera de estructurarlo es partiendo desde el sensor y subiendo de nivel hasta llegar a la presentación de la medida al usuario. En cada uno de los apartados se aportan las bases teóricas y el seguimiento del razonamiento seguido hasta alcanzar la elección final de diseño. Téngase en cuenta que, debido a la naturaleza cíclica del diseño, es posible que sea necesaria información de un apartado posterior para comprender completamente ciertas decisiones tomadas en otro de ellos. Hay características que dependen de componentes de otro nivel y muchas se han debido modificar en varias ocasiones según se daba con otra opción o un inconveniente imprevisto.

### 4.1. Selección de célula de carga

La célula de carga, nuestro transductor o sensor, es el corazón del sistema de medida que vamos a diseñar. Es la primera pieza que debemos de escoger, pues es quien nos delimitará las principales características eléctricas y necesidades a cubrir en el circuito de acondicionamiento, así como en la alimentación. Dependiendo de las características eléctricas de la célula de carga escogida, tendremos que adaptar la tensión de la batería y ganancia de amplificación para cumplir con lo exigido por el fabricante y poder trabajar sobre la señal.

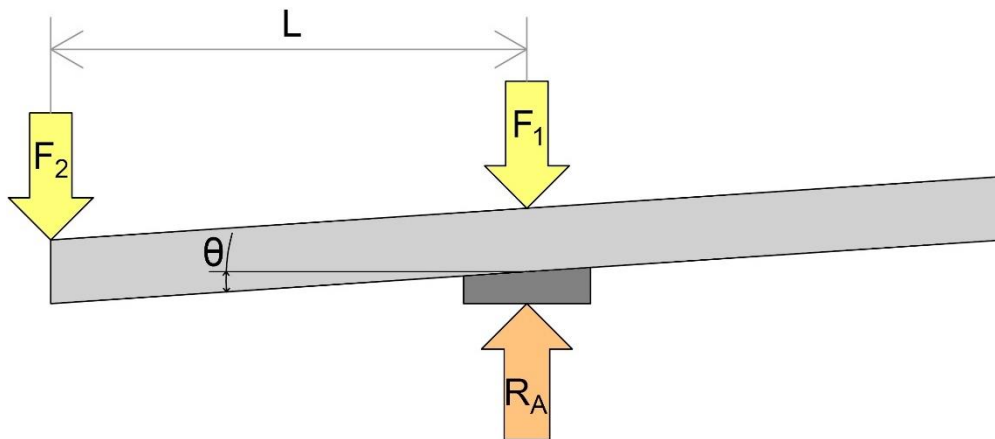
Como hemos visto en el apartado de “Tipos de células de carga”, hay una amplia gama de tipos y una gran oferta en el mercado dentro de cada uno de ellos. Así que para comenzar eliminaremos de consideración alguna de las grandes familias:

- Células de carga hidráulicas: El tratamiento de la medida de presión es más complejo que con un puente de Wheatstone, son por lo general más caras y necesitan mayor mantenimiento. No merece la pena utilizarlas en este tipo de aplicación.
- Células de carga de viga de flexión doble: Incluso las de menor capacidad pueden soportar unos pesos muy elevados. Demasiado incluso para nuestra intención de utilizar múltiples plataformas. Su forma complica el diseño mecánico y lo hace menos compacto.
- Células de carga tipo S: Tienen una capacidad alta, pero la forma del perfil complica su uso para una plataforma pequeña como la que pretendemos, elevando el perfil. Se suelen utilizar mayormente para medir tensiones a tracción.



Podríamos emplear células de carga de viga de flexión. Son muy utilizadas en básculas de mesa, y también en algunas de plataforma y portátiles, como veíamos en, por ejemplo, la serie PR.

Debemos en todo caso utilizar más de una célula. Si se emplea una sola célula de carga situada en el centro de la plataforma de pesado, se producirá un error en la medida que será mayor cuanto más alejados del centro se aplique la fuerza y mayor sea dicha fuerza. Se debe a que, con una sola célula en el centro, la plataforma tiende a desnivelarse, provocando una inclinación de la superficie de medida y sufriendo la célula una deformación por el momento de fuerza generado. Se le conoce como error de las cuatro esquinas y existe un máximo permitido por la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal). Representándolo:



$$R_A = F_1$$

$$R_A = F_2 + F_2L - F_2 \sin \theta$$

Existe una subdivisión de células de carga, que según el modelo se pueden clasificar dentro de los grupos de compresión o de viga de flexión, que están específicamente diseñadas para evitar este problema. Se las conoce como células de punto único. Pero el inconveniente es que son muy voluminosas, y por tanto difíciles de encajar en un diseño de perfil bajo como el que pretendemos desarrollar.

La otra forma de solventar este error es utilizar cuatro células de carga de menor capacidad, una en cada esquina, y sumar sus valores. Descartamos en este punto la utilización de células de viga de flexión porque nos obligarían a seguir un diseño parecido a lo que veíamos en los ejemplos comerciales de las series PR, WWS y BPR. Es decir, la plataforma de pesado central móvil sustentada por dos rampas fijas laterales, que obligan a duplicar la electrónica en cada lado o a realizar cálculos para asegurarse que aquello que fijemos a la plataforma móvil no sufrirá daños. Si utilizamos células de carga de compresión, podemos conseguir un diseño más compacto con toda la circuitería muy próxima y pudiendo prescindir de un visor electrónico externo.

Debemos de hacer una búsqueda entre las posibilidades del mercado para dilucidar qué modelo es el que más puede convenirnos. Muchas de las células de carga de compresión están diseñadas para capacidades en el rango de las toneladas. Descartaremos el uso de estas células de gran capacidad, puesto que vamos a utilizar cuatro células en cada plataforma y sería excesivo para nuestro objetivo. Tendremos en consideración células de pequeña capacidad considerados sensores de fuerza, pero que tienen estructura y comportamiento idénticos a los vistos. Buscamos que la capacidad total de cada plataforma ronde los 500 kg. Recopilando varias de las posibilidades:

Modelo	Fabricante	Capacidad (kg)	Alim. Rec. (V)	mV/V	R entr. ( $\Omega$ )	Diámetro Mayor (mm)	Altura Mayor (mm)	Precio	Notas
BM24R-C3-130kg-3G	Zemic Europe	130	10 a 15	1	1260	63	10		Tensión elevada
MK-1000	Flintec	102	5 a 10	2	400	31'75	9'91		Buena general
V70N-5000	Bosche	500 a 5000	5 a 15	2	3600	80	32'5	260	Capacidad excesiva
DL-0100-0100	Eilersen	100	24	20		100	45		Muy voluminosa
RLC-0250	Mettler Toledo	250	10	1'75	1100	80	25		Diámetro elevado
LC302-100	Omega	45'36	5 a 15	1	360	19	12'7	383	Salida baja
LC201-100	Omega	45'36	10 a 15	2	350	19	26'2	670	Muy cara
FC2231-0000-0100-L	TE Connectivity	45	5	100	3000	26	19'5	53'89	Capacidad baja
FC2311-0000-0250-L	TE Connectivity	113'47	5	20	3000	31'75	10'2	116'34	Buenas características
FX2931-0000-0100-L	TE Connectivity	90'78	1 a 6	20	3000	19'7	10'2	23'92	Capacidad-precio

Tabla 1: Células de carga

Seleccionamos el modelo FX2931-0000-0100-L de TE Connectivity. Es un sensor pensado más para aplicaciones de aficionados que uso industrial real, pero es el que puede cumplir con nuestro diseño manteniendo un buen precio, y con unas características eléctricas muy favorables para el diseño del circuito. Este sería el modelo que utilizaríamos como por defecto si se fabricase el diseño, pero el objetivo será que el circuito diseñado pueda admitir prácticamente cualquiera de las de la tabla u otras posibles.

## 4.2. Acondicionamiento

En esta sección estudiaremos los componentes que adaptan la señal eléctrica de salida de las células de carga y la adaptan para su lectura por parte del procesador. Es la parte más compleja electrónicamente de todo el diseño.

### 4.2.1. Filtrado

La señal de salida del puente de medida es por lo general muy pequeña. Esto causa que pequeñas variaciones provoquen un ruido significativo en la señal. Estos elementos que introducen ruido en la señal pueden ser tanto la vibración mecánica de la plataforma de pesaje como el ruido eléctrico general que pueda inducirse en los conductores. Es necesario introducir un filtro para limpiar este ruido, y debe de hacerse antes de la etapa de amplificación, o de lo contrario se amplificaría el ruido junto con la señal medida volviéndola inservible o no lineal.

Utilizaremos para esta aplicación un filtro pasivo, es decir, formado solamente por componentes pasivos de circuito (resistencias, condensadores e inductores). Ofrecen la ventaja de no necesitar una alimentación dedicada, como si necesita su contraparte activa, lo que simplifica el circuito. El rango de trabajo que ofrecen los filtros pasivos debiera de ser suficiente para esta aplicación. Además, los filtros pasivos son muy lineales, característica que nos beneficia para mantener la linealidad de la señal de tensión del puente de Wheatstone. El elemento menos lineal en bajas frecuencias, en las que trabajamos, son las inductancias, así que no haremos uso de ellas en el filtro.

Hay cuatro tipos de filtros pasivos según las frecuencias que acepten o rechacen: paso bajo, paso alto, paso de banda y rechazo de banda. Necesitaremos un filtro de paso bajo para esta aplicación. Un filtro de paso bajo establece una frecuencia de corte y rechaza todas las frecuencias a partir de ella, mientras que mantiene las anteriores. No teniendo un comportamiento ideal, atenúa también en parte las frecuencias inmediatamente por debajo de la de corte. Este es el comportamiento que buscamos para nuestra aplicación.

Una señal continua, transformada al dominio de la frecuencia por Fourier, ocupa exclusivamente el espacio del 0, por el hecho de ser continua. Sin embargo, el ruido eléctrico inducido en esta señal continua provoca resonancias a frecuencias mayores. Necesitamos el filtro de paso bajo para eliminar o atenuar lo máximo posible estas resonancias, manteniendo solamente la señal original.

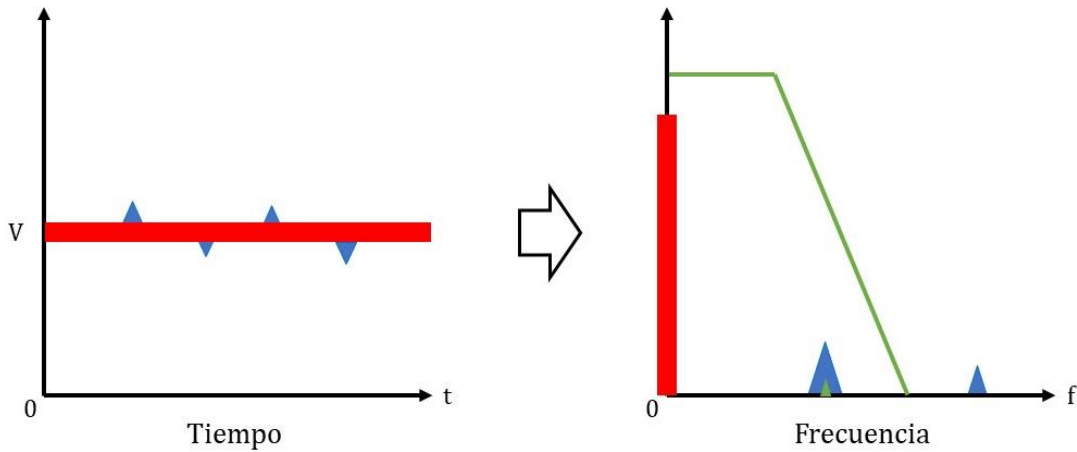


Ilustración 48: Resonancias tiempo - frecuencia

#### 4.2.1.1. Filtro paso bajo

El filtro que buscamos entonces es un filtro RC paso bajo de primer orden, haciendo referencia RC a que se forma solamente con Resistencias y Condensadores. El modelo más simple está constituido solamente por uno de cada, tal que:

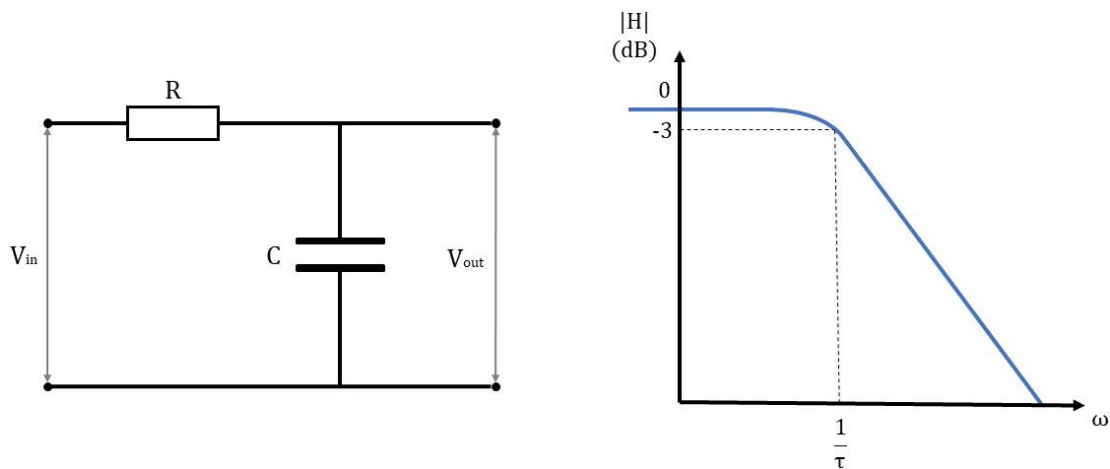


Ilustración 49: Filtro de paso bajo

La manera habitual de representación es mediante un diagrama de Bode, en el dominio de la frecuencia. En él, vemos como la tensión de salida es igual a la de entrada (se dice que tiene ganancia unidad) hasta las inmediaciones de la frecuencia de corte. Esta es una zona de transición hacia el rechazo total en la que existe una atenuación mayor a mayor frecuencia. Se estima el comienzo en las inmediaciones del corte entre  $1/\tau$  (siendo  $\tau = RC$ ) y -3 dB respecto al módulo de H. A partir de este punto la caída es de 20 dB por década.

Para calcular de forma sencilla la malla de un filtro, se hace uso de la impedancia compleja de un condensador. Si a esta le aplicamos la transformada de Laplace para dejarla en términos del plano  $s$ , que simplifica el cálculo. De esta forma, se obtiene la función de transferencia del sistema y se vuelve más sencillo representar el diagrama de Bode y analizar su comportamiento en la frecuencia.

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} \quad \rightarrow \quad X_c(s) = \frac{1}{sC}$$

Calculando entonces la función de transferencia del filtro y la frecuencia de corte en el dominio de  $s$ :

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1/Cs}{R + (1/Cs)} = \frac{1}{1 + RCs}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC}$$

Si se coloca un número  $n$  de estos filtros paso bajo en serie, se consigue un filtro de orden  $n$  superior. Sin embargo, esto también causa una atenuación marcada en el tramo previo a la frecuencia de corte ( $V_o/V_i \neq 1$ ). No nos interesa en principio para nuestro circuito, puesto que la tensión de salida del puente ya es reducida para empezar, nos quedaremos con uno de primer orden.

#### 4.2.1.2. Filtro diferencial

No podemos utilizar solamente un filtro paso bajo o dos en paralelo. La salida de un puente de Wheatstone, como hemos visto, es diferencial, y debemos de filtrarla antes del amplificado. La manera de hacerlo es utilizando un filtro paso bajo de primer orden diferencial. Su estructura es tal que:

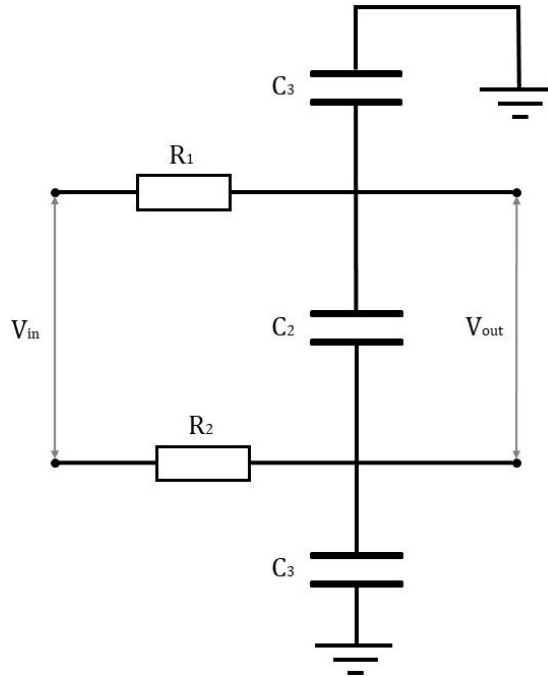


Ilustración 50: Filtro diferencial

Calculamos sobre la malla para obtener la función de transferencia. Asumimos que todas las resistencias y los condensadores tienen el mismo valor, respectivamente. Resolvemos:

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1/Cs}{2R + (1/Cs)} = \frac{1}{1 + 2RCs}$$

$$f_c = \frac{1}{4\pi RC}$$

Encontramos al resolver que la presencia de una segunda resistencia hace que la frecuencia de corte sea la mitad que en el caso del filtro simple, resultado beneficioso para justar más nuestro filtro.

Recordemos que todo este estudio de filtrado se hace sobre el comportamiento en la frecuencia. Los condensadores, en transitorio y corriente continua, se comportan como circuito abierto, de modo que su presencia no afecta al circuito general más que para el filtrado.

### 4.2.1.3. Diseño del filtro

Tenemos entonces que diseñar un filtro diferencial para limpiar la señal de salida del puente. Conocemos la estructura y comportamiento, pero debemos de ajustar los valores de resistencia y condensador. El objetivo de diseño será conseguir la menor frecuencia de corte posible, sin que haya decremento en la tensión y utilizando componentes accesibles y que alteren la señal lo mínimo posible.

Podemos calcular fácilmente la frecuencia de corte teórica, pero el comportamiento del sistema es complicado de dibujar. Lo más sencillo es utilizar Matlab para representar el diagrama de Bode a partir de la función de transferencia del sistema. Hay una función que lo representa automáticamente, pero no permite dibujar sobre el diagrama. Introducimos algunas líneas extra de código para visualizar la posición de la frecuencia de corte y los -3 dB al módulo. Basta con cambiar el valor de las variables C y R y ejecutar el script para ver los resultados.

```
%Valores de R y C estudiados
R=10000
C=470e-6

%Función de transferencia
H = tf(1,[2*C*R 1])
%Frecuencia de corte (Hz)
fc = 1/(4*pi*R*C)
%Frecuencia de corte (rad/s)
w = 2*pi*fc

%Representación automática de Bode
clf;
figure(1);
bode(H)

%Toma de datos del cálculo del Bode
[mag,phase,wout]=bode(H);
mag = squeeze(mag);
phase = squeeze(phase);

%Representación del módulo incluyendo fc
figure(2); hold on;
sgtitle('Diagrama de Bode');
subplot(2,1,1);
semilogx(wout,-abs(mag2db(mag)),w,-3,'ro');
xline(w,'r--');
yline(-3,'r--');
ylabel('Magnitud (dB)');
%Representación del argumento
subplot(2,1,2);
semilogx(wout,phase);
ylim([-90 0]);
ylabel('Fase (deg)');
xlabel('Frecuencia (rad/s)');
hold off
```

Para conseguir la menor frecuencia de corte, hay que utilizar la mayor combinación RC posible. Se vuelve por tanto necesario utilizar condensadores electrolíticos, que se mueven en valores de microfaradios. Los valores máximos de los cerámicos están en el orden de los picofaradios, muy pequeño para este uso. Utilizaremos un condensador electrolítico de  $470\mu\text{F}$ . Es el que nos proporciona mayor valor sin entrar en condensadores muy específicos de alta capacidad.

En resistencias hay más flexibilidad. Prácticamente cualquiera por encima de los  $4\text{k}\Omega$  nos da ya buenos resultados. Hacemos pruebas manteniendo fijo el valor del condensador y variando valores de la resistencia. En ningún caso se atenúa el valor de la tensión. La forma del Bode es también prácticamente idéntica en todo caso. Terminamos optando por una resistencia de  $10\text{ k}\Omega$ , que debiera de ser suficiente para esta aplicación al tiempo que se mantiene en una escala de valores similar a las que utilizaremos en el amplificador.

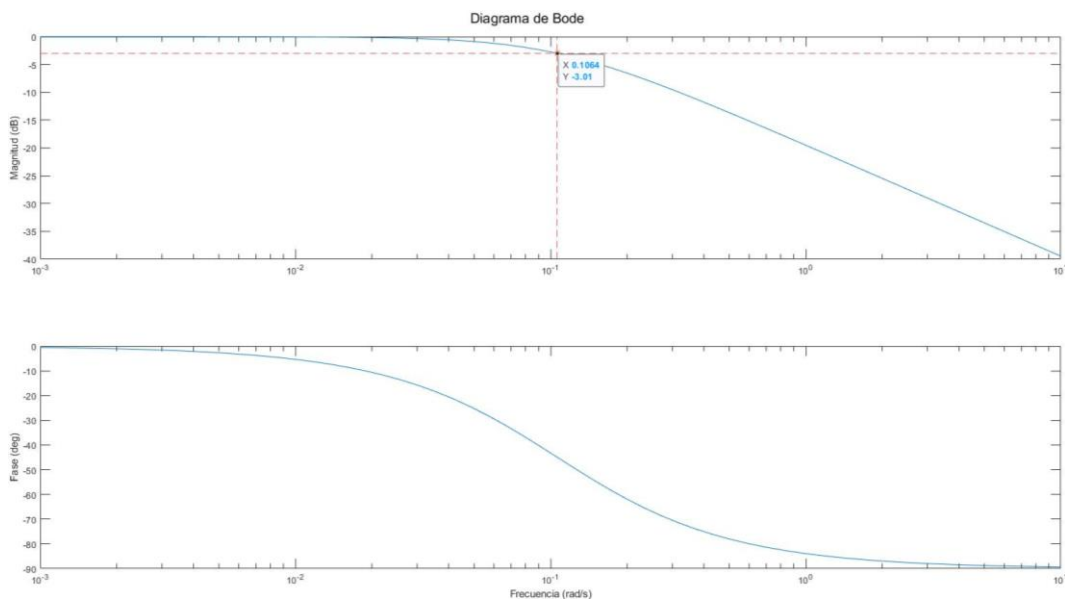


Ilustración 51: Bode del filtro diferencial

Acabamos teniendo un filtro diferencial caracterizado por:

$$H(s) = \frac{V_0(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{9'4s + 1}$$

$$f_c = 0'0169 \text{ Hz}$$

$$R = 10\text{K}\Omega$$

$$C = 470\mu\text{F}$$



## 4.2.2. Amplificación

La salida del puente de Wheatstone es por lo general muy reducida, del orden de los milivoltios. Es necesario amplificar la señal para poder darla como entrada al procesador posteriormente. Dado además que la salida del puente es diferencial ( $V_s = V_A - V_B$ ), tenemos que utilizar un montaje que nos permita hacer ambas operaciones, la diferenciación y la amplificación. Se nos abren dos opciones principales entonces: utilizar una etapa restadora y después otra amplificadora o utilizar amplificadores de instrumentación.

Pero antes, es necesario explicar la idea de CMRR para justificar la elección posterior de circuito para la fase de amplificación.

### 4.2.2.1. Rechazo del modo común (CMRR)

Es un concepto que surge por el desvío del comportamiento real de un AO respecto al comportamiento ideal esperable. Idealmente, un AO solamente debiera amplificar la diferencia entre las tensiones de entrada. Realmente, aunque la diferencia permanezca constante, si el valor de ambas entradas cambia, la salida sufre una variación debido al cambio del punto de operación en su construcción interna. Así, se definen para dos entradas,  $V_1$  y  $V_2$ , y una salida  $V_0$ :

$$\begin{aligned} \text{Entrada modo común: } V_{mc} &= \frac{V_1 + V_2}{2} \\ \text{Entrada modo diferencial: } V_{md} &= V_1 - V_2 \\ \text{Entrada modo común: } A_{mc} &= \left. \frac{V_0}{V_{mc}} \right|_{V_{md}=0} \\ \text{Entrada modo diferencial: } A_{md} &= \left. \frac{V_0}{V_{md}} \right|_{V_{mc}=0} \end{aligned}$$

En el caso ideal, la ganancia en modo común sería igual a 0 ( $A_{mc} = 0$ ), en el caso real, lo deseable es que sea lo menor posible. La forma general de dar este dato es como cociente entre  $A_{md}$  y  $A_{mc}$ , que es lo que se conoce como razón de rechazo del modo común o CMRR, del inglés common - mode rejection ratio. Puede aparecer también dado en decibelios.

$$CMRR = \left| \frac{A_{md}}{A_{mc}} \right| \quad \text{ó} \quad CMRR = 20 \log \left| \frac{A_{md}}{A_{mc}} \right| \text{ (dB)}$$

El mayor efecto del CMRR se siente sobre la primera fase del AO, el amplificador diferencial formado por dos transistores. Cuanto más parejos sean estos transistores, menor es el CMRR. También aumenta el CMRR a mayor tensión y frecuencia de la señal. Por ejemplo, esto puede volver el AO más sensible a ruidos. En conclusión, el CMRR es una característica indeseable de los AO que genera imprecisión y es deseable que sea lo menor posible.

#### 4.2.2.2. Dos etapas

Existen un conjunto de configuraciones habituales con los amplificadores operacionales. Este montaje consiste en utilizar dos de ellos, el circuito restador y el amplificador no inversor, en cascada. En la primera etapa, la restadora, obtenemos la diferencia de tensiones en las ramas del puente, la salida que nos interesa. En la segunda, amplificamos la señal de tensión para enviar a procesamiento. En la etapa diferencial ya se puede amplificar la diferencia de tensión, según los valores de las resistencias, pero es necesario una etapa de mayor amplificación para acercarnos a los valores de ganancia que pueda dar un amplificador de instrumentación. De incluir un filtro en el montaje, debería colocarse entre estas dos etapas (sobre  $V_{01}$ ). El montaje sería:

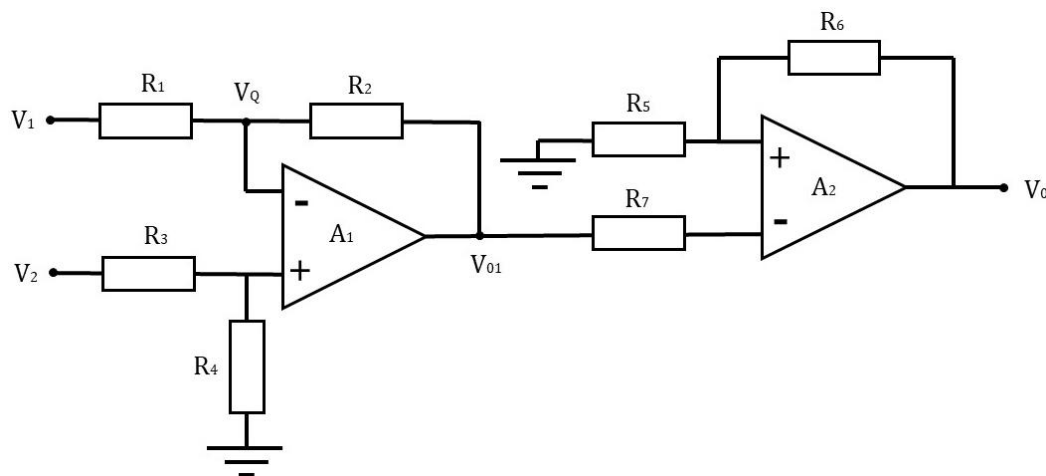


Ilustración 52: Diferenciador y amplificador

Estudiamos principalmente la primera etapa, el amplificador diferencial (configuración A<sub>1</sub>), que es en el que se basan los amplificadores de instrumentación que veremos a continuación. Calculando la tensión V<sub>01</sub> de salida de la parte diferencial:

$$\frac{V_1 - V_Q}{R_1} = \frac{V_Q - V_{01}}{R_2} \quad ; \quad \frac{V_2 - V_Q}{R_3} = \frac{V_Q}{R_4}$$

$$V_{01} = -\frac{R_2}{R_1}V_1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)\frac{R_4}{R_3 + R_4}V_2$$

Para que esta salida V<sub>01</sub> sea, de hecho, proporcional a la diferencia de entrada V<sub>2</sub>-V<sub>1</sub> debe de cumplirse:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} \quad \rightarrow \quad V_0 = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$$

Descomponiendo esta tensión de salida para expresarla en función de tensiones y ganancias en modos diferencial y común según la expresión:

$$V_0 = G_{mc}V_{mc} + G_{md}V_{md}$$

Y teniendo que las tensiones de entrada y salida se expresan como:

$$\begin{cases} V_{md} = V_2 - V_1 \\ V_{mc} = \frac{V_1 + V_2}{2} \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} V_1 = V_{mc} - \frac{V_{md}}{2} \\ V_2 = V_{mc} + \frac{V_{md}}{2} \end{cases}$$

Con todo esto en cuenta, podemos expresar las ganancias en modo diferencial y común en función de las resistencias del circuito:

$$G_{mc} = \frac{V_0}{V_{mc}} \Big|_{V_{md}=0} = \frac{R_4 R_1 - R_2 R_3}{R_1 (R_3 + R_4)}$$

$$G_{md} = \frac{V_0}{V_{md}} \Big|_{V_{mc}=0} = \frac{1}{2} \left[ \frac{R_2}{R_1} + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right]$$

En consecuencia, la condición que ha de cumplirse para que la ganancia en modo común sea nula es:

$$G_{mc} = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = K \quad \rightarrow \quad V_0 = KV_{md} = G_{md}V_{md}$$

Esta relación entre resistencias es difícil de conseguir, tanto por la limitación de utilizar resistencias normalizadas como por el propio error interno de construcción de cada una de ellas. Así, el CMRR no será nunca infinita, como sería ideal, sino que es limitado y dado por:

$$CMRR = \frac{G_{md}}{G_{mc}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_1 R_4 + R_2 R_3 + 2R_2 R_4}{R_1 R_4 - R_2 R_3}$$

Por último, si además amplificásemos esta salida diferencial en una segunda etapa con el amplificador no inversor (configuración  $A_2$ ), encontramos que la salida depende de dos nuevas resistencias, empeorando el problema que ya arrastrábamos.

$$V_0 = V_{01} \frac{R_6}{R_5} + 1 = -\frac{R_6 R_2}{R_5 R_1} V_1 + \frac{R_6}{R_5} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{R_4}{R_3 + R_3} V_2 + 1$$

En conclusión, el problema que plantea utilizar este método es una ganancia en modo común finita, inestable y dependiente de muchas resistencias. En las resistencias que se utilizan habitualmente en electrónica, la tolerancia suele ser de 5 o 2%, aunque hay otras de precisión con un error más pequeño, pero el precio aumenta sensiblemente. Se podría compensar el error sustituyendo alguna de ellas por un potenciómetro, pero el ajuste sería distinto para cada amplificador de este tipo que utilizemos y lento de medir. De modo que descartaremos el uso de este circuito para el diseño final.

#### 4.2.2.3. Amplificadores de instrumentación

Otra posibilidad es utilizar amplificadores de instrumentación (AI). Estos son dos configuraciones de amplificadores operacionales que tienen las siguientes características principales deseables:

- Salida diferencial muy precisa y estable. La salida se mantiene frente a cambios de temperatura y ruidos eléctricos. La tensión de salida es igual a la ganancia  $G$  del AI por la diferencia de entradas:

$$V_0 = G(V_2 - V_1)$$

- Ganancia precisa, muy elevada pero finita, y ajustable. El rango de ganancia suele estar entre 1 y 1000, que permite elevar tensiones diferenciales muy pequeñas. Se debe poder ajustar con un elemento externo al circuito, normalmente un potenciómetro.
- Impedancia de entrada muy alta, pero muy baja de salida. Recordemos que idealmente, un AO no tiene corriente de entrada, lo que nos lleva a que la impedancia de entrada ideal sea infinita. La impedancia de salida es idealmente 0, para que el AI sea inmune a la resistencia de carga equivalente de la salida. El objetivo es que el amplificador no afecte al resto del circuito de medida y viceversa.
- Alto rechazo en modo común (CMRR), idealmente, infinito. Esto es, se amplifica solamente la diferencia entre las tensiones de entrada, ignorando la componente de modo común de entrada. Esta característica es por la que se utiliza para medir señales de entrada diferenciales pequeñas.

- La tensión e intensidad de offset, así como sus derivas por temperatura, son de valor reducido. El offset es causado por diferencias constructivas en los componentes de un AO.

Por todo ello, es muy apreciado en aplicaciones de instrumentación. Se puede implementar el diseño por cuenta propia o utilizar alguno de los integrados a la venta comercialmente, como el INA217 de Texas Instruments o el AD524 de Analog Devices. Hay dos variantes, aunque la más popular es la que utiliza tres amplificadores operacionales (AO de aquí en adelante), que es la que más potencia las características deseables descritas anteriormente.

- Amplificador instrumentación 2 AO

La configuración del AI de 2 AO sigue el esquema:

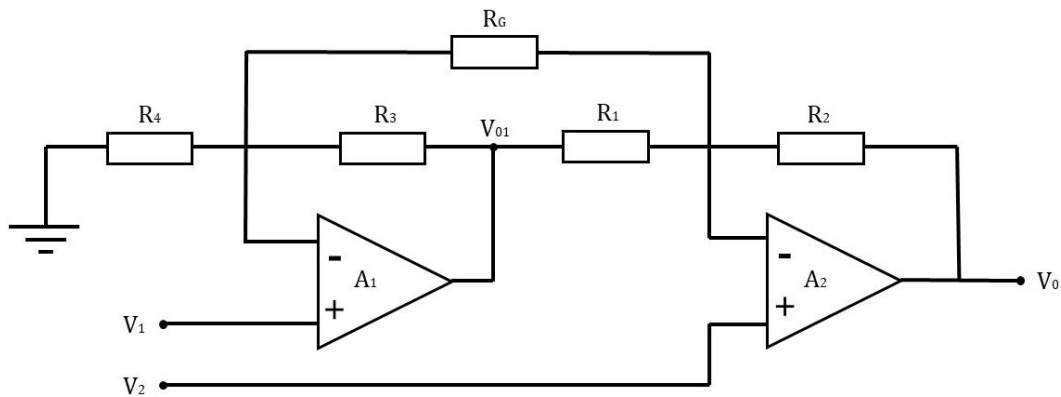


Ilustración 53: Amplificador de instrumentación de 2 operacionales

El planteamiento del circuito, considerando AO ideales es:

$$\frac{-V_1}{R_4} = \frac{V_1 - V_{01}}{R_3} + \frac{V_1 - V_2}{R_G}$$

$$\frac{V_1 - V_2}{R_G} + \frac{V_{01} - V_2}{R_1} = \frac{V_2 - V_0}{R_2}$$

De ello, se calcula la tensión de salida en función de las resistencias:

$$V_0 = V_2 \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{R_2}{R_G} + \frac{R_3 R_2}{R_G R_1} \right) - V_1 \left( \frac{R_2}{R_G} + \frac{R_2}{R_1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_4} + \frac{R_3}{R_G} \right) \right)$$

La condición que debiera cumplirse para conseguir un CMRR infinito en este circuito es que:

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1} = K \quad \rightarrow \quad V_0 = (V_1 - V_2) \left( 1 + K + \frac{R_2 + R_4}{R_G} \right)$$

Para que se cumpla, es necesario emparejar correctamente cuatro de las resistencias del circuito. Puede variarse la ganancia del circuito mediante la resistencia restante  $R_G$  sin que eso afecte al CMRR del AI.

El problema de esta variante de 2 AO es que, si bien supone un ahorro de material en resistencias y AO frente a la variante de 3, a causa de la asimetría en la entrada, tiene tendencia a un peor comportamiento en altas frecuencias.

- Amplificador instrumentación 3 AO

En el caso del AI formado por tres AO tenemos que: los amplificadores 1 y 2 están en configuración de amplificador no inversor (etapa de entrada), y el 3 en configuración de amplificador diferencial (etapa de salida). De esta forma, se amplifica y diferencian las tensiones  $V_1$  y  $V_2$  de entrada. La estructura es:

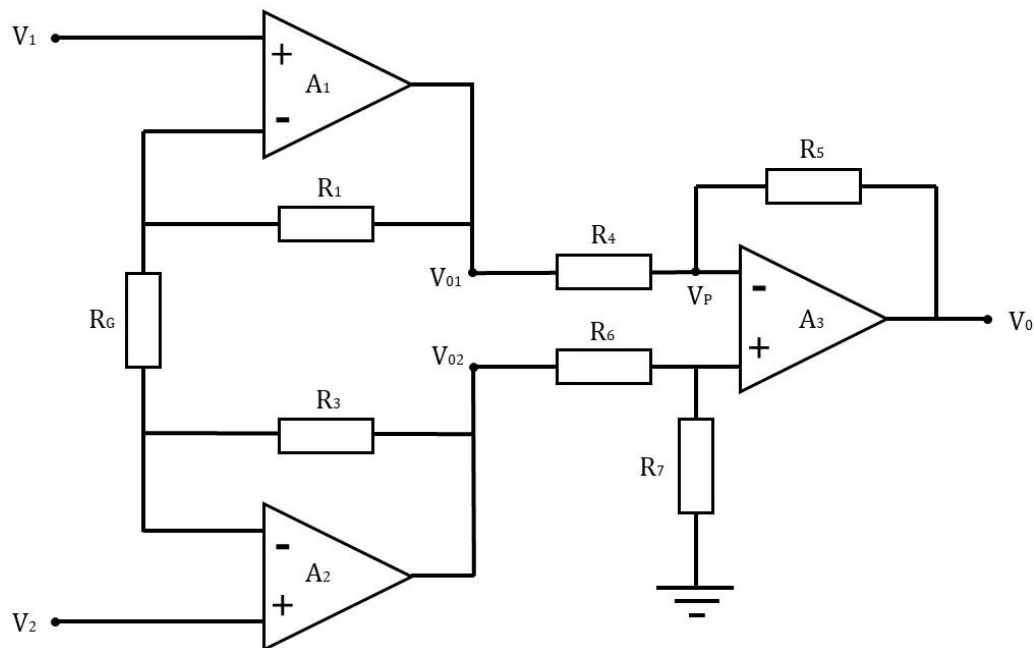


Ilustración 54: Amplificador de instrumentación de 3 operacionales

Planteando sobre el circuito, suponiendo AO ideales, se cumple:

$$\frac{V_{01} - V_1}{R_1} = \frac{V_1 - V_2}{R_G} = \frac{V_2 - V_{02}}{R_3}$$

$$\frac{V_{02} - V_2}{R_1} = \frac{V_2 - V_1}{R_G}$$

$$\frac{V_{02} - V_P}{R_6} = \frac{V_P}{R_7}$$

Calculando, llegamos a que la tensión de salida  $V_0$  es:

$$V_0 = -V_1 \left[ \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \frac{R_7}{R_6 + R_7} \cdot \frac{R_3}{R_G} + \frac{R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{R_1}{R_G} \right) \right] +$$

$$+ V_2 \left[ \left( 1 + \frac{R_5}{R_4} \right) \frac{R_7}{R_6 + R_7} \left( 1 + \frac{R_3}{R_G} \right) + \frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{R_1}{R_G} \right]$$

Expresando  $V_0$  en función de tensiones  $V_{mc}$  y  $V_{md}$ :

$$V_0 = V_{md} \left[ \frac{1 + R_5/R_4}{1 + R_6/R_7} \left( \frac{R_3}{R_G} + \frac{1}{2} \right) + \frac{R_5}{R_4} \left( \frac{R_1}{R_G} + \frac{1}{2} \right) \right] + V_{mc} \left[ \frac{1 - R_6 R_5 / R_7 R_4}{1 + R_6 / R_7} \right]$$

El CMRR máximo se consigue para  $G_{mc} = 0$ , que sucede cuando cumple:

$$\frac{R_5}{R_4} = \frac{R_7}{R_6} = K$$

Si además también se cumple la relación:

$$\frac{2R_1}{R_G} = \frac{2R_3}{R_G} = G \quad \rightarrow \quad V_0 = V_{md} K (1 + G) = (V_1 - V_2) \frac{R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_G} \right)$$

La ecuación anterior implica que se puede variar la ganancia del AI modificando solamente la resistencia  $R_G$ .

Calculando CMRR en función de resistencias, con AO ideales y  $R_1 = R_2$ :

$$CMRR = \frac{G_{md}}{G_{mc}} = (1 + G) \frac{1}{2} \cdot \frac{R_4 R_7 + R_6 R_5 + 2R_5 R_7}{R_4 R_7 - R_6 R_5}$$

Vemos que el CMRR es independiente de  $R_G$ , por lo que es posible ajustar la ganancia sin afectar a CMRR.

Concluyendo, el AI de 3 AO es el escogido para la etapa de amplificación de este proyecto por su notable estabilidad y la facilidad de ajuste de la ganancia (elevada) haciendo uso de  $R_G$ , que puede ser tanto una resistencia fija como un potenciómetro.

#### 4.2.2.4. Diseño teórico del amplificador

Como hemos concluido, utilizaremos un amplificador de instrumentación de 3 operacionales, que es el de mejores características en general. El objetivo es amplificar el rango de tensiones de salida marcado por la célula de carga utilizada para que pueda ser leído por el microcontrolador. Fijaremos los valores de las resistencias para ello.

El AI es el punto crítico para la escalabilidad del sistema de medida que diseñemos. El rango de tensión de entrada al microcontrolador será siempre el mismo, utilizando el ESP32, (0, 2'45) V. Se explica el motivo en el apartado "El problema con el ADC del ESP32". La forma de aumentar la capacidad del sistema es emplear células de carga con mayor capacidad. Según los ejemplos comerciales que hemos visto, las tensiones de salida, según las respectivas datasheets, están en el rango de (2, 20) mV/V, aproximadamente. Sin embargo, esta no es la tensión de salida "real", puesto que se da en milivoltios por cada voltio de entrada (mV/V). La tensión de entrada de las células de carga está en el rango de (5, 15) V para las de carácter industrial y (1, 5) V en aquellas consideradas como sensores de fuerza. Queremos un sistema que de base tenga una capacidad de entorno a los 800 - 1000 kg, de modo que consideraremos que aquellas en el rango de (1, 5) V son suficiente.

Con esto en cuenta, para que el circuito sea escalable, tiene que ser capaz de trabajar en todo el rango, para permitir la selección de células adecuadas. El AI tendrá que admitir entradas en rango (0, 100) mV, cubriendo todas las posibles tensiones de las células, y dar una salida del rango (0, 575) mV, de forma que, una vez sumadas las cuatro, esté en el rango (0, 2'45) V de la entrada del microcontrolador.

Asumamos que la tensión de alimentación de la célula de carga es siempre de 5 V, para aumentar el rango de tensión de salida y mejorar la precisión de la medida. Se conseguirá este objetivo con un regulador de tensión, establecido más adelante en este trabajo. La tensión de salida de la célula se calcularía entonces como:

$$V_{0c} = V_{ic} \cdot (mV/V) = 5 \cdot (mV/V)$$

Esto nos dejaría con que las situaciones extremas para cálculo de la ganancia se dan para:

$$V_{0c1} = 5 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0'01 V$$

$$V_{0c2} = 5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 0'1 V$$



Esto lo lograremos ajustando la ganancia con un potenciómetro ( $R_G$ ), mientras dejamos el resto de resistencias fijas a los valores que nos sean más convenientes. Haremos uso de MS Excel para poder formar tablas en que comparar todas las opciones posibles. Seguimos para el diseño el proceso:

- Recuperamos la fórmula que describe la salida de AI3, en dónde  $V_{md}$  es la tensión diferencial del puente ( $V_0$  célula), que llega a través del filtro

$$V_0 = V_{md}K(1 + G) = V_{md} \frac{R_5}{R_4} \left( 1 + \frac{2R_1}{R_G} \right)$$

- Trabajamos con la relación  $R_5/R_4$  como K.
- Consideramos valores normalizados de resistencias entre 1 k $\Omega$  y 8k2  $\Omega$  para todo el AI.
- Reunimos los valores en una tabla y usamos K con un máximo de dos decimales, por precisión.
- Buscamos el menor valor del potenciómetro  $R_G$  posible para mejorar la precisión en el ajuste y dejar margen para compensar errores de las resistencias y del potenciómetro en valores extremos.
- Despejamos  $R_G$  en función del resto de parámetros:

$$R_G = \frac{2R_1}{\left(\frac{G}{K} - 1\right)}$$

- Redondeamos a las unidades el resultado de  $R_G$ .
- Calculamos la ganancia necesaria para tener la tensión de salida máxima en las dos situaciones extremas del rango de entrada:

$$\circ V_{i1} = (0,10) \text{ mV} \quad \rightarrow \quad G = V_0/V_{i1} = 0'575/0'01 = 57'5$$

$$\circ V_{i2} = (0,100) \text{ mV} \quad \rightarrow \quad G = V_0/V_{i2} = 0'575/0'1 = 5'75$$

Hacemos uso de las tablas para buscar los valores que mejor se ajusten. Si queremos utilizar un potenciómetro de pequeño valor, la región de búsqueda es muy reducida a causa de la ganancia de 5'75. Acabamos fijando los valores de las resistencias a:

$$R_1=R_3=1500 \Omega$$

$$R_G=1200 \Omega$$

$$R_5=R_7=1800 \Omega$$

$$R_G(G=5'75) = 1057 \Omega$$

$$R_4=R_6=1200 \Omega$$

$$R_G(G=57'5) = 80 \Omega$$

Como comprobación de los cálculos, damos valores y simulamos el circuito en Eagle, por simulación de ngspice. Corroboramos que la salida es la esperada en ambos casos, dentro de un margen de error, así que damos por buenos los valores fijados.

- $V_{i1} = 10 \text{ mV}$ :

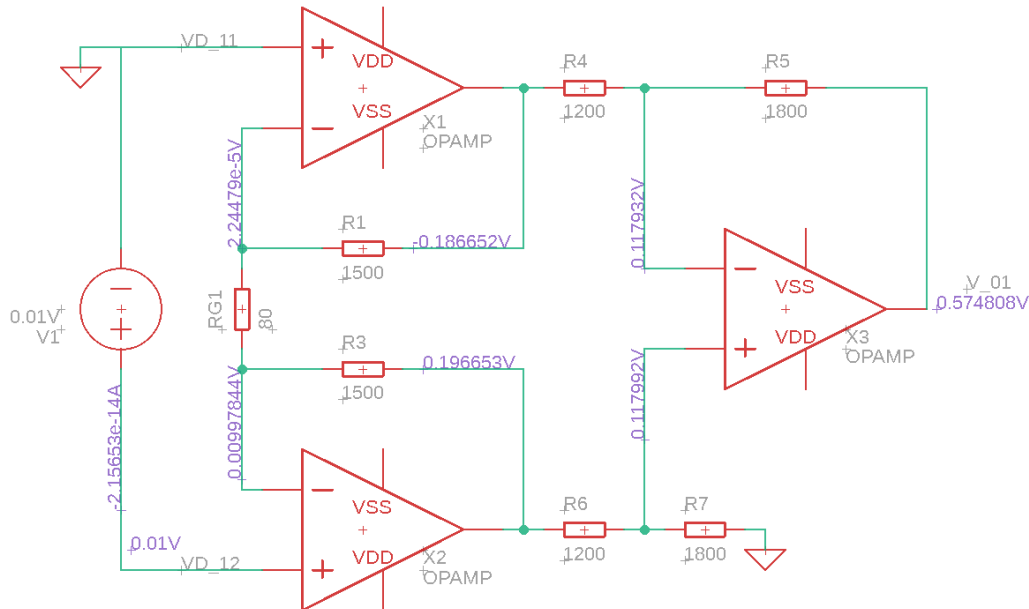


Ilustración 55: Simulación AI a 10 mV

- $V_{i2} = 100 \text{ mV}$ :

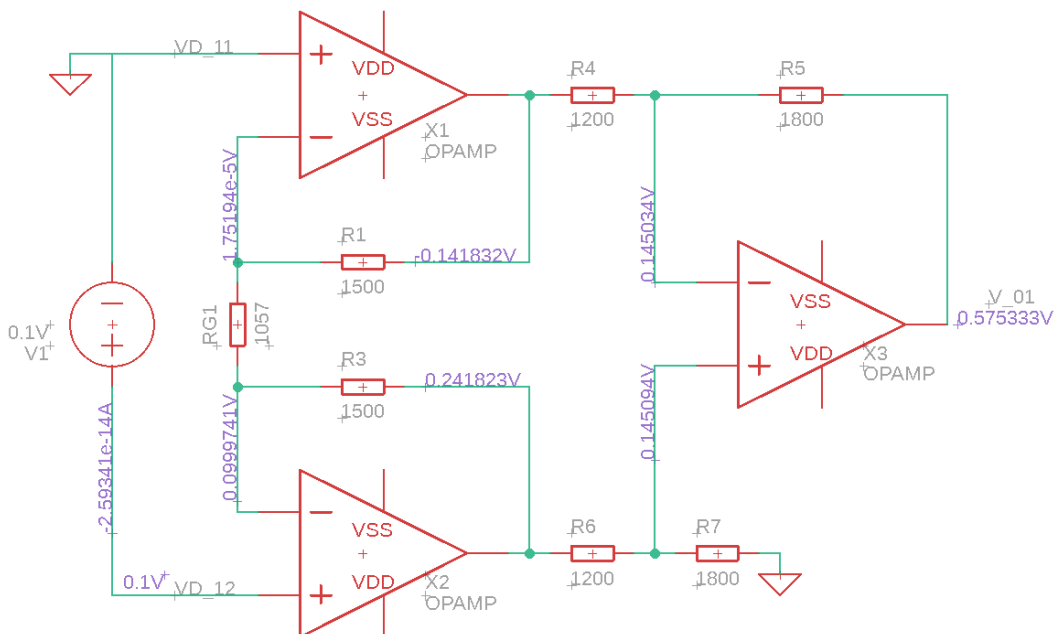


Ilustración 56: Simulación AI a 100 mV

#### 4.2.2.5. Selección de componentes del AI

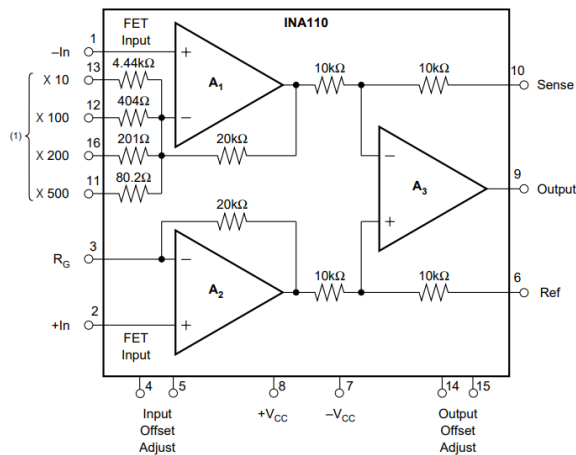
Resuelto el AI a nivel teórico, debemos de fijar los componentes electrónicos reales que utilizaremos, seleccionados entre los disponibles en el mercado. Utilizaremos como referentes de búsqueda las páginas de Mouser y Farnell, dedicadas a la venta online de componentes electrónicos.

Una buena opción sería utilizar AI ya integrados, con toda la construcción del circuito interna en una envoltente. Ofrecen ventajas frente a un circuito personalizado propio, como son un importante ahorro de área y complejidad en una PCB y unas tolerancias ya acotadas por el fabricante. Hay dos tipos principales.

- AI con ganancia fija

No referido a que el integrado tenga una sola ganancia, si no a que permite elegir solamente entre un número discreto preestablecido de ganancias. La resistencia de ganancia es interna a la envoltente y se selecciona puentando dos de los pines, especificados por el fabricante.

Un ejemplo sería el INA110, de Burr-Brown/Texas Instruments. Permite seleccionar ganancias de 10, 100, 200 o 500, con rango de tensión de  $\pm 12V$ .



NOTE: (1) Connect to  $R_G$  for desired gain.

Ilustración 57: INA110, Texas Instruments

Este tipo de integrados no sirven para nuestro propósito, dado que la ganancia que necesitamos no es muy elevada y no entra dentro de los múltiplos de 10 en que suelen dividir las ganancias seleccionables en estos integrados.

- Al con ganancia seleccionable

Al contrario que los anteriores, la resistencia de ajuste de la ganancia es exterior al integrado, en consecuencia, totalmente libre de seleccionar por el usuario. La ganancia suele calcularse a partir de una ecuación proporcionada por el fabricante del integrado.

Ejemplo de este tipo es el INA101, de Burr-Brown/Texas Instruments. Tiene prácticamente el mismo rango de tensiones que el anterior ( $\pm 12.5$  V), pero la ganancia es seleccionable, teniendo datos sobre el comportamiento de del integrado en múltiplos de 10, para poder inferir su comportamiento.

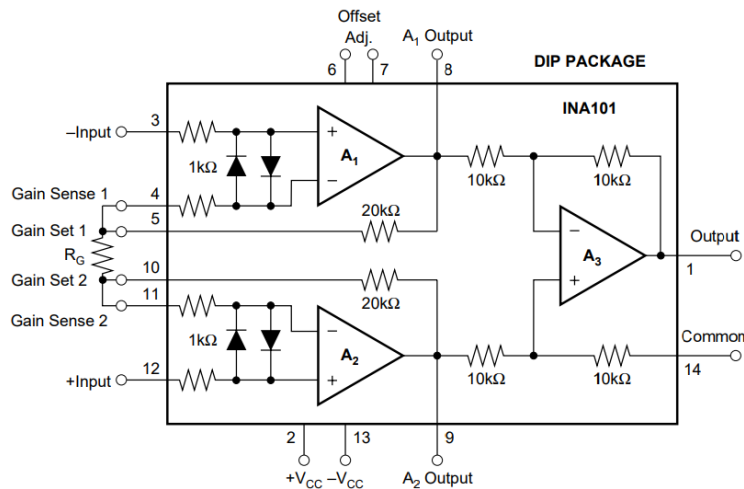


Ilustración 58: INA101, Texas Instruments

Tienden a ser circuitos de gran precisión, con un amplio rango de ganancia. Realmente el único problema de utilizar estos integrados es su elevado precio. El INA101 sin ir más lejos puede encontrarse por unos 17 €. Teniendo que emplear cuatro de ellos, hace que el coste del equipo se dispare demasiado como para que valga la pena el ahorro de área de PCB que supondría utilizar uno de estos en lugar de diseñar un AI propio.

- Amplificador de Instrumentación propio

La tercera opción que podemos tomar es construir nuestro propio AI a partir de AO disponibles en el mercado y utilizando resistencias de los valores normalizados que hemos determinado en el diseño. Con esto, sabemos que estamos incrementando la complejidad y el área de la PCB, pero a cambio podemos reducir potencialmente el coste y ajustarnos más a las ganancias específicas que necesitamos.

Nos interesa un AO cuya alimentación esté en el rango de (0, 5) V, para que se corresponda con el de las células de carga y pueda darnos la salida exigida. Además, debe admitir la entrada de tensión reducida de (0 a 100) mV.

El AO escogido es el LM358N, de Texas Instruments. Sus características eléctricas están por encima de lo que necesitamos realmente, pero presenta una ventaja, y es que contiene 2 AO en un mismo empaquetado DIP8. Teniendo en cuenta que utilizamos 12 AO para el total de AI que necesitamos, supone un importante ahorro, tanto monetario, como, sobre todo, de área y complejidad a la hora de diseñar la PCB. Sus características principales son:

- Tensión de alimentación: (3, 32) V
- Tensión de entrada: (-0'3, 32) V
- Temperatura de operación: (0, 70) °C

El esquema de conexión del empaquetamiento tipo DIP8 proporcionado por el fabricante es:

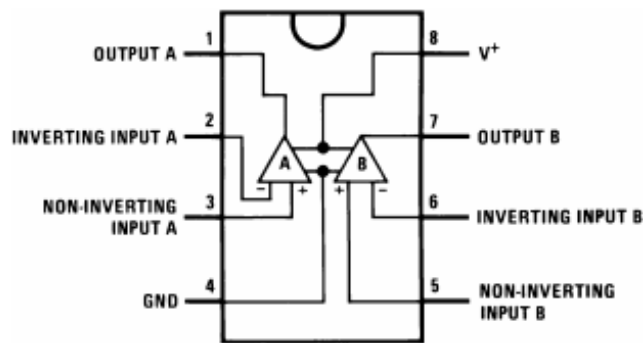


Ilustración 59: LM358N, Texas Instruments

Puede adquirirse en las páginas web de venta electrónica Mouser y Farnell por en torno a 0'83€ la unidad. Además, este amplificador está modelado en el las librerías de Eagle y podemos añadirlo fácilmente al diseño.

### 4.2.3. Sumador no inversor

Es preciso un sumador para reunir las cuatro señales de sendas células de carga. En todo circuito de instrumentación se debe de filtrar y amplificar la señal del transductor antes de aplicarle ninguna otra operación. Es por esto que el sumador lo colocamos después de que la señal de las células ya haya sido tratada. Del sumador, se enviará la salida total al procesador.

Hacemos uso de un circuito sumador no inversor con cuatro entradas:

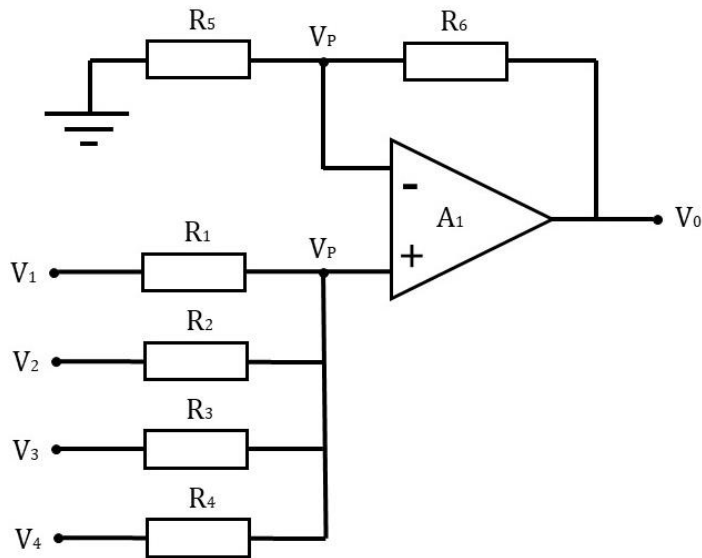


Ilustración 60: Sumador no inversor

Calculamos asumiendo que el desequilibrio entre las entradas causará que la corriente retorne en algún momento en dirección a una de las tensiones:

$$\frac{V_1 - V_P}{R_1} + \frac{V_2 - V_P}{R_2} + \frac{V_3 - V_P}{R_3} = \frac{V_P - V_4}{R_4}$$

$$\frac{V_P}{R_6} = \frac{V_P - V_0}{R_5}$$

Si resolvemos directamente, se llega a una expresión compleja:

$$V_P = \frac{R_2 R_3 R_4 V_1 + R_1 R_3 R_4 V_2 + R_1 R_2 R_4 V_3 + R_1 R_2 R_3 V_4}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

$$V_0 = \frac{R_6 + R_5}{R_6} V_P$$

Sin embargo, se puede simplificar si consideramos que  $R_1 - R_4$  están en paralelo y supeditamos el valor de  $R_5$  al del resto de resistencias del circuito. A esta se le llama resistencia de equilibrio y asegura la función sumadora. Así:

$$R_p = R_1 || R_2 || R_3 || R_4$$
$$R_5 = \left| \frac{R_6 \cdot R_p}{R_p - R_6} \right|$$

De esta forma, la tensión de salida queda en función de  $R_6$  y  $R_{1-4}$ , que, si son iguales, se simplifica hasta ser solamente la suma de  $V_{1-4}$ :

$$V_0 = R_6 \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \frac{V_4}{R_4} \right) \rightarrow V_0 = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$$

#### 4.2.3.1. Diseño del sumador

Conocidas las ecuaciones que rigen su funcionamiento, pasamos a seleccionar los componentes para nuestro sumador.

Primeramente, si seleccionamos resistencias de  $1500 \Omega$ , hacemos que la resistencia de equilibrio  $R_5$  tenga un valor de  $500 \Omega$ , dentro de los valores normalizados. La potencia que despejaría  $R_5$  sería de  $0.5 \text{ mW}$ , muy por debajo del mínimo de  $1 \text{ W}$  de las resistencias comerciales.

$$R_5 = \left| \frac{R_6 \cdot R_p}{R_p - R_6} \right| = \left| \frac{1500 \cdot 375}{375 - 1500} \right| = 500$$

Simulamos el montaje en Eagle y comprobamos su correcto funcionamiento y capacidad de sumar las 4 señales de los AI:

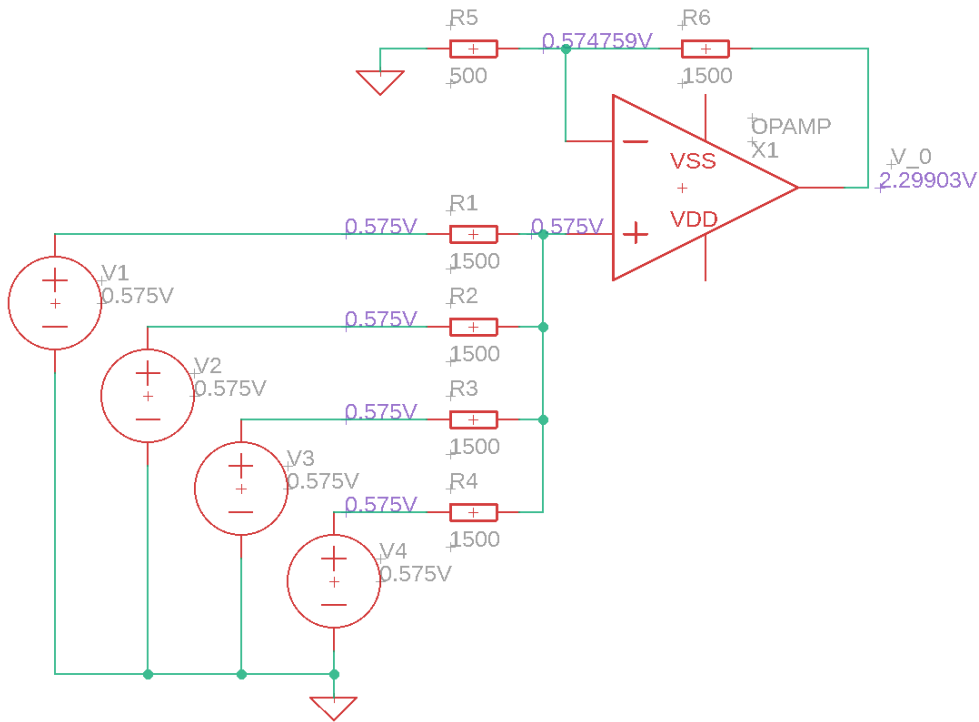


Ilustración 61: Simulación sumador no inversor

De nuevo, utilizaremos resistencias normalizadas de los valores descritos. Sería recomendable sustituir  $R_5$  por un potenciómetro de 1k $\Omega$  para poder compensar el error del resto de resistencias y ajustar la salida.

Como AO utilizado para este circuito, podríamos utilizar otro LM358N, pero no vale la pena hacer uso de un encapsulado con dos operacionales. En cambio, emplearemos el LM741, de Texas Instruments. El encapsulado DIP-8 contiene un solo AO, con rango de alimentación nominal de  $\pm 15$  V, de nuevo más de lo que necesitamos, pero compatible con el resto del circuito. La ventaja que tenemos con este modelo es la posibilidad de ajustar la tensión de offset para que sea nula, utilizando dos de los pines libres, con lo que podríamos reducir el error del circuito si fuese necesario.

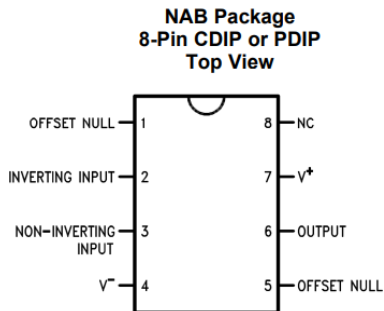


Ilustración 62: LM741, Texas Instruments



## 4.3. Alimentación

No es suficiente con proporcionar una fuente de alimentación al sistema de medida, sino que además esta debe de ser constante y predecible para asegurar el funcionamiento. Al mismo tiempo, por los requerimientos del sistema, necesitaremos que sea portable.

### 4.3.1. Batería

Como fuente de alimentación, utilizaremos una batería. Descartamos automáticamente la posibilidad de conectar la báscula a la corriente eléctrica de pared, utilizando un enchufe y un rectificador, porque coartaría uno de los objetivos principales, que es la portabilidad del equipo. Así pues, debemos de buscar una batería que se ajuste a nuestras necesidades y pueda alimentar tanto las cuatro células de carga, como el circuito de instrumentación y el microcontrolador. La batería debe cumplir con los objetivos:

- Proporcionar un mínimo de 5 V y un máximo de 10 V, para poder alimentar varios de los tipos de células de carga vistas.
- Asegurar el funcionamiento del resto del circuito en un uso continuado.
- Recargable, para aumentar la vida útil y rentabilidad del producto.
- Asequible, para no encarecer la báscula.
- Pequeña, para no aumentar el peso de la báscula y facilitar el diseño.
- Extraíble, para poder reemplazarla si fallase.

Lo primero sería estimar la corriente que consume el circuito para acotar la viabilidad de unas u otras baterías. Hay que tener en cuenta que:

- Las corrientes de entrada a un AO se consideran despreciables.
- La corriente de alimentación de las células se estima para el peor caso de las consideradas,  $3k \Omega$  de resistencia de entrada equivalente  $R_w$ . Alimentadas a 5 V y considerando las células en paralelo:

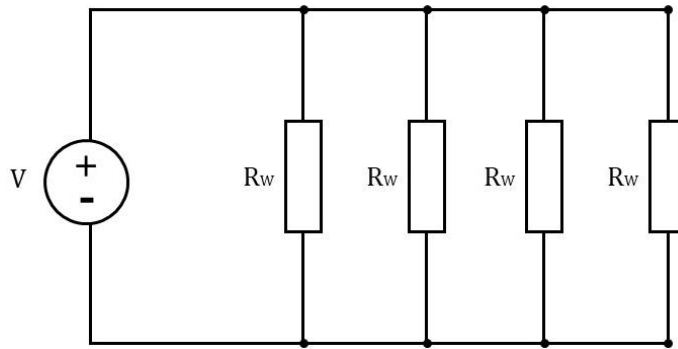


Ilustración 63: Resistencias Wheatstone en paralelo

$$R_P = R_w || R_w || R_w || R_w$$
$$I = \frac{V}{R_P} = \frac{5}{750} = 6'7 \text{ mA}$$

- El mayor consumo se produce en el microcontrolador, siendo para un ESP32 en estado activo (transmitiendo) 240 mA en el peor caso.
- El display LCD se estima, a partir de comparación con productos similares, que puede consumir del entorno a los 28 mA.

Tomamos entonces una corriente máxima consumida en un instante dado de entorno a los 275 mA. Damos un margen de seguridad del ~10% hasta los 300 mA. Ese será el valor de corriente consumida que utilizaremos para seleccionar la batería.

Buscamos una batería en el mercado que pueda cubrir nuestras necesidades. En este punto, es interesante buscar no solo en páginas de componentes electrónicos, sino también en otras de venta de productos de aeromodelismo, por ejemplo. Si las características son buenas, podemos utilizar dos o más de las baterías en serie o paralelo, así que incluiremos en la búsqueda alguna batería de tensión menor de la mínima requerida en principio.

Modelo	Fabricante	Tecnología	Tensión (V)	Capacidad (mAh)	Precio	Notas
Zippy Compact 3S	Zippy	LiPo	11,1	2200	11,64	Modelismo
Zippy Compact 2S	Zippy	LiPo	7,4	850	5,57	Modelismo
Turnigy 3S	Turnigy	LiPo	11,1	3000	15,67	Modelismo
XT60	ZOP Power	LiPo	7,4	1500	12,52	Modelismo
144-9405	RS PRO	LiPo	3,7	1800	14,6	2 en serie
144-9410	RS PRO	LiPo	7,4	2600	24,43	2 células
199-646	RS PRO	NiMH	9	200	10,7	De bloque
784-5992	RS PRO	LiMnO2	9	1200	11,8	
26650	ENIX Energies	LiFePo4	3,2	3300	18,97	2 en serie
CR2032	Panasonic	LiMnO2	3	220	2,61	De botón
HHR150AA	Panasonic	NiMH	1,2	1580	3,17	5 en serie
HHR-380A-1Z	Panasonic	NiMH	1,2	3800	10,02	5 en serie
PA-L28	Panasonic	LiPo	7,2	2250	22,48	2 células
MX1604	Duracell	Alcalina	9	475	7,25	No recargable
PSG91114	Multicomp Pro	Alcalina	9	475	3,05	No recargable
39170005	Ultralife	LiMg	9	1200	14,16	No recargable
2447-3030-20	ANSMANN	LiPo	7,4	3450	49,92	
2447-3031	ANSMANN	LiPo	7,4	2600	40,57	
55123505012	Varta	NiMH	6	1800	24,49	6 células
LS9V	Saft	Li-SOCl2	9	1200	16,06	
6F22	EBL	Li-Ion	9	600	7	

Tabla 2: Baterías

Este es uno de los casos de tabla comparativa en que más variedad se ha encontrado de productos que pudieran servir al propósito. Comentar que no se está teniendo en cuenta el precio extra del cargador de las distintas baterías para la comparativa de precios.

Dada la gran oferta del mercado, solo se han incluido aquí algunos ejemplos. Aun así, se hace necesario aplicar filtrado para eliminar candidatos:

- Descartamos todas las baterías que necesiten de otra del mismo tipo para cumplir con el requerimiento mínimo de 5 V.
- Descartamos todas aquellas que tengan un precio mayor de 25 €, que nos lastraría en exceso el coste del equipo.
- Descartamos las pocas que se han incluido que tengan una capacidad menor al requerimiento del circuito, establecido en el entorno de los 300 mA por seguridad.

Habida cuenta de esto, prácticamente cualquiera de las opciones que restan es buena. Una de las mejores quizá sea el modelo Zippy Compact 2S, que nos aporta las características buscadas a un precio asequible y con la ventaja de ser recargable.

Por otra parte, hay que considerar que la mayoría de las baterías están pensadas para un uso extenso, mientras que para nuestra aplicación solo se necesita que alimente el equipo durante el tiempo que se tarde en tomar la medida, que pudiera ser de 10 min máximo.

Recurrimos a Matlab junto con el paquete Simscape Electrical para tratar de hacernos una idea mejor de la capacidad de las baterías seleccionadas. Simscape Electrical es un paquete de herramientas para Simulink en el que simular y analizar el comportamiento de circuitos eléctricos y electrónicos. El elemento que nos interesa específicamente es el “Generic battery model”, que nos permite simular el comportamiento aproximado de una batería a partir de su composición química, su tensión nominal (V) y su capacidad máxima (Ah).

Construimos un modelo de simulación sencillo con la batería y una resistencia que absorberá la corriente máxima prevista de 300 mA. El bloque powergui permite la simulación eléctrica. Visualizamos tensión, corriente y estado de carga utilizando un bloque scope y un selector de bus.

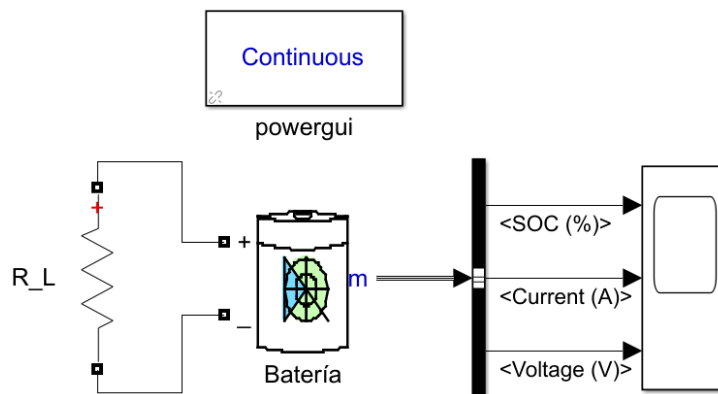


Ilustración 64: Montaje Simulink batería

Utilizamos este montaje para simular alguna de las opciones:

- **Zippy Compact 2S.** Duración: 9700s  $\approx$  162min  $\approx$  2'7h

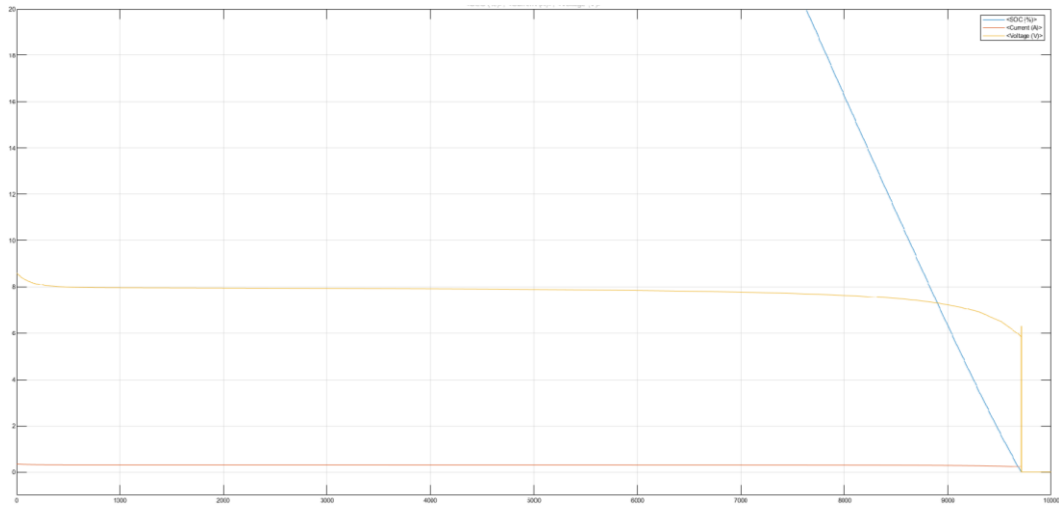


Ilustración 65: Simulación Zippy S2

- **Zippy Compact 3S.** Duración: 24900s  $\approx$  415min  $\approx$  6'92h

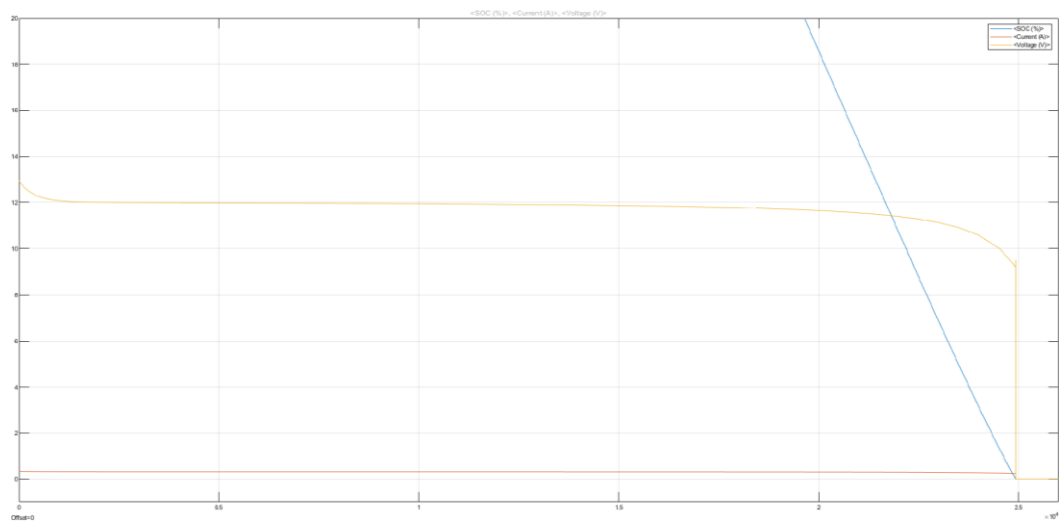


Ilustración 66: Simulación Zippy S3

- **Bloque 9V genérica (500mAh).** Duración: 5480s  $\approx$  91min  $\approx$  1'52h

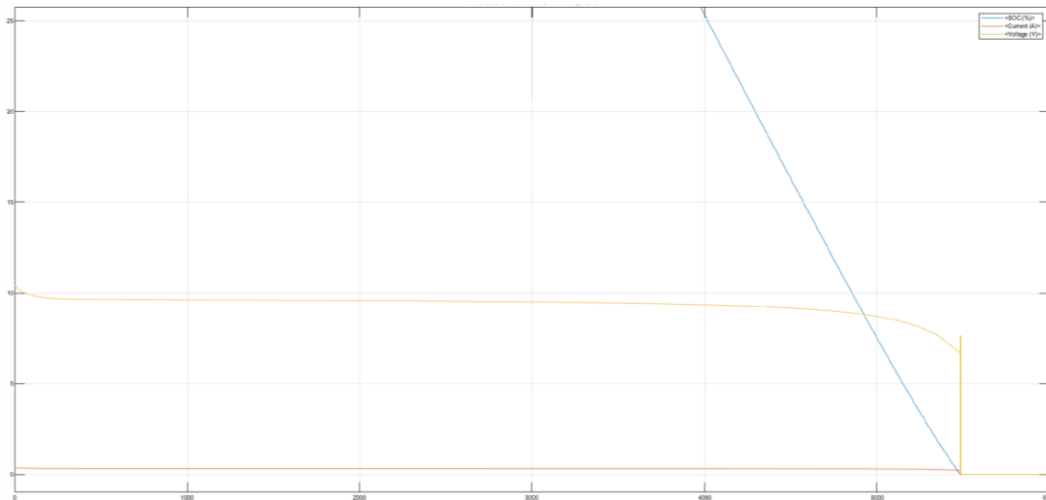


Ilustración 67: Simulación batería bloque 9 V

- **2 bloque 9V genéricas en paralelo.** Duración: 11400s  $\approx$  190min  $\approx$  3'17h

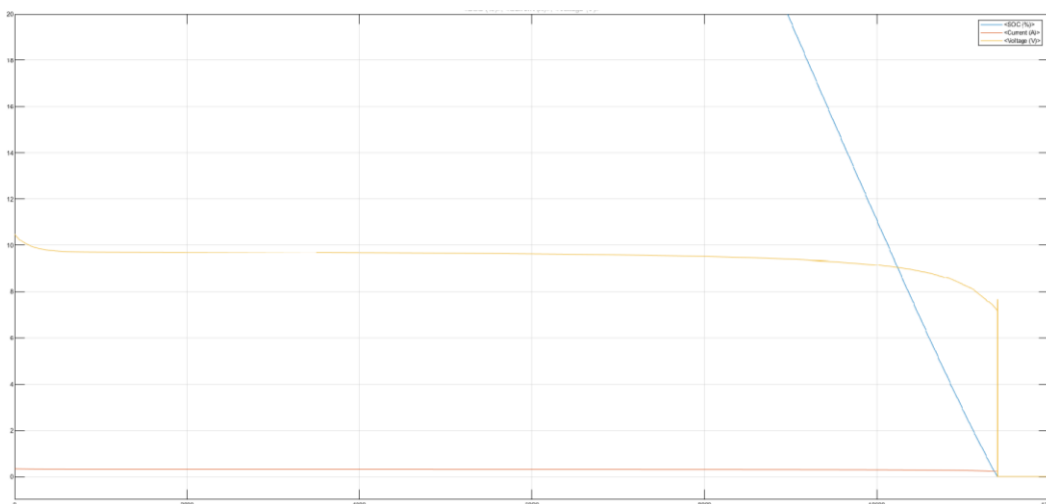


Ilustración 68: Simulación bloques 9 V en paralelo

Vistos los resultados, queda claro que, incluso manteniéndose la corriente máxima de 300 mA, la que más tiempo es capaz de mantenerse es la Zippy Compact 3S. Estaríamos en tiempos similares con las baterías de capacidad similarmente elevada. Sería suficiente con el modelo 2S, que puede perdurar casi 3 horas, que debiera ser suficiente, siendo igualmente una batería recargable, pero más barata y de menor volumen. El problema pudiera ser la accesibilidad a ellas, por estar comercializadas para modelismo.

Los bloques de pilas alcalinas tienen más dificultades para suministrar corrientes elevadas durante mucho tiempo. Puede solventarse utilizando dos de ellas en paralelo, con lo que volvemos al entorno de las 3 h. Esperaba mayor duración por parte de este tipo de baterías. Mientras no sean recargables, no es un tipo de batería que resulte rentable en términos energéticos. La única ventaja es una mayor accesibilidad a cualquiera de las de este tipo y una gran variedad de modelos, entre los que se cuentan algunos recargables.

Es por ello que se ha acabado concluyendo que la mejor opción de entre las baterías analizadas para alimentar el equipo sería la Zippy Compact 2S, que conjuga la capacidad recargable y un largo tiempo de servicio en las peores condiciones.

Sin embargo, en periodos de tiempo cortos y dispersos es una batería del tipo bloque de 9 V debiera de ser suficiente para el tiempo durante el que se estima que se va a utilizar el dispositivo. Aunque la capacidad sea menor que sus competidoras, la flexibilidad que se dejaría al usuario de escoger el modelo concreto puede compensarlo.



*Ilustración 69: Batería bloque y batería Zippy*

El circuito, gracias al regulador de tensión que estudiaremos a continuación, puede soportar la tensión de cualquiera de las dos. Utilizando un conector atornillable de batería se podría también conectar cualquiera de las dos. La preferencia es por la Zippy Compact 2S, pero pudiera utilizarse una de bloque de 9V en caso de preferencia o emergencia por estar la principal descargada.

### 4.3.2. Regulador de tensión

Necesitamos que la tensión de alimentación de la célula de carga sea siempre constante para asegurar el funcionamiento del circuito de instrumentación. A causa del comportamiento del puente de las células de carga, debemos conocer y establecer un rango fijo de voltios de entrada para conseguir el de milivoltios de salida. Es decir, para que la salida esté siempre en el rango especificado para entrada en el AI de entre 0 y 20 mV, para lo que la entrada debe estar fija a 0 y 5 V máximo.

La tensión de la batería es mayor de estos 5 V. Además, está sujeta a una curva de descarga, cierto error en la propia batería y una carga variable. La carga variable corresponde a la resistencia variable de las galgas del puente de Wheatstone, que hace variar el circuito. Todo ello provoca un error en el circuito de instrumentación que subsanamos estabilizando la tensión de alimentación.

Para lograr este objetivo tenemos dos alternativas diferentes.

#### 4.3.2.1. Diodo Zener

Es un diodo diseñado para funcionar en la zona de ruptura de los diodos estándar. Los diodos Zener están caracterizados por una tensión Zener  $V_Z$  propia, entre cátodo y ánodo. Se conectan aplicando una tensión positiva en el ánodo y negativa en el cátodo, en paralelo a una fuente de tensión  $V_{in}$ . Conectado de esta forma y siempre que  $V_{in} < V_Z$ , actúan como reguladores de tensión, manteniendo una tensión de salida fija  $V_Z$  independiente de la carga.

Esta característica, la capacidad de mantener una tensión constante independientemente de la carga, los hace populares en reguladores de tensión sencillos. Habrá una corriente  $I_Z$  que circule a través del cátodo, pero  $V_Z$  se mantendrá prácticamente constante en toza la llamada “zona Zener”.



La representación de un circuito regulador típico construido con Zener, utilizando una resistencia  $R_s$  para regular la corriente, es:

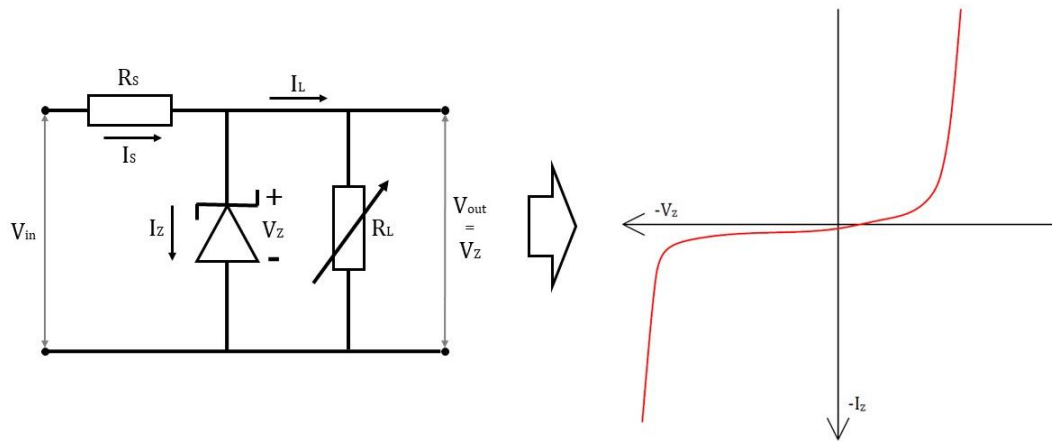


Ilustración 70: Diodo Zener

Un diodo Zener sería una buena opción para un circuito como el nuestro. Permite mantener una tensión estable con la inclusión de un solo elemento en el circuito. Además, la corriente que consume el circuito es muy baja, por lo que el Zener debiera de mantenerse siempre en su zona y no sería necesario limitar la corriente con una resistencia extra. Es la opción más barata y sencilla para regular la tensión del circuito.

Necesitaríamos un diodo con tensión Zener de 5 V para cumplir con las especificaciones del resto del circuito. El único inconveniente es que la tensión nominal típica más próxima en los diodos Zener comerciales es de 5'1 V, con un margen de error dado en porcentaje o en mínima-típica-máxima.

Buscando Zener comerciales, encontramos que son muy similares entre sí, con pequeñas diferencias en el error de tensión:

Modelo	Fabricante	V			IR de fuga ( $\mu$ A)	Precio
		Min.	Nom.	Max.		
BZX55C5V1	Vishay	4,8	5,1	5,4	0,1	0,16
TZX5V1B	Vishay	4,9	-	5,1	5	0,15
1N5231	Vishay	5	5,1	5,2	5	0,14
1N4733A	Vishay	4,86	5,1	5,36	10	0,14
BZD23C5V1	Philips	4,8	5,1	5,4	5	0,16

Tabla 3: Diodos Zener

### 4.3.2.2. Regulador de tensión

La segunda opción es utilizar un regulador de tensión integrado. Se trata de un circuito que mantiene una tensión de salida fija, independientemente de la carga. En algunos casos, el valor de esta tensión de salida es seleccionable. Internamente se componen de resistencias y semiconductores, como diodos y transistores. Suelen ser empaquetados de tres pines. Necesitan bien de dos condensadores de desacoplo si la salida de tensión es fija o de un circuito selector si la tensión de salida puede variarse.

Constituyen también una opción sencilla y aseguran la tensión de salida deseada. Aunque con un error también como el Zener, en este caso el valor típico sí puede ser directamente 5 V. Tienden a ser más estables que un Zener y están compensados contra temperatura. El problema es que tienden a disipar mucha energía en forma de calor y que ocupan más espacio en PCB que el diodo Zener. Permiten por lo general el paso de mayores corrientes que el Zener, pero no es un factor a tener en cuenta en este circuito. Son también más caros que los diodos, pero no es un aumento de precio realmente considerable.

Buscando opciones en el mercado, encontramos una buena oferta de reguladores que nos permitan fijar la tensión a 5 V:

Modelo	Fabricante	V entrada	V salida			I salida (A)	Precio
			Min.	Nom.	Max.		
L7805CV	STMicroelectronics	35	4,9	5	5,1	1,5	0,44
LM317T	STMicroelectronics	40	Diferencial VI-V0 = (30, 40) V			1,5	0,51
UA7805C	Texas Instruments	7 - 25	4,8	5	5,2	1	0,53
LM117	Texas Instruments	40	Regulable			1,5	13,56
LM340A	Texas Instruments	35	4,9	5	5,1	1,5	1,38

Tabla 4: Reguladores de tensión

Terminamos seleccionando para nuestra aplicación el modelo L7805CV de STMicroelectronics. Lo elegimos sobre cualquiera de los Zener porque nos asegura una mejor estabilidad en la tensión de salida. Además, está fija específicamente a 5V. De entre los reguladores integrados, es también el modelo preferible porque nos ofrece una regulación más sencilla que los seleccionables (LM317T, LM117) a un precio bajo (frente a LM340A) y puede mantener la salida de 5 V, aunque la tensión de la pila baje de la nominal (frente a UA7805C). A la hora de incluirlo en la PCB, lo haremos con el de empaquetado de agujero pasante TO220, propio de estos reguladores.

Para el correcto funcionamiento del regulador es necesario incluir dos condensadores de desacoplo, uno de  $0.33\ \mu\text{F}$  en la entrada y otro de  $0.1\ \mu\text{F}$  a la salida, según se especifica en la hoja de datos.

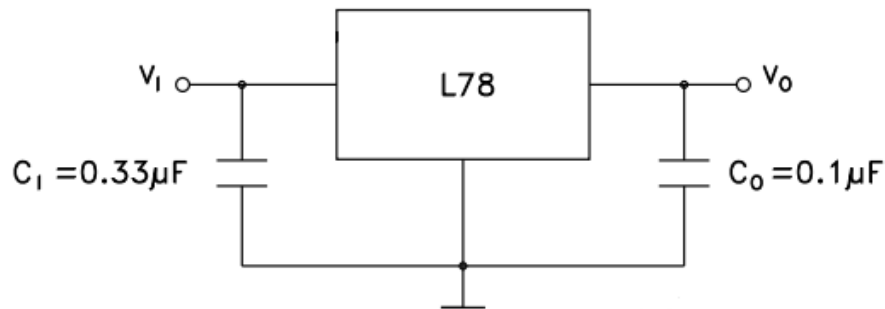


Ilustración 71: L7805CV, STMicroelectronics

## 4.4. Procesador

Es último componente que queda por seleccionar de la estructura presentada de los sistemas de medida y quien finalmente convertirá la señal de medida eléctrica en algo interpretable para un usuario humano. En las básculas industriales, es un componente incrustado del que por lo general se desconoce el funcionamiento concreto. Recurriremos entonces nosotros a microcontroladores programables del mercado que con el software correcto puedan desempeñar la tarea encomendada.

### 4.4.1. Microcontrolador Arduino

Arduino es una plataforma de código y hardware abierto para el desarrollo y programación de aplicaciones en microcontroladores. Su uso está muy extendido en ámbitos educativos y de aficionados a la electrónica por la gran cantidad de programas, librerías y tutoriales que se pueden encontrar online de manera gratuita.

La programación se realiza a través de la IDE propia de Arduino, con un lenguaje de programación basado en C, que hace que sea sencillo de adaptarse a él si se tiene conocimiento de programación previo. La última versión del IDE a fecha de este trabajo, y con la que trabajaremos es la 1.8.13, aunque también está disponible la beta de la versión 2.0.

Las placas Arduino son microcontroladores, que, según las instrucciones del programa interno, leen unas entradas y generan las salidas correspondientes, a través de los pines disponibles. El microcontrolador realmente es un chip embebido en la placa de desarrollo. Son, dependiendo de la placa concreta, un modelo diferente de la serie ATmega. El resto de componentes forman parte de la placa de desarrollo y facilitan la interacción entre el usuario y el microcontrolador, por ejemplo, el adaptador USB para conectar PC y placa y grabar el código escrito en la IDE.

#### 4.4.1.1. Arduino Nano

Hay actualmente una cantidad bastante elevada de distintos modelos de placas de Arduino. La mejor para esta aplicación sería el Arduino Nano, principalmente por su pequeño tamaño. No nos son necesarios un gran número de pines ni una velocidad de procesamiento especialmente elevada, factores que podrían hacernos optar por un modelo mayor, como el Mega, de modo que optamos por el mínimo tamaño posible.

La alimentación de la placa debe hacerse a 5 V, que se relacionaría bien con las especificaciones de las células de carga. La corriente máxima a través de los pines es de 40 mA sin comprometer la integridad de la placa. La velocidad del reloj de la placa, la frecuencia en que completa un ciclo de proceso, son 16 MHz. Tiene la placa 8 pines de entrada analógica, que leen en un rango de 0 - 1024 bits y 12 pines de entrada/salida digital, de los que 6 pueden generar salida PWM.

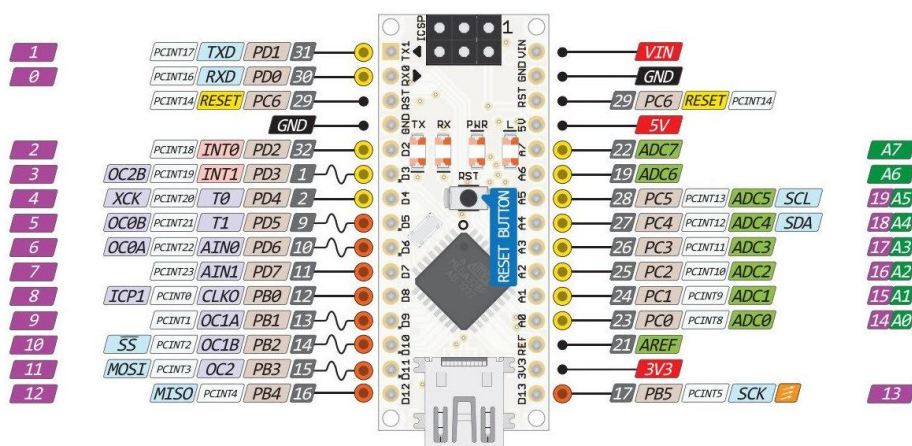


Ilustración 72: Arduino Nano

La manera más sencilla de conectar a distancia un dispositivo Arduino es utilizar un módulo bluetooth. El más práctico es el HC-06, que solo necesita de 4 pines. La comunicación entre Arduino y módulo es sencilla, tipo serie manejada internamente por las bibliotecas. Sin embargo, el problema es que

bluetooth solamente permite simultáneamente comunicaciones 1 a 1. Es decir, puede haber un dispositivo maestro que esté conectado a múltiples dispositivos esclavos, pero solamente uno de ellos se comunicará con el maestro en un momento dado, mientras el resto permanecen a la espera en estado latente. Esto supone un problema si se utilizan varias plataformas al mismo tiempo, ya que el usuario tendría que ir manualmente cambiando entre unas y otras hasta tener el peso total.



*Ilustración 73: Módulo bluetooth HC-06*

#### 4.4.1.2. Arduino Yún Rev 2

Es la alternativa propia de Arduino equipada con WiFi para proyectos relacionados con IOT. Utiliza un microprocesador Atheros AR9331 complementario con Linux para encargarse de las comunicaciones WiFi. Las características eléctricas son idénticas a las del Arduino Nano. La interacción entre Arduino y Linux se maneja por medio de una librería específica de esta placa, la YunBridgeLibrarie.

Sería la placa a utilizar si deseásemos utilizar una desarrollada por Arduino en el diseño. Sin embargo, existe una alternativa que es superior en aspectos de sencillez de manejo, características eléctricas y precio, que veremos a continuación.

#### 4.4.2. Microcontrolador ESP32

La mejor alternativa al conjunto Arduino-módulo bluetooth para una conexión a distancia sin cables es el microcontrolador ESP32, de Expressif. Es un chip diseñado para proyectos de IOT (Internet Of Things/El internet de las cosas) que integra WiFi (familia de protocolos IEEE 802.11) y Bluetooth (V4.2 BR/EDR y BLE). En la placa del “kit de desarrollo” se incluyen unos 20 componentes externos al propio chip ESP32 y que le proporcionan servicios extra. Los más importantes de ellos son la antena para Bluetooth y WiFi, un regulador de tensión y sobre todo las memorias flash y SRAM. En favor de

potenciar sus características como dispositivo para aplicaciones portátiles tiene un diseño de tamaño reducido y de muy bajo consumo.

Gracias al WiFi integrado, podemos comunicar varias de las plataformas básculas entre sí y con un dispositivo receptor, como un móvil, conjuntamente en una red para que puedan compartir datos en tiempo real. Y esto sin necesitar de módulos externos, pues todo lo necesario está integrado ya en la propia placa.

La primera versión, el ESP8266 se programaba con un lenguaje propio, que limitaba la accesibilidad al producto. Actualmente, puede programarse con lenguaje Arduino desde el IDE del mismo, o incluso con Python. El procesador es un Xtensa LX6 con arquitectura de 32 bits, de mayor capacidad frente al ATmega328 del Arduino Nano, que es de 8 bits.

Las placas de desarrollo pueden tener 30 o 36 pines accesibles. Nosotros trabajaremos con una versión V1 de 30 pines, suficiente para el uso que pretendemos y además el modelo que se ha encontrado para importar a Eagle. La mayoría de los pines tienen varias funciones. De entre las más destacables:

- 3V3: Alimentación a tensión de 3'3 V, la tensión nominal de funcionamiento del ESP32.
- VIN: Permite una alimentación de 5 - 12 V (6 - 7 V más eficiente) que, a través del regulador interno, da como salida los 3'3 V nominales.
- 2 pines GND de referencia a tierra.
- 9 pines táctiles capacitivos, utilizables como entrada.
- 18 pines de entrada analógica. Conectados a un conversor analógico-digital (ADC) tipo SAR de 12 bit de resolución, algo superior a la del Arduino Nano, de 10 bits de resolución.
- Dos pines de salida digital-analógica.
- En comunicaciones, no interesan dos pines para comunicación I2C, que permiten conectar con una pantalla LCD de forma sencilla.
- 16 pines capaces de producir una salida PWM.

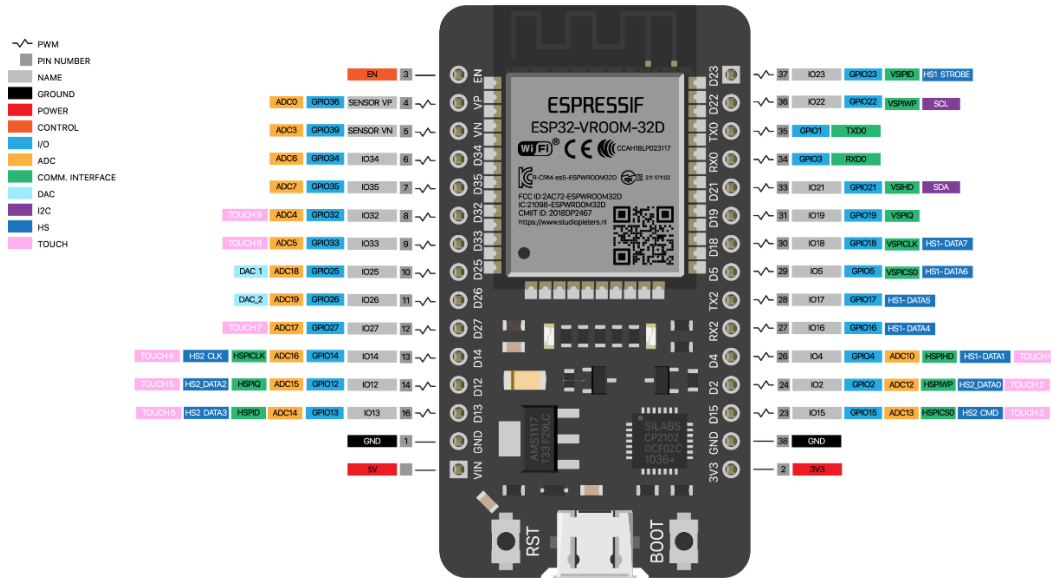


Ilustración 74: ESP32

Se prevé la utilización de uno de los pines de entrada para un botón de tarado y otro para la entrada de señal sumada de las células de carga. Los dos pines I2C se utilizarán para controlar una pantalla LCD con la que dar información al usuario. Podría conectarse directamente a la señal de tensión de la batería (9 V), pero es preferible hacerlo a la regulada a 5 V por la eficiencia del regulador interno de la placa. Elegimos este micro sobre el conjunto de Arduino y módulo bluetooth.

#### 4.4.2.1. El problema con el ADC del ESP32

En la primera versión de este chip, el ESP8266, solamente había un pin de entrada analógica de rango (0, 1) V. En este nuevo ESP32, el rango teórico de entrada es el de operación de la placa, es decir, (0, 3'3) V. En bits, el rango teórico es de 0 a 4096.

Este no es el rango real del convertor. El convertor tiene un error de 0 importante, no comienza a medir hasta los 150 mV. Tiene también cierta no linealidad, que se hace más patente a partir de los 2450 mV de entrada, dando medidas poco fiables. Esto viene especificado en las páginas 32 y 33 de la hoja de datos. Es la queja más extendida por la comunidad sobre el Esp32. Además, las medidas dentro del intervalo (150, 2450) mV tienen cierto error de  $\pm 60$  mV. Visualmente representado:

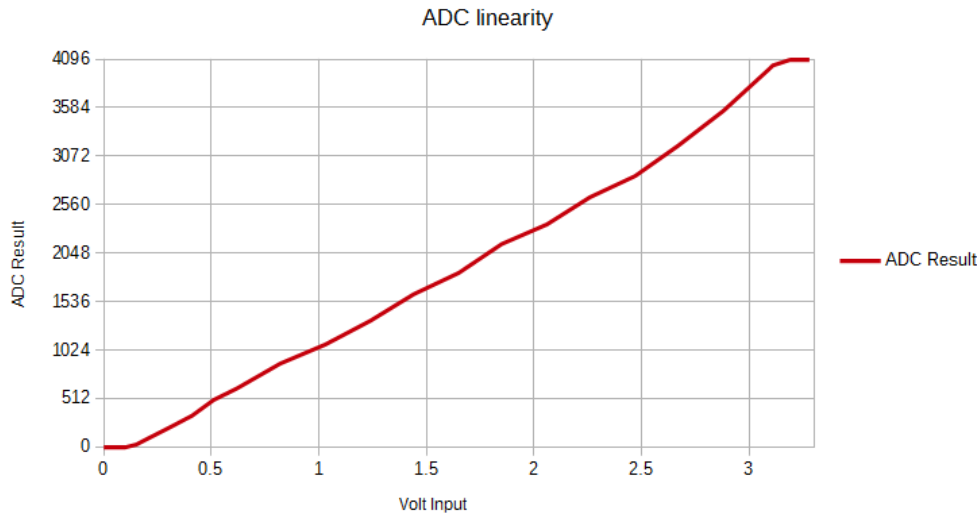


Ilustración 75: Respuesta ADC ESP32

La forma de paliar el problema del error de los  $\pm 60$  mV dentro del rango es hacer la media entre varias medidas tomadas por software.

Para solventar el problema con la escala, tenemos dos puntos que cubrir:

- Eliminar el error de 0. La manera de conseguir esto es hacer que los 150 mV sean el 0 de la escala, virtualmente. Para ello, cuando la señal de salida del sumador (suma de señales de las células de carga) sea 0, en el pin de entrada se tiene que leer 150 mV. Esto es, hay que sumar 150 mV a la señal de entrada del ESP32.

La forma más sencilla es aprovechar el pin de 3.3 V de salida para aportar esa tensión extra. Si la corriente de salida del pin 3V3, según el datasheet, son aproximadamente 50 mA:

$$R_0 = \frac{3'3 - 0'15}{0'05} = 63\Omega$$

Utilizaremos para ello un potenciómetro de  $120 \Omega$  que nos permita compensar errores. Debido al comportamiento del error, estos 150 mV corresponden directamente con el 0 en bits.

- Eliminar la zona no lineal. La manera más simple de hacerlo es, sencillamente, truncando la escala a los 2450mV, equivalentes a 3040 bits, calculados simplemente con una regla de tres. Este será el máximo de nuestra escala, que deberemos tener en cuenta en el software.

$$\frac{3300}{4096} = \frac{2450}{x} \rightarrow x = \frac{2450 \cdot 4096}{3300} = 3040'96$$



Habríamos entonces modificado la respuesta del conversor ADC tal que:

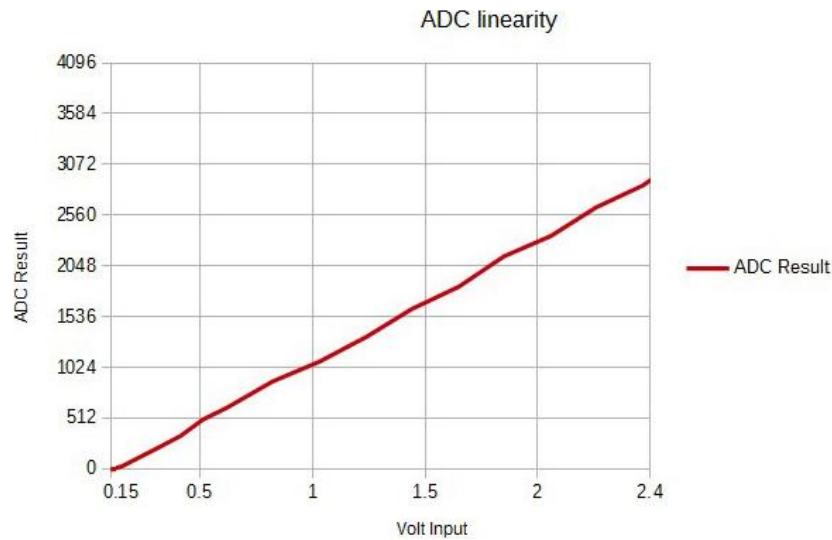


Ilustración 76: Modificación de respuesta ADC ESP32

Esto nos deja con un rango de tensión de entrada al ESP32 de (150, 2450) mV. Esta tensión proviene del circuito sumador, que suma los valores provenientes de cada uno de los cuatro AI, correspondientes a las respectivas células de carga. Tenemos que ajustar el rango de esa tensión de salida al disponible de entrada. Con un cálculo sencillo, encontramos que el máximo es de 575 mV.

$$(2450 - 150) / 4 = 575$$

Tenemos pues que ajustar el diseño de los AI para que su rango de salida sea de (0, 575) mV. El apartado correspondiente al cálculo de las resistencias de los AI está hecho con este número en mente. Apuntar que se debió de recalculer tras conocer el problema con el ADC del ESP32, ya que primeramente se había calculado para el rango normal de 3'3 V.

### 4.4.3. Apunte sobre los métodos de transmisión

En este apartado daremos una visión resumida sobre posibles métodos de transmisión, siendo los más habituales en equipos industriales los de la familia RS, para justificar la elección del procesador.

#### 4.4.3.1. RS-232

Define las características eléctricas, la sincronización y significado de las señales y el tamaño y pinout del conector. Su uso está muy extendido en las comunicaciones industriales. En este protocolo, el 1 corresponde al intervalo (-3, -15) V, y el 0 a (+3, +15) V.

El conector básico DB-25M es de 25 pines, con la referencia a tierra en el número 7. Existe una variante, el DE-9M, que tiene 9 pines, con la tierra en el 5. Este segundo conector, de menor tamaño, es el más utilizado.

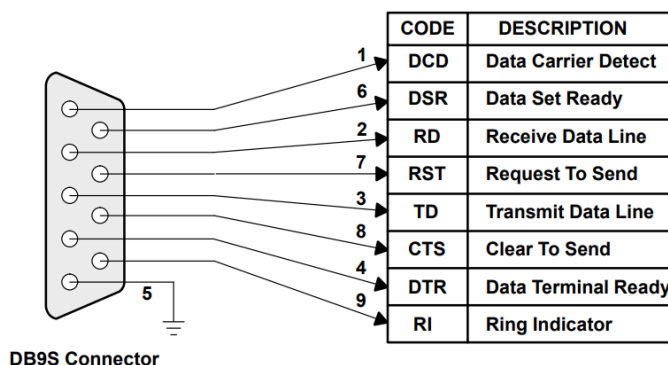


Ilustración 77: Pinout RS-232

Originalmente, la longitud de cable se definió como 15 m en la primera versión del protocolo con una velocidad máxima de transmisión de 20 kbps. Soporta una comunicación dúplex (bidireccional) o semidúplex (alternada). El medio de transmisión es cable de par trenzado, una solución sencilla para anular interferencias.

#### 4.4.3.2. RS-422

Surge con intención de sustituir al RS-232. La gran ventaja es que puede Transmite en modo diferencia, con tensiones de  $\pm 7$  V. Los valores negativos representan el 1 lógico, y los positivos el 0. Además, puede llegar a interconectar hasta 10 dispositivos.

La velocidad de transmisión es inversamente proporcional a la longitud del cable, con el máximo a los 10 Mbps, para longitud de cable de 4000 ft. Incluye además dos sistemas de seguridad: parallel termination (finaliza transmisiones en paralelo) y failsafe (asegura que siempre haya un estado lógico en cable).

#### 4.4.3.3. RS-485

Es la iteración final sobre la base del RS-232. La transmisión se realiza en modo diferencial de  $\pm 200$  mV (negativos = 1, positivos = 0). La velocidad de transmisión que llega a los 50 Mbps para una longitud de cable que alcanza los 1200 m. Además, admite hasta los 32 dispositivos conectados. Mantiene el parallel termination y el failsafe.

#### 4.4.3.4. Bluetooth

Bluetooth es un protocolo para conexiones inalámbricas cuya primera versión se lanzó en 1999. La unidad básica de una red bluetooth se conoce como “piconet”, formado por un nodo maestro y siete esclavos activos. Varios de los dispositivos maestros pueden unirse por puentes dando lugar a una unión de piconets o scatternet. Puede haber hasta 255 nodos esclavos, de los que 7 son los activos y el resto se encuentran en un estado de baja energía.

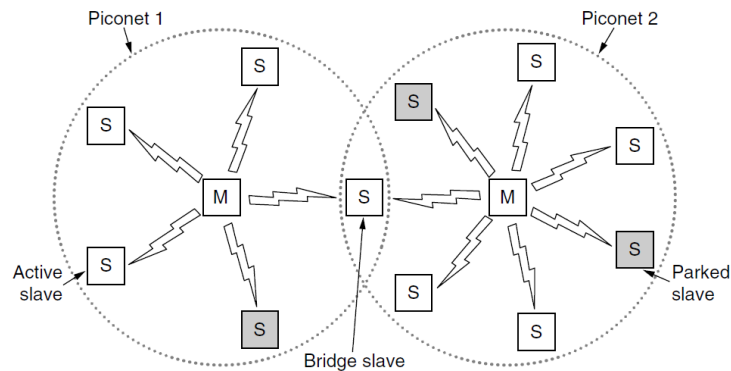


Ilustración 78: Estructura Bluetooth

El intercambio entre maestro y esclavos se lleva a cabo bajo TDM (TimeDivision Multiplexing), un método de transmisión basado en fragmentar el tiempo de acceso al medio. La comunicación es exclusivamente maestro-esclavo o viceversa, nunca esclavo-esclavo, lo que puede aumentar el tiempo de comunicación. El acceso y tiempo está regulado por el maestro, que decide que nodo puede transmitir en cada división de tiempo.

La pila del protocolo de comunicación contiene servicios distintos según los perfiles. Son los distintos tipos de aplicación que se contemplan para una conexión Bluetooth, como por ejemplo la transmisión de audio. El problema es que solamente pueden comunicarse dos dispositivos al mismo tiempo, que no es suficiente para la nuestra aplicación.

#### 4.4.3.5. WiFi

Es el nombre dado generalmente a las WLAN (Wireless Local Area Networks) que trabajan bajo la familia de estándares IEEE 802.11. Los dispositivos conectados a este tipo de redes cuentan con dos modos de funcionamiento: AP (Access Point), sirviendo como puente entre redes y como red Ad Hoc, que interconecta varios dispositivos.

Es bastante similar en estructura al sistema de referencia OSI, excepto que la capa de enlace de datos se subdivide en dos subcapas: la MAC (Medium Access Control), que decide quien puede transmitir, y la LLC (Logical Link Control), que uniformiza las diferencias entre los distintos grupos de 802.11.

Transmite en bandas ISM (Industrial Scientific Medical), reservadas para transmitir sin licencia, de 1'4 o 5 GHz, según subtipo. Cada subfamilia utiliza un método de control del medio de transmisión ligeramente diferente, pero el principal es el CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). A grandes rasgos, el transmisor escucha si el medio está libre antes de transmitir. Si no lo está, espera un tiempo intentar volver a transmitir, y si está libre, espera un tiempo aleatorio antes de transmitir.

Cuando se transmiten datos, si ocupan más de la capacidad de la trama, se fragmentan en varias. La estructura general de estas tramas es:

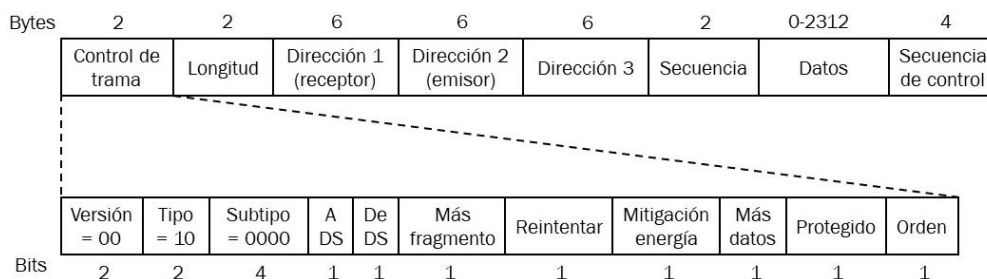


Ilustración 79: Trama WiFi

La gran ventaja que aporta el WiFi es que varios dispositivos pueden comunicarse en una red de manera virtualmente simultánea, sin tener que rotar entre esclavos como bluetooth. Esto nos permite utilizar un móvil como servidor WiFi para tener a todos los ESP32 de cada plataforma en uso en la misma red y que le transmitan los datos del peso. Es el motivo por el que se optó por este tipo de conexión y procesador en concreto.

## 4.5. Programación del ESP32

Diseñados todos los componentes y simulado su comportamiento, podemos pasar a plantear las bases del funcionamiento software del microcontrolador ESP32 seleccionado y del receptor que recoja los datos de todas las plataformas, que se planea sea una aplicación para móvil en el entorno Android. La programación es lo que acabará de darle el funcionamiento previsto al procesador y visor. La comunicación se hará por protocolo WiFi, como ya se ha establecido.

El funcionamiento de una plataforma individual sería:

- El ESP32 recibe la señal de tensión por uno de los pines GPIO (General Purpose Input Output).
- La convierte por medio del conversor ADC en una señal en bits digitales que pueda interpretar.
- Convierte la señal en bits a la escala de kilogramos equivalente dependiente de las células que se estén utilizando.
- Muestra en un display LCD el peso. Envía el peso a la red WiFi.
- En cualquier momento, el usuario puede solicitar un tarado del peso, que se ha de tener en cuenta para el cálculo.

Podemos expresar el ciclo de funcionamiento con un diagrama de flujo:

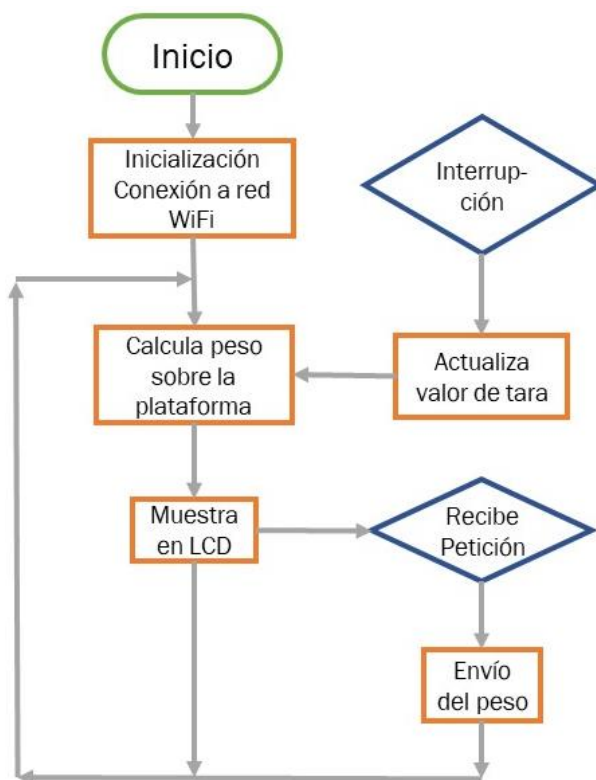


Ilustración 80: Diagrama de flujo del software

Este es el flujo general de todas las plataformas. Cada microcontrolador ESP32 ejecutaría cíclicamente esta secuencia. Sin embargo, los roles que cumplen cada en la red WiFi, así como a quién envían el dato del peso son diferentes según dos grupos: clientes y servidor.

El ESP32 tiene la capacidad de crear una red WiFi, actuando como punto de acceso (AP o Access Point) de forma similar a lo que hace un router. Sin embargo, al contrario que este último, no está conectado a una red mayor, por lo que se le conoce como Soft-AP. Puede haber un máximo de cinco dispositivos en esta red, siendo el ESP32 que crea la red el servidor AP y siendo los otros cuatro dispositivos clientes que interactúan con y a través de él.

Siendo uno de los procesadores ESP32 quien crea la red WiFi, nos aseguramos de en todo momento se puede ofrecer la información del peso al usuario, independientemente de la presencia de cobertura WiFi, de que la información se transmite sin depender de una aplicación instalada en el móvil u otro dispositivo, y de que podemos mostrar el peso total en una de las plataformas en todo caso, aunque no se cuente con dicho dispositivo móvil.

La estructura de la red puede verse representada en la figura inferior. Uno de los ESP32 de una de las plataformas, el que llamamos ESP\_01, actúa como servidor AP creando la red WiFi. Los otros se conectan a esa red como clientes. Ante la solicitud del ESP\_01, los clientes le enviarían los datos del peso leído. Además, mostrarían el peso individual en el display LCD de la plataforma correspondiente. Con los tres pesos de las otras plataformas y el medido en la propia, el ESP\_01 calcula el peso total. Mostraría el ESP\_01 tanto el peso total como el de su plataforma en el LCD. Si recibiera una solicitud de otro aparato conectado a la red, sea el móvil u otro dispositivo con conexión WiFi, le enviaría la suma total de pesos de las cuatro plataformas.

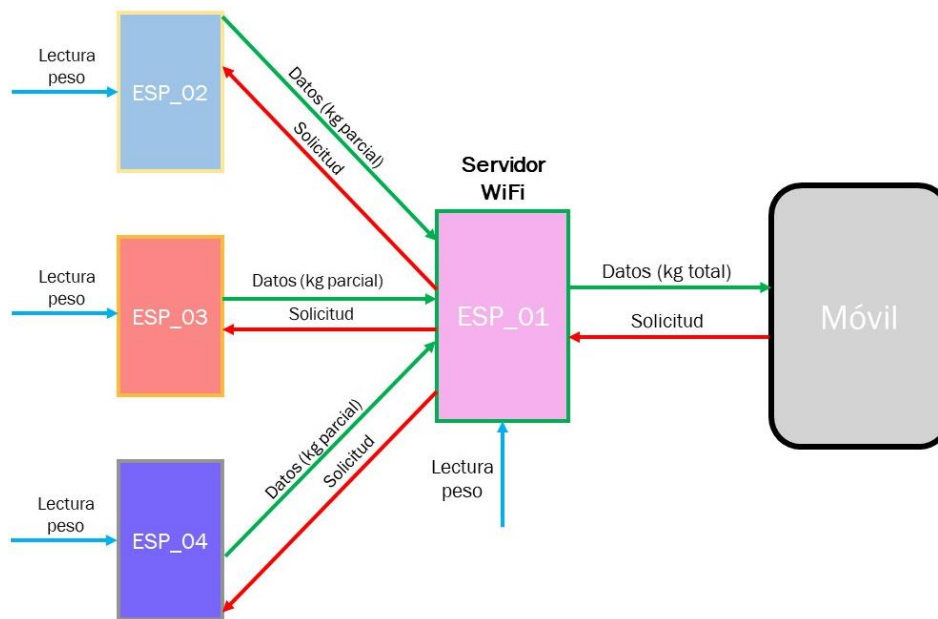


Ilustración 81: Estructura red de plataformas

Al crear la red, el ESP32 asigna al punto de acceso un SSID (Service Set Identifier), o nombre identificador de la red, y una contraseña. Con estas credenciales, cualquier dispositivo con capacidad WiFi puede conectarse a la red. La forma de compartir información entre los dispositivos de la red es a través de peticiones HTTP (Hypertext Transfer Protocol). Estas peticiones se escriben como URL (Uniform Resource Identifier) de páginas web y son encaminadas al dispositivo con la IP determinada en la URL. Puedn ser solamente palabras en la URL o páginas web en formato HTML. Las IP de la red, de clase C, son asignadas automáticamente por el servidor AP.



Ilustración 82: Estructura URL de la red

### 4.5.1. Introducción y montaje

El montaje se ha realizado sobre una placa protoboard para pruebas y prototipado electrónico utilizando cables de conexión. Los únicos elementos que se deben de conectar al ESP32 son un botón para el tarado y los cuatro pines del shield I2C de la pantalla LCD, a la que va soldado.

El botón irá asociado a una interrupción. Al contrario que en Arduino, en donde solamente alguno de los pines de las distintas placas son capaces de soportar interrupciones, cualquiera de los pines GPIO del ESP32 puede hacerlo. Conectamos además una resistencia de pulldown para evitar los conocidos como rebotes en la respuesta. Cuenta el ESP32 con resistencias de pullup internas, que debieran cumplir la misma función, pero conviene hacer pruebas para asegurarse.

El shield I2C sí está limitado a conectarse en unos pines específicos, los que soportan ese protocolo. Estos son el GPIO 21 para el pin SDA y el GPIO 22 para el SCL. Además, de ser posible resulta conveniente alimentar el display LCD a 5 V en lugar de a los 3'3 V de funcionamiento del ESP32. El motivo de hacerlo es que el brillo del LCD se ajusta con un potenciómetro incorporado en el shield, y con 3'3 V apenas se tiene brillo suficiente para ver correctamente aquello que se imprima en el LCD.

La alimentación, para las pruebas de programa, la haremos a través del puerto micro USB utilizado para programarlo desde el ordenador.

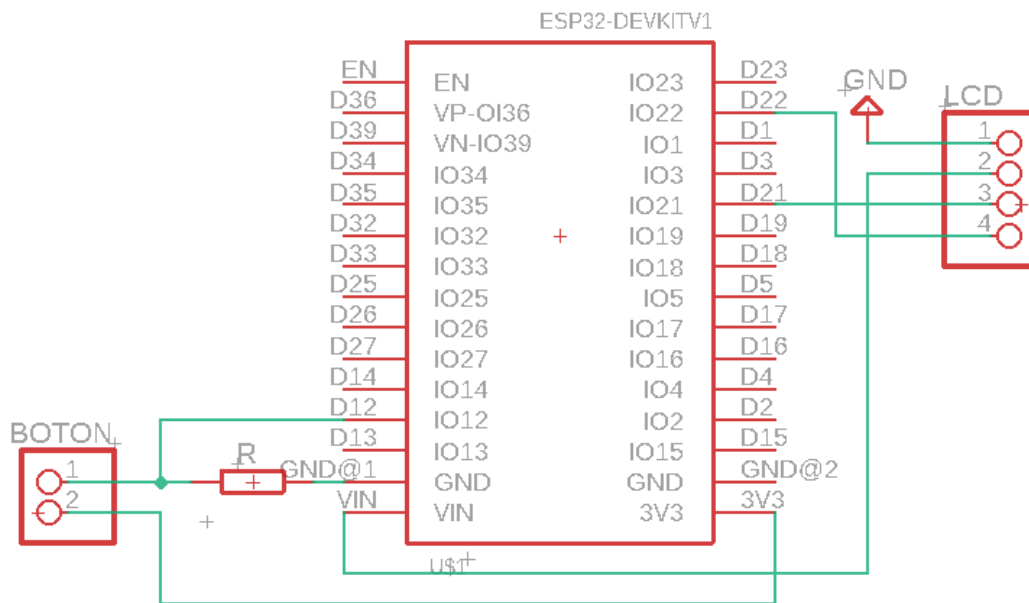


Ilustración 83: Esquema de conexión ESP32



## 4.5.2. Software en ESP32

La programación del ESP32 se realiza, como comentábamos, en el IDE de Arduino. Para poder aplicar el lenguaje Arduino a la placa ESP32, primero es necesario instalar los drivers. Se pueden conseguir a través de la página de Espressif, incluyéndola como gestor de tarjetas adicional, e instalar a través del administrador de tarjetas dentro del desplegable de Herramientas.

También necesitaremos instalar una biblioteca externa, la "LiquidCrystal\_I2C.h", que simplifica enormemente el control del display LCD a través de protocolo I2C siempre y cuando se cuente con el módulo I2C para LCD. El compilador advierte que esta biblioteca no está pensada para la arquitectura ESP32, pero funciona sin inconveniente.

El código presentado se corresponde con el del ESP\_01, el que actúa como servidor AP. Sigue el esquema presentado en el diagrama de flujo, correspondiendo la ejecución cíclica a la función "loop" del programa. Supone una simulación del funcionamiento de la plataforma de pesado en el que las lecturas de la señal de tensión proveniente del circuito de acondicionamiento se han sustituido por la generación de un número aleatorio. Se indicará en el programa las líneas que debieran ser sustituidas. A excepción de estas lecturas, el programa desarrollado, a vistas de los resultados, podría implementarse tal cual se presenta en la báscula final.

El programa aquí presentado crea el servidor AP, obtiene la lectura simulada local y la muestra por el LCD. Además, crea una página web desde la que solicitar la suma del peso de todas las plataformas. Esta parte del código puede sustituirse para funcionar con una App en Android en lugar de con una página Web. Para entender el código, la opción preferible es a través de comentarios en el propio código:

```
//Definición de los pines para facilitar código y cambio
#define entrAcond 34 //Usado como semilla de números aleatorios
#define botonTara 12 //Es válido para interrupción cualquier GPIO

//Cargamos las dos librerías necesarias
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <WiFi.h>

//Declaramos el objeto lcd
//lcd(Dirección I2C, número de columnas, número de filas)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

//Credenciales (Nombre y contraseña) de la red WiFi creada
const char* ssid = "ESP32-AP";
const char* password = "123456789"; //8 cifras mínimo

//Puerto utilizado por el server para la comunicación
//El puerto 80 es el predeterminado para HTML
WiFiServer server(80);
```

```
//Declaración de variables globales
String header;           //Almacena la petición HTML
float pesoTotal = 0;     //Peso total de las 4 plataformas
float pesoLocal = 0;     //Peso local de la plataforma
int pesoL_bits = 0;      //Auxiliar para el peso local
int pesoTara = 0;        //Almacena el peso de la tara
int pesoMax = 90;        //Capacidad máxima de una células
bool tara = false;       //Auxiliar para indicar tarado

//Variables para el manejo de intervalos de tiempo
unsigned long t_inicial;
unsigned long t_parcial;
unsigned long t_incremento;

//En el setup iniciamos el servidor y declaramos los pines
void setup() {
  //Iniciamos el monitor serie para poder hacer comprobaciones
  Serial.begin(115200);
  //Iniciamos el LCD
  lcd.init();
  //Encendemos la luz del LCD
  lcd.backlight();

  //Especificamos el modo de los pines
  pinMode(entrAcond, INPUT);           //Pin de entrada
  pinMode(botonTara, INPUT_PULLUP);    //Entrada y resistencia pullup
  //Asociamos interrupción a función lanzada en flanco de bajada
  attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(botonTara), interTara,
  FALLING);

  //Creamos el servidor AP con las credenciales especificadas
  WiFi.softAP(ssid, password);
  //Almacenamos la dirección IP
  IPAddress IP = WiFi.softAPIP();
  //Inicializamos el servidor
  server.begin();

  //Mostramos la dirección IP del ESP32 a la que conectarse
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print(IP);
  delay(2000);

  //Limpiamos LCD y mostramos el peso inicialmente a 0
  lcd.clear();
  displayPeso();

  t_inicial = millis(); //Inicializamos el tiempo de intervalo
}

//El loop se ejecuta secuncialmente de forma cíclica
void loop() {
  t_parcial = millis();           //Actualizamos tiempo del ciclo
  t_incremento = t_parcial - t_inicial; //Calculamos intervalo
  if (t_incremento >= 1000){      //Cada x tiempo, actualizamos peso
    t_inicial = t_parcial;         //Tiempo para siguiente intervalo
    pesoL_bits = muestreaPeso();   //Muestreamos el peso en bits
    pesoLocal = escalaPeso(pesoL_bits); //Escalamos a kilos
    displayPeso();                 //Mostramos pesos en LCD
  }
}
```

```

//Esta sección maneja peticiones recibidas por WiFi y respuestas
//Escucha por posibles clientes entrantes
WiFiClient client = server.available();
//Si un cliente se conecta, entonces...
if (client) {
  //...crea un String para almacenar los datos del cliente
  String currentLine = "";
  //Mientras el cliente esté conectado, mantiene bucle
  while (client.connected()) {
    if (client.available()) { //Si hay bytes que leer...
      char c = client.read(); //...se lee el byte del cliente
      header += c; //Acumulación de bytes
      //Si el byte es un carácter que indica nueva línea...
      if (c == '\n') {
        //Si la línea está en blanco, son dos vacíos seguidos,
        //así que es el final de la petición. Se envía respuesta
        if (currentLine.length() == 0) {
          //Las cabeceras HTTP comienzan con código respuesta:
          client.println("HTTP/1.1 200 OK");
          //Se envía "Content-type" para preparar al cliente
          client.println("Content-type:text/html");
          client.println("Connection: close");
          client.println();

          //Si la solicitud es "/peso/0", enviamos el peso total
          if (header.indexOf("GET /peso/0") >= 0) {
            //Se debe de escribir como String para enviarlo
            pesoTotal = simulaSuma();
          }

          //En esta versión del código, el ESP32 genera una
          página web en formato HTML
          //Con las credenciales e IP, cualquier dispositivo con
          WiFi puede ver la página
          //Las siguientes líneas dan formato a la página HTML
          client.println("<!DOCTYPE html><html>");
          client.println("<head><meta name=\"viewport\"
content=\"width=device-width, initial-scale=1\">");
          client.println("<link rel=\"icon\" href=\"data:;\">");
          //Se crea un botón que al pulsarse envíe la petición
          de peso al ESP32 y se le da formato
          client.println("<style>html { font-family: Helvetica;
display: inline-block; margin: 0px auto; text-align: center;}");
          client.println(".button { background-color: #f03322;
border: none; color: white; padding: 16px 40px;");
          client.println("text-decoration: none; font-size:
30px; margin: 2px; cursor: pointer;}");
          client.println("</style></head>");
          //Se da título a la página
          client.println("<body><h1>Servidor ESP32</h1>");

```

```
        //Mostramos en la página el peso total recibido
        //Editamos el tamaño de la fuente del texto
        client.println("<p style=font-size:20px> -----
----- <p>");
        client.println("<p style=font-size:20px> El peso total
es: " "</p>");
        client.println("<p style=font-size:40px><b>" +
String(pesoTotal) + " kg</b></p>");
        client.println("<p style=font-size:20px> -----
----- <p>");

        //Al pulsar el botón, se escribe la petición el la URL
        client.println("<p><a href=\"/peso/0\"><button
class=\"button\">Pesaje</button></a></p>");

        //La respuesta HTTP finaliza con otra línea blanca
        client.println();
        //Salimos del bucle while
        break;
    } else { //Si se tiene una nueva línea, limpia la actual
        currentLine = "";
    }
}
//Si lo único que se tiene es un retorno de carro...
} else if (c != '\r') {
    //...se añade al final de la línea actual
    currentLine += c;
}
}
}
//Se limpia la variable de cabecera
header = "";
//Se cierra la conexión
client.stop();
}
}

//Función que sobremuestra la señal simulada de peso
//Recibe: void
//Devuelve: El valor del peso total medido en bits como número
entero (int)
int muestreaPeso (void) {
    //Generamos una semilla de números aleatorios de lectura del pin
    randomSeed(analogRead(entrAcond));
    //Inicializamos las variables locales para el cálculo
    int N_muestras = 10; //Se tomarán 10 muestras consecutivas
    int maxInterval = 3040; //Máximo de escala
    int pesoRND = 0;
    int pesoRND_0 = 0;
    int pesoAcum = 0;
    //Si se muestrea una tara, menos muestras para mayor velocidad
    if (tara == true) {
        N_muestras = 3;
        //Reducimos el intervalo máximo para la tara
        maxInterval = 1000;
        //Devolvemos la indicación de tara al estado inicial
        tara = false;
    }
}
```

```

//Simulamos tomar varias muestras para reducir el error
for (int i = 0; i <= N_muestras; i++) {
  //Se toma un valor aleatorio inicial
  if (i == 0) {
    pesoRND = random(0, maxInterval);
    pesoRND_0 = pesoRND;
    //Los siguientes valores se encuentran alejados del inicial
  } else {
    pesoRND = pesoRND_0 + random(-100, 100);
  }
  pesoAcum = pesoAcum + pesoRND;
}
//Hacemos media y devolvemos el valor
pesoRND = pesoAcum / N_muestras;
return (pesoRND);
}

//Función para convertir el peso en bits en peso en kilogramos
//Recibe: El peso en en el instante (int)
//Devuelve: El valor del peso en kilos (float)
float escalaPeso (int peso_bits) {
  //La capacidad máxima es la de 4 células de carga
  int capMax = pesoMax * 4;
  Serial.println(capMax);
  //Si no se separa el cálculo, da problemas de precisión
  float diferencia = peso_bits - pesoTara;
  Serial.println(diferencia);
  float reescala = diferencia / 3040;
  Serial.println(reescala);
  float kilos = reescala * capMax;
  Serial.println(kilos);
  return (kilos);
}

//Función para mostrar pesos en el LCD
//Recibe: void
//Devuelve: void
void displayPeso (void) {
  lcd.setCursor(0, 0); //Línea superior del LCD
  lcd.print("Local:" + enBlanco(pesoLocal) + String(pesoLocal) + "
kg");

  lcd.setCursor(0, 1); //Línea inferior del LCD
  lcd.print("Total:" + enBlanco(pesoTotal) + String(pesoTotal) + "
kg");
}

//Función de interrupción asociada al botón de tara
//Recibe: void
//Devuelve: void
void interTara(void) {
  //Cambia el estado de la bool para que...
  tara = true;
  //...la función de muestreo tome menos muestras
  pesoTara = muestreaPeso();
  //sacamos por la consola los valores
  Serial.print("\nPeso tara:");
  Serial.println(pesoTara);
}
}

```

```
//Función para el relleno de espacios en LCD
//Recibe: Número de x cifras (float)
//Devuelve: String de espacios en blanco
String enBlanco (float cifra) {
    String espacios = "";
    if (cifra <= 9.99) {
        espacios = "  ";
    } else if (cifra <= 99.99) {
        espacios = "   ";
    } else if (cifra <= 999.99) {
        espacios = "    ";
    } else {
        espacios = "";
    }
    return (espacios);
}

//Función que simula la obtención de valores de otras plataformas
//Recibe: void
//Devuelve: Valor del peso simulado (float)
float simulaSuma(void) {
    float suma = 0;
    float acumAux = 0;
    //Llamamos a las funciones de peso para 3 valores aleatorios
    for (int i = 0; i <= 3; i++) {
        int pesoExt = muestreaPeso();
        float pesoKg = escalaPeso(pesoExt);
        acumAux = acumAux + pesoKg;
    }
    //Los sumamos al peso de la báscula local
    suma = acumAux + pesoLocal;
    return (suma);
}
```

Como decíamos, este código es una simulación del objetivo final, que debería leer la señal de entrada que recibe en el pin 34 desde el circuito de acondicionamiento diseñado, para leer el peso dado por las células de carga. Esto se ha tenido en cuenta a lo hora de escribir el código, y el único cambio necesario para que pueda leer y dar el peso es introducir unos cambios en la función “muestreaPeso()” para la lectura analógica del pin:

```
int muestreaPeso (void) {
    int N_muestras = 10;
    int pesoLeido = 0;
    int pesoAcum = 0;
    if (tara == true) {
        N_muestras = 3;
        tara = false;
    }
    //Simulamos tomar varias muestras para reducir el error
    for (int i = 0; i <= N_muestras; i++) {
        pesoLeido = analogRead(entrAcond);
        pesoAcum = pesoAcum + pesoLeido;
        delayMicroseconds(100);
    }
    pesoRND = pesoAcum / N_muestras;
    return (pesoRND); }
```

Otro cambio que se puede hacer sobre el código es adaptarlo para hacer que el peso sea leído por una aplicación en Android en lugar de generar la página web en formato HTML. La ventaja que tiene usar esta página es que los resultados pueden verse en cualquier modelo de móvil, tablet u ordenador con acceso a WiFi. No obstante, en el siguiente apartado veremos cómo adaptar el código y crear una aplicación sencilla.

### 4.5.3. Software en Android

El objetivo es crear una app sencilla gracias a la cual el móvil personal del usuario pueda pasar a cumplir la función del visor electrónico de cualquiera de las básculas industriales. La misión que debe por tanto cumplir la aplicación en Android es recibir los valores de peso de cada plataforma en uso, sumarlos y presentarlos al usuario. Recibirá este dato del servidor ESP\_01 como una URL.

El mayor entorno de desarrollo para aplicaciones en Android es probablemente Android Studio. Es un IDE de uso gratuito que incluye herramientas de programación, diseño de la app y simulación del móvil. El problema es que el lenguaje de programación principal es Kotlin, con Java como secundario. Ambos son lenguajes que presentan una complejidad elevada, cuya amplitud resulta inabarcable dentro alcance de este TFG.

Hay una alternativa de uso sensiblemente más sencillo que nos servirá para presentar una primera posible versión de la app de control y ayudar a hacernos una idea del objetivo que se busca. Este software es el MIT App Inventor, un entorno de desarrollo online basado en bloques creado en colaboración por Google Labs y el MIT (Massachusetts Institute of Technology) con el objetivo de democratizar el desarrollo de apps. Es de uso gratuito y se puede acceder a todas las funciones con una cuenta de Google.

Lo primero es modificar el código anterior para que interactúe con la App. No es posible que convivan la opción de la página HTML y de la App, puesto que la App debe de leer la información de la URL y entraría en conflicto con el formato de la página. La única parte que hay que modificar del código es la sentencia “if” que se lanza al recibir una solicitud. El resto del código es idéntico. Resulta un código más breve puesto que solamente hay que escribir el dato en la URL en lugar de dar formato a la página y configurar el botón.

```
//Si la solicitud es "/peso/0", enviamos el peso total
if (header.indexOf("GET /peso/0") >= 0) {
//Se debe de escribir como String para escribirlo en URL
pesoTotal = String(simulaSuma());
//Esta página HTML consta solo de la URL
client.println("<!DOCTYPE HTML>");
client.println("<html>");
//Escribimos el peso
client.println(pesoTotal);
client.println("</html>");
}
```

Seguimos diseñando la disposición de los elementos de la app en la pantalla del móvil. La manera de diseñar la distribución que tiene App Inventor es mediante “Arrangers”, elementos auxiliares que fijan los elementos en líneas verticales, horizontales o tablas. Con estas posiciones genéricas se trata de asegurar que la distribución será válida para cualquier dispositivo. Utilizamos varias etiquetas de texto para aportar algo de información al usuario. Una de ellas contendrá la cifra del peso. Su valor es editable desde la programación. Debe de establecerse una opción que indica “HTML format” para que solo muestre el número y no toda la URL. Añadimos también un botón que al pulsarlo lance la solicitud de peso, esencialmente ejecutando el programa. Para poder conectar con el ESP32 de la plataforma, se utiliza un elemento “Web” invisible que maneja la conectividad.



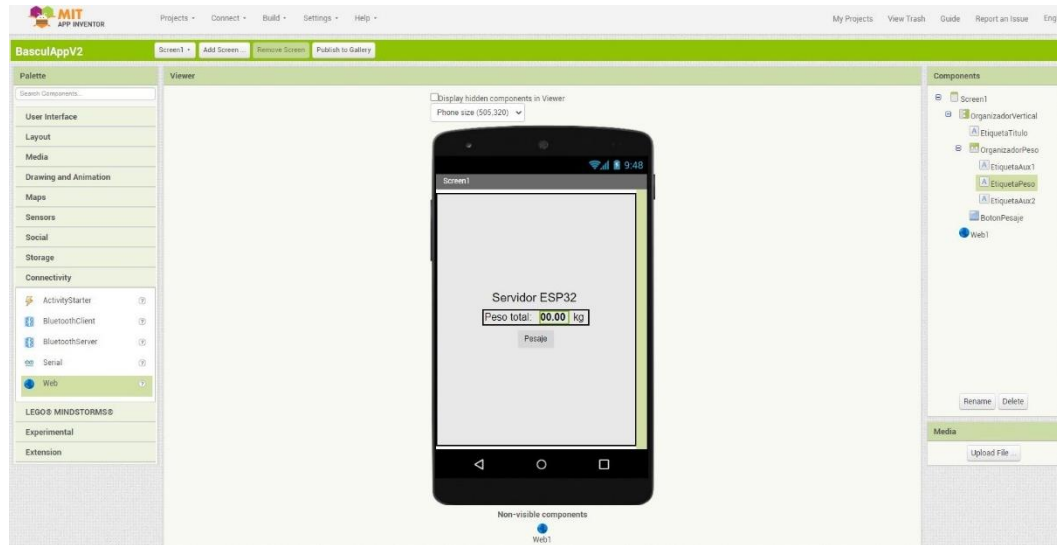


Ilustración 84: Diseño App Inventor

Con la distribución de elementos completa, pasamos a la programación por bloques. La ejecución se lanzará cuando se pulse el botón de pesaje. Al pulsarlo, se escribirá por medio de la URL una solicitud al ESP32. Esto se ejecuta por medio del bloque “when BotonPesaje”. Se queda entonces la app a la espera de la respuesta, que se recibe por medio del bloque “when Web1”, llamado por el bloque anterior. La respuesta se escribe entonces en la etiqueta de texto indicada.

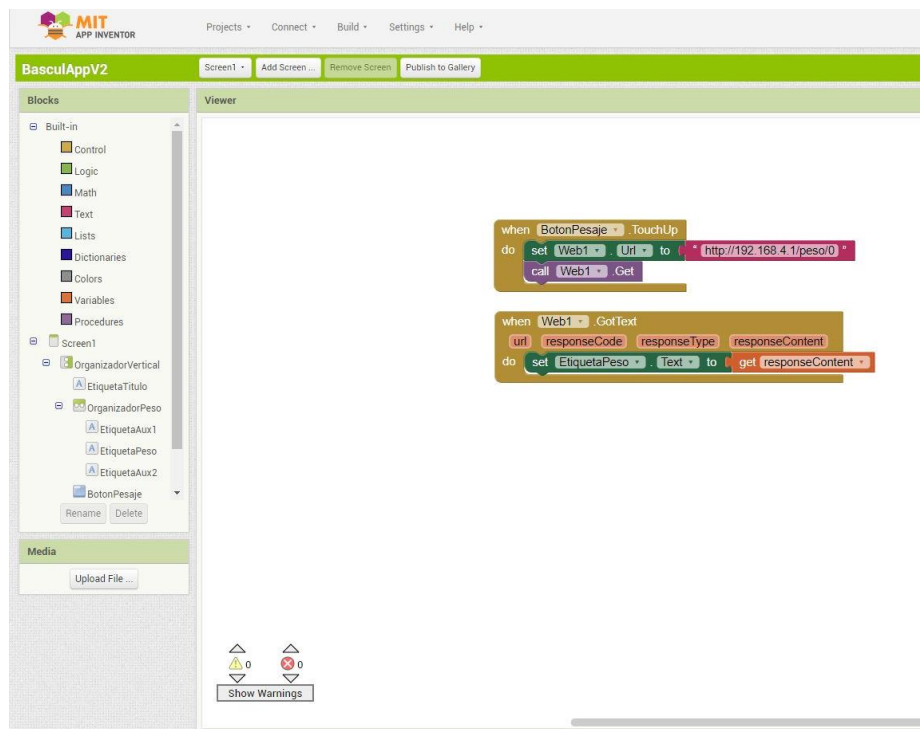
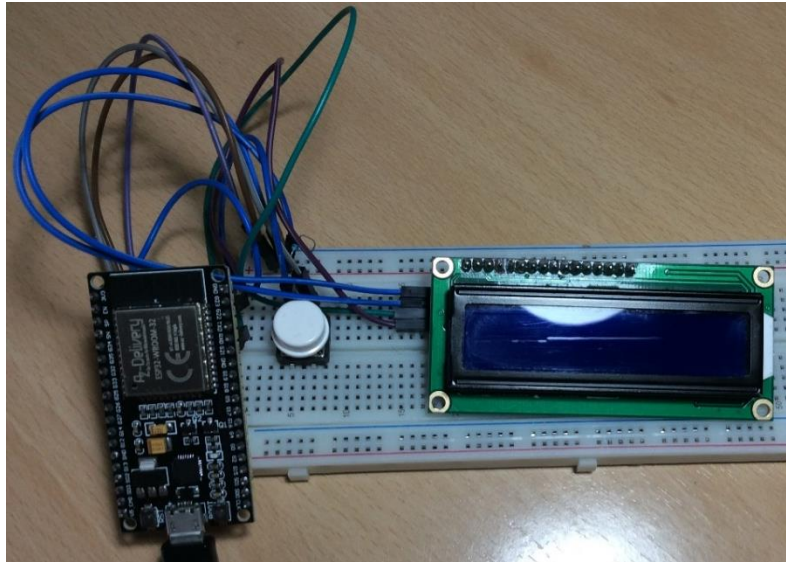


Ilustración 85: Programa bloques App Inventor

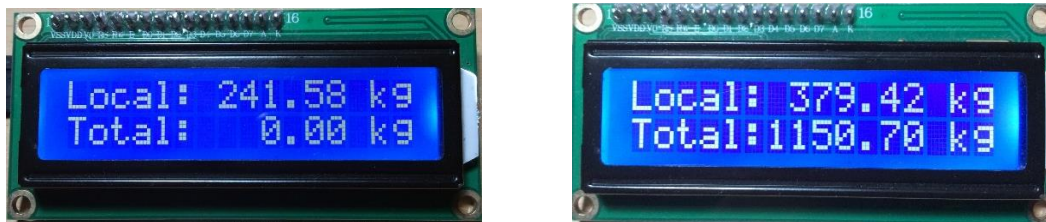
#### 4.5.4. Pruebas del modelo

Como final del apartado y demostración de la funcionalidad del código presentado, mostraremos a continuación los resultados de las pruebas hechas con ambas versiones del código. Preparamos el montaje en la protoboard y realizamos las conexiones pertinentes.



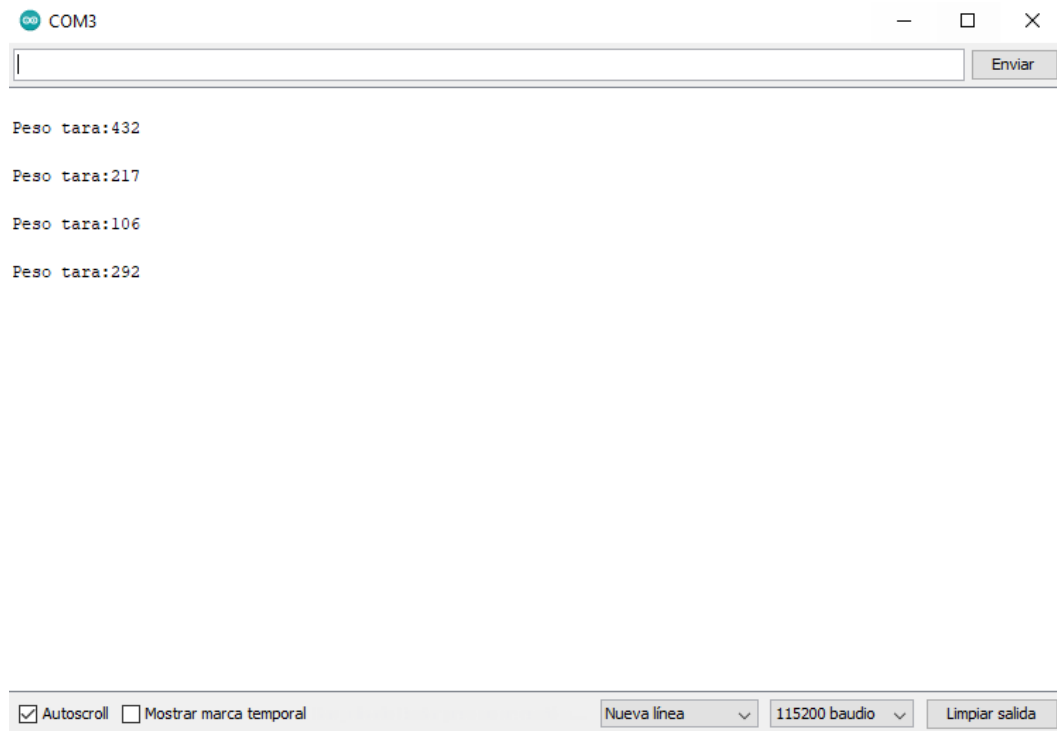
*Ilustración 86: Montaje ESP32 protoboard*

Subimos el programa con la versión de página HTML al ESP32 para la primera prueba. Comprobamos que en el display LCD solamente aparecen valores del peso local, en la línea superior, hasta que pulsamos el botón de la página. El valor del peso local cambia cada cierto tiempo, lo podemos ajustar fácilmente con el valor del contador. El total aparece una vez pulsado el botón.



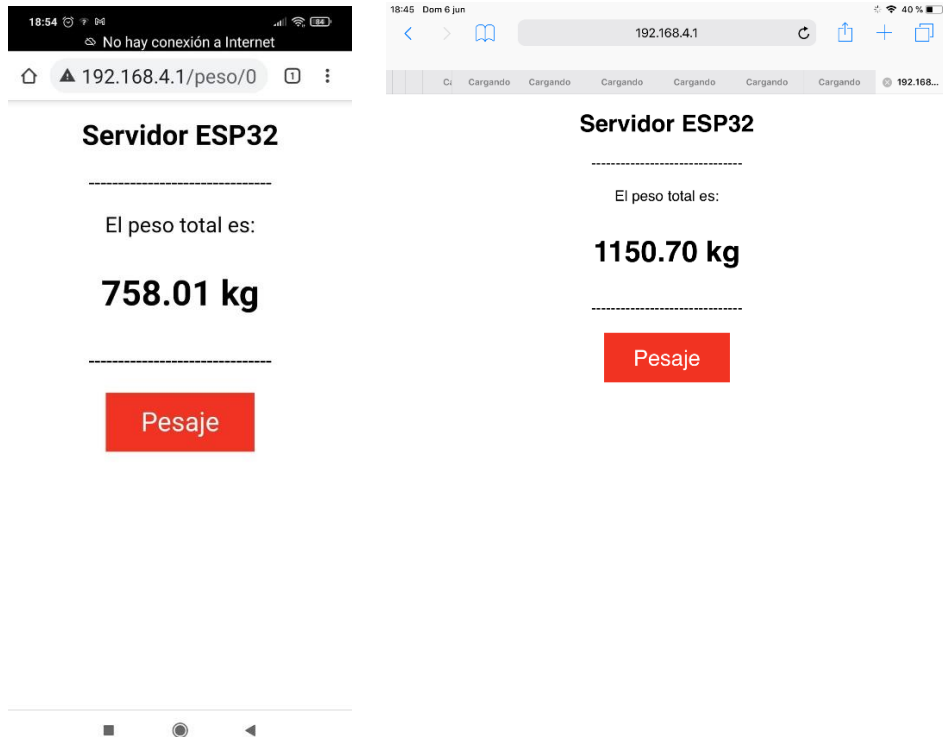
*Ilustración 87: Display pesos*

Para comprobar que la interrupción del botón de tara funciona, no podemos confiar solo en comparar con los pesos que aparecen en el LCD por ser estos generados aleatoriamente cada poco tiempo. Comprobamos añadiendo tres líneas de código a la interrupción para asegurar que entramos en la interrupción y ver el valor de tara utilizando el monitor serie.



*Ilustración 88: Tara en monitor serie*

Ahora, comprobamos el funcionamiento de la página HTML. Al pulsar el botón, nos devuelve correctamente el peso total, que es también actualizado en el LCD. Además, probamos que la página funciona en distintos dispositivos, habiendo sido probada en móvil (izquierda) y tablet (derecha).



*Ilustración 89: Prueba página HTML*

Por último, compilamos la App desde Android Studio y la instalamos en el móvil. Hay dos opciones para esto, se puede hacer descargando la .apk (extensión de aplicación Android) o a través de un código QR generado. Cambiamos el código del ESP32 a la versión que puede interactuar con la App. Los resultados son buenos, al pulsar el botón de aplicación se nos da también el valor del peso simulado.



*Ilustración 90: Prueba App Android*

Concluimos en vista de los resultados de la simulación llevada a cabo en este apartado que el programa y aplicación desarrollados podrían cumplir con el propósito previsto para ellos dentro del diseño y que los cambios para la lectura de una señal eléctrica real son sencillos y no afectarían a la transmisión.

## 4.6. Diseño PCB

Con todas las piezas que forman parte del circuito de instrumentación diseñadas individualmente, pero teniendo en cuenta la interacción entre ellas, solamente queda el último paso en el diseño de circuito: la simulación de todos los elementos y la distribución e interconexión de los mismos en una PCB.

### 4.6.1. Herramienta utilizada: Autodesk Eagle

Hemos utilizado este programa en las simulaciones ya presentadas en este trabajo, pero aprovechamos este apartado para presentarlo.

Eagle es un programa de diseño PCB propiedad de la compañía Autodesk, dedicada al software de diseño. El programa fue desarrollado inicialmente como iniciativa de código libre por CadSoft, hasta su venta a Autodesk en 2016. Actualmente sigue el modelo de suscripción mensual habitual en los programas de la compañía, pero hay disponible una versión gratis muy limitada. Esta versión solo permite manejar dos capas de esquema eléctrico al mismo tiempo y el límite de área en la PCB son 80 cm<sup>2</sup>. Esto debiera de todas formas ser suficiente para este proyecto, pero también está disponible la versión completa libre para estudiantes.

Hay dos editores interconectados en este programa. Uno es el editor de esquemas y otro el de PCB. En el primero se dibuja el esquema eléctrico del circuito que estemos diseñando y en el segundo se diseña y ruta la PCB.

En el editor de circuitos encontramos un lienzo central para disponer los componentes, una barra vertical de opciones a la izquierda y una de herramientas horizontal superior.

La barra vertical izquierda contiene las herramientas para manipular y ajustar componentes, además del acceso a la biblioteca desde la que importarlos al esquema. Permite instalar librerías externas que sumar a las ya incluidas. El trazado de las redes determina la conexión entre componentes para simulación y rutado en la PCB.

La barra de herramientas superior ofrece las opciones típicas de zoom y guardado de cualquier programa, justo con un navegador por capas. Lo más importante de esta barra es el selector de capa y las opciones de simulación. Para simulación, Eagle utiliza Ngspice, un simulador eléctrico de código libre. Los modelos de Ngspice deben de asociarse a los componentes utilizados para poder simular el circuito o, alternativamente, crear un circuito solamente con los modelos de Ngspice.

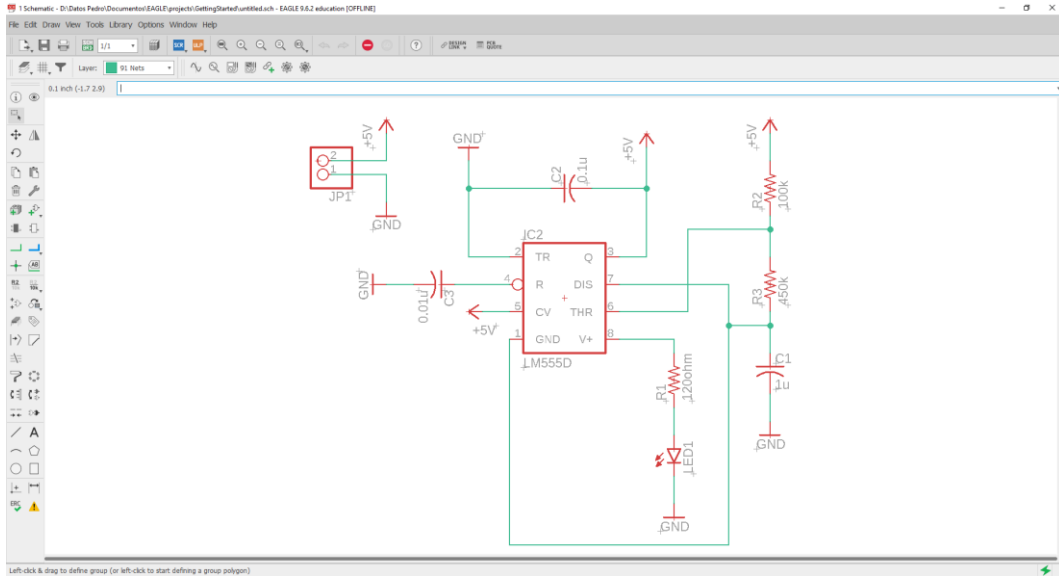


Ilustración 91: Pantalla esquema eléctrico Eagle

Con un botón se cambia del esquema eléctrico a la PCB. Los cambios en el esquema se actualizan en tiempo real en la PCB. Aquí se escoge la forma y tamaño de la placa PCB, se sitúan los componentes en su interior y se trazan las rutas entre ellos. El programa informa de los componentes no conectados y a que red pertenecen (ratsnest), además de tener opciones de apoyo al trazado. Alternativamente, ofrece la opción del autorrutado. Las normas seguidas para el autorrutado o para la ayuda integrada en el trazado de las rutas, como el clearance o el ancho de ruta, se selecciona en la pestaña DRC (Design Rules). Además, Eagle genera automáticamente todos los archivos necesarios para la fabricación, como el de coordenadas de taladro en código G y los negativos de las capas con cobre.

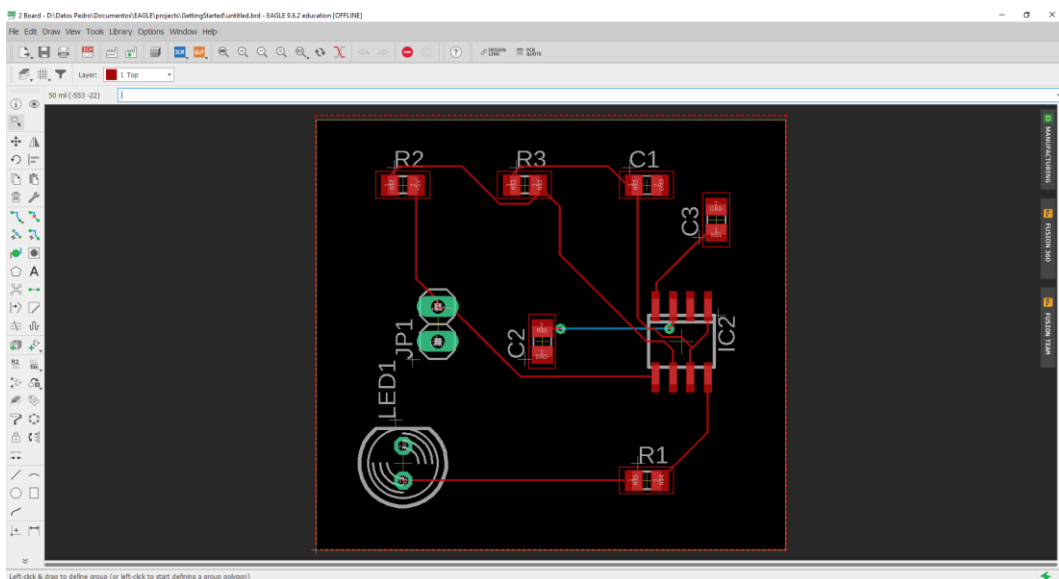


Ilustración 92: Pantalla diseño PCB Eagle

Por último, si los componentes seleccionados tenían un modelo 3D asociado en la librería, se puede exportar la PCB a Fusion360 para visualizarla e integrarla en el modelo de un diseño mecánico. Este programa de modelado 3D enfocado a la ingeniería también pertenece a Autodesk, que permiten esta interacción entre sus dos programas. Es similar a Inventor, de la misma compañía. El modelado se basa en el trazo de un boceto bidimensional que después se extruye. Una vez extruido, se pueden realizar modificaciones, como biseles o taladros, o bocetar de nuevo sobre una de las caras. Además, incluye funciones para simulación de movimiento mecánico, a partir de articulaciones, y de animación y renderizado 3D.



Ilustración 93: Pantalla general Fusion360

Escogemos utilizar este programa para el diseño del circuito porque tiene una interfaz sencilla e intuitiva, ofrece unas opciones de rutado cómodas y la integración con Fusion360 abre unas opciones interesantes de diseño y presentación. En el canal de YouTube de Eagle se puede, de forma gratuita, acceder a tutoriales para empezar a utilizarlo en menos de dos horas.

### 4.6.1.1. Otras opciones consideradas

Antes de optar por utilizar Eagle, se han considerado otras opciones disponibles para diseño y simulado de circuitos:

- **PowerSim (PSIM):** Es un programa para simulado de circuitos, pensado inicialmente para circuitos de potencia, pero aplicable a circuitos generales. Lo descartamos como opción por no contar con editor de PCB en el programa.



- **Matlab:** Utilizando el paquete Simscape Electrical para Simulink se pueden simular circuitos eléctricos en Matlab. De nuevo, el problema es que no hay opción de unificar simulación y PCB en el mismo programa. Por otra parte, es el programa en que se ven resultados con mayor precisión y que más manipulación permite de los datos, así que no se ha descartado su uso como herramienta de apoyo, utilizándola en el diseño del filtro y batería.
- **Altium Designer:** Es posiblemente el programa de diseño PCB más potente disponible y el más utilizado en la industria. El problema es que la versión completa, de forma gratuita, solamente es accesible por un periodo temporal de prueba.
- **MicroSim8 (MSIM8):** Es un programa muy similar a Eagle en funciones, permitiendo trabajar también con esquema eléctrico y PCB en paralelo. Sin embargo, es un programa que actualmente está descatalogado y no cuenta con servicio de soporte, tutorial, ni ayuda. Además, la interfaz resulta más obtusa que Eagle, los archivos de fabricación deben obtenerse de forma manual y el autorrutado es menos avanzado.
- **Proteus:** Se trata de un programa de diseño muy completo. A la simulación y diseño PCB le suma un apartado de electrónica digital más extenso que el resto de programas vistos, dando por ejemplo la posibilidad de introducir pequeños programas en microcontroladores simulados. El inconveniente es que la versión gratuita está muy limitada, no permite siquiera guardar el trabajo.
- **KiCad:** Programa completo de diseño PCB de código libre, completamente gratuito, multiplataforma. En su desarrollo, ha recibido aportaciones incluso del CERN. La única diferencia actualmente que supone una ventaja de Eagle sobre KiCad es la integración del primero con Fusion360.

#### 4.6.2. Circuito completo

Dibujamos el circuito completo, con los valores especificados en su apartado de diseño correspondiente. Recordar que, siendo un circuito de instrumentación, es necesario tratar la señal de cada transductor individualmente antes de sumarla, por lo que se necesitan los cuatro filtros y AI representados. Las células de carga no se representan, por considerarse que no forman parte del circuito de instrumentación per se. Se conectarán a través de los conectores X1-1 y subsiguientes, con el cableado conectado tal cual se indica en el esquema. También aparecen indicados los AO que comparten envoltorio, como el IC1A y IC1B.

RG5 podría ser una resistencia fija de 500  $\Omega$ , pero se opta por utilizar un potenciómetro ajustable de 1k  $\Omega$ . Es de esta resistencia de quién depende que la salida guarde el equilibrio de la suma de las cuatro señales, por lo que es beneficioso poder ajustarla frente a posibles errores. De la misma forma, usamos un potenciómetro de 100  $\Omega$  en RG6 para poder ajustar el 0 de la escala a la entrada del ESP32. No se ha considerado en principio necesario añadir otro potenciómetro más para ajustar el offset de IC7, cuyo error se puede ajustar con RG5, pero se podría incluir si fuese necesario.

En el diseño final habrá tres componentes que no estarán soldados sobre la PCB, si no que irán conectados a ella por cable para poder disponerlos en un lugar más accesible al usuario en el exterior de la plataforma. Estos son el display LCD, el botón de tara y el interruptor asociado a la batería. Colocamos en el circuito unos pines hembra que representen su posición y permitan conectarlos a la placa.

Se ha seleccionado también la envolvente, y en consecuencia huella de los componentes. Esta huella nos servirá para distribuirlos en la PCB. Esta envolvente es la asociada al modelo del integrado escogido en los apartados de diseño para los AO y rectificador. Las escogidas para cada componente se especifican en el apartado de “Lista de componentes”

El esquema del circuito de instrumentación desarrollado completo, dividido según la función que cubre cada segmento, es el que sigue:

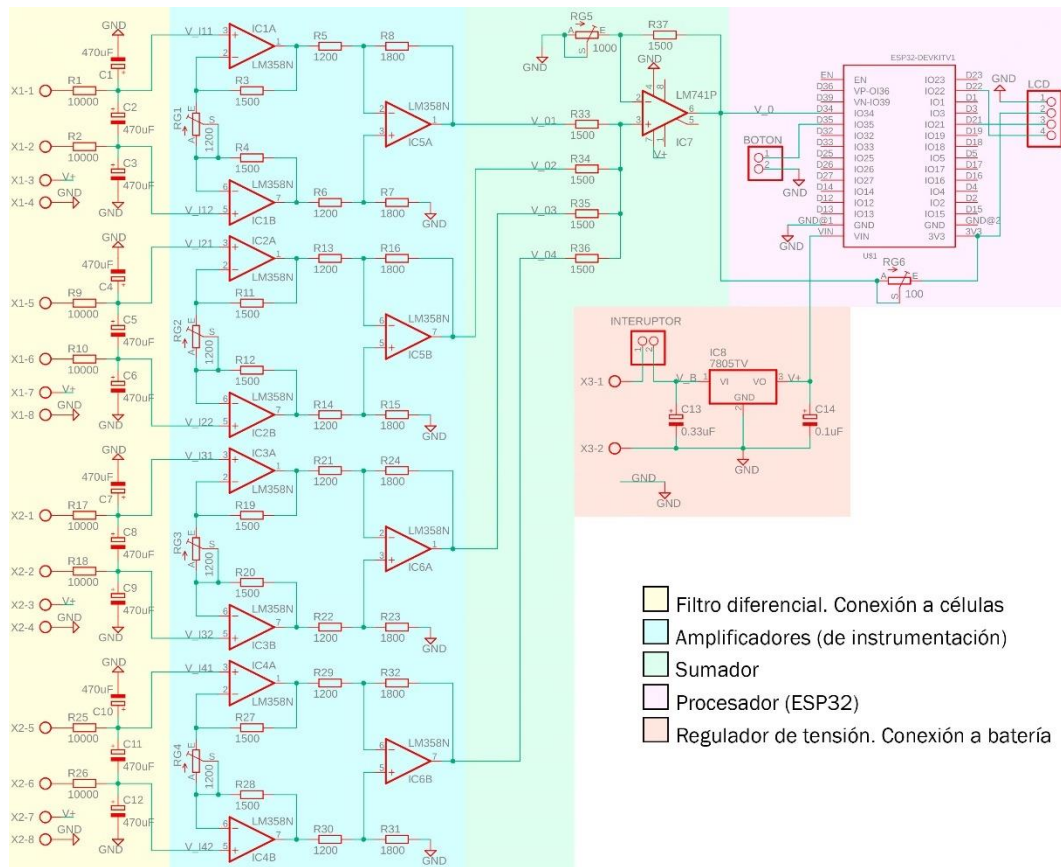


Ilustración 94: Diseño circuito completo

#### 4.6.2.1. Simulación

Hemos simulado los bloques formales del circuito de manera individual, pero debemos de comprobar que no interfieran entre sí. Además, los hemos simulado estáticamente, no frente a un incremento de la tensión de entrada, que es lo que sucedería al depositar un objeto sobre la plataforma. Para ello, preparamos una simulación en Eagle utilizando los componentes de ngspice. Resulta más cómodo crear un nuevo circuito para la simulación que hacer todos los cambios sobre el completo anteriormente presentado.

Las diferencias de esta versión de simulación sobre la versión completa y las consideraciones más importantes son:

- En primer lugar, eliminamos el ESP32, solo queremos comprobar la tensión final de salida del circuito de instrumentación.
- Obviamos también el regulador de tensión, no es simulable. Para alimentar el circuito utilizaremos una fuente de tensión ideal V1 que represente la tensión a la entrada del circuito, es decir, los filtros. No es necesario alimentar directamente los AO en simulación.
- Esta fuente de tensión V\_0 la colocamos en paralelo para conseguir la tensión diferencial prevista. La manera de representar la tensión diferencial de entrada es con una fuente ideal y una tierra, conectadas como veremos en la representación. Puede ser fija o variable.
- La entrada será la calculada para los dos extremos supuestos considerados en el apartado del AI: (0, 0'01) V y (0, 0'1) V. Recordemos que estos valores están calculados según los mV/V de las células de carga para una entrada fijada a 5 V. Estos intervalos de tensión serán los aplicados en la fuente ideal.

Esto es, en las células de carga, sometidas a su carga nominal, por cada voltio de tensión de entrada (1 V), darán como salida "x" mV. El dato viene dado en las hojas de datos de cada célula específica. En el mejor caso, son 20 mV/V, y en el peor 2 mV/V. Siendo la entrada fija a 5 V gracias al regulador, calculamos los dos intervalos de (0, 0'01) V y (0, 0'1) V para mejor y peor caso de funcionamiento, con lo que nos aseguramos de que el circuito pueda responder correctamente para un rango amplio de tensiones y por tanto de células utilizadas.

- Los potenciómetros los modelamos como resistencias con valores no normalizados. Se deben de cambiar los valores de los  $R_G$  de los AI en cada caso para conseguir la ganancia que corresponde a los dos intervalos en estudio.
- Los condensadores utilizan un modelo único para simulación que no distingue entre electrolíticos y cerámicos.
- Para la simulación en tiempo, es necesario colocar probes (sondas) en los nudos de las tensiones que se desea registrar. Serán: tensión de entrada a los filtros (V\_I), tensión de salida de los AI (V\_01, V\_02, V\_03, V\_04) y la de salida total del sumador (V\_0).

El circuito simulable finalmente es:

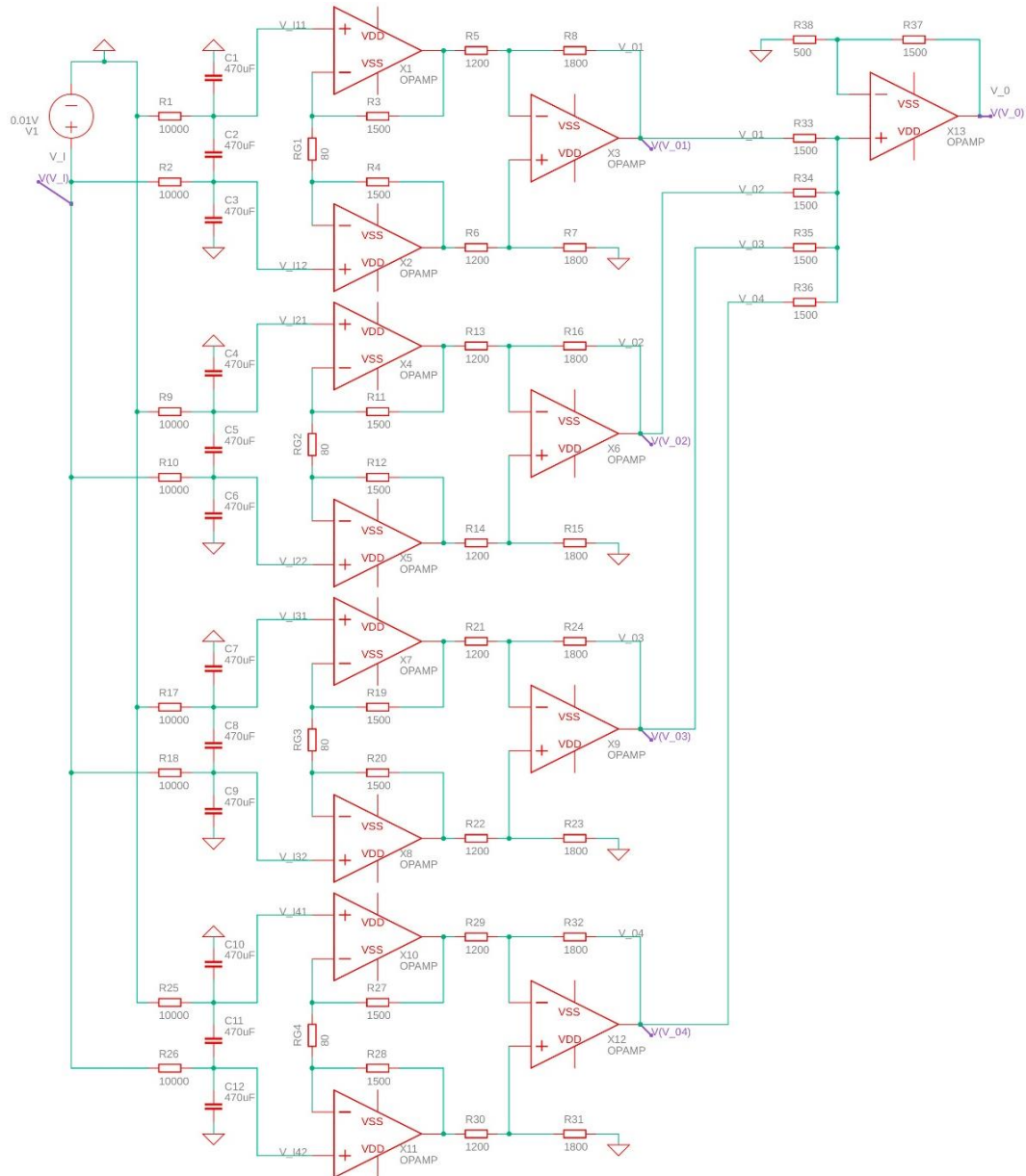


Ilustración 95: Circuito completo simulable

La configuración de la simulación la haremos como DC sweep (barrido de continua), que es la que varía la tensión proporcionada por una fuente ideal entre dos valores dados. La simulación de un instante, que nos da las tensiones en los nudos, se hace con “Operating Point”, el tipo utilizado con anterioridad en los diseños. Instruiremos que se haga la simulación con un número elevado de puntos. Las tensiones representadas en el barrido son exclusivamente las de las “probes” colocadas. El barrido se hace basado en la fuente de tensión ideal V1.

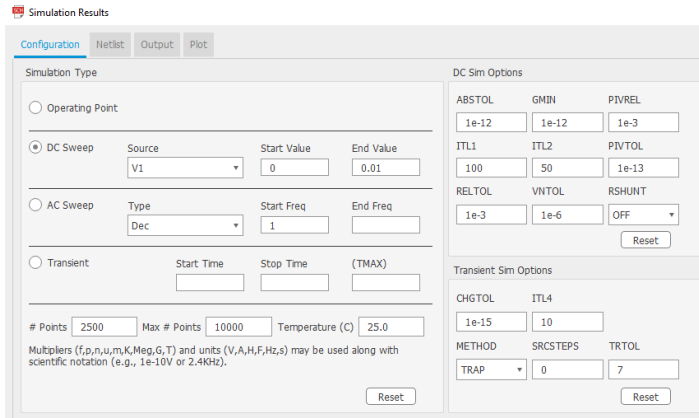


Ilustración 96: Configuración simulación

Así pues, lanzamos simulación para los dos intervalos extremos comentados. Si el circuito se comporta bien en estos dos casos, es de suponer que lo hará también en los posibles estadios intermedios. Recordar que hay que cambiar el valor de las resistencias de ganancia ( $R_G$ ) para ajustar la ganancia al rango de tensión de entrada.

- Intervalo (0, 0'01) V.  $R_G = 80 \Omega$ :

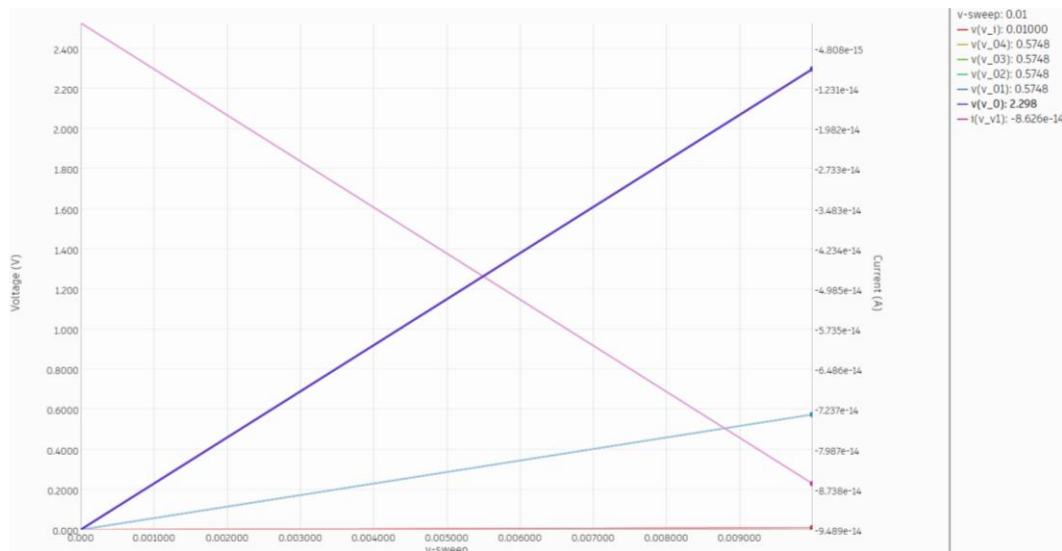


Ilustración 97: Simulación (0, 0'01) V

- Intervalo (0, 0'1) V.  $R_G = 1057 \Omega$ :

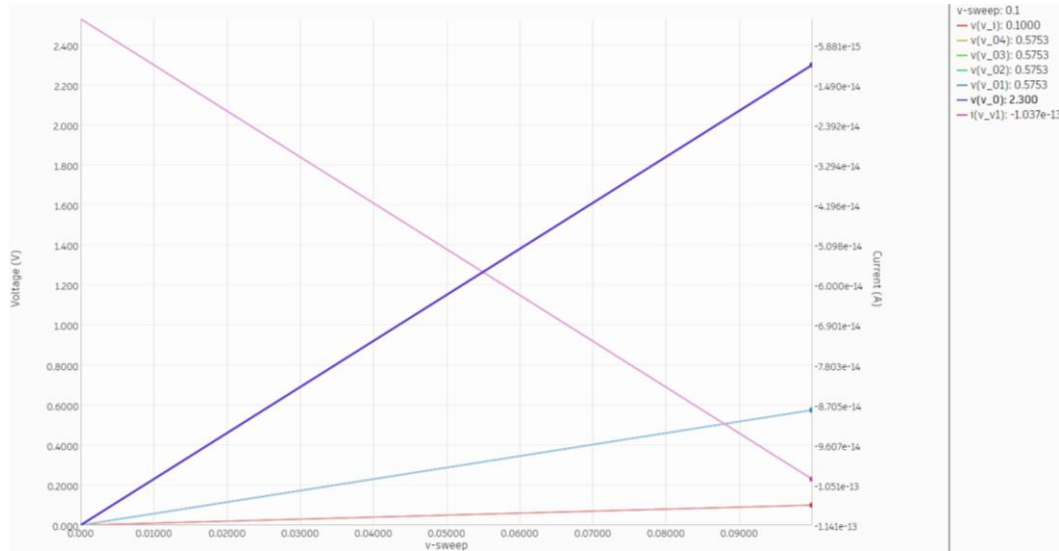


Ilustración 98: Simulación (0, 0'1) V

Lo primero, concretar qué es lo que estamos viendo. En el eje vertical izquierdo tenemos la escala de tensión, a la que van referidas las tensiones de salida de los AI (V\_01 a V\_04, línea azul) y la de salida del circuito (V\_0, línea morada). En el eje vertical derecho, a una escala diferente, encontramos la corriente I (V\_V1, línea rosa), que representa la corriente aportada por la fuente de tensión. Por último, el eje horizontal es el incremento gradual de tensión de entrada (V\_I, línea naranja), la que se aplicaría al circuito desde las células.

La representación de la corriente es opcional, pero se ha decidido dejarla porque sirve para mostrar que el circuito completo de acondicionamiento, formado por componentes pasivos y AO no consume apenas potencia de la fuente, como vemos por lo reducido de su escala. Disminuye inversamente proporcional al aumento de la tensión.

Las tensiones de salida de los AI se solapan en todo el recorrido, se comportan todos igual. Podemos ver en la tensión de salida del sumador como estas cuatro tensiones de los AI se suman correctamente, dando lugar a la señal resultante V\_0 que vemos. Es interesante señalar que el circuito mantiene un comportamiento perfectamente lineal en todo el recorrido, sin error de 0 y finalizando en la tensión prevista. El circuito mantendrá por tanto la linealidad de la salida del puente de Wheatstone de las células de carga.

Vemos que en ambos casos el circuito funciona correctamente, cumplen con lo calculado y el margen de error es muy pequeño, algo más notable en el intervalo de 0'01 V. Por otra parte, es normal que el error mayor se de en menores tensiones. El error que nos de en la simulación será siempre menor que el que tenga un circuito real, pero conocerlo sigue resultando útil para comprobar lo correcto del diseño.

Calcularemos entonces el error en tres puntos: el inicial (0 V), el final (2'3 v) y el central (2'3/2 = 1'15 V) del rango de tensiones teórico recorrido por la tensión de salida del sumador V\_0. Calcularemos para los dos intervalos los errores absoluto y relativo de los tres puntos a partir del valor teórico. El error absoluto se calcula como la diferencia entre la medida real y la teórica en valor absoluto. El relativo como el cociente entre el error relativo y la medida real. Sus ecuaciones son:

$$\varepsilon_a = |\bar{X} - X_i|$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_a}{\bar{X}}$$

Se calculará sobre la tensión de salida del sumador (V\_0) y de los AI. Se ha encontrado que en simulación esta última coincide en los cuatro casos, de modo que la resumimos como V\_0i. Los resultados obtenidos:

		Valores Sim.						Teórico						Error									
		0			1/2			1			0			1/2			1			Absoluto		Relativo	
		0	1/2	1	0	1/2	1	0	1/2	1	0	1/2	1	0	1/2	1	0	1/2	1	0	1/2	1	
(0,0'01)	v(v_0)	0	1,1491	2,2982	0	1,15	2,3	0	9,00 E-04	1,80 E-03	0	7,8261 E-04	7,8261 E-04										
	(v_0i)	0	0,28850	0,57480	0	0,2875	0,575	0	1,00 E-03	2,00 E-04	0	3,4783 E-03	3,4783 E-04										
(0,0'1)	v(v_0)	0	1,1501	2,3003	0	1,15	2,3	0	1,00 E-04	3,00 E-04	0	8,6957 E-05	1,3043 E-04										
	(v_0i)	0	0,2876	0,57530	0	0,2875	0,575	0	1,00 E-04	3,00 E-04	0	3,4783 E-04	5,2174 E-04										

Tabla 5: Errores de medida

Vemos que el error es muy pequeño en todos los casos, por debajo del 1% habitualmente exigido como mínimo en sistemas de medida, por lo que concluimos que, en base a los resultados de simulación, el funcionamiento del circuito acondicionador es bueno y apto.

#### 4.6.2.2. Lista de componentes

La lista de componentes o bill of materials es una tabla que especifica principalmente el número, tipo, huella y valores de los componentes utilizados en un diseño. Se pueden incluir otros datos útiles, como el precio o el fabricante concreto. Esta tabla es a lo que dedicamos el contenido de este apartado.

Se puede obtener un primer borrador de la lista de componentes desde Eagle utilizando el comando "ULP" y seleccionando "bom" (bill of materials). Nos da las características principales de cada componente, que después podemos completar en nuestra propia tabla.



Los precios se han tomado siempre que ha sido posible de las páginas de Farnell y Mouser. Es posible que haya alguna variación entre los precios. La lista completa del material necesario para el circuito desarrollado es:

Sobre PCB											
Referencia	Compon.	Descip./ Tipo	Valor	Otro	Modelo	Huella	Fabricante	Referencia Fabricante	Nº uds.	Coste ud. (€)	Coste x10³ uds. (€)
C(1-12)	Conden.	Electrolít.	470uF	10V, 20% err.		E2-5	Panasonic	EEU-EB1A471SB	12	0,42	106
C13	Conden.	Electrolít.	0,33uF	100V, 20% err.		E1,8-4	Nichicon	UVR2AR33 MDD1TD	1	0,18	45
C14	Conden.	Electrolít.	0,1uF	100V, 20% err.		E1,8-5	Nichicon	UVR2A0R1 MDD1TA	1	0,14	39
R1, 2, 9, 10, 17, 18, 25, 27	Resist.	Agujero pasante, película metálica	10kΩ	250mW, 1% err.		0207/10	Yageo	MFR25S FTF52-10K	5	0,09	12
R3, 4,11, 12,19, 20, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37	Resist.	Agujero pasante, película metálica	1500Ω	400mW, 1% err.		0207/11	Yageo	MF0204 FTE52-1K5	13	0,09	12
R5, 6, 13, 14, 21, 22, 27, 28	Resist.	Agujero pasante, película metálica	1200Ω	250mW, 1% err.		0207/12	Yageo	MFR-25 FTE52-1K2	8	0,09	12
R7, 8, 15, 16, 23, 24, 29, 30	Resist.	Agujero pasante, película metálica	1800Ω	250mW, 1% err.		0207/13	Yageo	MFR-25 FTE52-1K8	8	0,09	12
RG(1-4)	Potenc.	Agujero pasante, vueltas	2000Ω	500mW		S64W	Bourns	3296W-1-202RLF	4	3,04	1470
RG5	Potenc.	Agujero pasante, vueltas	1000Ω	500mW		S64W	Bourns	3296W-1-102RLF	1	3,04	1470
RG6	Potenc.	Agujero pasante, vueltas	100Ω	500mW		S64W	Bourns	3296W-1-101RLF	1	3,04	1470
IC(1-6)	AO	2 AO por cada			LM358N	DIL08	TI	LM358N/ NOPB	6	0,84	384
IC7	AO				LM741CN	DIL08	TI	LM741CN/ NOPB	1	0,8	339
IC8	Reg. V positiva		5V	100mV err.	7805CV	TO220V	STM	L7805CV	1	0,47	182
U\$1	Microcon.				ESP32	ESP32-DEVKIT V1	Espressif		1	9,5	9500
X(1-2)	Conector	Atornillable		8 contactos		AK500/ 8-H	Phoenix Contact	1725711	2	5,6	3760
X3	Conector	Atornillable		2 contactos		AK500/ 2-H	Phoenix Contact	1888687	1	0,98	691
LCD	Pines conexión	Tira divisible				1X04	TE Conectivity	826629-2	1	0,39	182
Interruptor, Botón	Pines conexión	10 pines hembra				1X02			2		
									<b>Tot.</b>	55,04	31302
									<b>+IVA</b>	66,6	37875,42

Tabla 6: Listado de componentes

Exterior PCB						
Componente	Modelo	Descripción/Tipo	Fabricante	Referencia Fabricante	Nº uds. (€)	Coste ud. (€)
Display LCD		16x2, blanco sobre azul	Midas	MC21605C6W-BNMLWI-V2	1	8,87
Interfaz I2C		Soldable al display LCD	Tiendatec	MOD-LCDI2C	1	1,36
Cable conexión		Cable para batería 9V	RS Pro	185-4790	1	0,51
Batería	Zippy compacto 2S	Batería LiPo recargable	Zippy	ZC.850.2S.25	1	4,4
Botón		Pulsador pequeño	SparkFun	COM-00097	1	0,3
Interruptor		Interruptor pequeño	E-Switch	R1966ABLKBLKFF	1	0,97
Células de carga base	FX29	Célula de carga pequeña, 1000N	TE Connectivity	FX293X-100A-0100-L	4	23,92
Separadores PCB	WA-SSTIE M M 3x35mm SW 5.5	Separadores hexagonales	Würth Elektronik	971350321	4	0,58
Tornillos M3			Würth Elektronik	97790603111	4	0,22
					<b>Total</b>	115,29
					<b>Total+IVA</b>	139,5

Tabla 7: Listado de componentes externo a la PCB

Se han tomado también los precios de 1000 unidades para poder formar una idea a nivel teórico de cuál sería el coste de una producción elevada del circuito. Gracias a ello, son más visibles los componentes que lastran el precio total del circuito y que deberían de ser sustituidos en caso de una producción en masa:

- **Potenciómetros:** El primer inconveniente es que no existen potenciómetros de 1200  $\Omega$  dentro de la gama de varias vueltas de precisión, condición que se desconocía hasta el desarrollo de este punto. Si existen modelos de menor precisión pero que no pueden adquirirse por unidades. Además, son potenciómetros muy caros, debería de analizarse el prototipo para saber si pueden sustituirse por otros de gama menor.
- **Conectores:** Los conectores atornillables resultan estar muy descompensados en precio para la función que cumplen. Sería recomendable encontrar una alternativa para intercambiar células.
- **Procesador y display LCD:** Son los dos componentes más caros de todo el diseño por ser prefabricados complejos. El display podría sustituirse por un 7 segmentos led si solamente se van a mostrar valores. El procesador es más complicado de sustituir, sobre todo manteniendo la función WiFi. Se podría usar un empaquetado más sencillo del ESP32.

### 4.6.2.3. Trazado PCB

A partir del circuito completo que hemos construido, con los componentes especificados, podemos generar en Eagle un primer paso a la PCB. Nos da un área de trabajo, de tamaño modificable, las huellas de cada componente y una red de Ratsnest, líneas que indican que un pad de conexión pertenece a un nudo determinado.

El objetivo principal es lograr que el circuito completo ocupe la menor área posible. Nos restringirán el largo de los conectores, el tamaño comparativamente elevado del ESP32 y los AI no integrados que hemos decidido utilizar. Además, se trazarán todas las rutas por una sola cara, para facilitar su fabricación. Recordar también que en ningún caso se pueden trazar giros de 90° en las pistas de un circuito impreso y que en PCBs se trabaja principalmente con milésimas de pulgada (mil).

Antes de comenzar con la distribución de componentes y el rutado, hay que concretar ciertos puntos sobre el circuito impreso:

- **Espesor:** El espesor del cobre de las diferentes rutas y pads. El mismo para todo el circuito. Será de 35  $\mu\text{m}$  que es el más habitual.
- **Clearance:** Distancia entre dos rutas de cobre, entre pad de conexión y pista o entre dos pads. Dependerá de la tensión entre pistas. Para aplicaciones de baja tensión (<15 V), el estándar IPC 2221 establece un mínimo de 0'1 mm o 4 mils, que será el utilizado.
- **Distancia borde-pistas:** El espacio libre que se deja en la PCB entre un conductor y el borde de la placa. Utilizamos el predeterminado en Eagle. Usamos el mínimo predefinido en Eagle de 40 mil.
- **Ancho de pista:** El ancho de cada una de las pistas de cobre. Se calcula:

$$A = \left( \frac{I}{0'048 \cdot \Delta T^{0'44}} \right)^{\frac{1}{0'725}} ; \quad W = \frac{A}{e}$$

En dónde:

I = Corriente máxima en amperios (A).

$\Delta T$  = Incremento de temperatura en °C

A = Área de la sección en mils<sup>2</sup>

e = Espesor de las pistas

W = Ancho de las pistas

Calculamos un espesor para la corriente hacia el ESP32, que incluye la alimentación del display LCD y otro espesor generalista para el resto del circuito basándonos en la corriente mayor hacia las células de carga.

Asumimos una diferencia de temperatura máxima de 20°C. Comprobamos resultados con una calculadora online.

$$I_{ESP32} \rightarrow W = \frac{\left(\frac{300 \cdot 10^{-3}}{0'048 \cdot 25^{0'44}}\right)^{\frac{1}{0'725}}}{0'3161} = 3'35 \text{ mil}$$
$$I_{gen} \rightarrow W = \frac{\left(\frac{10 \cdot 10^{-3}}{0'048 \cdot 25^{0'44}}\right)^{\frac{1}{0'725}}}{0'3161} = 0'03 \text{ mil}$$

Los anchos teóricos de las pistas son muy reducidos. Si se fabricasen por abrasión de cobre sería imposible mantenerlos. Por este motivo y por mejorar la visualización de las conexiones, se ha rutado a 12 mil las rutas generales y a 32 mil la ruta al ESP32.

En Eagle se pueden definir las restricciones de clearance y distancia en la herramienta "DRC" para que se tangan en cuanto automáticamente. El ancho de pista se define con "Route Airwire". Utilizamos una rejilla de 25 mil de lado de cuadro para ayudar a guiar el diseño. Se ha optado por no utilizar el autorutado y hacer todas las conexiones manualmente, un trabajo más lento pero que acabó dando mejor resultado.

Además del rutado, hay que incluir unos taladros extra para poder fijar la placa, para lo que se utilizarán tornillos de métrica 3 mm = 118'11 mil. Se indicarán con la herramienta "Hole", dejando cierta distancia de seguridad a los bordes de la placa y a las pistas.

Concluido el proceso, acabamos llegando al diseño final de distribución y rutado sobre la PCB:

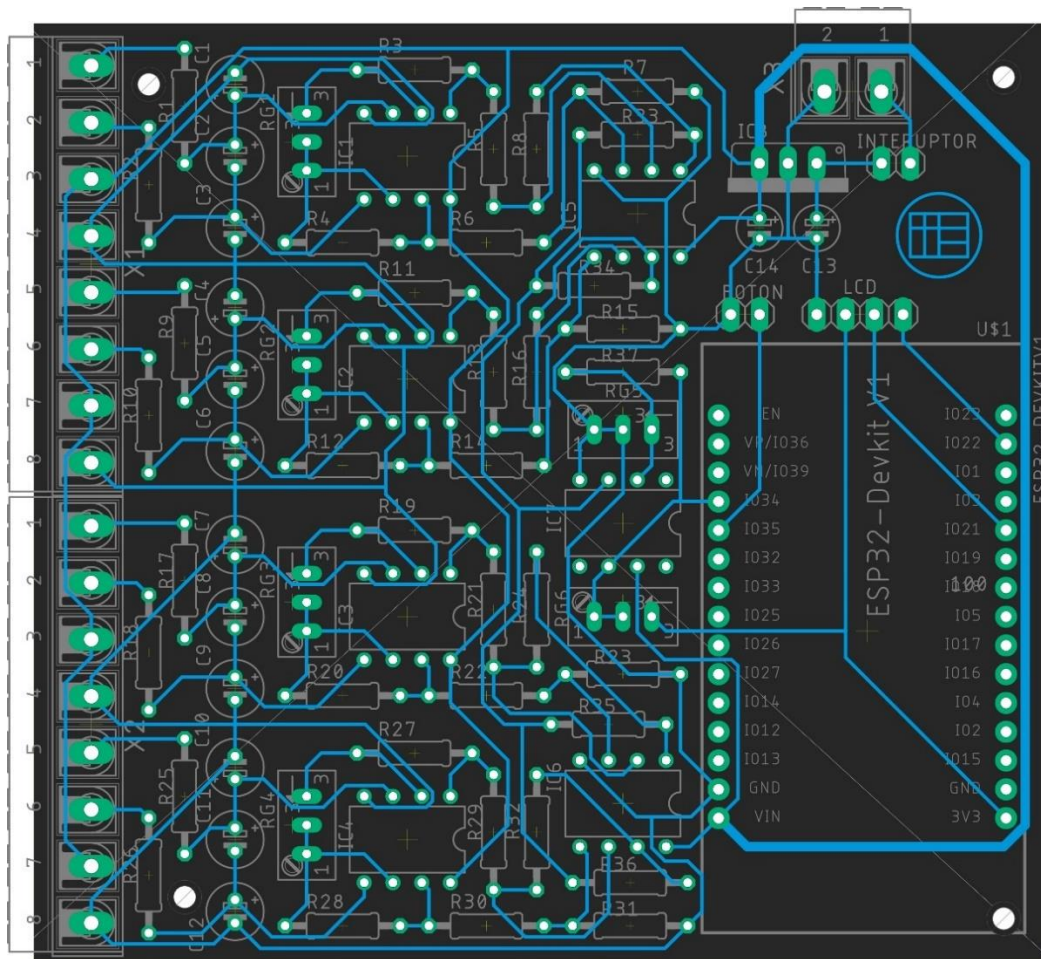


Ilustración 99: Diseño PCB

Los componentes están distribuidos, de izquierda a derecha, en conectores de células, filtros, parte diferencial AI, parte amplificadora AI y sumador; y conector de batería, regulador y procesador. Se ha logrado mantener todas las pistas en la misma cara. El tamaño mínimo que se ha conseguido es de 3'524 in (89'52 mm) de ancho por 3'262 in (82'262 mm) de alto. Conseguimos el dato exacto en la pestaña de Manufacturing. No servirá esta medida para diseñar su envoltente.

Con esto compeltto, se pueden exportar los archivos necesarios para la fabricabilidad, como los gerber (.gbr), el código G de taladrado y los negativos de cada una de las cpas de cobre, desde la pestaña de "Manufacturing" de manera automática.

## 4.7. Aproximación al montaje físico

En este apartado, haremos un ejercicio de diseño de una posible plataforma báscula que aloje todos los componentes anteriormente diseñados. Se realizará utilizando materiales adquiribles en el mercado y haciendo uso de las funcionalidades de Fusion360.

### 4.7.1. Modelado 3D del circuito

El primer paso para emprender un primer diseño de un posible prototipo físico es conseguir un modelo 3D fiable del circuito. Además, nos ayudará este modelo a visualizar el resultado final del diseño realizado sobre PCB.

En la pantalla PCB de Eagle se puede seleccionar en una pestaña a la derecha la opción de “Push to Fusion”, que nos genera un modelo 3D automáticamente. Este modelo utiliza los modelos de los componentes individuales según se hayan seleccionado.

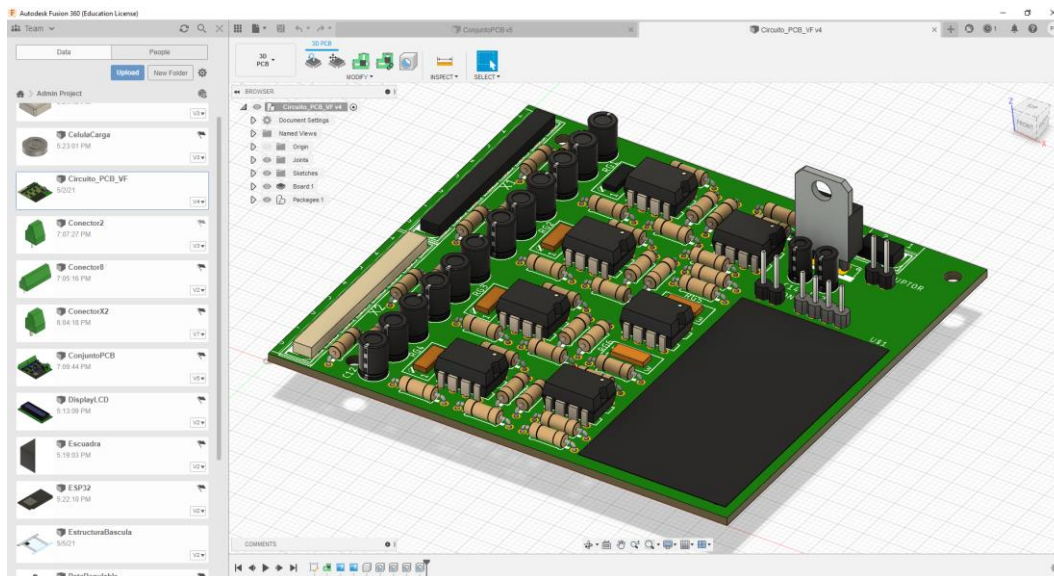


Ilustración 100: Modelo 3D automático Fusion360

Alguno de los componentes utilizados, los conectores potenciómetros y ESP32, no tienen un modelo 3D asociado. Modelamos una aproximación de estos componentes, precisa en las áreas que ocupan, pero inexacta en los detalles, y les asignamos materiales para completar el circuito. Con ello completo, podemos lanzar un render de nuestra PCB completa.

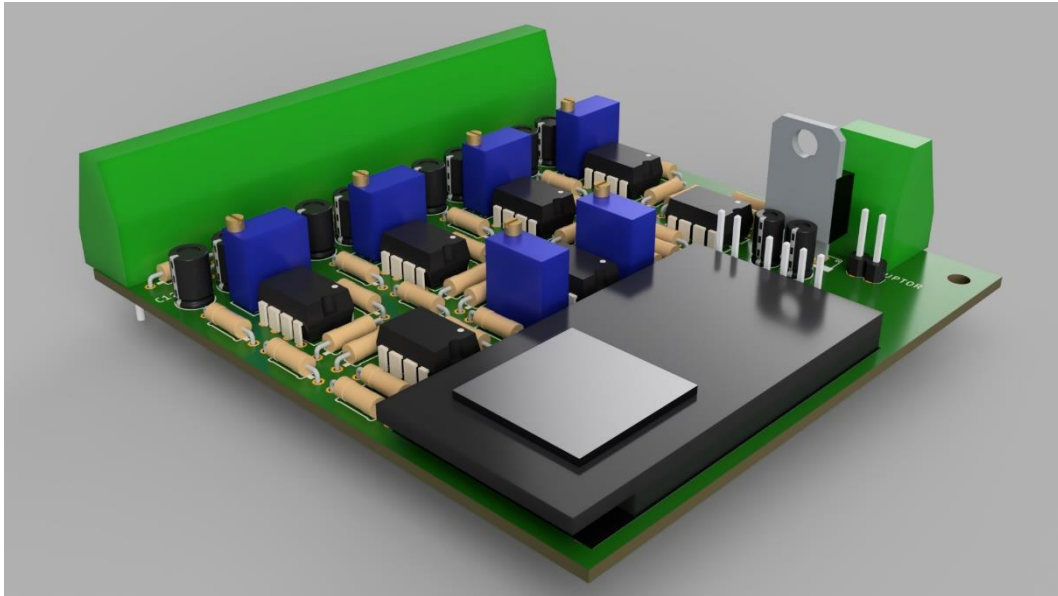


Ilustración 101: Render modelo 3D PCB

## 4.7.2. Diseño y modelado 3D de la plataforma

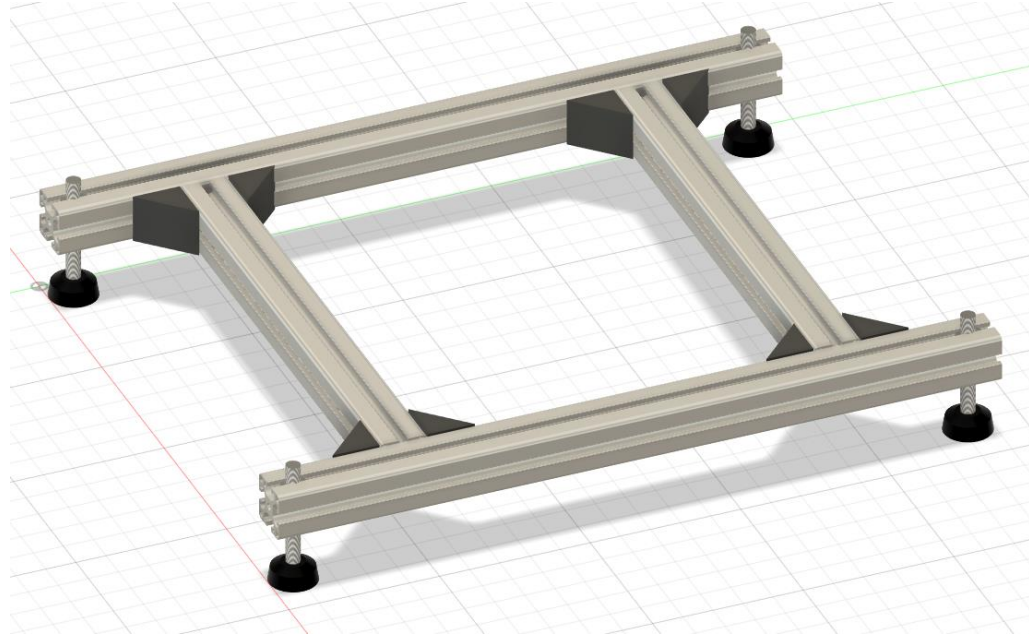
Con el modelo de PCB representado, pasamos a diseñar la plataforma que alojará a circuito y células. Las prioridades a seguir son dos: sencillez y escalabilidad. Para lo primero, buscaremos el menor número posible de componentes y la mayor facilidad en la fabricación. Lo segundo es el objetivo principal del sistema de pesado diseñado. Ya se ha logrado que a nivel de circuito acepte un rango amplio de células de carga, pero ahora debemos lograr que puedan intercambiarse en la propia plataforma, con el problema que nos plantea sus diferencias de diámetro.

### 4.7.2.1. Estructura base

Consiste en el armazón sobre el que sustentará el objeto a pesar y en el que colocaremos los dispositivos electrónicos. Para esta estructura, utilizaremos un perfil de aluminio ranurado de 40x40 mm, que nos aporta una buena resistencia y una considerable facilidad para fijar componentes mediante tornillos y tuercas, prescindiendo de soldadura en todo momento.

Así, podemos diseñar los siguientes componentes como módulos que se atornillen al perfil. Se formaría una base con dos perfiles de 600 mm con otros dos de 400 mm formando un cuadrado irregular. Los fijamos utilizando unas escuadras diseñadas para este tipo de perfiles.

Los extremos más largos los utilizamos para colocar cuatro patas ajustables por rosca. Sería necesario taladrar el perfil y se fijaría con sendas tuercas a cada lado, introducidas en la acanaladura. Permitirían regular la altura para nivelar la base.



*Ilustración 102: Estructura base*

### 4.7.2.2. Alojamiento de componentes electrónicos

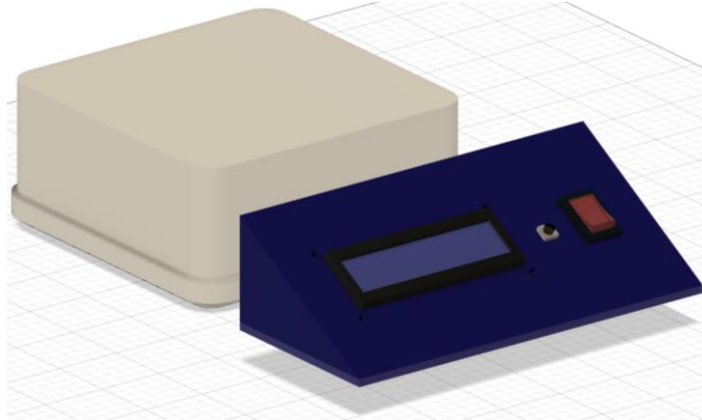
Se hace necesario proteger los componentes del circuito de instrumentación de las posibles inclemencias climáticas. La manera más sencilla de hacerlo es con una caja estanca de conexiones eléctricas, de las que se utilizarían en una instalación eléctrica.

La PCB tiene unas medidas de 89'52x82'86 mm, así que tenemos que pasarnos al orden siguiente de medidas del mercado. Esto es, 105x105 mm. Escogemos una caja estanca de Legrand con ese tamaño. La PCB iría atornillada a su interior y queda suficiente espacio para introducir y fijar en su interior también la batería.

Para colocar el display LCD, botón de tara e interruptor no queda otro remedio que diseñar una pieza propia. La creamos con una inclinación de 30° y una tapa para poder acceder a los componentes. Hacemos el diseño de este componente considerando que pueda ser fácilmente impreso en 3D.

Ambas partes se atornillarían en caras opuestas de uno de los perfiles de aluminio, usando las ranuras para fijarlos por tuercas. Los cables habrían de pasarse por un taladro central que atravesase el marco de aluminio.





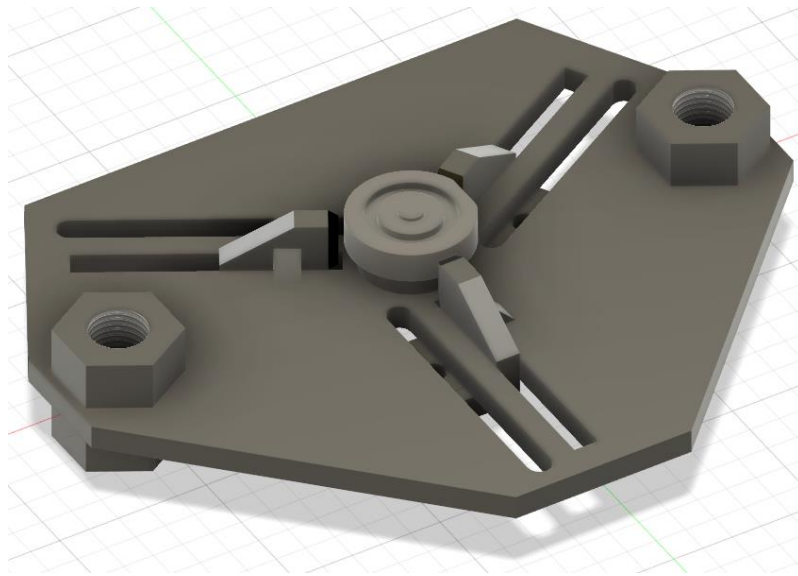
*Ilustración 103: Alojamiento dispositivos electrónicos*

#### 4.7.2.3. Células de carga

El problema a resolver en lo concerniente a las células de carga es que, para cumplir con la escalabilidad, deben de poder utilizarse varios modelos. Por lo general, a mayor capacidad, mayor diámetro. Así que hay que diseñar un sistema que permita fijar células de carga de distintos diámetros.

Tomamos inspiración de las mordazas utilizadas en los tornos. Con tres placas deslizantes dispuestas en triángulo equilátero podemos fijar la célula de carga por tres puntos. Las mordazas se desplazarían por raíles y se fijarían por tornillos en un raíl paralelo. El diámetro mínimo previsto es de unos 20 mm.

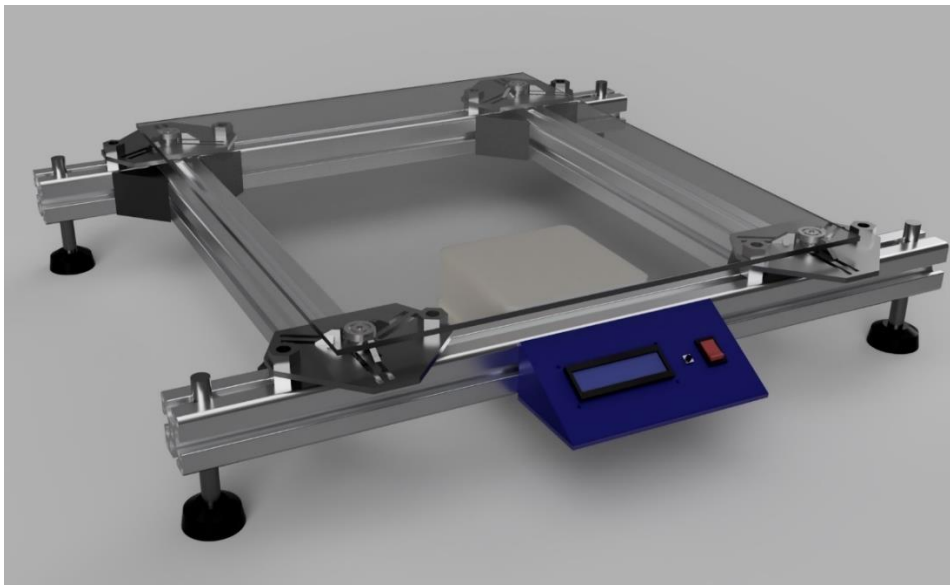
Esta estructura se fijaría después a los perfiles de aluminio en dos puntos. Esto también permitiría ajustar ligeramente la posición de las células. Estas piezas son las más complejas y necesitarían de una fabricación personalizada. Según están diseñadas, se pretende que sea posible recortarlas de una plancha de metal, incluyendo las mordazas. Estas últimas, deberían de ser dobladas para formar la pestaña por la que pasa el tornillo. Alternativamente, también es posible imprimir en 3D el diseño.



*Ilustración 104: Placa ajustable células de carga*

#### 4.7.2.4. Conjunto

Con todas las piezas fijadas, podemos asignarles materiales de Fusion para lanzar un render. Montamos todos los componentes en sus posiciones teóricas para mostrar una idea del diseño, importando todos los componentes diseñados con anterioridad al mismo espacio de trabajo. El render de este conjunto final es el que sigue.



*Ilustración 105: Render modelo 3D plataforma completa*

Como bandeja que colocar sobre las células de carga para depositar el objeto a medir y repartir su peso, sería posible utilizarse prácticamente cualquier lámina plana, cuadrada y firme de metal u otro material suficientemente resistente. Debido a los diámetros diferentes según las células de carga en uso, no es posible diseñar una alternativa que no cargue un peso extra innecesario sobre las células.

Podemos hacer un listado de materiales al uso de la “Bill of materials” del circuito, como lista de componentes indispensables y una aproximación al posible coste. De un solo perfil de aluminio de 2 m se pueden extraer las cuatro partes necesarias.

Plataforma PCB						
Componente	Modelo	Descripción/Tipo	Fabricante	Referencia Fabricante	Nº uds.	Coste 1 ud.
Perfil aluminio	40x40x2000mm	Cuadrado ranurado	RS Pro	761-3313	1	36,94
Escuadra			RS Pro	767-5695	6	7,53
Pata ajustable			RS Pro	185-4508	4	18,6
Caja estanca	105x105x55, IP55		Legrand	0 920 22	1	8,34
Tuerca M12					8	
Tornillo M10					12	
Tuerca M10					20	
Plancha metálica					1	
					Total	164,86
					Total+IVA	199,48

Tabla 8: Previsión componentes plataforma



## CONCLUSIONES

Por lo general, se considera que se han alcanzado los objetivos propuestos para este trabajo. El circuito diseñado responde correctamente en las simulaciones, por lo que se le supone un buen comportamiento en situaciones reales. La alimentación de las células tal cual está establecida nos asegura una salida predecible. Esta tensión de salida se encontrará dentro del rango de trabajo del amplificador, que es lo bastante amplio como para aceptar un buen número de diferentes células de carga. El comportamiento del amplificador es, según las simulaciones, lineal, y se mantiene en el rango de entrada del microcontrolador. Por estos motivos, consideramos que el objetivo de escalabilidad del sistema queda cumplido, puesto que la única pieza intercambiable serían las células de carga.

Un problema imprevisto que se atravesó en la fase de investigación. Y es que hay menos información de la esperada acerca del funcionamiento concreto de las células de carga comerciales. Los fabricantes aportan apenas nada, los libros sobre sensores y electrónica tienden a dar un caso general, y la gran mayoría de artículos sobre ellas son de casos avanzados. Así que el estudio se ha tenido que formar a partir de retazos de diversas fuentes.

En cuanto a posibles cambios, la mayoría se han pulido en las distintas iteraciones que ha recorrido el presente trabajo. Sí que podrían sustituirse los potenciómetros utilizados por unos de gama más baja, ya que es el componente que más lastra el precio del circuito impreso. De la misma forma, se podría trabajar para sustituir el devkit del ESP32 utilizado actualmente por otro modelo más pequeño y económico. Esto requeriría de un rediseño de la PCB, la posible inclusión de un segundo regulador y replantear el código.

En el espacio del software, restarían pruebas con una señal real. Existe también la posibilidad de profundizar más en el diseño de aplicaciones y utilizar Android Studio. Con ello se pudiera llegar a una aplicación más compleja y de acabado más profesional, pero para el ámbito de pruebas y para un uso sencillo, el App Inventor es una elección suficiente.

Por último, la vía de futuro que debiera tomar este proyecto es la construcción de un prototipo sobre el que comprobar el funcionamiento real, la validez del diseño físico y descubrir problemas diversos que deban solucionarse en una nueva versión. Sin embargo, dado que el objetivo final era el diseño, se considera que la construcción del prototipo real escapa al trabajo.

En resumen, se considera que se han cumplido los objetivos principales, aunque hay espacio para la mejora. Este tipo de diseños suponen realmente una sola de las múltiples soluciones que pudiera tener el problema planteado, pero la escogida y aquí presentada aporta al campo un resultado concluyente.



## BIBLIOGRAFÍA

### 1. Libros

- Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras de la Universidad de Valladolid. (2014). *Apuntes para una breve introducción a la Resistencia de Materiales y temas relacionados*. Universidad de Valladolid
- Callister, William D. Jr. (1995). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté.
- Granda Miguel, Mercedes y Mediavilla Bolado, Elena. (2010). *Instrumentación electrónica: transductores y acondicionadores de señal*. Universidad de Cantabria.
- Pallás Areny, Ramón. (2005). *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo.
- Regtien, P.P.L. (2005). *Electronic instrumentation*. VSSD.
- Tanenbaum, Andrew S. and Wetherall, David J. (2010). *Computer networks*. Prentice Hall.
- Webster, John G. and Eren, Halit. (2014). *Measurement, instrumentation, and sensors handbook*. CRC Press.

### 2. Artículos y pdf online

- Alzate Rodríguez, Edwin Jhovany; Montes Ocampo, Jose William; Silva Ortega, Carlos Armando. (2007). *Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas*.  
[https://www.researchgate.net/publication/26544250\\_Medidores\\_de\\_deformacion\\_por\\_resistencia\\_galgas\\_extensiometricas](https://www.researchgate.net/publication/26544250_Medidores_de_deformacion_por_resistencia_galgas_extensiometricas)
- Quiles-Latorre, Francisco J.; Moreno-Moreno, Carlos D.; Moreno-García, Isabel M.; Olmedo-Rivera, José A.; Ortiz-López, Manuel A. (2018). *Diseño del interfaz de una balanza electrónica basada en una celda de carga*.  
[https://www.researchgate.net/publication/326508615\\_Disenio\\_del\\_in\\_terfaz\\_de\\_una\\_balanza\\_electronica\\_basada\\_en\\_una\\_celda\\_de\\_carga](https://www.researchgate.net/publication/326508615_Disenio_del_in_terfaz_de_una_balanza_electronica_basada_en_una_celda_de_carga)
- Russel, Aravind; Karda, Jugal; Jain, Piyush; Kale, Shalmali; Khaire, Pallavi. (2016). *Simulation and Experimental Study for Selection of Gauge Area CrossSection of 'S' Type Load Cell*.  
<https://www.irjet.net/archives/V3/i4/IRJET-V3I4258.pdf>

Texas Instruments. (2013). AN-1031 TIA/EIA-422-B overview. <https://www.ti.com/lit/an/snla044b/snla044b.pdf>

Texas Instruments. (2008). Interface Circuits for TIA/EIA-485 (RS-485). <https://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>

Texas Instruments. (2002). Interface circuits for TIA/EIA-232-F. [https://www.ti.com/lit/an/slla037a/slla037a.pdf?ts=1610055971190&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/slla037a/slla037a.pdf?ts=1610055971190&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F)

Texas Instruments. (2010). RS-422 and RS-485 Standards Overview and System Configurations. <https://www.ti.com/lit/an/slla070d/slla070d.pdf>

### 3. Páginas web

Android Studio. (2021). <https://developer.android.com/studio>

Autodesk Eagle. (2021). Essentials for EAGLE Beginners. [https://www.youtube.com/watch?v=bw08TY4Vtw&list=PL1rOC5j\\_Fyi6ZP1vB\\_WyQFxpJ7d8T\\_BxoB](https://www.youtube.com/watch?v=bw08TY4Vtw&list=PL1rOC5j_Fyi6ZP1vB_WyQFxpJ7d8T_BxoB)

Bluetooth. (2021). Learn about Bluetooth. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/>

Bosche. (2021). Load cells from Bosche. <https://www.bosche.eu/en/scale-components/load-cells>

Desmith. (2018). ANSI IPC-2221A PCB Trace Width Calculator. <https://www.desmith.net/NMdS/Electronics/TraceWidth.html>

DITIOT. (2021). What is the best battery for the ESP32? <https://diyi0t.com/best-battery-for-esp32/#:~:text=In%20summary%20a%20LiFePO4%20battery,on%20the%203.3V%20pin.>

Espressif. (2021). Analog to Digital Converter. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>

Espressif. (2020). ESP8266EX Datasheet. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf)

HBM. (2021). ¿Cómo funciona una célula de carga de flexión tipo barra? <https://www.hbm.com/es/2973/como-funciona-una-celula-de-carga-tipo-barra/?gclid=EAlaQo>



- Instrumentation Tools. (2021). *Hydraulic Load Cell Principle*. <https://instrumentationtools.com/hydraulic-load-cell-principle/>
- MIT App Inventor. (2021). <https://appinventor.mit.edu/>
- Mozilla. (2021). Referencia de Elementos HTML. <https://appinventor.mit.edu/>
- Mozilla. (2021). Referencia de Elementos HTML. <https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/HTML/Element>
- Mundo básculas. (2019). *Básculas industriales*. <https://www.mundobasculas.com/91-basculas-industriales>
- Omega. (2021). *¿Qué es una célula de carga y cómo funciona?* <https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html#>
- Sánchez, Carlos. (2020). Referencias APA. Normas APA. <https://normas-apa.org/referencias/>
- Santos, Rui. (2018). *How to Set an ESP32 Access Point (AP) for Web Server*. <https://randomnerdtutorials.com/esp32-access-point-ap-web-server/>
- Sensorland. (2021). *How they work Load/Force cells*. <https://www.sensorland.com/HowPage005.Html>

## 4. Productos

### 4.1. Básculas

- Dini Argeo. (s.f.). *Accesorios*. <http://www.diniargeo.es/lst/basculas-y-balanzas/pesaje-de-ejes-y-vehiculos/plataformas-y-visores/accesorios-wws-es.aspx>
- Dini Argeo. (s.f.). *Plataformas inalámbricas*. <http://www.diniargeo.es/lst/basculas-y-balanzas/pesaje-de-ejes-y-vehiculos/plataformas-y-visores/plataformas-inalmbricas-es.aspx>
- Dini Argeo. (s.f.). *Touch screen 5,7"*. <http://www.diniargeo.es/prd/basculas-y-balanzas/visores-de-peso/pantalla-tactil-serie-3590-1/touch-screen-57-es/3590etkr-es.aspx>
- Expondo. (s.f.). *Dinamómetro digital - 3 t / 1 kg - LED*. [https://www.expondo.es/steinberg-systems-dinamometro-digital-3-t-1-kg-led-10030084?gclid=EAlaIQobChMIpsjuqYiu7wIVVe7tCh0kXwM2EAYYAyABEgLMIPD\\_BwE](https://www.expondo.es/steinberg-systems-dinamometro-digital-3-t-1-kg-led-10030084?gclid=EAlaIQobChMIpsjuqYiu7wIVVe7tCh0kXwM2EAYYAyABEgLMIPD_BwE)

- Flintec. (s.f.). GRAM K2 XBENGAL. <https://flintec.es/serie-k2-xb.html>
- Giropes. (2020). Plataformas pesa ruedas. <https://static.giropes.com/public/docs/10403/plataformas-pesaruedas-es-np-2020.pdf>
- Giropes. (2020). GI620 Indicador maleta portátil. <https://static.giropes.com/public/docs/10229/gi620-es.pdf>
- Gram Group. (s.f.). GRAM PR. <https://gram-group.com/es/product/gram-pr/>
- Gram Group. (s.f.). INDICADOR GRAM MK3. <https://gram-group.com/es/product/indicador-gram-mk3/>
- HKM Messtechnik. (s.f.). <https://www.hkm-messtechnik.com/en/download-area>
- Jungheinrich. (s.f.). Transpaleta pesadora BASIC. <https://www.jungheinrich-profishop.es/Transpaleta-pesadora-BASIC-24442-171132/?categoryId=57059-es-es>
- Mettler Toledo. (s.f.). Báscula avanzada ICS465. [https://www.mt.com/es/es/home/products/Industrial\\_Weighing\\_Solutions/bench-scales/bench-scale/high-resolution/ICS465.html?smartRedirectEvent=true#documents](https://www.mt.com/es/es/home/products/Industrial_Weighing_Solutions/bench-scales/bench-scale/high-resolution/ICS465.html?smartRedirectEvent=true#documents)
- Mundo Básculas. (s.f.). Barras Pesadoras en acero pintado Serie ZFI más precisas. [https://www.mundobasculas.com/barras-pesadoras/550-barras-pesadoras-en-acero-pintado-serie-zfi-con-indicador-br15-capacidades-2000kg-y-3000kg.html#/45-referencias-zfi802\\_800x105mm\\_y\\_2000kg/769-certificados-ninguno](https://www.mundobasculas.com/barras-pesadoras/550-barras-pesadoras-en-acero-pintado-serie-zfi-con-indicador-br15-capacidades-2000kg-y-3000kg.html#/45-referencias-zfi802_800x105mm_y_2000kg/769-certificados-ninguno)
- Obelink. (s.f.). Reich balanza para caravana. [https://www.obelink.es/reich-balanza-para-caravana.html?gclid=EAlaIQobChMI7IHcuf2o7wIVzOvtCh34kgJ2EAYYAyABEgKzR\\_D\\_BwE](https://www.obelink.es/reich-balanza-para-caravana.html?gclid=EAlaIQobChMI7IHcuf2o7wIVzOvtCh34kgJ2EAYYAyABEgKzR_D_BwE)
- PCE Instruments. (s.f.). Balanza cuentapiezas PCE-TB 6C. [https://www.pce-instruments.com/espanol/balanza/balanza/balanza-cuentapiezas-pce-instruments-balanza-cuentapiezas-pce-tb-6c-det\\_2152367.htm?list=kat&listpos=3](https://www.pce-instruments.com/espanol/balanza/balanza/balanza-cuentapiezas-pce-instruments-balanza-cuentapiezas-pce-tb-6c-det_2152367.htm?list=kat&listpos=3)
- Puchades y Gimeno. (s.f.). PGMM con Rampas. <https://www.puchadesgimeno.com/bascula-puente-camiones-basculas-pgmm-con-rampas/>

## 4.2. Células de carga

Bosche. (s.f.). *S-Type load cell S21S*. <https://www.bosche.eu/en/scale-components/load-cells/s-type-load-cell/s-type-load-cell-s21s>

Bosche. (s.f.). *Pancake Load cell V70N*. <https://www.bosche.eu/en/scale-components/load-cells/ring-torsion-load-cell/pancake-load-cell-v70n>

Eilersen. (s.f.). *ATEX Compression Load Cell DLA*. <https://www.eilersen.com/compression-load-cell/product/atex-compression-load-cell-dla/>

Eilersen. (s.f.). *Digital Compression Load Cell - Type DL*. [https://www.eilersen.com/uploads/pics/Digital\\_Compression\\_Load\\_Cell\\_Type\\_DL\\_Datasheet.pdf](https://www.eilersen.com/uploads/pics/Digital_Compression_Load_Cell_Type_DL_Datasheet.pdf)

Flintec. (s.f.). *Célula De Carga Tipo Viga SB8 (10 - 500kg)*. <https://www.flintec.com/es/sensores-de-peso/celulas-de-carga/viga/sb8>

Flintec. (s.f.). *MK button force transducer*. <https://www.flintec.com/media/downloads/mk-datasheet-en-1.pdf>

Geosense. (s.f.). *Hydraulic Load Cell HLC-6050 Series*. [https://www.geosense.co.uk/media/ProductDatasheet/194/file/Load\\_CellHydraulic6050SeriesV1.1.pdf](https://www.geosense.co.uk/media/ProductDatasheet/194/file/Load_CellHydraulic6050SeriesV1.1.pdf)

Mettler Toledo. (s.f.). *RLC Load Cell Downloads*. [https://www.mt.com/id/en/home/library/datasheets/industrial-scales/RLC\\_DL.html](https://www.mt.com/id/en/home/library/datasheets/industrial-scales/RLC_DL.html)

Omega. (s.f.). *19 mm (0.75") diameter subminiature tension or compression load cells standard and metric model*. <http://www.farnell.com/datasheets/2921283.pdf>

Omega. (s.f.). *19 mm (0.75") diameter stainless steel compression load cell standard and metric models*. <http://www.farnell.com/datasheets/2921284.pdf>

TE Connectivity. (s.f.). *FC22 Compression Load Cell*. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FFC22%7FA5%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_FC22\\_A5.pdf%7FFC2201-0000-0100-L#:~:text=The%20FC22%20is%20a%20medium,span%20with%20respect%20to%20temperature.](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FFC22%7FA5%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_FC22_A5.pdf%7FFC2201-0000-0100-L#:~:text=The%20FC22%20is%20a%20medium,span%20with%20respect%20to%20temperature.)

TE Connectivity. (s.f.). *FC23 Compression Load Cell*. <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Acti>

[on=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FFC23%7FA7%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_FC23\\_A7.pdf%7FFC2301-0000-0100-L](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FFC23%7FA7%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_FC23_A7.pdf%7FFC2301-0000-0100-L)

TE Connectivity. (s.f.). *FC29 Compact Compression Load Cell*. [https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FFX29%7FA5%7Fpdf%7FEnglish%7FENG\\_DS\\_FX29\\_A5.pdf%7FCAT-FSE0006](https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FFX29%7FA5%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_FX29_A5.pdf%7FCAT-FSE0006)

Utilicell. (s.f.). *Modelo 460*. <https://www.utilicell.es/celula-de-carga/celula-de-carga-modelo-460/>

Zemic Europe. (s.f.) *Célula de carga H8C*. [https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/H8C\\_Datasheet-ES.pdf](https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/H8C_Datasheet-ES.pdf)

Zemic Europe. (s.f.). *L6P aluminium planar beam, OIML approved (22-110kg)*. <https://www.zemiceurope.com/en/categories/load-cells/planar-beam-load-cells/l6p.html>

Zemic Europe. (s.f.) *Type BM24R Load Cell*. [https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/BM24R\\_Datasheet.pdf](https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/BM24R_Datasheet.pdf)

## 4.3. Componentes

### 4.3.1. Amplificadores operacionales/de instrumentación

Texas Instruments. (2005). *Fast-Settling FET-Input instrumentation amplifier*. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina110.pdf?ts=1618059332990&ref\\_url=https://www.ti.com/product/INA110](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina110.pdf?ts=1618059332990&ref_url=https://www.ti.com/product/INA110)

Texas Instruments. (1998). *High Accuracy instrumentation amplifier*. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina101.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620730619481&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina101.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620730619481&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F)

Texas Instruments. (2014). *LMx58-N Low-Power, Dual-Operational Amplifiers*. [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358-n.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620731586157&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm358-n.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620731586157&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F)

Texas Instruments. (2015). *LM741 Operational Amplifier*. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm741.pdf>

### 4.3.2. Diodos Zener

Multicomp Pro. (2020). IN4733A Zener diode.  
<http://www.farnell.com/datasheets/2895471.pdf>

Philips. (1996). BZD23 series Voltage regulator diodes.  
<https://www.datasheetarchive.com/pdf/download.php?id=55d63d7c776cf8cc654aa35dfd383f78964e01&type=M&term=bzd23c5v1>

Vishay. (2019). 1N5221 to 1N5267 Small Signal Zener Diodes.  
<https://www.mouser.es/datasheet/2/427/1n5221-1767759.pdf>

Vishay. (2019). BZX55-Series Small Signal Zener Diodes.  
<https://www.mouser.es/datasheet/2/427/bzx55-1767760.pdf>

Vishay. (2019). TZX-Series Small Signal Zener Diodes.  
<https://www.mouser.es/datasheet/2/427/tzxserie-1767901.pdf>

### 4.3.3. Reguladores de tensión

STMicroelectronics. (2018). L78 Positive voltage regulator ICs.  
<https://www.mouser.es/datasheet/2/389/cd00000444-1795274.pdf>

STMicroelectronics. (2019). LM217, LM317 1.2 V to 37 V adjustable voltage regulators.  
<https://www.mouser.es/datasheet/2/389/cd00000455-1795522.pdf>

Texas Instruments. (2015).  $\mu$ A78xx Fixed Positive Voltage Regulators.  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua78.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620723461542&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ua78.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620723461542&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.de%252F)

Texas Instruments. (2020). LM117, LM317-N Wide Temperature Three-Pin Adjustable Regulator.  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317-n.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620673033047&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.co.il%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm317-n.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620673033047&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.co.il%252F)

Texas Instruments. (2016). LM340, LM340A and LM7805 Family Wide VIN 1.5-A Fixed Voltage Regulators.  
[https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620734892995&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm340.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1620734892995&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F)

#### 4.3.4. Baterías

Ansmann. (s.f.). 2447-3030-20. <https://es.farnell.com/anmann/2447-3030-20/bater-a-li-ion-7-4v-3-45ah/dp/2777015>

Ansmann. (s.f.). 2447-3031-20. <https://es.farnell.com/anmann/2447-3031-20/bater-a-li-ion-11-1v-3-45ah/dp/2777017>

Duracell. (s.f.). MX1604. <https://docs.rs-online.com/97ce/0900766b8135a4c4.pdf>

EBL. (s.f.). EBL 600mAh 9V 6F22 Batería Recargable de Iones de Litio con Cargador de batería de 9V. <https://www.amazon.es/EBL-Bater%C3%ADa-Recargable-Cargador-bater%C3%ADa/dp/B00EYYRLVO>

Multicomp Pro. (2021). Non-rechargeable Alkaline Battery 6LR61/9V Size. <http://www.farnell.com/datasheets/3179015.pdf>

RS. (s.f.). Pila 9V de Dióxido de Manganeso-Litio, 1.2Ah, terminal. <https://es.rs-online.com/web/p/pilas-de-9v/7845992/>

RS. (s.f.). Pila 9V recargable NiMH, 200mAh, terminal. <https://es.rs-online.com/web/p/pilas-9v-recargables/0199646/>

RS. (s.f.). Pila recargable 26650 de Fosfato de litio, 3.2V, 3.3Ah, terminal plano. [https://es.rs-online.com/web/p/baterias-recargables-de-tamanos-especiales/8183009/?cm\\_mmc=ES-PLA-DS3A\\_-google\\_-CSS\\_ES\\_ES\\_Pilas\\_%26\\_Bater%C3%ADas\\_y\\_Cargadores\\_Whoop\\_-\(ES:Whoop!\)+Bater%C3%ADas+Recargables+de+Tama%C3%B1os+Espeiales\\_-8183009&matchtype=&aud-821594433763:pla-341957035414&gclid=EAlaIqObChMIpovH5oyK8AIVjZntCh0mBwpbEAQYASABEgIHLvD\\_BwE&gclid=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/baterias-recargables-de-tamanos-especiales/8183009/?cm_mmc=ES-PLA-DS3A_-google_-CSS_ES_ES_Pilas_%26_Bater%C3%ADas_y_Cargadores_Whoop_-(ES:Whoop!)+Bater%C3%ADas+Recargables+de+Tama%C3%B1os+Espeiales_-8183009&matchtype=&aud-821594433763:pla-341957035414&gclid=EAlaIqObChMIpovH5oyK8AIVjZntCh0mBwpbEAQYASABEgIHLvD_BwE&gclid=aw.ds)

RS. (s.f.). Pila recargable 53.5 x 35 x 10.4 mm de Polímero de Litio, 3.7V, 1.8Ah, terminación en cable. [https://es.rs-online.com/web/p/baterias-recargables-de-tamanos-especiales/1449405/?cm\\_mmc=ES-PLA-DS3A\\_-google\\_-PLA\\_ES\\_ES\\_Pilas\\_%26\\_Bater%C3%ADas\\_y\\_Cargadores\\_Whoop\\_-\(ES:Whoop!\)+Bater%C3%ADas+Recargables+de+Tama%C3%B1os+Espeiales\\_-1449405&matchtype=&aud-827186183886:pla-333331382340&gclid=EAlaIqObChMImdDkr4-K8AIVoIBQBh2kkgx-EAQYASABEgJsLvD\\_BwE&gclid=aw.ds](https://es.rs-online.com/web/p/baterias-recargables-de-tamanos-especiales/1449405/?cm_mmc=ES-PLA-DS3A_-google_-PLA_ES_ES_Pilas_%26_Bater%C3%ADas_y_Cargadores_Whoop_-(ES:Whoop!)+Bater%C3%ADas+Recargables+de+Tama%C3%B1os+Espeiales_-1449405&matchtype=&aud-827186183886:pla-333331382340&gclid=EAlaIqObChMImdDkr4-K8AIVoIBQBh2kkgx-EAQYASABEgJsLvD_BwE&gclid=aw.ds)

RS. (s.f.). Batería recargable de Ión-Litio, 7.4V, 2.6Ah, 2 celdas 37 x 69 x 19 mm, terminación en cable. <https://es.rs-online.com/web/p/baterias-recargables/1449410/>

- Panasonic. (2006). CR2032.  
<http://www.farnell.com/datasheets/2059961.pdf>
- Panasonic. (2005). HHR150AA.  
[https://www.mouser.es/datasheet/2/315/3515\\_fileversion-1627253.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/315/3515_fileversion-1627253.pdf)
- Panasonic. (s.f.). PA-L28. <http://www.farnell.com/datasheets/1441766.pdf>
- Saft. (s.f.). *Pila 9V de Cloruro de Tionilo-Litio, 1.2Ah, terminal.* <https://es.rs-online.com/web/p/pilas-de-9v/7781129/>
- Turnigy. (s.f.). Turnigy 3000mAh 3S 20C Lipo Pack w/XT-60.  
[https://hobbyking.com/es\\_es/turnigy-battery-3000mah-3s-20c-lipo-pack-xt-60.html](https://hobbyking.com/es_es/turnigy-battery-3000mah-3s-20c-lipo-pack-xt-60.html)
- Ultra Life. (2013). *U9VL-J-P Technical Datasheet.* <https://docs.rs-online.com/fabf/0900766b81549eff.pdf>
- Varta. (s.f.). 55123505012.  
<https://es.farnell.com/varta/55123505012/pack-de-bater-as-nimh-aa-1800/dp/2082838>
- Zippy. (s.f.). ZIPPY Compacto 2200mAh 3S Lipo 25C Paquete.  
[https://hobbyking.com/es\\_es/zippy-compact-2200mah-3s-25c-lipo-pack.html](https://hobbyking.com/es_es/zippy-compact-2200mah-3s-25c-lipo-pack.html)
- Zippy. (s.f.). ZIPPY compacto 850mAh Lipo 2S 25C Paquete.  
[https://hobbyking.com/es\\_es/zippy-compact-850mah-2s-25c-lipo-pack.html](https://hobbyking.com/es_es/zippy-compact-850mah-2s-25c-lipo-pack.html)
- ZOP Power. (s.f.). *ZOP Potencia 7.4V 1500mAh 40C 2S Batería de Lipo XT60 Enchufe.* [https://es.banggood.com/ZOP-Power-7\\_4V-1500mAh-40C-2S-Lipo-Battery-XT60-Plug-p-1085890.html?cur\\_warehouse=CN&rmmds=search](https://es.banggood.com/ZOP-Power-7_4V-1500mAh-40C-2S-Lipo-Battery-XT60-Plug-p-1085890.html?cur_warehouse=CN&rmmds=search)

#### 4.3.5. Procesadores

- Arduino. (s.f.). Arduino Nano. <https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- Arduino. (s.f.). Arduino Yún Rev 2. <https://store.arduino.cc/arduino-yun-rev-2>
- Espressif. (2021). ESP32 Series Datasheet.  
[https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf)

### 4.3.6. Componentes pasivos

Bourns. (2019). *3/8" Square trimpot trimming potentiometer*. <https://www.mouser.es/datasheet/2/54/3296-776415.pdf>

Nichicon. (s.f.). *Aluminum electrolytic capacitors miniature sized*. [https://www.mouser.es/datasheet/2/293/e\\_uvr-1889929.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/293/e_uvr-1889929.pdf)

Panasonic. (2020). *Aluminum electrolytic capacitors radial lead type*. <https://www.mouser.es/datasheet/2/315/ABA0000C1024-947657.pdf>

Yageo. (2020). *Metal film resistors general type normal & miniature style [MFR series]*. [https://www.mouser.es/datasheet/2/447/Yageo\\_LR\\_MFR\\_1-1714151.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/447/Yageo_LR_MFR_1-1714151.pdf)

Yageo. (2020). *Metal film resistors profesional type normal & miniature style [MFO series]*. [https://www.mouser.es/datasheet/2/447/yago\\_s\\_a0009380273\\_1-2286683.pdf](https://www.mouser.es/datasheet/2/447/yago_s_a0009380273_1-2286683.pdf)

### 4.3.7. Otros

Midas. (2016). *MC21605C6W-BNMLWI-V2 2x16 5mm Character Height LCD Module*. <http://www.farnell.com/datasheets/2825693.pdf>

RS. (s.f.). *Datasheet Profile 8 40x40 light*. <https://docs.rs-online.com/fb5b/0900766b8157c300.pdf>

RS. (s.f.). *Soporte de conector RS Pro y soporte de ángulo de junta, perfil de montante 40 x 40 x 40 mm, tamaño de ranura 8mm*. <https://docs.rs-online.com/786e/A700000007512408.pdf>

RS. (s.f.). *Stainless Steel Plastic Levelling Feet*. <https://docs.rs-online.com/fb5b/0900766b8157c300.pdf>

RS. (2012). *Plexo junction boxes*. <https://docs.rs-online.com/b8f6/0900766b81666b92.pdf>