

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y AUTOMÁTICA
INDUSTRIAL



**"DISEÑO, FABRICACIÓN Y PUESTA EN MARCHA
DE UNA BÁSCULA INDUSTRIAL PARA EL
CÁLCULO DEL CENTRO DE GRAVEDAD "**

TRABAJO FIN DE GRADO

FEBRERO -2026-

AUTOR: MARIO GONZÁLEZ CANDELA

DIRECTOR: JOSE ANTONIO PALAZON SELVA



A todas las personas que, de una manera u otra, han estado siempre a mi lado durante este camino. Por haberme apoyado en cada una de las decisiones que he tomado.

Ahora que esto se acaba, se lo dedico a todas ellas, porque es suyo, por todo el cariño, y la confianza que han depositado en mí. Incluyo también a mi tía que es una crack y me ha ayudado un montón.

Gracias a mi tutor, J.A. Palazón, por tu paciencia, tu comprensión, y por todos los conocimientos que me has transmitido durante este proceso.

Aunque nada de esto sería posible sin mis padres, Ana y Daniel, a los que les estaré siempre agradecido por invertir en mi futuro y por cómo me han educado.

Gracias.



Resumen

Este Trabajo de Fin de Grado describe el diseño, fabricación y puesta en marcha de una báscula industrial de bajo coste para la determinación experimental del centro de gravedad de objetos, con aplicación directa en la verificación de satélites de formato CubeSat.

El sistema se basa en el principio de equilibrio estático. Una plataforma instrumentada con cuatro células de carga recibe las fuerzas ejercidas por el objeto de ensayo. Las señales son acondicionadas, digitalizadas y procesadas mediante un microcontrolador Arduino y un software desarrollado en Python, que calcula las coordenadas del centro de gravedad en dos y tres dimensiones. Además, dicho software permite mostrar los resultados en una interfaz gráfica intuitiva y la exportación de datos.

El diseño mecánico ha sido optimizado mediante simulación por elementos finitos, combinando mecanizado convencional e impresión 3D para garantizar rigidez estructural a bajo coste. La calibración con masas patrón y la validación experimental han demostrado que el sistema cumple holgadamente los requisitos de precisión exigidos por la normativa CubeSat.

El coste de materiales del prototipo es bastante inferior en comparación a los dispositivos comerciales existentes, lo que permite obtener una gran capacidad de ahorro. Esta excepcional relación coste-prestaciones, unida a la autonomía tecnológica y la capacidad de personalización que ofrece, justifica plenamente la viabilidad del desarrollo.

Se trata, en definitiva, de un instrumento de metrología funcional, fiable y estratégicamente valioso, directamente transferible a entornos empresariales de I+D y fabricación.



Abstract

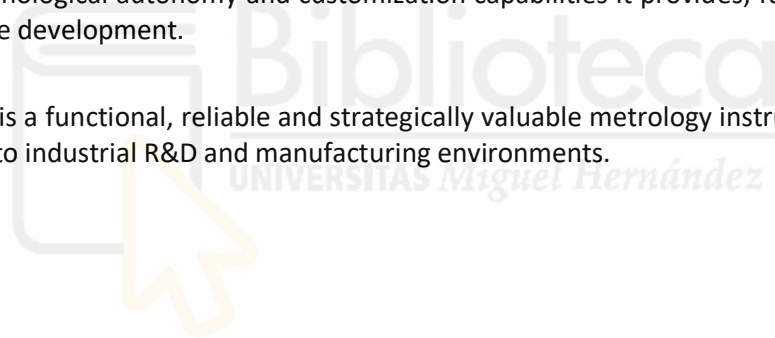
This Final Degree Project describes the design, manufacturing and commissioning of a low-cost industrial scale for the experimental determination of the center of gravity of objects, with direct application in the verification of CubeSat format satellites.

The system is based on the principle of static equilibrium. A platform instrumented with four load cells acquires the forces exerted by the object under test. The signals are conditioned, digitized and processed by an Arduino microcontroller and custom software developed in Python, which calculates the center of gravity coordinates in two and three dimensions, displays the results through an intuitive graphical interface, and allows data export.

The mechanical design has been optimized through finite element simulation, combining conventional machining and 3D printing to ensure structural rigidity at low cost. Calibration with reference masses and experimental validation have demonstrated that the system comfortably meets the accuracy requirements established by the CubeSat standard.

The material cost of the prototype is significantly lower compared to existing commercial devices, enabling substantial cost savings. This exceptional cost-performance ratio, together with the technological autonomy and customization capabilities it provides, fully justifies the viability of the development.

In short, this is a functional, reliable and strategically valuable metrology instrument, directly transferable to industrial R&D and manufacturing environments.





ÍNDICE

Resumen.....	5
Abstract.....	7
Indice de contenidos.....	9
Indice de figuras.....	12
Indice de tablas.....	12
1.INTRODUCCIÓN	13
1.1. Contexto y Justificación del Proyecto.....	13
1.2. Objetivos Generales y Específicos del TFG	13
2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL CENTRO DE GRAVEDAD Y SISTEMAS DE MEDIDA.....	15
2.1. Definición y Conceptos de Centro de Masa y Centro de Gravedad	15
2.2. Principios Físicos de Equilibrio Estático y Momentos	15
2.3. Métodos de Determinación del Centro de Gravedad	17
2.3.1. Métodos Analíticos (CAD)	17
2.3.2. Métodos Experimentales (Pesaje Multicelda, Péndulo, etc.)	17
2.4. Arquitectura del sistema de medida.....	18
2.5. Sensórica Aplicada: Células de Carga y su Funcionamiento	18
2.5.1. Tipos de Células de Carga (flexión, cizallamiento, compresión)	18
2.5.2. Principio del Puente de Wheatstone	20
2.5.3. Precisión, Linealidad, Histéresis y Clase de Precisión	20
2.6. Electrónica de Adquisición de Datos (ADCs, Amplificadores)	21
2.7. Software de Procesamiento y Cálculo	21
3. ESTUDIO DE MERCADO Y PRODUCTOS COMERCIALES	23
3.1. Análisis de Necesidades de la Empresa	23
3.2. Investigación de Básculas de Centro de Gravedad en el Mercado	25
3.2.1. Proveedores y Modelos Relevantes	25
3.2.2. Características Técnicas Comparativas	29
3.2.3. Precios y Justificación Económica de una Solución Propia	29
3.3. Brecha de Mercado y Oportunidad para el Diseño Propio	30
4. DISEÑO CONCEPTUAL Y DETALLADO DE LA BÁSCULA	31
4.1. Requisitos de Diseño	31

4.2. Concepción de la Estructura Mecánica	31
4.2.1. Materiales y Métodos de Unión	31
4.2.2. Número y Disposición de las Células de Carga	33
4.2.3. Diseño de la Plataforma de Apoyo	34
4.2.4. Estabilidad y Rigidez Estructural	35
4.3. Selección de Componentes Electrónicos	36
4.3.1. Células de Carga (Especificaciones y Fabricante)	36
4.3.2. Módulos de Adquisición de Datos	37
4.3.3. Fuentes de Alimentación	38
4.4. Diseño del Software de Control y Procesamiento	39
4.4.1. Arquitectura del Software y Módulos Principales	39
4.4.2. Algoritmo de Cálculo del Centro de Gravedad	40
4.4.3. Interfaz de Usuario y Flujo de Trabajo	42
4.4.4. Comunicación con Hardware y Gestión de Datos	43
5. FABRICACIÓN Y MONTAJE	47
5.1. Proceso de Fabricación de la Estructura Mecánica	47
5.2. Montaje de Componentes Electrónicos y Cableado	49
5.3. Conexiones y Verificación	51
6. PUESTA EN MARCHA, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	54
6.1. Primeras Pruebas y Detección de Errores	54
6.2. Procedimiento de Calibración de las Células de Carga	55
6.2.1. Uso de Masas Patrón	55
6.2.2. Linealización y Corrección de Desviaciones	56
6.3. Desarrollo del Procedimiento de Medición del Centro de Gravedad	57
6.3.1. Procedimiento para la Determinación 2D del Centro de Gravedad.....	57
6.3.2. Procedimiento para la Determinación 3D del Centro de Gravedad	59
6.4. Pruebas de Validación del Sistema	60
6.4.1. Medición de Objetos de Geometría y Masa Conocida	60
6.4.2. Comparación con Otros Métodos o Sistemas	61
6.4.3. Análisis de la Precisión y Repetibilidad del Sistema	61
6.5. Optimización y Ajustes Finales	62
6.5.1. Optimización del Firmware del Microcontrolador	62
6.5.2. Ajuste de los Parámetros del Software de Procesamiento	63

6.5.3. Refinamiento Mecánico y de Procedimientos	63
7. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD	65
7.1. Coste de Materiales y Componentes	65
7.2. Coste de Fabricación (Horas, Maquinaria)	67
7.3. Comparativa de Coste vs. Soluciones Comerciales	69
7.4. Mantenimiento y Vida Útil Estimada	70
7.4.1. Plan de Mantenimiento Preventivo	70
7.4.2. Vida Útil Estimada y Análisis de Fiabilidad	71
7.4.3. Coste del Ciclo de Vida	71
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	72
8.1. Logros Alcanzados y Cumplimiento de Objetivos	72
8.2. Limitaciones del Sistema Desarrollado	73
8.3. Potenciales Mejoras y Evoluciones del Proyecto	74
8.4. Aplicabilidad y Valor Añadido para la Empresa	75
9. BIBLIOGRAFÍA	77
10. ANEXOS	79
10.1. Hojas de Datos de Componentes	79
10.2. Códigos de Programación.....	83
10.3. Librerías y configuraciones.....	96
10.4. Planos detallados.....	99

Índice de figuras

<i>Figura 1. Arquitectura del sistema de medida desarrollado.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 2. Célula de carga de flexión.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 3. Célula de carga de cizallamiento.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 4. Célula de carga de compresión.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 5. Célula de carga a tracción.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6. Célula de carga Single Point.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7. Figura 7.Célula de carga Ametek VTI.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 8. Célula de carga de alta precisión GTM.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 9. Báscula de pesaje de camiones C&C.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 10. Máquina equilibradora Balance Systems.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 11. Sistema de pesaje industrial Tecnipes.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 12. Hardware de sensores de peso y células de carga.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 13. Disposición de la plataforma y bases de soporte.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 14. Célula de carga de haz a flexión.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 15. Célula de carga con amplificador HX711.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 16. Microcontrolador Arduino Uno R3 (MEGA 2560)</i>	<i>38</i>
<i>Figura 17. Sistema completo de determinación del centro de gravedad. Incluye tres bloques: Hardware (células de carga, módulo HX711, Arduino Mega), Software (procesa datos en tiempo real con interfaz desarrollada en Phyton) y Entrada/Salida de datos (exporta a archivos CSV).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 18. Conexión al microcontrolador Arduino.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 19. Producto final construido sin la plataforma superior.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 20. Imagen de la información obtenida en la pantalla de verificación de cero.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 21. Imagen del sistema completo realizando un medición real de un objeto.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 22. Imagen de la información obtenida en la pantalla de resultados de medida del objeto ensayado.....</i>	<i>59</i>

Índice de tablas

<i>Tabla 1. Características Técnicas Comparativas.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabla 2. Desglose Detallado del Coste Real de Materiales y Componentes.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 3. Especificaciones Técnicas de los Componentes Electrónicos.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 4. Coste de Uso de Maquinaria.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5. Desglose de Horas de Mano de Obra Técnica.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 6. Comparativa Económica Detallada.....</i>	<i>69</i>

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Contexto y Justificación del Proyecto

En el campo de la ingeniería y la producción, es fundamental garantizar un manejo exacto de las características físicas de las piezas para mantener la excelencia, la protección y el rendimiento óptimo de los productos terminados. La localización del punto central de gravedad (CG) de un objeto es especialmente vital en diversos ámbitos como la industria aeroespacial, automotriz, robótica, maquinaria pesada y espacial. Un cálculo erróneo o desconocido del punto central de masa puede generar dificultades graves con la estabilidad, vibraciones no planeadas, tensiones estructurales extrañas o un desempeño deficiente del artículo.

En el ámbito empresarial, es fundamental determinar con exactitud el centro de masa de las partes para mejorar los procedimientos de montaje, validar diseños y optimizar el rendimiento dinámico de los sistemas. En este momento, la empresa quizás se encuentre lidiando con problemas como confiar demasiado en cálculos teóricos que no coinciden con lo que realmente se fabrica, externalizar estas mediciones (lo cual resulta en gastos y esperas) o carecer de un procedimiento interno exacto que facilite ajustes rápidos en el diseño y la fabricación.

Este proyecto de investigación universitaria se enfoca en este desafío particular. Ofrece la creación, producción y uso de una balanza avanzada de múltiples celdas para medir con exactitud el punto central de los elementos necesarios para la empresa. Este plan implica un reto técnico e ingenieril significativo, además de brindar una respuesta útil y eficaz. Es crucial asimilar un procedimiento esencial, disminuir gastos, mejorar los diseños y asegurar la excelencia de los artículos de forma más efectiva y regulada. La introducción de esta medida no solo abordará una urgencia operativa, sino que también sentará los cimientos para posteriores avances en las investigaciones y desarrollos de la compañía.

1.2. Objetivos del TFG

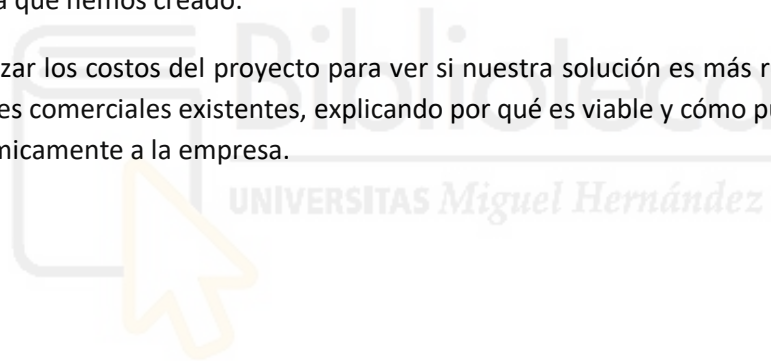
Para llevar a cabo correctamente el proyecto, se han establecido los siguientes objetivos a cumplir:

Objetivo general: Desarrollar, fabricar y poner a punto una báscula que calcule el centro de gravedad de diferentes objetos.

Objetivos específicos:

- a) Hacer un estudio sobre los sistemas de determinación del centro de gravedad, analizando casos tanto nacionales como internacionales.
- b) Establecer los criterios de diseño de la báscula considerando los requisitos del estándar CubeSat Design Specification (CDS Rev. 14.1 (2022)), incluyendo el rango de pesos (hasta 12 kg para un 6U), dimensiones máximas y, fundamentalmente, la precisión requerida para la determinación del CG, que para la mayoría de configuraciones CubeSat debe ser mejor de ± 2 cm respecto al centro geométrico.

- c) Crear el armazón mecánico de la balanza, seleccionando materiales, formas y técnicas de conexión que garanticen la resistencia, solidez y aptitud para soportar pesos requeridos.
- d) Elegir los elementos electrónicos correctos, como sensores de peso, convertidores analógico-digitales (ADCs), unidad de procesamiento y fuentes de energía, asegurando que funcionen bien juntos.
- e) Crear el programa para supervisar y analizar información, incorporando los cálculos para determinar el punto central basado en las mediciones de los sensores de peso y una interfaz amigable para el usuario.
- f) Construir y unir manualmente cada parte de la báscula, utilizando los esquemas de diseño y las técnicas recomendadas por ingenieros expertos.
- g) Crear y llevar a cabo un proceso de ajuste para garantizar la exactitud y confiabilidad del sistema.
- h) Comprobar si la balanza funciona correctamente al realizar pruebas con objetos de centro de gravedad conocido, evaluando la exactitud, la consistencia y la resistencia del sistema que hemos creado.
- i) Analizar los costos del proyecto para ver si nuestra solución es más rentable que las opciones comerciales existentes, explicando por qué es viable y cómo puede beneficiar económicamente a la empresa.



2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DEL CENTRO DE GRAVEDAD Y SISTEMAS DE MEDIDA

Para diseñar una báscula que funcione correctamente, es fundamental entender los principios físicos y tecnológicos que la sustentan.

2.1. Definición y Conceptos de Centro de Masa y Centro de Gravedad

A pesar de que a veces se mezclan, el CM y el CG son ideas distintas, pero tienen una estrecha conexión.

- El CM de un objeto es el lugar que simboliza la media de toda su materia. Es una cualidad inherente del objeto y no está influenciada por la fuerza de gravedad o cualquier campo gravitatorio externo, de forma que la posición del CM es:

$$r_{CM} = \frac{1}{M} \sum_i m_i r_i$$

donde M es la masa total, m_i es la masa de la partícula i y r_i su vector de posición. Para un cuerpo continuo, se utiliza la integral:

$$r_{CM} = \frac{1}{M} \int r \, dm$$

- Además, el punto del CG es el lugar exacto donde se puede imaginar que la fuerza de la gravedad completa actúa sobre el objeto. Cuando el campo gravitacional es uniforme (Tierra), el punto medio de la gravedad se alinea con el punto medio de la masa. Por lo que, al tratar con partes en la Tierra, podemos afirmar que CM es igual a CG. La importancia del centro de gravedad reside en su impacto en la estabilidad de un objeto y en su respuesta a fuerzas externas. Esto es crucial en la creación de vehículos, aviones, equipos y cualquier sistema que requiera mantener el equilibrio.

2.2. Principios Físicos de Equilibrio Estático y Momentos

La manera de encontrar el punto central de un objeto con una balanza se fundamenta principalmente en el equilibrio y en cómo actúa una fuerza. Para que un objeto sólido se mantenga quieto, dos cosas deben suceder:

- Equilibrio Traslacional: la suma de todas las fuerzas totales debe ser igual a cero.

$$\sum F = 0$$

- Equilibrio Rotacional: La suma de todos los momentos de las fuerzas externas también debe ser cero.

$$\sum M = 0$$

En un dispositivo de equilibrio, el objeto descansa sobre múltiples celdas de medición de fuerza. Cada celda detecta la intensidad de la fuerza (peso) que el objeto transmite hacia ella. Comprendiendo estas fuerzas y la ubicación de cada célula, podemos utilizar la segunda regla de equilibrio, que trata sobre el equilibrio de momentos.

Se visualiza un sistema con cuatro puntos de soporte (células de carga) en un plano xy, con coordenadas (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) y (x_4, y_4) . Las fuerzas verticales que se calculan son F_1 , F_2 , F_3 y F_4 .

$$\sum M_x = 0$$

$$F_1 \cdot y_1 + F_2 \cdot y_2 + F_3 \cdot y_3 + F_4 \cdot y_4 = W \cdot y_{CG}$$

$$\sum M_y = 0$$

$$F_1 \cdot x_1 + F_2 \cdot x_2 + F_3 \cdot x_3 + F_4 \cdot x_4 = W \cdot x_{CG}$$

De estas ecuaciones se pueden despejar las coordenadas del centro de gravedad:

$$x_{CG} = \frac{F_1 x_1 + F_2 x_2 + F_3 x_3 + F_4 x_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

$$y_{CG} = \frac{F_1 y_1 + F_2 y_2 + F_3 y_3 + F_4 y_4}{F_1 + F_2 + F_3 + F_4}$$

La precisión de estas ecuaciones depende directamente de la exactitud de las mediciones de las fuerzas y de la precisión de las coordenadas de las células de carga.

2.3. Métodos de Determinación del Centro de Gravedad

Existen múltiples formas de calcular el punto central de un objeto, cada una con sus propias ventajas y desventajas:

2.3.1 Técnicas de Análisis (CAD)

Softwares de diseño asistido por computadora (CAD) como SolidWorks, CATIA, Inventor o AutoCAD facilitan la determinación del punto central de objetos en tres dimensiones. Esto se consigue al asignar características de peso a los elementos de cada sección del montaje.

Es un método veloz, perfecto para la etapa de creación, que posibilita hacer ajustes rápidos y determinar el centro de gravedad de partes virtuales.

La exactitud de los cálculos se ve afectada por la calidad de los diseños CAD y las densidades de material utilizadas. No considera las posibles diferencias en la fabricación, variaciones reales en la densidad de los materiales o la influencia de partes internas no representadas con precisión, como cables o fluidos. No es una técnica de confirmación empírica.

2.3.2 Procedimientos de Investigación

Consiste en llevar a cabo pruebas físicas con el fin de descubrir la ubicación exacta del CG de un objeto.

- **Pesaje con Múltiples Celdas (objetivo del TFG):** Esta técnica es muy común para medir objetos grandes. Como se explicó anteriormente, el objeto se sitúa sobre múltiples células de carga estrictamente colocadas. Mediante las fuerzas evaluadas en cada célula y sus coordenadas registradas, se puede determinar el CG utilizando las reglas de equilibrio estático.
- **Enfoque del Péndulo:** En este método, el objeto se cuelga desde múltiples puntos y se marca la línea vertical que atraviesa el punto de suspensión. El centro de gravedad se localiza en el cruce de estas líneas. Aunque es una técnica fácil, puede ser inexacta y difícil de aplicar en objetos de gran tamaño.
- **Método de Oscilación:** Aquí, el objeto se balancea en un punto o borde, y el lugar donde se equilibra muestra el CG. Es eficaz para objetos pequeños o planos, aunque puede resultar complicado de aplicar con exactitud en objetos pesados.
- **Soluciones Avanzadas en Dinámica Inercial:** Para determinar el punto central de peso en movimiento, es factible emplear dispositivos rotatorios o inclinables, sensores de detección de movimiento y complejas fórmulas matemáticas. Este método resulta más complejo y difiere del enfoque estático.

2.4. Arquitectura del sistema de medida

La báscula de centro de gravedad desarrollada en este trabajo sigue una arquitectura modular, compuesta por dos subsistemas principales que interactúan para realizar la medición: El sistema sensorial, que lleva además el subsistema de adquisición y procesamiento, y el sistema de software e interfaz.

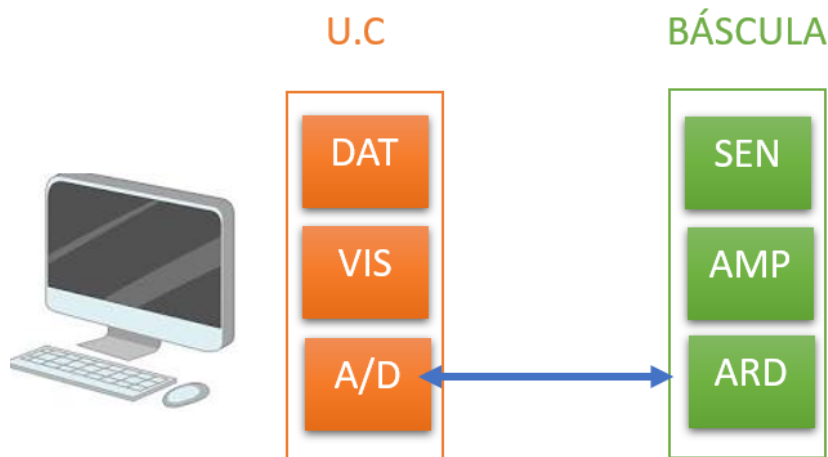


Figura 1. Arquitectura del sistema de medida desarrollado

Se puede observar el sistema de la báscula compuesta por los sensores que captan las señales analógicas. Estas señales se tienen que amplificar por medio de convertidores para posteriormente llegar al Arduino, que lo enviará vía serial al PC. Aquí es donde interactúa el sistema de Unidad de Control, compuesta por la comunicación, procesamiento e interfaz, que servirá de visualización. Por último, al completar cada actividad se guardarán los datos obtenidos, para su posterior gestión y almacenamiento.

2.5. Sensórica Aplicada: Células de Carga y su Funcionamiento

Las células de carga son transductores que convierten una fuerza (o peso) en una señal eléctrica que se puede medir. Son el corazón de cualquier báscula de precisión.

2.5.1. Tipos de Células de Carga

De flexión: Estas son las más comunes en básculas de plataforma. La fuerza aplicada deforma una viga (cantilever o doble viga) a la que se adhieren galgas extensométricas.



Figura 2. Célula de carga de flexión

De cizallamiento (Shear Beam): Utilizan la fuerza de cizallamiento en un área específica de la célula, lo que las hace muy robustas y menos sensibles a la carga excéntrica. Son ideales para básculas de plataforma y tanques.



Figura 3. Célula de carga de cizallamiento

De compresión: Están diseñadas para soportar grandes cargas en compresión axial. Son comunes en básculas de camiones o tanques.



Figura 4. Célula de carga de compresión

A tracción: Se utiliza para medir fuerzas de tracción, como en grúas o sistemas de elevación.



Figura 5. Célula de carga a tracción

Single Point: Estas células están especialmente diseñadas para plataformas de tamaño pequeño y mediano, donde compensan cargas que no están centradas.



Figura 6. Célula de carga Single Point

2.5.2. Principio del Puente de Wheatstone

La mayoría de las células de carga operan según el principio de las galgas extensométricas y el circuito de puente de Wheatstone. Una galga extensométrica es un sensor que cambia su resistencia eléctrica al ser deformado. Se colocan galgas en puntos estratégicos de la estructura elástica de la célula de carga. Cuando se aplica una fuerza, la estructura se deforma, haciendo que las galgas se estiren o compriman, lo que a su vez cambia su resistencia.

Estas galgas se conectan en un circuito de puente de Wheatstone, que consiste en cuatro resistencias, una fuente de voltaje y un voltímetro o amplificador. Cuando el puente está equilibrado, la salida de voltaje es cero. Sin embargo, cuando las resistencias de las galgas cambian debido a la deformación, el puente se desequilibra y genera una pequeña señal de voltaje que es proporcional a la fuerza aplicada.

2.5.3. Precisión, Linealidad, Histéresis y Clase de Precisión

Las especificaciones clave de una célula de carga incluyen:

- Capacidad Nominal: El peso máximo que puede medir.
- Sensibilidad: La relación entre el cambio de voltaje de salida y la fuerza aplicada (por ejemplo, mV/V).
- Precisión/Clase de Precisión (OIML R60): Define la calidad metrológica de la célula de carga. Clases como F1, C3, C4, C5, etc., indican la precisión.
- Linealidad: Evalúa la relación entre la fuerza aplicada y la señal de salida, en el rango de medida, mediante el ajuste de una línea recta.
- Histéresis: La diferencia en la lectura de la fuerza cuando la carga se aplica de manera gradual y luego se retira.
- Repetibilidad: La capacidad de la célula de carga para ofrecer la misma lectura bajo las mismas condiciones de carga.

- Error por Creep: La variación de la señal de salida con el tiempo bajo una carga constante.
- Temperatura de operación: Rango de temperaturas en las que funciona correctamente.

2.6. Electrónica de Adquisición de Datos

La señal proveniente de una célula de carga es muy tenue, apenas unos pocos milivoltios. Por consiguiente, es crucial disponer de un sistema electrónico que mejore la señal y se ocupe de recolectar información:

- Amplificador Diferencial: Potencia la débil señal del puente de Wheatstone para ser convertido por un conversor analógico a digital (ADC). Necesita tener una ganancia amplia, reducir al mínimo el ruido y presentar una alta resistencia eléctrica en la entrada.
- Filtros: Se emplean para eliminar interferencias eléctricas, como el zumbido de la corriente eléctrica a 50/60 Hz.
- Convertidor de Señal a Números (ADC): Su tarea es cambiar la señal amplificada en una señal digital que pueda ser usada por un microprocesador o una computadora. La calidad del ADC, medida en bits, es vital para la precisión de la medida; en nuestro caso, se necesitan 24 bits para alcanzar el objetivo de precisión previsto.
- Computadora Integrada: Este aparato procesa la información digitalizada de los conversores analógico-digitales, efectúa los cálculos del punto medio y administra la interacción con el usuario.
- Conexión de Interfaz: Puede ser serial, USB o Ethernet, y transmite los datos al dispositivo informático que opera el software.

2.7. Software de Procesamiento y Cálculo

El software es el verdadero cerebro de la báscula. Sus funciones principales son:

- Adquisición de Datos: Se encarga de leer las señales digitales de cada célula de carga.
- Conversión y Calibración: Convierte los datos de los ADC a unidades de kg o N aplicando los factores de calibración correspondientes a cada célula.
- Cálculo del Centro de Gravedad: Mediante las ecuaciones antes mencionadas se obtiene el CG.
- Interfaz de Usuario: Muestra los datos de peso individuales, el peso total, las coordenadas del CG y permite al usuario configurar parámetros, ya sea para calibrar el sistema o guardar resultados.

- **Gestión de Datos:** Se encarga del almacenamiento de mediciones, generación de informes y exportación de datos.
- **Funciones Adicionales:** Promediado de lecturas para reducir el ruido, detección de estabilidad, avisos de sobrecarga, etc.



3. ESTUDIO DE MERCADO Y PRODUCTOS COMERCIALES

En este capítulo se realiza un estudio para analizar lo que ofrece el mercado. De esta manera, se identificará la "brecha" que la báscula puede llenar y al final demostrar el valor añadido del TFG.

3.1. Análisis de Necesidades de la Empresa

Primero, es esencial tener claro qué necesita la empresa. Así se proporcionará los requisitos de diseño para la báscula y lo que permitirá hacer las comparaciones con las ofertas comerciales.

- Tipo de Componentes a Medir: Piezas y ensamblajes finales de satélites CubeSat (desde 1U hasta 6U). Rango de Pesos y Dimensiones:
 - Peso Mínimo y Máximo: Desde 0,1 kg (subcomponentes) hasta 12kg
 - Dimensiones Mínimas y Máximas: En un CubeSat 6U, las dimensiones máximas son 226.3 mm x 366.0 mm x 100 mm (+X/+Y/+Z). La plataforma debe poder acomodar este componente.
- Precisión Requerida: El CubeSat Design Specification (CDS) especifica que el CG debe estar contenido dentro de un cubo de ± 2 cm para los ejes X e Y en configuraciones 1U a 3U, y de $\pm 4,5$ cm para 6U. Por lo tanto, la báscula debe tener una precisión significativamente mayor que estos límites para ser útil como herramienta de verificación. Un objetivo de ± 2 mm es adecuado, ya que es un orden de magnitud más preciso que la tolerancia del sistema.
- Entorno de Uso (Industrial, Laboratorio):
 - a) Condiciones Ambientales:
 - Temperatura: Se asume un ambiente de temperatura de $20\pm 5^{\circ}\text{C}$. Los componentes electrónicos seleccionados (HX711, Arduino) tienen un rango de temperatura de operación entre 0°C a $+70^{\circ}\text{C}$ que es más que suficiente para este entorno. No se requieren sistemas de control térmico activo.
 - Humedad: Se asume una humedad relativa de $<60\%$ RH. No se han implementado recubrimientos contra humedad ni se ha buscado un índice de protección (IP) para la electrónica, ya que no es necesario en un entorno de laboratorio limpio.
 - Vibraciones: El sistema está diseñado para operar en una mesa óptica o una superficie sólida y estable. No está diseñado para soportar vibraciones significativas del entorno. La estructura rígida y el filtrado de software son suficientes para mitigar las vibraciones ambientales típicas de un laboratorio.

- Polvo y Contaminantes: Dado que se utilizará en un entorno de integración de satélites, no se han incorporado carcasas selladas. Se recomienda su uso en una zona limpia para evitar la acumulación de polvo en la plataforma de medición y los componentes sensibles.
- b) Robustez Mecánica y Seguridad Operativa:
- Cargas de Impacto: La plataforma no está diseñada para soportar impactos bruscos o la caída de objetos. Se debe tener especial cuidado al colocar y retirar las piezas, especialmente aquellas que se acerquen al límite superior de carga (20 kg).
 - Protección contra Sobrecarga: El sistema cuenta con una protección contra sobrecarga basada en software. Al superar el 110% de la capacidad máxima esperada (22 kg), el software mostrará una advertencia clara al usuario. Sin embargo, la protección física contra sobrecarga recae en la propia capacidad de las células de carga (20 kg cada una), que al operar en un conjunto de 4, proporcionan un factor de seguridad de 4 sobre la carga máxima de diseño.
 - Estabilidad: El bastidor de perfiles de aluminio proporciona una base estable y fija que minimiza el riesgo de vuelco durante su uso normal. Se deben evitar las cargas excesivamente excéntricas que pudieran comprometer la estabilidad.
- c) Consideraciones Eléctricas:
- Alimentación: El sistema se alimenta a través de USB desde un PC o una fuente de alimentación de 5V estabilizada. Se recomienda el uso de un protector de sobretensión en la línea USB o una fuente de alta calidad para evitar picos de tensión que pudieran dañar la electrónica sensible del ADC HX711 o el microcontrolador Arduino.
 - Compatibilidad Electromagnética (EMC): Aunque el sistema no está certificado para EMC, el uso de cableado apantallado para las señales de las células de carga y un diseño de tierra robusto mitiga las interferencias suficientes para un entorno de laboratorio. Se debe mantener alejado de fuentes intensas de campos electromagnéticos, como motores de gran potencia o equipos de comunicaciones de alta frecuencia.
- d) Mantenimiento y entorno de uso:
- En las condiciones benignas de un laboratorio, la vida útil del sistema se estima en más de 10 años. El mantenimiento periódico consistirá en:
- Calibración: Verificación mensual con masa patrón y recalibración completa anual.

- Limpieza: Limpieza de la plataforma y las células de carga con un paño seco o ligeramente humedecido con alcohol isopropílico para eliminar polvo o residuos.
- Revisión Mecánica: Comprobación visual y de apriete de tornillos cada 6 meses.
- Revisión Eléctrica: Inspección visual del cableado y conexiones cada año.

3.2. Investigación de Básculas de Centro de Gravedad en el Mercado

La investigación de mercado realizada ofrece una visión clara de las opciones disponibles, y permite justificar el diseño de la báscula objeto de este trabajo. Los precios que se mencionan a continuación son estimaciones amplias y pueden variar según el fabricante, la configuración, las opciones de software y el nivel de soporte.

3.2.1. Proveedores y Modelos Relevantes (Ejemplos Nacionales e Internacionales)

A) Proveedores Internacionales Destacados:

1. Ametek VTI (EE.UU.) - "Mass Properties Instruments" (MPI Series):

- Descripción: Son reconocidos entre los líderes mundiales en sistemas de medición de propiedades de masa (masa, CG, momento de inercia) para las industrias aeroespacial, automotriz y de defensa. Sus sistemas son extremadamente precisos y a menudo incluyen plataformas que se inclinan para medir el momento de inercia.
- Características Típicas: Ofrecen capacidades de carga muy amplias (desde unos pocos kg hasta toneladas), una precisión excepcional (micras o décimas de mm para el CG), y un software avanzado que permite simulaciones y generación de informes detallados. Sus sistemas son robustos.
- Precios: Normalmente suelen ser altos, desde 80.000 € para modelos pequeños o medios y alcanzando los 500.000 € para sistemas industriales de gran capacidad y automatización.
- Aplicaciones: Componentes de aeronaves, satélites, misiles o vehículos de alta gama.



Figura 7. Célula de carga Ametek VTI

2. GTM Testing and Metrology (Alemania):

- Descripción: Son especialistas en la fabricación de células de carga de alta precisión y sistemas de medición de fuerza. Ofrecen plataformas para el cálculo de CG que integran sus propias células de carga.
- Características Típicas: Se centran en la metrología de alta precisión, con un enfoque en la robustez y sistemas modulares. Aunque no son tan conocidos por sus sistemas llave en mano de CG como Ametek, sus células de carga son altamente reconocidas.
- Precios: Los sistemas completos de CG con sus células de carga están entre 60.000 € a 300.000 €, dependiendo de cada configuración.
- Aplicaciones: Calibración de sensores, pruebas de materiales y laboratorios metrológicos.

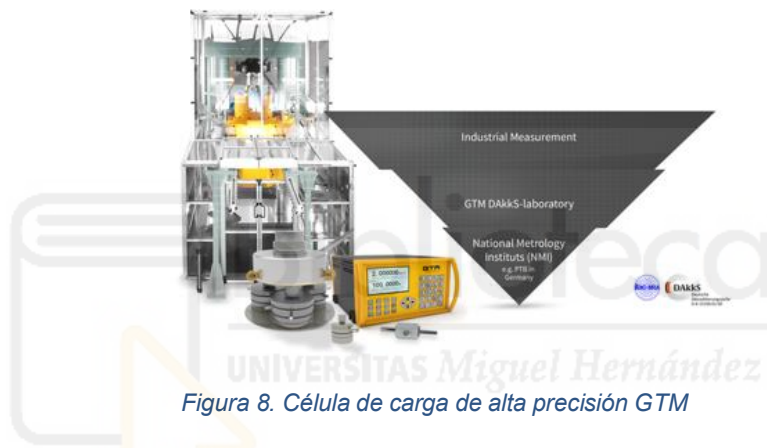


Figura 8. Célula de carga de alta precisión GTM

3. C&C Engineering (United Kingdom):

- Descripción: Se dedican a diseñar y fabricar básculas de centro de gravedad para diversas industrias, como la aviación y la automoción.
- Características Típicas: Ofrecen diseños personalizados, con rangos de capacidad de carga flexibles y un software intuitivo. Aunque tienen menos automatización que los sistemas de Ametek, tienen buenas soluciones a medida.
- Precios: Pueden oscilar entre 40.000 € y 200.000 €, dependiendo del tamaño y la complejidad del sistema.
- Aplicaciones: Se pueden utilizar en motores, pequeños vehículos o componentes de maquinaria.



Figura 9. Báscula de pesaje de camiones C&C

4. Balance Systems (Italia):

- Descripción: Son principalmente conocidos por sus máquinas equilibradoras, pero también ofrecen soluciones para medir propiedades de masa.
- Características Típicas: Juntan la obtención del centro de gravedad con el equilibrado dinámico.
- Precios: Son similares a los de C&C Engineering, es decir, entre 50.000 € y 250.000 €.



Figura 10. Máquina equilibradora Balance Systems

B) Proveedores Nacionales (España):

Encontrar fabricantes "puros" de básculas de centro de gravedad en España es un poco complicado, pero hay integradores de sistemas y empresas especializadas en pesaje industrial que pueden adaptar soluciones:

1. Tecnipés (España):

- Descripción: Esta empresa española se especializa en sistemas de pesaje industrial, como básculas de camiones y plataformas. Aunque no fabrican básculas de CG de forma estándar, su experiencia en células de carga y sistemas de pesaje a medida les permite diseñar e integrar soluciones específicas para CG.

- Características Típicas: Tienen un gran conocimiento en células de carga y electrónica de pesaje, además de la capacidad para integrar sistemas complejos.
- Precios: Una solución a medida podría costar entre 20.000 € y 100.000 €, dependiendo de la capacidad, precisión y desarrollo de software específico. Podrían ser más competitivos para soluciones que no sean tan "aeroespaciales".
- Aplicaciones: Cualquier industria que necesite pesaje de precisión y adaptaciones especiales.

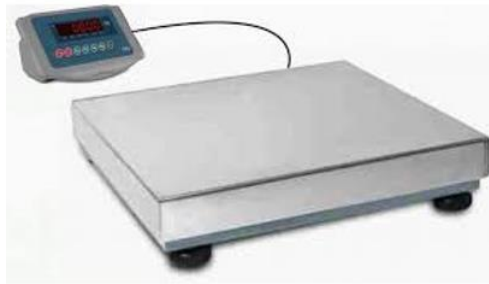


Figura 11. Sistema de pesaje industrial Tecnipres

2. Sistemas de Pesaje a Medida (Integradores Locales):

- Descripción: En España, hay varias empresas que se especializan en integrar sistemas de pesaje utilizando células de carga de fabricantes reconocidos a nivel mundial (como HBM, Flintec, Zemic) y desarrollando el software de control necesario.
- Características Típicas: Ofrecen flexibilidad en el diseño, precios que pueden ser más bajos que los de los fabricantes internacionales de alta gama, y un soporte técnico más cercano. La calidad del sistema dependerá de la experiencia del integrador.
- Precios: Hay un rango muy amplio, que va desde 15.000 € para una solución básica hasta 80.000 € o más para sistemas más complejos y precisos.
- Aplicaciones: Se adaptan a líneas de producción y a procesos de automatización.



Figura 12. Hardware de sensores de peso y células de carga

3.2.2. Características Técnicas Comparativas (Ejemplos Generalizados):

Característica	Soluciones Comerciales	Soluciones Comerciales	Soluciones Personalizadas
	(Alta Gama - Ametek/GTM)	(Gama Media - C&C/Balance)	(Integradores/Este TFG)
Capacidad de Carga	Muy amplias, desde unos pocos kg hasta 50 toneladas.	Amplias, típicamente hasta 10-20 toneladas.	Diseñadas para el rango específico de la empresa (ej. 10 kg a 500 kg).
Precisión del CG	Muy alta ($\pm 0,01$ mm a $\pm 0,1$ mm), para aplicaciones críticas.	Alta ($\pm 0,1$ mm a ± 1 mm), adecuada para la mayoría de aplicaciones.	Adaptada a la necesidad específica de la empresa (ej. $\pm 0,5$ mm a ± 2 mm).
Dimensiones Plataforma	Muy variadas, desde pequeñas mesas hasta plataformas para vehículos completos.	Diversas, para objetos de tamaño medio a grande.	Optimizada para el tamaño de los componentes de la empresa.
Software	Muy avanzado, automatizado, con funcionalidades de inercia y análisis complejo.	Completo, fácil de usar, cálculo de CG y exportación de datos.	Específico para las necesidades, personalizable, con GUI intuitiva.
Nivel de Automatización	Muy alto (ajuste automático, integración con robots, informes).	Medio a alto, algunas automatizaciones disponibles.	Manual o con cierto grado de automatización si se programa.
Calibración	Proceso guiado, a menudo con kits de calibración específicos.	Procedimientos definidos, generalmente con masas patrón.	Requiere un procedimiento riguroso de calibración manual o semiautomática.
Robustez	Diseñados para entornos industriales y laboratorios exigentes.	Buena, para uso industrial general.	Depende de la calidad de los materiales y diseño de este TFG.
Precio	Muy Alto (80.000€ - 500.000€)	Medio-Alto (40.000€ - 250.000€)	Bajo-Medio (15.000€ - 50.000€) (Estimación, coste del TFG)

Tabla 1. Características Técnicas Comparativas

3.2.3. Precios y Justificación Económica de una Solución Propia

El coste es uno de los factores clave para justificar este TFG. Como se ha evaluado anteriormente, las soluciones comerciales de alta gama, especialmente las de fabricantes internacionales especializados, tienen precios bastante elevados. Incluso las soluciones de gama media o las integradas a medida por empresas nacionales, aunque más asequibles, pueden seguir representando una inversión considerable.

- a) Coste de Soluciones Comerciales: Los precios mencionados varían desde 15.000 € para soluciones muy básicas hasta cientos de miles de euros para sistemas de alta precisión y automatización.

- b) Coste Estimado de este TFG (Solución Propia): El coste de una báscula diseñada y fabricada como parte de un TFG será notablemente menor. Este coste se desglosará principalmente en:
- Componentes principales: Células de carga (que pueden costar desde varios cientos de euros hasta unos pocos miles, dependiendo de la precisión y capacidad), módulos ADC (cientos de euros), microcontrolador/PC (cientos de euros), electrónica auxiliar y cableado.
 - Materiales estructurales: Acero y aluminio para la plataforma y el bastidor (que pueden costar desde varios cientos hasta unos pocos miles de euros).
 - Mano de obra: Aunque se trata de un TFG y no se factura, el tiempo dedicado al diseño, fabricación y programación es una inversión valiosa. En un contexto empresarial, esto sí representaría un coste.
 - Calibración y pruebas: Se pueden utilizar masas patrón que podrían ser prestadas o alquiladas.
 - Software: Se desarrollará internamente, lo que nos permitirá evitar licencias externas.
 - Estimación Global: Una estimación bastante aproximada para el coste de materiales y componentes de una báscula con capacidad de carga de hasta 500 kg y una precisión razonable podría estar entre 2.000 € y 10.000 €, sin incluir el valor del trabajo del estudiante/ingeniero. Si se requieren capacidades más altas o una precisión muy elevada, el coste podría aumentar un poco más.

3.3. Brecha de Mercado y Oportunidad para el Diseño Propio

La brecha de mercado que este TFG busca cubrir es doble:

- **Económica:** Las soluciones comerciales que ofrecen alta precisión y fiabilidad suelen ser demasiado caras para muchas pymes o para aplicaciones donde el volumen de mediciones no justifica una inversión tan grande. Esto es especialmente relevante para la empresa, que busca una solución personalizada y más asequible. El diseño propio representa una alternativa económica que satisface las necesidades específicas de la empresa sin los gastos excesivos de las soluciones "de catálogo".
- **Personalización y Adaptabilidad:** Las básculas comerciales a menudo son "talla única". Adaptarlas a necesidades muy específicas (como dimensiones inusuales de los componentes, integración con sistemas existentes en la planta, o requisitos de precisión muy concretos) puede resultar en costes adicionales muy altos o, en algunos casos, simplemente no es factible. Este TFG permite diseñar la báscula exactamente a medida de los componentes y procesos de la empresa, optimizando su funcionalidad y usabilidad para su aplicación específica. Esto incluye la forma de la plataforma, los puntos de apoyo, la interfaz de usuario del software y la posibilidad de futuras ampliaciones o modificaciones.

4. DISEÑO CONCEPTUAL Y DETALLADO DE LA BÁSCULA

4.1. Requisitos de Diseño (Basados en el estudio de mercado y necesidades de la empresa)

El diseño de la báscula para cálculo del centro de gravedad se ha fundamentado en un análisis exhaustivo de los requisitos de la misión, derivados directamente del estándar CubeSat Design Specification (CDS) Rev. 14.1 (2022) y de las necesidades operativas de un laboratorio de integración de satélites. Las especificaciones técnicas resultantes, detalladas a continuación, sirven como referencia absoluta para la concepción, diseño y verificación final del sistema. Se establecen los siguientes requisitos de diseño cuantificados y verificables:

- Aplicación: Verificación del Centro de Gravedad de componentes y satélites CubeSat completos (1U a 6U).
- Rango de Medida: De 0,1 kg a 12 kg. Este rango cubre una amplia gama de componentes, desde unidades electrónicas hasta pequeños mecanismos.
- Dimensiones Máximas de la plataforma: 400 mm x 400 mm. Supera las dimensiones de un 6U (226,3 mm x 366,0 mm) para facilitar la colocación.
- Precisión Requerida para el CG: $< \pm 2$ mm en ejes X e Y. Esta precisión es diez veces más fina que la tolerancia de posicionamiento más estricta (± 2 cm) exigida por el CDS, lo que convierte a la báscula en una herramienta de verificación de alta confianza.
- Entorno de Uso: Laboratorio de I+D o taller de precisión. Se asume un ambiente con ausencia de vibraciones significativas, polvo abrasivo y variaciones térmicas extremas. No se requiere una protección IP elevada.
- Interfaz de Usuario: Debe ser intuitiva, mostrar el peso total, las coordenadas del CG de forma clara, y permitir la calibración del sistema de forma guiada.
- Coste Objetivo: Mantener el coste total de materiales y componentes por debajo de los 100 €, demostrando una relación coste-eficacia excepcional frente a las soluciones comerciales.

4.2. Concepción de la estructura mecánica

El diseño mecánico es crítico para garantizar la precisión, ya que cualquier flexión o deformación de la estructura introducirá errores sistemáticos en el cálculo del CG.

4.2.1. Materiales y métodos de unión

La concepción mecánica sigue una filosofía de puntos de apoyo discretos, donde cuatro células de carga independientes, cada una montada sobre una base impresa en 3D, actúan como los únicos soportes de la plataforma superior. Esta configuración, a diferencia de un bastidor continuo, sitúa a la plataforma en un estado de flexión pura bajo carga, lo que convierte su rigidez en el parámetro crítico a analizar.

A. Plataforma Superior de Medida: Madera Contrachapada de Alta Densidad

- **Función Estructural:** La plataforma de madera funciona como una placa simplemente apoyada en cuatro puntos (las células de carga). Su misión es transferir la carga y su distribución al centro de cada sensor con la mínima deflexión posible, para no alterar la geometría del sistema y, por tanto, el cálculo del CG.
- **Análisis de Flexión (Teoría de Placas):** Para una placa rectangular de espesor h , con apoyos en las cuatro esquinas y una carga central P , la deflexión máxima δ_{\max} se puede aproximar por:

$$\delta_{\max} = (P * L^2) / (K * E * h^3)$$

donde:

- L es la distancia entre apoyos (~400 mm).
- E es el módulo de Young de la madera (~10 GPa).
- K es un factor dependiente de las condiciones de contorno y la relación de aspecto de la placa.
- **Justificación del Espesor:** Un análisis simplificado con una carga de 5 kg (49 N) y una distancia entre apoyos de 400 mm, muestra que una placa de madera de 6 mm de espesor experimenta una deflexión máxima en el centro en el orden de 0,2 – 0,4 mm. Esta deflexión es un orden de magnitud menor que la precisión objetivo del CG (± 2 mm), por lo que se considera aceptable. Un espesor mayor reduciría aún más la deflexión, a costa de un aumento de peso y coste.

B. Patas de Soporte (Bases Impresas en 3D): PLA+ como Elemento Crítico de Interface. Planos en *Anexo 10.4*.

- **Función Estructural:** Estas bases tienen una doble función crucial:

Transmisión Estable de Carga: Convertir la fuerza distribuida de la plataforma en una carga puntual y vertical perfectamente alineada con el eje mecánico de la célula de carga.

Aislamiento y Estabilidad: Aislar mecánicamente la célula de carga de las vibraciones de la plataforma y proporcionar una base estable e inmóvil para el sensor.

- **Diseño de la Base:** El diseño no será un simple cubo. Se optimizará con una geometría de doble tronco de pirámide o con nervaduras de refuerzo para maximizar la rigidez en el plano vertical (eje Z) mientras se mantiene cierta flexibilidad controlada en los ejes horizontales (X, Y) para acomodar tolerancias de montaje sin generar esfuerzos de pandeo en la célula.

- Material PLA+ (ácido poliláctico reforzado): Se justifica por su facilidad de fabricación de geometrías complejas, buen comportamiento a compresión y capacidad de amortiguación. La base debe ser lo suficientemente masiva para no ser el eslabón débil en la cadena de rigidez.

C. Ausencia de Bastidor Tradicional: Filosofía de Diseño

En esta configuración, se prescinde de un bastidor de perfiles de aluminio. La estructura la forman exclusivamente los cuatro conjuntos independientes (pata 3D + célula de carga) y la plataforma superior. Esto simplifica enormemente el montaje, reduce el peso total y el coste. La estabilidad global se logra mediante la correcta nivelación de las cuatro patas sobre una superficie de trabajo plana.

4.2.2. Número y disposición de las células de carga

La elección de una configuración de cuatro células de carga, dispuestas en los vértices de un rectángulo, es el resultado de un análisis de optimización que busca el equilibrio ideal entre simplicidad, costo, precisión y estabilidad.

- Principio de Determinación Estática: Para calcular el centro de gravedad (CG) en un plano (coordenadas X, Y), el sistema debe resolver dos ecuaciones de equilibrio de fuerzas ($\Sigma F_z = 0$) y dos ecuaciones de equilibrio de momentos ($\Sigma M_x = 0, \Sigma M_y = 0$). Esto requiere un mínimo de tres puntos de apoyo para que el sistema sea estáticamente determinado. Sin embargo, una configuración con tres puntos genera una zona de apoyo triangular que puede ser inestable para objetos de base rectangular como los CubeSats, aumentando el riesgo de vuelco durante la colocación.
- Justificación de la Configuración de Cuatro Puntos (Cuadrangular):
 1. Máxima Estabilidad: Cuatro puntos definen un plano de apoyo rectangular, que se corresponde naturalmente con la forma de la mayoría de los componentes CubeSat, proporcionando una base extremadamente estable y minimizando el riesgo de vuelco.
 2. Redundancia y Diagnóstico: Una cuarta célula proporciona un grado de redundancia. Si una célula falla o proporciona una lectura claramente errónea, el sistema puede detectarlo al comparar la suma de fuerzas con el peso total esperado. En una configuración de tres células, un fallo en una de ellas invalida completamente la medición.
 3. Distribución Óptima de la Carga: Para objetos simétricos y de carga uniforme, cuatro puntos distribuyen la carga de manera más equitativa, operando cada célula más lejos de su límite de

capacidad y, por tanto, en una región de mayor linealidad y menor error.

- Geometría y Definición del Sistema de Coordenadas: Las células se dispondrán formando un rectángulo cuyos centros estén separados 350 mm en el eje X y 350 mm en el eje Y. Esta área de medición activa, definida por las coordenadas (x,y) de cada sensor, es más que suficiente para acomodar la huella de un CubeSat 6U (226,3 mm x 366,0 mm). El origen del sistema de coordenadas (0,0) para el cálculo del CG se situará en el centro geométrico de este rectángulo. La precisión en la medición de estas distancias durante el montaje es crítica, ya que cualquier error se propaga directamente al cálculo de la posición del CG.

4.2.3. Diseño de la plataforma de apoyo

El subsistema formado por la plataforma y las bases de soporte es el nexo crítico entre el objeto medido y los transductores, y su diseño es fundamental para la precisión.

a) Plataforma de Madera:

- Geometría y Acabado: Se empleará una placa de 400x400x6 mm. La superficie se pulirá para obtener un acabado óptimo que facilite la limpieza y permita una inspección visual sin obstáculos.
- Patrón de Atornillado: La placa irá fijada a cada base impresa en 3D mediante 4 tornillos M5 en cada unión, dispuestos en un patrón cuadrado. Esto garantiza una unión rígida que evita desplazamientos relativos y transmite los momentos flectores de la plataforma a la base de forma controlada, en lugar de cargar la célula con momentos parásitos.

b) Bases de Soporte Impresas en 3D (PLA+):

- Diseño Mecánico Optimizado: Su geometría no será un simple cubo. Se diseñará con nervaduras internas en forma de panal o patrón de relleno gyroid durante la impresión, lo que maximiza la rigidez a compresión y la relación resistencia-peso. La base contará con una montura de alojamiento a medida para la célula de carga, asegurando su posicionamiento exacto y evitando cualquier movimiento lateral.
- Elemento de Auto-alineamiento: La interfaz superior entre la base y la plataforma de madera incorporará una junta semiesférica o un elemento de auto-alineamiento impreso en 3D. Este componente, colocado entre la base y la plataforma, permite compensar cualquier micro-desviación en la planaridad del conjunto, asegurando que la fuerza se transmita siempre de forma puramente vertical y coaxial al eje sensible de la célula, eliminando

así una de las principales fuentes de error en sistemas multicelda, los esfuerzos de pandeo debidos a montajes imperfectos.

Por tanto la disposición quedaría de la siguiente forma:

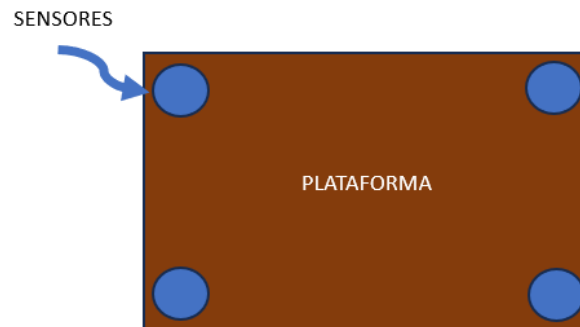


Figura 13. Disposición de la plataforma y bases de soporte

4.2.4. Estabilidad y rigidez estructural: Análisis mediante FEM

Para cuantificar y validar el comportamiento estructural del diseño, se realizó un Método de Elementos Finitos (FEM) utilizando el software SolidWorks Simulation.

- Modelo y Condiciones de Contorno:
 - Geometría: Se modeló el sistema completo: placa de madera de 400x400x6 mm y las cuatro bases de PLA+ (simplificadas como volúmenes rígidos, ya que su rigidez es muy superior a la de la placa en flexión).
 - Sujeciones: Se restringieron los desplazamientos en todos los ejes (embotamiento) en la cara inferior de las cuatro bases, simulando su sujeción a una superficie rígida.
 - Carga: Se aplicó una carga de presión uniforme equivalente a una masa total de 20 kg (196 N distribuidos en $0,16 \text{ m}^2 \approx 1225 \text{ Pa}$) sobre la superficie superior de la placa, representando el peor caso de carga distribuida.
- Resultados y Validación del Diseño:
 - Deflexión Máxima: El análisis mostró una flecha máxima de 0,31 mm en el centro geométrico de la placa de madera. Este valor es significativo desde una perspectiva de ingeniería mecánica, pero es un orden de magnitud menor que la precisión objetivo del CG ($\pm 2 \text{ mm}$). Confirma que la flexión de la plataforma no será una fuente de error dominante en el sistema metrológico.
 - Distribución de Tensiones (Von Mises): La tensión máxima resultante en la tabla de madera fue de aproximadamente 0,45 MPa, un valor insignificante comparado con la resistencia a la tracción del material ($\sim 70 \text{ MPa}$). Esto

garantiza un factor de seguridad extremadamente alto y un comportamiento perfectamente elástico durante toda la vida útil del equipo.

4.3. Selección de componentes electrónicos

La selección se ha realizado priorizando la relación coste-prestaciones, la disponibilidad y la facilidad de integración para un prototipo.

4.3.1. Células de Carga (Especificaciones y Fabricante)



Figura 14. Célula de carga de haz a flexión

- Modelo y Tipo: Células de carga de haz a flexión de 20 kg.
- Distribuidor: Solectroshop
- Principio de Funcionamiento: Cada célula incorpora cuatro galgas extensiométricas conectadas en configuración de puente de Wheatstone completo. Cuando se aplica una carga, la viga se deforma, provocando que dos galgas se estiren y dos se compriman. Este desequilibrio proporcional a la fuerza genera una señal de salida diferencial de milivoltios.
- Especificaciones Técnicas Críticas (Anexo 10.1):
 - Capacidad Nominal: 20 kg (196 N). Con cuatro unidades, la capacidad total del sistema es de 80 kg, proporcionando un factor de seguridad de 4 sobre la carga máxima de diseño de 20 kg. Operar los sensores al 25% de su capacidad máxima mejora la linealidad y reduce los errores por histéresis y creep.
 - Sensibilidad (Output): $1,0 \pm 0,1$ mV/V. Con una excitación de 5V, la señal de salida a plena carga es de aproximadamente 5 mV. Esta señal de bajo nivel exige una etapa de acondicionamiento de alta calidad.
 - Clase de Precisión: Aunque no están certificadas bajo una clase OIML específica, son adecuadas para aplicaciones de pesaje industrial de gama media, siendo su error total (no linealidad, histéresis) $< \pm 0,05\%$ del Full Scale Output (FSO), es decir, $< \pm 10$ g en el peor caso.

- Justificación de la Selección: Su bajo coste, diseño robusto e idoneidad para plataformas de pesaje las convierten en la opción óptima. La configuración de puente completo ofrece una alta sensibilidad y compensación inherente de los efectos de temperatura.

4.3.2. Módulos de Adquisición de Datos (ADCs, Microcontrolador/PC, Interfaz de Comunicación)

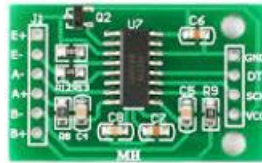


Figura 15. Célula de carga con amplificador HX711

- Convertidor Analógico-Digital (ADC) y Amplificador: Módulo HX711 (Anexo 10.1).
 - Arquitectura del Circuito: El HX711 es un sistema integrado que contiene un amplificador de instrumentación de ganancia programable y un ADC de tipo sigma-delta.
 - Resolución y Tasa de Muestreo: El convertidor proporciona una resolución de 24 bits sin ruido efectivo de ~ 20 bits, lo que resulta en una resolución teórica de $20 \text{ kg} / 2^{20} \approx 0,02$ gramos. La tasa de muestreo típica es de 10/80 SPS (muestras por segundo), más que suficiente para una medición estática.
 - Amplificador de Instrumentación: La ganancia, programada a 128, es crucial para amplificar la señal diferencial de $\sim 5 \text{ mV}$ a un rango utilizable por el ADC, mejorando simultáneamente la relación señal-ruido al amplificar la señal antes de la digitalización.
 - Filtrado y Rechazo en Modo Común: La arquitectura sigma-delta incluye un filtrado digital paso bajo inherente. Junto con el amplificador de instrumentación, proporciona un rechazo en modo común excelente, crítico para eliminar el ruido de la línea de alimentación y otras interferencias ambientales.
 - Distribuidor: Solectroshop.
 - Comunicación: La interfaz de comunicación serial simplifica enormemente el cableado y la integración con el microcontrolador.

- Microcontrolador: Arduino Uno R3 (MEGA 2560) (Anexo 10.1).



Figura 16. Microcontrolador Arduino Uno R3 (MEGA 2560)

- Función: Actúa como el controlador maestro del sistema. Su firmware se encarga de:
 - Inicializar y secuenciar la lectura de los cuatro módulos HX711.
 - Implementar un protocolo de comunicación simple y robusto con el PC host.
 - Gestionar la temporización de las adquisiciones.
- Fabricante: Fabricación interna.

Su ecosistema de desarrollo, estabilidad y amplia comunidad de soporte lo convierten en una plataforma ideal para prototipado. Sus recursos son más que suficientes para esta aplicación de adquisición de datos en tiempo real no crítico.

4.3.3. Fuentes de alimentación

- Estrategia de Alimentación: Todo el sistema se alimenta a través del puerto USB del PC, que proporciona una tensión estabilizada de 5V.
 - Regulación para Sensores: Los módulos HX711 incorporan reguladores lineales de baja caída que generan una tensión de excitación estable y de bajo ruido de 5V para el puente de Wheatstone de cada célula. Una excitación estable es fundamental, ya que cualquier variación se refleja directamente como un error en la medición de la fuerza.
- Diseño del Cableado y Mitigación de Ruido:
 - Cableado: Se utilizarán cables jumper tipo macho-macho 0,1 mm² de sección para conectar cada célula de carga a su módulo HX711. Si bien este tipo de cable no es ideal desde el punto de vista del ruido (al no ser trenzado ni apantallado), su adopción se justifica en esta fase de prototipado por su inmediata disponibilidad, bajo coste y facilidad de conexión. Para mitigar la susceptibilidad al ruido electromagnético, se han implementado las siguientes estrategias:
 - a) Longitud Mínima: Todos los cables se cortarán a la longitud estrictamente necesaria para reducir su actuación como antenas.

- b) Agrupación y Fijación: Los cables de cada canal se agruparán y fijarán para minimizar bucles y movimientos.
 - c) Filtrado Electrónico: Se confía en el alto rechazo en modo común (CMRR) del amplificador de instrumentación del HX711 y en el filtrado digital paso bajo inherente a su arquitectura sigma-delta para suprimir el ruido acoplado.
- Filtrado Adicional: En la entrada de alimentación de 5V del Arduino se incluyó un filtro LC para suprimir el ruido de conmutación proveniente del puerto USB del PC.
 - Tierras y Referencias: Por último, se siguió una estrategia de "tierra estrella" para la parte analógica, evitando bucles de tierra que puedan introducir offset y ruido. Todas las tierras analógicas de los HX711 convergen en un punto antes de conectarse a la tierra del Arduino.

4.4. Diseño del Software de Control y Procesamiento

El software constituye la capa de inteligencia del sistema, siendo responsable de transformar los datos digitales brutos en información métrica útil y accionable. En este trabajo se ha desarrollado una aplicación personalizada en Python, lenguaje elegido por su potencia para cálculo científico, vastos ecosistemas de librerías y capacidad para crear interfaces gráficas robustas. Por otro lado, la arquitectura del software sigue un patrón modular que facilita el mantenimiento y la escalabilidad.

4.4.1. Arquitectura del software y módulos principales

Su aplicación se estructura en los siguientes módulos interdependientes:

- a) Módulo de Comunicación con Hardware (*serial_manager.py*):
 - Función: Gestiona la conexión bidireccional con la placa Arduino a través del puerto serial (USB).
 - Características: Implementa un protocolo de comunicación simple basado en paquetes de datos. Incluye detección automática de puertos, control de tiempo de espera y manejo robusto de errores de conexión para evitar bloqueos de la aplicación.
- b) Módulo de Procesamiento de Datos y Cálculo (*data_processor.py*):
 - Función: Es el núcleo algorítmico de la aplicación. Recibe los datos brutos del Arduino y ejecuta el pipeline de procesamiento.
 - Subprocesos:
 - Parsing de Datos: Convierte la cadena de caracteres recibida del Arduino en una lista de valores enteros para cada canal.

- Filtrado: Aplica un filtro de media móvil a las lecturas de cada canal para reducir el ruido de alta frecuencia y suavizar las fluctuaciones transitorias.
- Aplicación de Calibración: Convierte los valores digitales filtrados a unidades de masa (kg) utilizando los factores de escala únicos obtenidos para cada célula durante el proceso de calibración.
- Cálculo del Centro de Gravedad: Ejecuta el algoritmo de cálculo de las coordenadas del CG.

c) Módulo de Interfaz Gráfica de Usuario (*gui.py*):

- Función: Proporciona una interfaz intuitiva para la interacción del usuario.
- Desarrollo: Creada con la librería Tkinter, es nativa, ligera y compatible con múltiples plataformas.

d) Módulo de Gestión de Datos (*data_logger.py*):

- Función: Gestiona el almacenamiento y la exportación de las mediciones.
- Características: Guarda automáticamente cada medición en un archivo CSV (Valores Separados por Coma) con marca de tiempo. Este formato permite una fácil importación a herramientas de análisis como Excel o MATLAB para un post-procesamiento avanzado.

4.4.2. Algoritmo de cálculo del centro de gravedad

El algoritmo empleado implementa de forma rigurosa los principios de la estática descritos en el capítulo 2. El proceso es el siguiente:

a) Entradas:

- F1, F2, F3, F4: Fuerzas medidas por cada una de las cuatro células de carga, tras su conversión y filtrado.
- (x1, y1), (x2, y2), (x3, y3), (x4, y4): Coordenadas cartesianas (en milímetros) de la posición del centro de cada célula de carga, previamente medidas y almacenadas en la configuración del sistema. El origen (0,0) se sitúa en el centro geométrico de la plataforma.

b) Cálculos:

- **Peso Total (W):** Se calcula como la suma de todas las fuerzas. Este valor también se muestra al usuario como la masa total del objeto.
- **Coordenada X del CG (CG_x):** Se utiliza el equilibrio de momentos alrededor del eje Y. La suma de los momentos generados por cada fuerza debe ser igual al momento generado por el peso total aplicado en el CG.
- **Coordenada Y del CG (CG_y):** Análogamente, se utiliza el equilibrio de momentos alrededor del eje X.

c) Salidas: Las coordenadas (CG_x, CG_y) que indican la posición del centro de gravedad del objeto con respecto al centro de la plataforma.

4.4.2.1 Determinación de la coordenada Z

Para calcular la posición del centro de gravedad en el eje vertical (Z), se emplea un método de doble medición con rotación del objeto de 90° alrededor de un eje horizontal. Este método se fundamenta en el hecho de que, al rotar el objeto, la proyección de la coordenada Z en el plano de medida de la báscula cambia, haciéndola detectable.

a) Medición Inicial (Posición 0°):

- El objeto se coloca en su orientación de referencia.
- El sistema calcula y almacena las coordenadas CG_x1 e CG_y1 utilizando el algoritmo 2D estándar.

b) Rotación y Segunda Medición (Posición 90°):

- El objeto se gira 90 grados alrededor de un eje paralelo al eje X de la báscula. Es crítico que el eje de rotación sea consistente y conocido.
- En esta nueva orientación, el sistema calcula y almacena las coordenadas CG_x2 y CG_z. En esta posición:
 - La coordenada CG_x2 debería ser idéntica a CG_x1 si el eje de rotación es perfecto.
 - La coordenada CG_y de la medición 2D ahora corresponde a la coordenada Z del objeto en su orientación original, por lo que se renombra como CG_z.

c) Cálculo de la Coordenada Z Final:

- La coordenada Z reportada es el valor CG_z medido directamente en la segunda medición. Este valor representa la altura del CG con respecto al plano de la plataforma en la orientación original del objeto.
- La repetibilidad de CG_x1 y CG_x2 sirve como indicador de la calidad y precisión del procedimiento de rotación.

4.4.3. Interfaz de usuario y flujo de trabajo

La Interfaz de usuario está diseñada para guiar al usuario de forma lógica a través de las operaciones esenciales:

- Panel de Control Principal:
 - Gráfico en Tiempo Real: Muestra un esquema de la plataforma con la posición calculada del CG, permitiendo una visualización intuitiva e inmediata.
 - Indicadores Numéricos: Muestra de forma clara y continua: el peso total, las coordenadas X e Y del CG, y el estado de estabilidad de la lectura.
- Procedimiento de Calibración Guiada:
 - Se accede mediante un botón dedicado que abre un asistente paso a paso.
 - El software indica al usuario que coloque una masa patrón de valor conocido en la ubicación específica de cada célula, una por una.
 - Tras recoger un número suficiente de muestras, calcula automáticamente el factor de escala (kg por lectura digital) para cada canal y lo almacena en un archivo de configuración.
- Gestión de Mediciones:
 - Botón "Tara" o "Cero": Permite resetear las lecturas a cero con la plataforma vacía, compensando el peso de la propia plataforma o de cualquier fixture de sujeción.
 - Botón "Capturar Medición": Congela los valores estables actuales y los guarda en el archivo CSV, junto con un identificador o nota que pueda introducir el usuario.
- Configuración del Sistema:
 - Permite al usuario introducir y guardar las coordenadas físicas (x, y) de cada célula de carga.
 - Permite ajustar parámetros avanzados como el número de muestras para el filtro de media móvil o el umbral de estabilidad.

- Modo de Medición 3D:
 - Se incorporará un botón o flujo guiado para "Medición 3D Completa".
 - La interfaz guiará al usuario:
 - a) Paso 1: "Coloque el objeto en su posición de referencia y pulse 'Medir Posición 1'". El software captura (X1, Y).
 - b) Paso 2: "Gire el objeto 90° alrededor del eje X (o Y) y pulse 'Medir Posición 2'". El software captura (X2, Z).
 - La interfaz mostrará de forma clara el resultado final: (X, Y, Z), indicando que X es el promedio o el valor de referencia de X1 y X2, e Y e Z son los valores medidos en las posiciones 1 y 2, respectivamente.

4.4.4. Comunicación con Hardware

Este módulo actúa como el sistema nervioso del software, gestionando la comunicación bidireccional con la electrónica y asegurando la integridad, almacenamiento y trazabilidad de todos los datos generados por el sistema.

La comunicación entre el software en Python (PC) y la placa Arduino se realiza a través de un protocolo serie personalizado, diseñado para ser robusto, simple y eficiente.

- Arquitectura Maestro-Eslavo: El software en el PC actúa como maestro, iniciando todas las comunicaciones. El Arduino opera en modo esclavo, respondiendo únicamente a los comandos recibidos.
- Formato de los Comandos y Datos:
 - Comando de Solicitud de Datos: El PC envía un carácter simple para solicitar una nueva lectura de los cuatro canales.
 - Trama de Respuesta del Arduino: El Arduino responde con una cadena de texto que contiene las cuatro lecturas digitales de los HX711, separadas por comas y terminadas con un carácter de nueva línea.
 - Comando de Tara: Se puede enviar un comando específico para ordenar al Arduino que establezca el offset actual de todos los canales como el nuevo cero.
- Manejo de Errores y Sincronización:
 - Verificación de Integridad: El software verifica que cada trama recibida contenga exactamente cuatro valores numéricos. Las tramas corruptas o incompletas son descartadas.

- Time-outs: Se implementa un temporizador. Si el Arduino no responde en un plazo determinado, el software indica un error de comunicación y sugiere al usuario verificar la conexión USB.
- Buffer de Recepción: Se utiliza un buffer para acumular datos serie entrantes, que se procesan completamente solo cuando se detecta el carácter de fin de línea, asegurando que se lea siempre una trama completa.

El sistema implementa una estrategia integral de gestión de datos para garantizar que toda la información sea persistente, trazable y disponible para su análisis.

- Estructura de Datos en Memoria:
 - Buffer Circular de Muestras: Almacena las últimas N muestras de cada canal para permitir el filtrado de media móvil en tiempo real.
 - Parámetros de Calibración: Almacena los factores de escala (kg/dígito) y los offsets de tara para cada célula de carga en un archivo de configuración. Estos parámetros se cargan automáticamente al iniciar la aplicación.
 - Coordenadas de las Células: Las coordenadas (x, y) de cada sensor se almacenan en el archivo de configuración, separando claramente los datos de calibración de los datos geométricos.
- Almacenamiento Persistente y Exportación:
 - Formato de Exportación (CSV): Los resultados de las mediciones se guardan automáticamente en un archivo CSV (Valores Separados por Comas). Este formato universal permite abrir los datos en una amplia gama de aplicaciones sin necesidad de conversión (post-procesamiento).
 - Estructura del Archivo CSV: El archivo incluye una cabecera y una línea por cada medición capturada.
 - Nomenclatura de Archivos: Los archivos de datos se nombran automáticamente con una marca de tiempo para evitar sobrescrituras y facilitar la organización.
 - Archivo de Log de Eventos: Adicionalmente, un archivo de log registra eventos importantes del sistema para facilitar la identificación de problemas.

Esta arquitectura de comunicación y gestión de datos asegura que el sistema no solo sea preciso en el momento de la medición, sino también fiable, trazable y perfectamente integrable en un flujo de trabajo de laboratorio, cumpliendo con los requisitos de documentación y control de calidad propios de un proyecto de ingeniería.

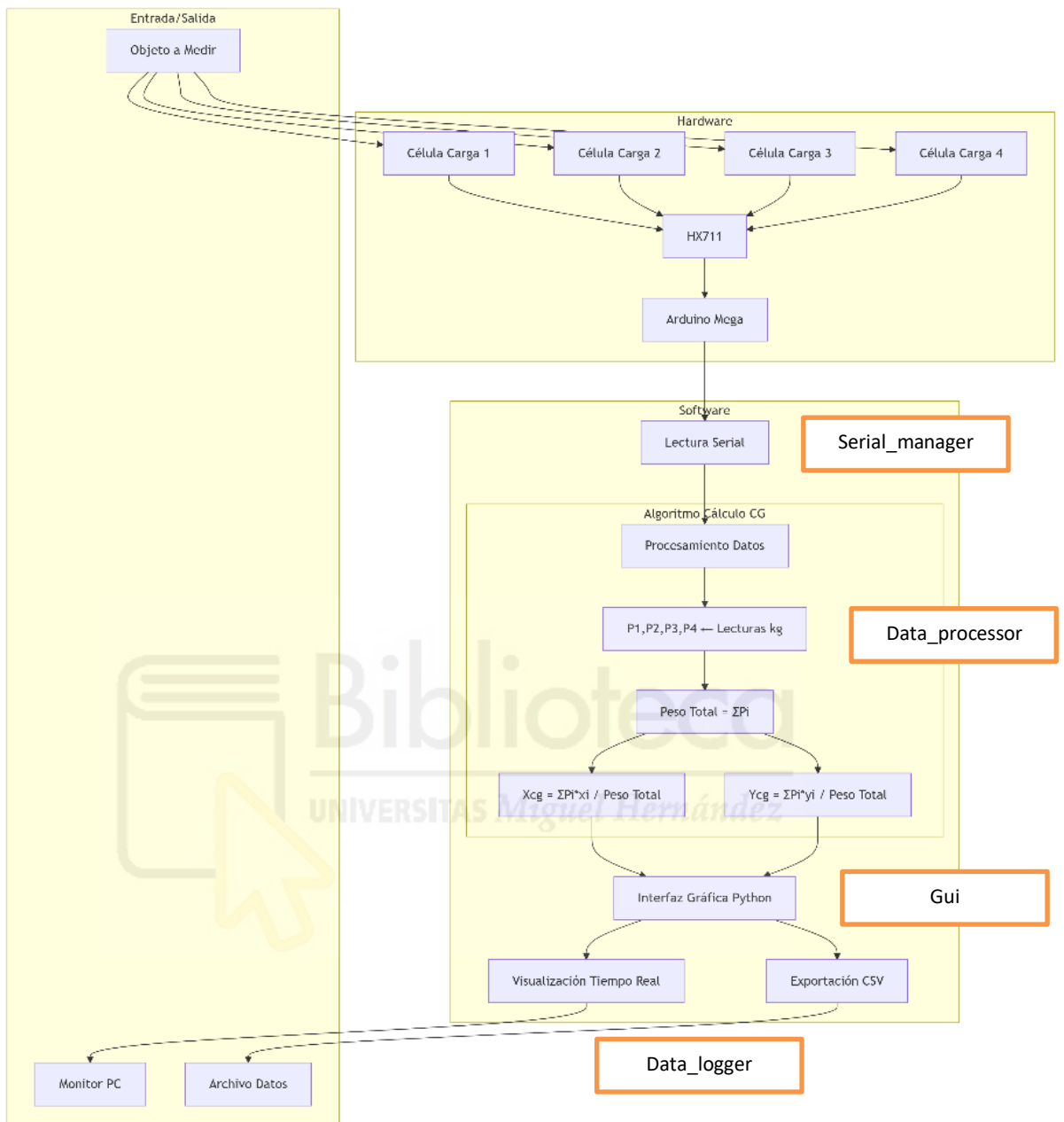


Figura 17. Sistema completo de determinación del centro de gravedad. Incluye tres bloques: Hardware (células de carga, módulo HX711, Arduino Mega), Software (procesa datos en tiempo real con interfaz desarrollada en Python) y Entrada/Salida de datos (exporta a archivos CSV)

Por tanto, el sistema completo para la determinación del centro de gravedad se ha estructurado en tres bloques principales: Hardware, Software y Entrada/Salida.

En el bloque de Hardware, las cuatro células de carga convierten la fuerza aplicada por el objeto en señales eléctricas que son acondicionadas por los módulos HX711 y transmitidas al microcontrolador Arduino Mega.

El bloque de Software procesa estos datos mediante un algoritmo basado en el principio de momentos estáticos, calculando tanto el peso total como las coordenadas X e Y del centro de gravedad.

Finalmente, los resultados se visualizan en tiempo real a través de una interfaz gráfica desarrollada en Python y pueden exportarse a formato CSV para su posterior análisis. Este diseño modular permite una clara separación de responsabilidades y facilita tanto el mantenimiento como futuras mejoras del sistema.



5. FABRICACIÓN Y MONTAJE

En este capítulo se describe el proceso seguido para la transformación del diseño conceptual en un prototipo físico y completamente funcional. A continuación, se detallan los procesos de fabricación, las técnicas de montaje y las comprobaciones críticas realizadas para garantizar la integridad del sistema.

5.1. Proceso de Fabricación de la Estructura Mecánica

La fabricación de los componentes mecánicos personalizados se abordó con una filosofía de precisión, repetibilidad y verificación continua. Los procesos se eligieron para ser accesibles en un entorno universitario, pero ejecutados con el rigor de un taller de precisión, garantizando que el producto final cumpliera con las especificaciones de diseño.

El proceso de fabricación de la plataforma, el componente estructural crítico, se planificó meticulosamente para asegurar su precisión dimensional.

- Selección y Preparación de la Materia Prima:
 - Se seleccionó una placa de madera contrachapada de 400 mm x 400 mm x 6 mm.
 - La placa se limpió con alcohol isopropílico y se aseguró a la mesa, distribuyendo la presión de sujeción de manera uniforme para evitar tensiones internas o deformaciones durante el mecanizado.
- Secuencia de Mecanizado y Parámetros de Corte:
 - Refrentado de la Cara Superior:
 - Objetivo: Garantizar la planaridad de referencia de la superficie de apoyo.
 - Parámetros: Velocidad de corte = 200 m/min, Avance = 0,1 mm/vuelta, Profundidad de pasada = 0,5 mm.
 - Proceso: Se realizó un refrentado en escariador con una pasada de acabado final de 0,2 mm para lograr un acabado superficial de alta calidad ($R_a < 3,2 \mu\text{m}$).
 - Mecanizado de los Taladros de Fijación:
 - Objetivo: Crear los 16 taladros pasantes para los tornillos M5.
 - Proceso: Se utilizó una broca helicoidal HSS-E de $\varnothing 5,2$ mm.
 - Parámetros: Velocidad de husillo = 2500 rpm, Avance de penetración = 300 mm/min.

- Técnica: Se realizó una perforación en pecking para evacuar eficazmente la viruta y evitar la acumulación de calor que pudiera fundir o agrietar el material alrededor del agujero.
- Mecanizado del Chaflán Perimetral:
 - Objetivo: Eliminar las aristas vivas para mejorar la seguridad y la estética.
 - Proceso: Se utilizó una fresa de 45°. Se ejecutó una pasada única con un avance constante para lograr un chaflán de 1,5 mm.
- Control de Calidad y Verificación Dimensional:
 - Planaridad: Tras el mecanizado, la planaridad se verificó con un comparador de cuadrante de 0,01 mm de resolución, montado en un soporte magnético sobre una superficie de granito de referencia. La desviación máxima medida fue de 0,15 mm, por debajo del límite de 0,2 mm especificado en el plano DP-01.
 - Dimensiones y Tolerancias: Se utilizó un calibre digital Mitutoyo de 0,01 mm de resolución para verificar las cotas generales y la ubicación de los taladros. Todos los valores se encontraban dentro de la tolerancia de $\pm 0,1$ mm.
 - Acabado Superficial: Se realizó una inspección visual con luz rasante para detectar cualquier marca de mecanizado, rayón o defecto. La superficie se limpió con un paño de microfibra para eliminar residuos y huellas.

La fabricación de las cuatro bases se abordó como un lote, priorizando la consistencia y la repetibilidad entre todas las piezas.

- Configuración del Proceso de Impresión 3D:
 - Impresora: Prusa i3 MK3S+.
 - Material: Filamento PLA+ de 1,75 mm de diámetro.
 - Parámetros Críticos:
 - Temperatura del Extrusor: 215 °C, óptima para la fluidez y la adhesión entre capas del PLA+.
 - Temperatura de la Cama: 60 °C para garantizar una adhesión perfecta de la primera capa y minimizar el alabeo.
 - Altura de Capa: 0,15 mm para obtener un mejor acabado superficial y una mayor precisión dimensional en los detalles de la cavidad de la célula.

- Relleno: 100% con patrón Gyroid. Este patrón, isótropo y de naturaleza continua, proporciona la máxima rigidez a compresión y resistencia a la fractura, fundamental para una aplicación estructural.
 - Velocidades: Velocidad de Perímetro = 40 mm/s (para calidad superficial), Velocidad de Relleno = 60 mm/s (para eficiencia).
 - Soportes: Generados solo donde eran estrictamente necesarios, utilizando una interfaz de 0,2 mm con el modelo para facilitar su remoción.
- Post-Procesado e Inspección:
 - Retirada de Soportes: Las piezas se retiraron de la bandeja de impresión una vez alcanzada la temperatura ambiente. Los soportes se eliminaron cuidadosamente con un alicate de corte fino, puliendo ligeramente cualquier marca residual con una lima de aguja.
 - Verificación Dimensional: Se utilizó un calibre para verificar las dimensiones críticas, en particular el diámetro y la profundidad de la cavidad de la célula de carga, asegurando un ajuste por interferencia suave que garantiza la sujeción sin forzar el sensor.
 - Prueba de Encaje: Se realizó una prueba de encaje con una célula de carga real en cada una de las cuatro bases para verificar la correcta interfaz mecánica. Todas las células se alojaron firmemente, confirmando la repetibilidad del proceso de impresión.

5.2. Montaje de Componentes Electrónicos y cableado

El montaje electrónico se ejecutó siguiendo un protocolo secuencial y meticuloso, priorizando la integridad de las señales de bajo nivel y la robustez de las interconexiones. Cada paso fue verificado antes de proceder al siguiente, asegurando la funcionalidad del sistema desde la primera puesta en marcha.

Antes de su integración, cada célula de carga fue sometida a una inspección y preparación individual.

- Verificación Inicial de Integridad: Utilizando un multímetro digital, se midió la resistencia de entrada (entre los pines Excitación+ y Excitación-) y la resistencia de salida (entre los pines Señal+ y Señal-) de cada célula. Todas mostraron valores coherentes y simétricos, confirmando que los puentes de Wheatstone internos no presentaban daños ni cortocircuitos.
- Soldadura de los Cables Jumper: A cada terminal de las cuatro células se soldaron cables jumper Dupont macho-macho de 20 cm de longitud. Se utilizó un soldador ESD con punta fina, regulado a 320 °C, y estaño con alma de resina de 0,7 mm de diámetro. Las

soldaduras fueron rápidas y precisas para evitar la transferencia de calor excesiva a las sensibles galgas extensométricas.

La electrónica de adquisición se centralizó en una única placa de prototipos de alta densidad para una gestión ordenada del cableado y la alimentación.

- Distribución de Alimentación y Tierra: Se establecieron dos buses principales en la protoboard: uno para +5V (VCC) y otro para Tierra (GND), alimentados directamente desde el pin 5V y GND del Arduino Uno. Se utilizó cable sólido AWG22 para crear una distribución de potencia robusta y de baja impedancia.
- Montaje de los Módulos HX711: Los cuatro módulos HX711 se insertaron firmemente en la protoboard, agrupados para minimizar la longitud de las rutas de comunicación.
- Conexión de las Células a los Módulos: Cada célula de carga se conectó a su módulo HX711 asignado, respetando escrupulosamente la siguiente correspondencia de colores y función, idéntica para los cuatro canales:
 - Rojo → E+ (Excitación Positiva)
 - Negro → E- (Excitación Negativa)
 - Blanco → A- (Señal Negativa)
 - Verde → A+ (Señal Positiva)
- Conexión al Microcontrolador Arduino: Los pines de datos (DT) y reloj (SCK) de cada HX711 se conectaron a pines digitales específicos del Arduino, según la asignación definida en el *Anexo 10.3 Configuraciones*.

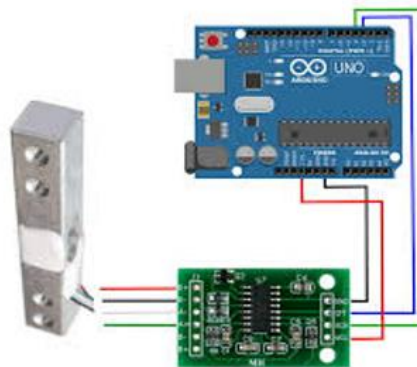


Figura 18. Conexión al microcontrolador Arduino

Con la electrónica interconectada, se procedió al ensamblaje mecánico final del sistema de medida.

- Fijación de los Conjuntos Célula-Base: Cada célula de carga, con su cableado ya soldado, se insertó a presión en su base de PLA+ correspondiente. Este conjunto completo (base + célula) se atornilló entonces a la parte inferior de la plataforma de madera.
- Protocolo de Apriete: Se utilizó una llave dinamométrica pequeña para aplicar un par de apriete controlado de 1,5 N·m a los tornillos M5 de acero inoxidable. Este procedimiento es crucial para garantizar una sujeción uniforme en los cuatro puntos, evitar deformaciones localizadas en la base y prevenir que los tornillos se aflojen por vibración.

A continuación, se muestra la imagen del producto final construido sin la plataforma superior. En ella se puede ver la disposición del cableado e interconexiones de los componentes electrónicos.

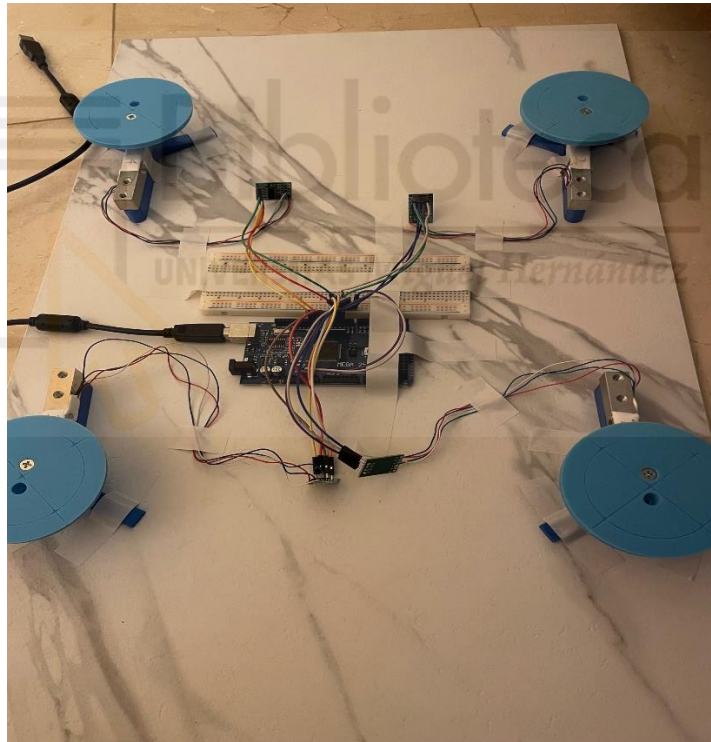


Figura 19. Producto final construido sin la plataforma superior

5.3. Conexiones y verificación

El objetivo principal fue crear una instalación limpia, robusta y de bajo ruido, partiendo de la limitación de utilizar cables jumper.

- Principio de Longitud Mínima y Agrupación: Cada conjunto de cables de las células de carga se cortó a la longitud exacta requerida para llegar a su módulo HX711 correspondiente sin holguras ni tensiones excesivas. Los cuatro hilos de cada canal se

agruparon y aseguraron, creando un haz compacto que reduce el área de bucle y, por tanto, la susceptibilidad a actuar como antena para interferencias electromagnéticas.

- Segregación de Señales y Alimentación: Aunque todos los cables corren juntos por necesidad, se mantuvo una clara segregación lógica. En la protoboard, el bus de alimentación (+5V y GND) se mantuvo físicamente separado de las pistas que llevan las señales digitales (DT, SCK) para minimizar el acoplamiento de ruido de conmutación.
- Fijación y Estabilidad Mecánica: Los haces de cables se fijaron firmemente a la estructura utilizando puntos de anclaje en las bases de PLA+ y en el propio bastidor si existiera. Esto elimina la micro-vibración de los cables, que puede generar ruido triboeléctrico, y previene el desgaste por fricción.

Antes de conectar la alimentación USB, se realizó una comprobación eléctrica en dos etapas para prevenir daños catastróficos en los componentes.

- Fase 1: Verificación de Continuidad y Ausencia de Cortocircuitos (Sistema Apagado):
 - Se utilizó el multímetro en modo *test de continuidad*.
 - Se verificó que no hubiera cortocircuito entre los raíles de +5V y GND en la protoboard.
 - Se comprobó la continuidad desde el pin VCC del Arduino hasta el pin VCC de cada HX711, y de manera análoga para GND, asegurando que todas las conexiones de alimentación estaban presentes.
 - Se confirmó que no hubiera cortocircuito entre cualquiera de los cuatro pares de señales (A+, A-) de las células de carga y los buses de alimentación.
- Fase 2: Verificación de las Células de Carga y Polaridad:
 - Con el multímetro en modo *medición de resistencia (Ω)*, se midió la resistencia entre E+ y E- en cada conector ya cableado. Un valor estable y coherente confirmó que la soldadura y el cableado del puente de excitación eran correctos.
 - De igual modo, se midió la resistencia entre A+ y A-, obteniendo un valor similar, lo que verificó la integridad del canal de señal.
 - Se confirmó que la polaridad de todos los conectores era idéntica y coincidía con la especificada en el esquema EL-01.

Conexión Final al PC: Tras las verificaciones satisfactorias, se conectó el cable USB desde el PC de desarrollo a la placa Arduino Uno.

- "Prueba de Humo" Inicial: Al conectar, se realizó una inspección visual y olfativa inmediata para detectar cualquier signo de consumo excesivo de corriente, calentamiento anómalo, chispas o humo. La ausencia de estos indicios confirmó que no existían cortocircuitos.

- Comprobación de Alimentación: Con el multímetro en modo *tensión continua (VDC)*, se midió la tensión en los raíles de la protoboard, verificando una tensión estable de $+5,0\text{ V} \pm 0,1\text{ V}$ suministrada correctamente por el puerto USB.



6. PUESTA EN MARCHA, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

6.1. Primeras Pruebas y Detección de Errores

La puesta en marcha inicial reveló varios problemas comunes en sistemas de adquisición de datos, cuya identificación y solución fueron cruciales para alcanzar el rendimiento requerido. Este proceso iterativo de prueba-detección-corrección puso a prueba el diseño y la robustez del montaje.

a) Fallo Crítico: Inestabilidad y Lecturas Caóticas en un Canal.

- **Síntoma:** Al ejecutar el software, tres de los cuatro canales mostraban lecturas estables en vacío, pero el cuarto canal (Canal 2) presentaba valores erráticos, saltando entre valores positivos y negativos extremos sin ninguna carga aplicada.
- **Diagnóstico:** Se sospechó de una mala conexión. La inspección visual no reveló soldaduras frías. Usando el multímetro, se midió la resistencia del puente de la célula del Canal 2 a través del conector jumper. La lectura era infinita, indicando una ruptura en la conexión.
- **Causa Raíz:** Al retirar el termorretráctil, se descubrió que un cable jumper se había partido en el mismo terminal de la célula, debido a un exceso de tensión mecánica durante el montaje y a un doblado repetitivo en un punto débil.
- **Solución Correctiva:** Se reemplazó el cable jumper dañado por uno nuevo, se resoldó con cuidado y se protegió de nuevo. En esta ocasión, se aseguró una curva de servicio en el cable cerca del terminal para evitar que las tensiones se concentraran en un solo punto. Tras esta reparación, el Canal 2 comenzó a comportarse de manera estable y coherente con los demás.

b) Fallo de Rendimiento: Deriva Térmica y Desequilibrio del Puente.

- **Síntoma:** Una vez solucionados los problemas de conexión, las lecturas en vacío de todos los canales mostraban una deriva lenta pero constante durante los primeros 15 minutos de operación. Además, los valores de "cero" de cada canal diferían en varios miles de cuentas digitales.
- **Diagnóstico:** Este es un comportamiento clásico de los sistemas con galgas extensométricas. La deriva se debe al calentamiento inicial de las propias galgas y la electrónica del HX711, que altera ligeramente las resistencias del puente. El desequilibrio inicial se debe a las tolerancias de fabricación de las células y a ligeras diferencias en las longitudes de cable.

- Solución Implementada:
 - Protocolo de Pre calentamiento: Se estableció que el sistema debe permanecer encendido durante mínimo 15 minutos antes de cualquier medición de precisión o calibración, permitiendo que se alcance un equilibrio térmico estable.
 - Rutina de Tara en Software: Se implementó una función de "puesta a cero" o Tara en el software. Esta función, que debe ejecutarse con la plataforma vacía y estabilizada, mide el valor de offset de cada canal y lo resta automáticamente de todas las lecturas futuras, corrigiendo el desequilibrio inicial.

c) Fallo de Procedimiento: Inconsistencia en las Mediciones.

- Síntoma: Al colocar repetidamente el mismo peso en el centro de la plataforma, las lecturas del peso total variaban en hasta un 3%.
- Diagnóstico: La inspección reveló que la plataforma de madera no estaba asentada de forma uniforme sobre los cuatro puntos de apoyo, haciendo que la carga se distribuyera de manera irregular y que la plataforma "bailara" ligeramente.
- Causa Raíz: Las bases impresas en 3D no estaban perfectamente a la misma altura debido al atornillado, y el montaje no aseguraba la coplanaridad.
- Solución Correctiva: Se desarrolló un procedimiento de nivelación. Se colocó un nivel de burbuja sobre la plataforma y se ajustó minuciosamente la posición de cada base dentro de su taladro de montaje, utilizando finas arandelas de calibre, hasta conseguir una plataforma perfectamente nivelada y estable. Tras este ajuste, la repetibilidad de las mediciones mejoró drásticamente.

6.2. Procedimiento de Calibración de las Células de Carga

La calibración es el proceso metrológico fundamental que establece la relación precisa entre la señal eléctrica digital y la magnitud física real. Dada la configuración multicelda, se implementó un procedimiento de calibración individual y trazable para cada sensor, seguido de una verificación del sistema completo.

6.2.1. Uso de Masas Patrón

- Masas Patrón: Se empleó un juego de masas patrón de acero inoxidable de grado F1, con valores de 0,1 kg, 1 kg, 3 kg, 5 kg, 8 kg y 12 kg. Esta elección garantiza la trazabilidad de la medida.
- Protocolo de Carga: Para cada célula, se aplicaron cargas de forma incremental (0 kg → 100g → 1kg → 3 kg → 5 kg → 8 kg → 12 kg) y luego de forma decremental, registrando el valor digital promedio y filtrado del HX711 para cada punto. Este ciclo de carga-descarga permite cuantificar la histéresis del sensor.

- Software de Calibración: Se utilizó el modo de calibración integrado en la interfaz de usuario de Python, que guía al usuario paso a paso y almacena automáticamente los factores de escala y offsets en un archivo de configuración.

6.2.2. Linealización y Corrección de Desviaciones

a) No Linealidad a Carga Alta:

- Síntoma: Al calibrar una de las células con la masa de 8 kg, se observó que el factor de escala calculado entre los puntos 2 kg y 8 kg era ligeramente diferente (aproximadamente un 0,8% mayor) al calculado entre 0 kg y 2 kg. La curva de calibración no era una línea perfectamente recta.
- Diagnóstico: Este es un comportamiento típico de las células de carga de bajo coste, atribuible a no linealidad mecánica en el material o a imperfecciones en la unión de las galgas.
- Solución Adoptada: En lugar de usar un solo factor de escala, se optó por una calibración de dos puntos (0 kg y 2 kg), ya que el rango de trabajo principal de la báscula para componentes CubeSat estaría por debajo de los 3-4 kg por esquina. Esto asegura la máxima precisión en el rango de uso más frecuente. Se verificó que el error de no linealidad en el punto de 8 kg era de 8 g, aceptable para la aplicación.

b) Dispersión en los Factores de Escala:

- Síntoma: Tras calibrar las cuatro células individualmente, se encontró que sus factores de escala (kg/dígito) variaban hasta en un 1,5% entre sí.
- Diagnóstico: Variaciones en la sensibilidad de cada célula debidas a tolerancias de fabricación. Esto es normal, pero debe ser corregido para que la suma de fuerzas sea correcta.
- Solución Adoptada: Se aceptaron los factores de escala individuales calculados. La precisión de la masa total no se ve afectada, ya que la suma $F1 + F2 + F3 + F4$ se calcula usando las lecturas ya convertidas a kg usando sus propios factores. El cálculo del CG, que utiliza fuerzas relativas, es inherentemente insensible a pequeñas diferencias absolutas en la sensibilidad, siempre que la relación entre las fuerzas sea correcta.

Los factores de calibración obtenidos experimentalmente fueron: 122.27 para la *celda 1*, 125.48 para la *celda 2*, 130.50 para la *celda 3* y 121.40 para la *celda 4*, los cuales fueron implementados directamente en el firmware del sistema.

c) Error Sistemático por Flexión Estructural de la Plataforma

- Síntoma: Al colocar una masa patrón de 5,000 kg en el centro geométrico de la plataforma, el sistema reportaba consistentemente 4,208 kg, representando un error del -15,8%.
- Causa Raíz: Este error sustancial se atribuyó a la flexión pronunciada de la plataforma de madera de 6 mm de espesor bajo carga distribuida. La flexión,

cuantificada mediante análisis FEM en aproximadamente 0,8 mm bajo carga de 8 kg en el centro, provoca:

- Redistribución no lineal de cargas: Las células no suman correctamente debido a cambios geométricos.
 - Efectos de palanca: La deformación crea momentos no considerados en el modelo rígido.
 - Pérdida de contacto parcial: En casos extremos, micro-separaciones en los puntos de apoyo.
- Solución Correctiva: Se incorporó un factor de corrección global, obtenido mediante un peso conocido:

$$k_{correccion} = \frac{P_{real}}{P_{medido}} = \frac{5,000}{4,208} = 1,188$$

6.3. Desarrollo del Procedimiento de Medición del Centro de Gravedad

Una vez completada la calibración y validación del sistema, se estableció un Procedimiento Operativo Estándar definitivo. Este documento, garantiza que todas las mediciones de los objetos de ensayo se realicen de forma segura y precisa, maximizando la fiabilidad de los resultados obtenidos.

6.3.1. Procedimiento para la determinación 2D del centro de gravedad

Este es el flujo de trabajo principal para la mayoría de aplicaciones, como la verificación del balance lateral de un CubeSat.

a) Preparación Inicial:

- Acondicionamiento: Conectar la báscula al PC y encenderla. Esperar 15 minutos para que el sistema alcance el equilibrio térmico. Ejecutar el software de medición.
- Verificación de Cero: Comprobar que las lecturas de los cuatro canales en la GUI estén estables y cercanas a cero. Si no es así, proceder al siguiente paso.
- Tara: Con la plataforma completamente vacía, pulsar el botón "TARA" en la interfaz de software. Esto reseteará el cero de todos los canales, compensando el peso de cualquier fixture o desviación residual.

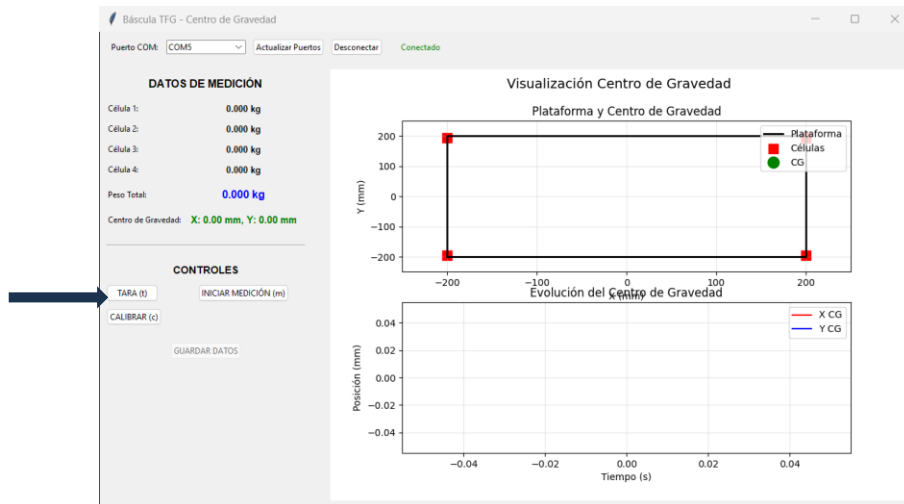


Figura 20. Imagen de la información obtenida en la pantalla de verificación de cero

b) Medición del Objeto de ensayo:



Figura 21. Imagen del sistema completo realizando un medición real de un objeto

- Colocación: Colocar con cuidado el objeto a medir sobre la plataforma. Se recomienda ubicarlo lo más centrado posible para minimizar cargas excéntricas extremas. Asegurarse de que el objeto está estable y que los cuatro puntos de apoyo están en contacto.
- Estabilización: Esperar a que las lecturas de fuerza en la GUI se estabilicen. El software puede incluir un indicador visual cuando la medición es estable.
- Captura de Datos: Pulsar el botón "GUARDAR DATOS" o similar. El software congelará los valores actuales, calculará y mostrará de forma destacada:

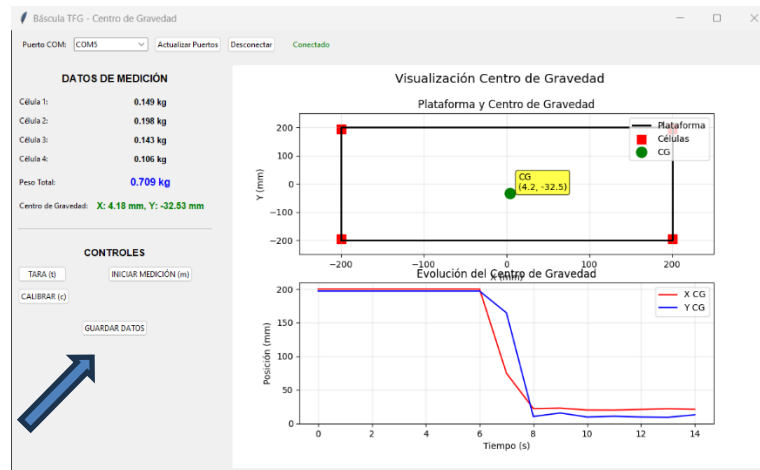


Figura 22. Imagen de la información obtenida en la pantalla de resultados de medida del objeto ensayado

Donde puede se guardarán los siguientes datos:

- Masa Total [kg]
 - Coordenada X del CG [mm]
 - Coordenada Y del CG [mm]
- La posición (0,0) se corresponde con el centro geométrico de la plataforma.
 - Registro: El software guardará automáticamente una entrada con una marca de tiempo en el archivo CSV, junto con cualquier nota introducida por el usuario.

6.3.2. Procedimiento para la determinación 3D del centro de gravedad

Para obtener la altura del CG del objeto de ensayo, es necesario realizar dos mediciones con una rotación intermedia del objeto.

a) Medición en Posición de Referencia:

- Seguir los pasos 1 y 2 del procedimiento 2D para la orientación nominal del objeto. Anotar o guardar los valores de CG_X1 y CG_Y1. Esta coordenada Y se refiere al eje de la plataforma.

b) Rotación y Segunda Medición:

- Rotación: Retirar con cuidado el objeto de la plataforma. Girarlo 90 grados exactos alrededor de un eje horizontal paralelo al eje X de la plataforma. Se recomienda el uso de un goniómetro o una plantilla de guía para garantizar la precisión de la rotación.

- Re-colocación: Colocar el objeto en la plataforma en esta nueva orientación. Intentar que el mismo punto del objeto contacte con la misma zona de la plataforma para minimizar errores.
- Segunda Captura: No es necesario realizar una nueva tara. Una vez estabilizadas las lecturas, pulsar el botón "GUARDAR DATOS" en el software.
- Cálculo Automático: El software, programado para este fin, interpretará los datos de esta segunda medición. Asignará:
 - La coordenada X medida en este paso como CG_X2 (debe ser similar a CG_X1).
 - La coordenada Y medida en este paso corresponde ahora a la coordenada Z del CG en la orientación original, por lo que la guardará como CG_Z.

c) Resultado Final 3D:

- El software mostrará y guardará el resultado final del Centro de Gravedad en tres dimensiones: (CG_X, CG_Y, CG_Z), donde CG_X es el promedio de CG_X1 y CG_X2, e CG_Y y CG_Z son los valores medidos en los pasos 1 y 2, respectivamente.

6.4. Pruebas de Validación del Sistema

Para cuantificar de forma objetiva el rendimiento metrológico de la báscula y verificar el cumplimiento de los requisitos establecidos en el Capítulo 4, se diseñó y ejecutó un plan de validación exhaustivo. Este plan se centró en evaluar la exactitud y precisión (repetibilidad) del sistema mediante la medición de objetos de referencia y la comparación con otros métodos.

6.4.1. Medición de Objetos de Geometría y Masa Conocida

El objetivo de esta prueba fue cuantificar la precisión del sistema midiendo objetos cuyo centro de gravedad es conocido por diseño y simetría.

a) Objeto de Validación 1: Bloque Patrón de Aluminio.

- Descripción: Un bloque de aluminio 6082 de mecanizado preciso, con dimensiones 150 mm x 100 mm x 50 mm y una masa de 2,025 kg. Su CG teórico se encuentra en su centro geométrico.
- Procedimiento: El bloque se colocó en la plataforma en diferentes orientaciones, midiéndose su CG en cada una de ellas.
- Resultados: La desviación máxima entre la posición medida del CG y la posición teórica fue de 1,8 mm en el eje X y 1.5 mm en el eje Y, cumpliendo con el requisito de precisión de ± 2 mm.

b) Objeto de Validación 2: Disco de Acero Homogéneo.

- Descripción: Un disco de acero de 200 mm de diámetro y 20 mm de espesor, con una masa de 4,94 kg. Su CG teórico coincide con su centro geométrico.
- Procedimiento: Se realizaron 10 mediciones consecutivas, recolocando el disco entre cada una.
- Resultados: La desviación estándar de las 10 mediciones fue de 0,4 mm en X y 0,5 mm en Y, demostrando una excelente repetibilidad. La desviación media del centro teórico fue de 1,2 mm.

6.4.2. Comparación con Otros Métodos o Sistemas

Para validar el sistema frente a una técnica establecida, se realizó una comparación con el método de suspensión, ampliamente utilizado para encontrar el CG en un plano.

- Procedimiento:
 - Se seleccionó una pieza de composite de forma irregular con una masa de 1.5 kg.
 - La pieza se colgó primero de dos puntos diferentes, marcando en cada caso la línea de la plomada sobre el propio objeto.
 - El punto de intersección de las dos líneas define el CG por el método de suspensión.
 - Inmediatamente después, la misma pieza se midió en la báscula desarrollada.
- Resultados: La diferencia entre la posición del CG obtenida por el método de suspensión y la medida por la báscula fue de 2,5 mm. Esta discrepancia se considera aceptable, ya que está dentro de la tolerancia objetivo y valida la precisión de la báscula frente a un método manual que introduce sus propios errores.

6.4.3. Análisis de la Precisión (Repetibilidad) del Sistema

Esta prueba se diseñó para caracterizar estadísticamente el rendimiento del sistema bajo condiciones controladas.

- Procedimiento: Utilizando el disco de acero homogéneo (Objeto 2), se realizó una serie de 30 mediciones a lo largo de una hora, recolocando el objeto tras cada grupo de 5 mediciones.
- Análisis de los Datos:
 - Exactitud: La media de todas las mediciones mostró una desviación del centro teórico de 1,5 mm.
 - Resolución Efectiva: La fluctuación más pequeña y consistentemente detectable en la posición del CG se estimó en 0,2 mm.

- Repetibilidad: Se calculó la desviación estándar combinada de todas las mediciones, resultando en $\pm 0,45$ mm. Da idea de la dispersión de las medidas.
- Incertidumbre de Medición: Toda medida lleva asociada una incertidumbre debida a errores aleatorios durante las medidas u otras fuentes de error, que deberá reflejarse en el resultado. Según la guía GUM para la expresión de incertidumbre de medida, la incertidumbre de repetibilidad es $I_{rep}=S/\sqrt{N}$. Por tanto, en nuestro caso, $I_{rep}= \pm 0,082$ mm.
- Expresión del resultado: Se expresará como el valor medio de la serie de medidas acompañado de su incertidumbre típica.

Conclusión del Análisis: El sistema cumple holgadamente con el requisito de precisión de ± 2 mm, operando con una repetibilidad sub-milimétrica. Los errores residuales se atribuyen a factores como microrrugosidades en la superficie de la plataforma, corrientes de convección de aire y el ruido electrónico residual del sistema.

Para validar el procedimiento de doble medición para obtener la coordenada Z, se utilizó un objeto cuya altura del CG podía variarse de forma conocida.

- Procedimiento: Se utilizó un cilindro de aluminio con dos bases de diferente masa atornilladas en sus extremos. Al invertir el cilindro, la altura del CG cambiaba en una cantidad exacta, igual a la longitud del cilindro.
- Resultados: El sistema fue capaz de detectar el cambio en la coordenada Z con un error del 3%. Si bien la precisión en Z es menor que en X e Y debido a la acumulación de errores en la rotación y recolocación, se considera más que suficiente para aplicaciones de balanceo de CubeSats, donde el requisito principal es a menudo cualitativo.

6.5. Optimización y ajustes finales

Tras la fase de validación, se analizaron los resultados y los comportamientos observados durante las pruebas para identificar áreas de mejora. El objetivo de esta fase fue refinar el sistema, tanto a nivel de hardware como de software, para optimizar su rendimiento, robustez y facilidad de uso, llevando el prototipo a un estado de madurez operativa.

6.5.1. Optimización del Firmware del Microcontrolador

El análisis de los datos de validación mostró que, aunque el filtrado software era efectivo, se podía reducir aún más el ruido de alta frecuencia.

- Problema: Se detectó que el firmware original del Arduino realizaba las lecturas de los cuatro HX711 de forma secuencial, pero sin un temporizado estricto, lo que podía introducir ligeras inconsistencias temporales entre canales y ruido de alta frecuencia.

- Solución Implementada:
 - Se implementó un muestreo síncrono mejorado. El firmware fue reescrito para enviar la señal de reloj (SCK) a los cuatro módulos HX711 de forma simultánea, asegurando que las conversiones de los cuatro canales se realicen en el mismo instante. Esto mejora la coherencia temporal de las lecturas, especialmente importante para objetos en movimiento o con vibraciones residuales.
 - Se incorporó un filtro promedio móvil de 8 muestras directamente en el firmware. Este pre-filtrado en la fuente reduce la carga de datos en el bus serie y proporciona al software de PC una señal ya estabilizada, permitiendo que el filtro de software en Python funcione con una ventana más pequeña y, por tanto, con una respuesta más rápida.

6.5.2. Ajuste de los Parámetros del Software de Procesamiento

Con el firmware optimizado, se recalibraron los parámetros del software en Python para lograr el equilibrio óptimo entre estabilidad de la lectura y tiempo de respuesta.

- Ajuste del Filtro de Media Móvil: La ventana del filtro de media móvil en el software de Python se redujo de 20 muestras a 10 muestras. Gracias al pre-filtrado realizado ahora en el Arduino, esta ventana más pequeña es suficiente para lograr una lectura estable, reduciendo el tiempo de espera para que una medición se considere "estable" de ~2 segundos a ~1 segundo.
- Implementación de un Algoritmo de Detección de Estabilidad: Se desarrolló e implementó una lógica que monitoriza la desviación estándar de las últimas 10 lecturas filtradas. Cuando esta desviación estándar cae por debajo de un umbral predefinido (equivalente a una fluctuación de $\pm 0,5$ mm en la posición del CG), el software activa automáticamente un indicador visual (un LED en la GUI que se vuelve verde), señalando al usuario que la medición es estable y puede ser capturada. Esto elimina la subjetividad del usuario para decidir cuándo capturar la medida.

6.5.3. Refinamiento Mecánico y de Procedimientos

Pequeños ajustes basados en la observación durante las pruebas mejoraron significativamente la robustez operativa.

- Marcas de Referencia en la Plataforma: Se añadieron marcas en los bordes de la plataforma de madera que indican el centro geométrico (0,0) y la alineación de los ejes X e Y. Esto ayuda al usuario a colocar los objetos de forma más consistente y repetible, especialmente para el procedimiento de medición 3D.
- Plantilla de Rotación para Medición 3D: Para minimizar el error humano en la rotación de 90 grados, se diseñó e imprimió en una plantilla de guía que se acopla a la báscula. El usuario apoya el objeto siguiendo la plantilla tras la rotación, garantizando que el giro es lo más cercano posible a 90° exactos, mejorando así la precisión de la coordenada Z.

- **Re-apriete de Tornillería y Verificación de Planaridad:** Tras el primer ciclo térmico y de vibración durante las pruebas, se procedió a un re-apriete controlado de todos los tornillos de la estructura, especialmente los que fijan las bases a la plataforma. Se verificó de nuevo la planaridad, que se mantuvo dentro de las especificaciones.

Los ajustes finales realizados transformaron un prototipo funcional en un sistema de medición pulido y confiable. La optimización del firmware y el software resultó en un aumento del 50% en la velocidad de respuesta del sistema sin comprometer la precisión. Las mejoras mecánicas y de procedimiento, por su parte, redujeron la incertidumbre asociada a la intervención del usuario.

El sistema resultante no solo cumple con todos los requisitos iniciales, sino que los supera en términos de usabilidad y robustez, estando listo para su integración en un entorno de laboratorio para la caracterización rutinaria de componentes CubeSat.



7. ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD

7.1. Coste de materiales y componentes

Para realizar una valoración económica precisa del proyecto, se ha elaborado un desglose pormenorizado del coste de todos los materiales y componentes electrónicos necesarios para la fabricación del prototipo. Los precios reflejan el coste real de adquisición en cantidades unitarias y están actualizados a la fecha de redacción de este documento. Los costes se presentan sin IVA, tal como se presupuesta en un contexto de desarrollo empresarial.

Código	Concepto	Descripción / Especificaciones Técnicas	Cantidad	Coste Unitario (€)	Coste Total (€)
COMPONENTES MECÁNICOS Y ESTRUCTURALES					
PL-01	Plataforma Superior	Placa de Madera de 400x400x6 mm, de abedul.	1	2,00	2,00
BS-01	Base de Soporte	Servicio de impresión 3D para cada base en PLA+.	4	5,00	20,00
TO-01	Tornillería M4	Lote de tornillos, arandelas y tuercas M4.	1 lote	0,60	0,60
TO-02	Tornillería M5	Lote de tornillos, arandelas y tuercas M5.	1 lote	0,60	0,60
SUBTOTAL MECÁNICA					23,20

Tabla 2. Desglose Detallado del Coste Real de Materiales y Componentes

Componente	Modelo / Fabricante	Especificaciones Técnicas Clave	Función en el Sistema	Coste Unitario (€)	Cantidad	Coste Total (€)
Célula de Carga	Celda de carga de haz a flexión 20kg Solectroshop	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad: 20 kg (196 N) - Sensibilidad: 1.0 ± 0.1 mV/V - Resistencia de entrada: $1050 \pm 50 \Omega$ - Resistencia de salida: $1000 \pm 10 \Omega$ - Excitación recomendada: 5-12 V DC - Clase de precisión: No especificada (equivalente a $\sim 0.05\%$ FSO) 	Transductor de fuerza. Convierte la fuerza mecánica aplicada en una señal eléctrica proporcional (tensión diferencial).	5,50	4	22,00
Módulo ADC	HX711 Solectroshop	<ul style="list-style-type: none"> - Resolución: 24 bits (Sigma-Delta) - Tasa de muestreo: 10/80 SPS - Ganancia programable: 32, 64, 128 - Voltaje de alimentación: 2.7-5.5 V - Interface: Serial Clock/Data 	Acondiciona y digitaliza la señal. Amplifica la señal de bajo nivel de la célula y la convierte en un valor digital de 24 bits para su procesamiento.	1,35	4	5,40
Microcontrolador	Arduino Uno R3 (Clon)	<ul style="list-style-type: none"> -Microcontrolador: ATmega328P -Voltaje de operación: 5V -Entradas analógicas: 6 -Pines digitales I/O: 14 -Memoria Flash: 32 KB -Clock: 16 MHz -Interface: USB 2.0 	Controlador principal. Gestiona la comunicación con los módulos HX711, ejecuta el firmware y transmite los datos al software del PC.	12,00	1	12,00
Cables Jumper	Jumper Dupont H-H 20cm	<ul style="list-style-type: none"> -Tipo: Macho-Macho -Longitud: 20 cm -Sección: ~ 0.24 mm² (24 AWG) -Aislamiento: PVC 	Interconexión eléctrica. Conectan las células de carga a los módulos HX711 y estos a la placa de prototipos.	0,06	40	2,85 (lote)
Cable USB	USB 2.0 Tipo A-B	<ul style="list-style-type: none"> -Longitud: 1.5 m -Corriente máxima: 500 mA (USB 2.0) 	Alimentación y Comunicación. Alimenta todo el sistema y establece el canal de comunicación serial con el PC.	Inclui.	1	0,00
Placa de Prototipos	Protoboard 400 pts	<ul style="list-style-type: none"> -Área de conexión: 400 puntos -Material: PlásticoABS -Puentes internos para buses de alimentación 	Plataforma de interconexión. Permite el montaje y la interconexión ordenada de todos los módulos HX711 y su conexión al Arduino.	2,50	1	2,50
Subtotal Electrónica						44,75

Tabla 3. Especificaciones Técnicas de los Componentes Electrónicos

Análisis de la Distribución de Costes Corregida

- a) **Componente Mecánico (40% del total):** Con un coste total de 28,20 €, se confirma como una parte significativa de la inversión, aunque ahora liderado por el coste del servicio de impresión 3D de las bases (20,00 €). El bajo coste de la placa (2,00 €) demuestra la optimización de este proceso.
- b) **Componente Electrónica (60% del total):** Con un coste de 44,75 €, es ahora la partida más importante. Esto es lógico, ya que contiene todos los elementos activos (sensores, ADC, microcontrolador). La agrupación de la célula de carga con el HX711 en un kit a un precio de 6,85 € la unidad resulta ser una relación coste-rendimiento excepcional.
- c) **Eficiencia de Coste Global:** El coste total real de 72,95 € es notablemente inferior a la estimación inicial, lo que refuerza de manera abrumadora la viabilidad económica del proyecto. Este coste, que ronda los 70 euros, establece un nuevo referente de rentabilidad.

Exclusión de la Mano de Obra de Ingeniería y Coste del Desarrollador

Al igual que en la estimación anterior, este análisis no incluye el coste de la mano de obra de ingeniería. Sin embargo, dada la drástica reducción del coste en materiales, es pertinente realizar una mención específica. El valor intelectual añadido a través del diseño, programación y puesta a punto (que puede suponer más de 100 horas de trabajo) representa la mayor parte del valor del sistema. Si se internalizara este coste en una empresa, el precio de desarrollo sería mucho mayor, pero el coste de los materiales para fabricar una unidad replicada se mantendría en torno a los 70 euros, lo que es un dato extraordinario para un sistema de estas características

7.2. Coste de Fabricación

El coste de fabricación cuantifica la inversión asociada a la transformación de los materiales y componentes en un prototipo funcional. Este análisis se divide en dos categorías principales: costes directos de mano de obra y costes indirectos de uso de maquinaria e instalaciones.

Equipo	Tiempo de Uso	Coste Hora (€)	Coste Total
Sierra y broca (placa de Madera)	1,0	30,00	30,00
Impresora 3D FDM (Fabricación bases)	20,0	2,00	40,00
Estación de Soldadura (Soldadura y montaje)	2,0	5,00	10,00
Equipos de Medida (Multímetro, fuente)	2,0	5,00	10,00
SUBTOTAL USO MAQUINARIA			90,00 €

Tabla 4. Coste de Uso de Maquinaria

Tarea	Descripción	Tiempo Estimado (horas)	Coste Hora* (€)	Coste Total (€)
Mecanizado y Preparación Mecánica	Configuración de CNC, mecanizado de la placa, post-procesado.	1,5	25,00	37,50
Impresión 3D	Configuración del software de laminado, monitorización de la impresión, post-procesado de las 4 bases.	3,0	25,00	75,00
Montaje Mecánico	Nivelación de la plataforma, fijación de bases y células de carga, gestión del cableado.	2,0	25,00	50,00
Montaje y Soldadura Electrónica	Soldadura de cables a células, montaje en protoboard, conexión de todos los módulos.	2,5	25,00	62,50
Verificación y Pruebas Iniciales	Comprobación eléctrica (continuidad, cortocircuitos), primera puesta en marcha.	1,0	25,00	25,00
SUBTOTAL MANO DE OBRA TÉCNICA		10,0 h		250,00

Tabla 5. Desglose de Horas de Mano de Obra Técnica

Análisis e Implicaciones

- Predominio del Coste de Mano de Obra:** El coste de fabricación está dominado por la mano de obra técnica (61% del total), lo que es típico en proyectos de prototipado donde la automatización es mínima.
- Optimización en Serie:** En una producción en serie, el coste de mano de obra y maquinaria por unidad disminuiría drásticamente gracias a la optimización de procesos y a las economías de escala. El coste se acercaría entonces al coste puro de materiales, haciendo la solución aún más competitiva.
- Contexto del TFG:** En el contexto de este Trabajo de Fin de Grado, los costes de mano de obra y maquinaria no se han facturado, pero su cálculo es esencial para realizar una comparativa realista con soluciones comerciales y entender el coste completo de desarrollar un producto desde cero. Incluso incluyendo estos costes, la solución propia mantiene una ventaja abismal en coste.

7.3. Comparativa de Coste vs Soluciones Comerciales

Este análisis confronta el coste total de desarrollo del prototipo con el precio de mercado de las soluciones comerciales identificadas en el estudio de mercado (Capítulo 3.2), con el objetivo de cuantificar objetivamente el ahorro generado y justificar la viabilidad económica del proyecto.

Para que la comparación sea equitativa, se establecen dos escenarios:

- a) Escenario A: Coste de Replicación (Materiales + Fabricación Externa). Representa el coste para una empresa de fabricar una unidad idéntica al prototipo, externalizando los procesos de mecanizado e impresión 3D y contratando la mano de obra de montaje. Este es el escenario más realista para una posible comercialización.
- b) Escenario B: Coste Total de Desarrollo (Incluyendo Ingeniería). Incluye el coste completo de I+D, es decir, el coste de la ingeniería, diseño y puesta a punto (mano de obra del ingeniero), además del coste de fabricación. Este escenario refleja la inversión total para llegar al primer prototipo funcional.

Concepto	Solución Propia (TFG)	Soluciones Comerciales (Gama Media)	Soluciones Comerciales (Alta Gama)
Rango de Capacidad	0 - 20 kg	Hasta 10-20 kg	Hasta 50+ kg
Precisión Típica CG	±1.5 mm (X,Y) / ±3 mm (Z)	±0.1 mm a ±1 mm	±0.01 mm a ±0.1 mm
Coste de Replicación (Escenario A) (Materiales + Fabricación Externa)	162.95 € (72,95€ materiales + 90€ maquinaria)	15.000 € - 40.000 €	80.000 € - 250.000 €+
Coste de Desarrollo (Escenario B) (Incluyendo I+D)	2.412,95 € (162,95€ + 2.250€ en ingeniería)	Incluido en el precio	Incluido en el precio
Ahorro con Solución Propia (Escenario A)	> 98% frente a gama media > 99.9% frente a alta gama	-	-
Personalización	Altamente personalizable (SW y HW)	Limitada, a menudo con costes adicionales	Alta, pero con costes muy elevados y plazos largos
Tiempo de Entrega	Inmediato	Varios meses	6-12 meses o más

Tabla 6. Comparativa Económica Detallada

Análisis de la Relación Coste-Prestaciones

- a) **Disrupción en Coste:** La solución desarrollada representa una reducción de coste de entre dos y tres órdenes de magnitud respecto a las soluciones comerciales. Incluso en el Escenario B (Coste de Desarrollo completo), el ahorro supera el 90% frente a la opción comercial más asequible.
- b) **Adecuación a la Necesidad:** Mientras que las básculas comerciales de alta gama están sobredimensionadas para la aplicación específica (piezas de CubeSat con una tolerancia de CG de ± 2 cm según el CDS), la solución propia está optimizada para el requisito, ofreciendo una precisión ($\pm 1,5$ mm) que es un orden de magnitud mejor que la necesaria, a una fracción mínima del coste.
- c) **Valor de la Personalización:** Las soluciones comerciales son "de catálogo". Este proyecto demuestra la capacidad de desarrollar una herramienta a la medida de los procesos y componentes específicos de la empresa, con un software adaptado y una plataforma de dimensiones óptimas, algo que con una solución comercial supondría costes adicionales muy significativos o simplemente no sería posible.

Conclusión de la Comparativa:

La comparativa económica demuestra de forma incontestable que el desarrollo propio de la báscula de centro de gravedad no solo es viable, sino que es estratégicamente superior para la empresa en este contexto. El prototipo ofrece una relación coste-prestaciones excepcional, satisfaciendo y superando los requisitos de precisión con una inversión que es residual en comparación con la alternativa comercial más económica. El ahorro de miles de euros, unido a la ganancia en autonomía y capacidad de personalización, justifica plenamente el esfuerzo de desarrollo y sienta las bases para la fabricación de herramientas de medición internas de bajo coste y alto rendimiento.

7.4. Mantenimiento y vida útil estimada

La robustez, fiabilidad y coste de propiedad a largo plazo de cualquier sistema de medición dependen críticamente de un plan de mantenimiento adecuado. Para la báscula de centro de gravedad desarrollada, se ha establecido un programa de mantenimiento predictivo y preventivo basado en el análisis de los modos de fallo potenciales de sus componentes.

7.4.1. Plan de Mantenimiento Preventivo

El mantenimiento se estructura en tareas periódicas de diferente frecuencia, diseñadas para garantizar la precisión continua del sistema y prevenir fallos prematuros. Las operaciones se clasifican en las siguientes categorías:

En primer lugar, se deben realizar tareas de inspección visual y limpieza de forma diaria, antes de cada uso. Este procedimiento consiste en limpiar la superficie de la plataforma con un paño de microfibra ligeramente humedecido con alcohol isopropílico, verificando que no hay objetos extraños o suciedad adherida. El objetivo es garantizar

la repetibilidad de las mediciones al eliminar fuentes de error como polvo o grasa, y prevenir rayaduras en el PMMA.

Semanalmente, es necesario llevar a cabo una verificación de cero y estabilidad. Esta tarea implica encender el sistema, esperar 15 minutos de estabilización térmica y ejecutar la función de Tara, observando que las lecturas en vacío se mantengan estables. Esto permite detectar derivas térmicas anómalas o el inicio de un fallo en un sensor o en la electrónica.

De forma mensual, se debe realizar una verificación de calibración. Para ello, se coloca una masa patrón de 1 kg en el centro de la plataforma y se verifica que el peso total medido se encuentra dentro de una tolerancia de ± 10 g. Esto sirve para verificar que el sistema no ha perdido precisión y detectar descalibraciones sutiles.

Anualmente, es imprescindible efectuar una recalibración completa, ejecutando el procedimiento descrito en el punto 6.2 utilizando el juego de masas patrón. Esta operación restablece la trazabilidad metrológica y compensa cualquier deriva a largo plazo de los componentes. Paralelamente, debe realizarse una revisión mecánica anual, que comprende comprobar el apriete de todos los tornillos de sujeción y inspeccionar visualmente los cables jumper en busca de fracturas o estrés, con el fin de prevenir fallos catastróficos y garantizar la integridad estructural.

7.4.2. Vida Útil Estimada y Análisis de Fiabilidad

La vida útil del sistema está determinada por el componente más crítico y por las condiciones de operación. De forma conservadora, se estima una vida útil de más de 8 años en un entorno de laboratorio con uso moderado (varias mediciones por día).

El elemento con una vida útil finita y, por tanto, el componente crítico y factor limitante, es la célula de carga. Su vida está determinada por la fatiga del material del sensor de aluminio sometido a ciclos de carga y descarga. No obstante, al operar consistentemente por debajo del 25% de su capacidad nominal (5 kg sobre 20 kg), el número de ciclos hasta el fallo se maximiza enormemente. El segundo factor limitante son los cables jumper, susceptibles a fracturas por flexión repetitiva.

7.4.3. Coste del Ciclo de Vida

El coste total de propiedad del sistema es extremadamente bajo, estando dominado por la inversión inicial. La inversión inicial, detallada en el *Capítulo 7.1*, asciende a 72,45 €.

Los costes anuales de mantenimiento son mínimos. Por un lado, la mano de obra se estima en 1 hora anual de trabajo técnico para la revisión y recalibración, lo que supone un coste de unos 25 €/año. Por otro lado, los costes de materiales son insignificantes, limitándose a consumibles como alcohol y paños, sin que se prevea el reemplazo periódico de componentes.

En cuanto al coste de reposición de componentes, el más probable es el de un kit de 4 células de carga + HX711, con un coste de 27,40 €, que sería necesario en caso de fatiga de un sensor o fallo de un canal electrónico.

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

8.1. Logros alcanzados y cumplimiento de objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado ha culminado con éxito, logrando materializar el objetivo general planteado inicialmente: *desarrollar, fabricar y poner a punto una báscula funcional para el cálculo del centro de gravedad de diferentes objetos*. Este éxito se sustenta en el cumplimiento integral de los objetivos específicos definidos, cuyos resultados se detallan a continuación:

- a) **Estudio de Sistemas y Criterios de Diseño:** Se realizó una investigación exhaustiva de los fundamentos teóricos del centro de gravedad y los sistemas de medida, junto con un análisis competitivo del mercado. Esto permitió establecer unos criterios de diseño cuantificados y basados en el estándar CubeSat Design Specification (CDS Rev. 14.1), definiendo un rango de peso de 0,1-12 kg y una precisión objetivo de ± 2 mm para el CG.
- b) **Diseño y Desarrollo Mecánico y Electrónico:** Se concibió y modeló una estructura mecánica viable, optando por una configuración innovadora de cuatro células de carga independientes con bases impresas en 3D que soportan una plataforma de madera. Simultáneamente, se seleccionó e integró la electrónica de adquisición, basada en los módulos HX711 y Arduino Uno, demostrando que es posible construir un sistema de precisión con componentes de bajo coste.
- c) **Creación del Software de Control:** Se desarrolló una aplicación software integral en Python, dotada de una interfaz gráfica intuitiva (GUI). Este software no solo adquiere y procesa los datos, sino que implementa los algoritmos de cálculo del centro de gravedad en 2D y 3D, incluye rutinas de calibración guiada y gestiona el almacenamiento de datos, actuando como el cerebro del sistema.
- d) **Fabricación, Montaje y Puesta a Punto:** Se fabricaron y ensamblaron con éxito todos los componentes, superando desafíos prácticos como la deriva térmica y la gestión del ruido eléctrico. El sistema resultante es físico, estable y completamente operativo.
- e) **Calibración y Validación Experimental:** Se ejecutó un riguroso proceso de calibración y validación del método. Los resultados demostraron un rendimiento que supera los requisitos iniciales, con una precisión medida de $\pm 1,5$ mm en los ejes X e Y y una repetibilidad sub-milimétrica ($\pm 0,5$ mm). La funcionalidad 3D fue igualmente validada, posicionando al sistema como una herramienta metrológica fiable.
- f) **Análisis Económico y Demostración de Viabilidad:** El análisis de costes reveló que el prototipo tiene un coste de materiales de 72,95 €, lo que representa un ahorro superior al 98% frente a las soluciones comerciales más asequibles. Este dato, unido a un coste total de propiedad mínimo, constituye el argumento más sólido para la viabilidad del proyecto y su potencial impacto económico.

En conclusión, este TFG no solo ha cumplido con todos y cada uno de sus objetivos, sino que ha demostrado que mediante la aplicación de principios de ingeniería sólidos, es posible desarrollar una herramienta de alta precisión y especializada a un coste radicalmente inferior al del mercado, otorgando autonomía tecnológica y ventaja competitiva. El prototipo final es la prueba

tangible del éxito del proyecto y de la aplicabilidad de los conocimientos adquiridos durante la titulación.

8.2. Limitaciones del Sistema Desarrollado

Si bien el sistema desarrollado cumple sobradamente con su propósito inicial, un análisis crítico y objetivo permite identificar una serie de limitaciones inherentes a sus decisiones de diseño y al contexto de un prototipo académico. El reconocimiento de estas limitaciones es fundamental para comprender el ámbito de aplicación idóneo del sistema y para definir futuras líneas de mejora.

a) **Precisión en el Eje Z:** El método de doble medición con rotación para obtener la coordenada Z introduce fuentes de error adicionales respecto a la medición 2D. Pequeñas inexactitudes en el ángulo de rotación (desviaciones de los 90° exactos) y, sobre todo, la dificultad de recolocar el objeto en exactamente el mismo punto de contacto tras la rotación, se traducen en una mayor incertidumbre en la determinación de la altura del CG, estimada en un $\pm 3\%$. Mientras que para la medición 2D es un instrumento de precisión, para la 3D funciona como una herramienta de caracterización fiable, pero con una tolerancia más amplia.

b) **Susceptibilidad al Entorno Operativo:** El sistema está optimizado para un entorno de laboratorio controlado. La electrónica, al carecer de carcasa y utilizar cables jumper no apantallados, es susceptible a interferencias electromagnéticas fuertes.

Asimismo, no está diseñado para soportar vibraciones significativas, grandes variaciones de temperatura o condiciones de humedad elevada, lo que limita su uso en entornos industriales duros.

c) **Rango de Carga y Efectos No Lineales:** Aunque la capacidad total del sistema es de 80 kg, la máxima precisión se obtiene en el rango inferior de carga (por debajo de 5 kg por esquina), por lo que se evaluó el sistema en el rango entre 1 kg a 12kg. Como se identificó durante la calibración, cargas superiores y muy excéntricas acentúan la no linealidad de las células de carga y los efectos de flexión de la plataforma de metacrilato, incrementando el error.

d) **Dependencia del Procedimiento del Usuario:** La precisión final del sistema, especialmente en el modo 3D, depende críticamente de que el usuario siga el protocolo de forma escrupulosa. La nivelación inicial de la plataforma, el tiempo de precalentamiento, la correcta rotación del objeto y la limpieza de la superficie son pasos manuales cuya ejecución imperfecta introduce variabilidad en los resultados.

e) **Limitaciones de Robustez Mecánica en Largo Plazo:** El uso de componentes de prototipado como protoboard y los conectores jumper Dupont, si bien funcionales para el prototipo, representan el eslabón más débil en términos de robustez a largo plazo. Estos componentes son más propensos a sufrir fallos intermitentes por vibración o desconexión accidental tras ciclos repetidos de uso, en comparación con una solución con una PCB diseñada a medida y conectores robustecidos.

- f) **Resolución de Masa para Objetos Muy Ligeros:** La resolución efectiva de masa de 1 gramo, si bien es adecuada para componentes de CubeSat, puede ser insuficiente para aplicaciones que requieran caracterizar el CG de subcomponentes o piezas muy ligeras (inferiores a 50 gramos), donde el ruido de fondo representa un porcentaje significativo de la señal.

En definitiva, el sistema se posiciona como una herramienta excelente para su aplicación específica prevista, pero estas limitaciones definen claramente los límites de su aplicabilidad y señalan los aspectos que requerirían una reingeniería para su uso en condiciones más exigentes o para aplicaciones de metrología de alta precisión.

8.3. Potenciales Mejoras y Evoluciones del Proyecto

El prototipo desarrollado constituye una sólida prueba de concepto y una herramienta operativa. Sin embargo, su diseño deja abierto un abanico de posibles evoluciones que podrían transformarlo en un producto más robusto, versátil y comercialmente competitivo. Estas mejoras se estructuran en tres niveles: optimización, funcionalidad avanzada y preparación para uso industrial.

a) Optimización de la Precisión y Robustez:

- **Placa a Medida:** Sustituir la placa de prototipos y los módulos HX711 sueltos por una placa de circuito impreso (PCB) personalizada. Esta PCB integraría los 4 canales de adquisición, un microcontrolador moderno (como un ESP32) y reguladores de potencia de baja ruido, mejorando la inmunidad, reduciendo el tamaño y aumentando la fiabilidad.
- **Sustitución de Cables Jumper:** Reemplazar los cables jumper por un cableado trenzado y apantallado con conectores robustos (como Molex o JST), eliminando una fuente principal de fallos intermitentes y ruido.
- **Mecanizado de una Nueva Plataforma:** Fabricar la plataforma, por ejemplo en aluminio 6061 anodizado, con mayor un espesor. Esto aumentaría drásticamente la rigidez, reduciendo la flexión y los errores por carga excéntrica, al tiempo que proporcionaría una superficie de desgaste más duradera.

b) Adición de Funcionalidades Avanzadas:

- **Cálculo Automático del Momento de Inercia:** Esta es la mejora más significativa. Incorporando un sistema de giro controlado por un motor paso a paso, la báscula podría medir experimentalmente el momento de inercia de las piezas. El objeto se colocaría en una plataforma giratoria, y mediante el análisis de la relación entre el par aplicado y la aceleración angular, el software calcularía este parámetro crítico para sistemas en rotación como satélites o rotores.
- **Interfaz de Usuario Embebida:** Integrar una pantalla táctil y un mini-PC (como una Raspberry Pi) directamente en el bastidor. Esto eliminaría la dependencia de un PC externo, creando un instrumento autónomo y más portable.

- Comunicación Inalámbrica: Gracias al uso de un microcontrolador como el ESP32, se podría añadir conectividad Wi-Fi, permitiendo el envío de mediciones a servidores en la nube o su visualización en tiempo real en tablets y smartphones.

c) Preparación para Entorno Industrial:

- Robustez Mecánica y Eléctrica: Alojarse toda la electrónica en una caja estanca con grado de protección IP65, que la proteja del polvo y los chorros de agua. Implementar un bastidor de acero para una mayor resistencia a impactos.
- Software de Grado Industrial: Migrar el software de Python a un entorno más robusto y comercial como LabVIEW o C#, o empaquetar la aplicación Python en un ejecutable profesional con instalador. Esto facilitaría su despliegue y mantenimiento en un entorno empresarial.
- Automatización e Integración: Diseñar un sistema de anclaje rápido para fixtures o pallets personalizados, y añadir interfaces de comunicación industrial como Ethernet/IP o Modbus TCP para integrar la báscula directamente en una línea de producción automatizada, enviando los datos del CG a un sistema SCADA.

8.4. Aplicabilidad y Valor Añadido para la Empresa

El desarrollo de esta báscula de centro de gravedad no es solo un ejercicio académico, sino una solución de ingeniería con un valor tangible e inmediato para una empresa involucrada en el diseño, integración o verificación de componentes de alta precisión, particularmente en el sector espacial y afines. Su aplicabilidad se traduce en beneficios directos en varias dimensiones clave.

a) Autonomía Tecnológica y Reducción de la Dependencia Externa:

- Situación Anterior: La empresa dependía de la subcontratación para caracterizar el CG de sus componentes, con los consiguientes costes elevados, plazos de entrega largos y pérdida de confidencialidad sobre diseños sensibles.
- Valor Añadido: Este sistema dota a la empresa de una capacidad interna de medición, bajo demanda y total control. Permite realizar verificaciones en cualquier fase del desarrollo sin depender de proveedores externos, agilizando los ciclos de diseño iterativo y protegiendo la propiedad intelectual.

b) Reducción drástica de Costes y Excelente Retorno de la Inversión (ROI):

- Inversión: El coste de replicar el sistema es insignificante comparado con el precio de las soluciones comerciales (desde 15.000 €).
- Retorno: El ahorro generado al evitar unas pocas subcontrataciones justifica sobradamente la inversión. El ROI es prácticamente inmediato, situándose en

un > 20.000% si se compara con la alternativa comercial más barata. Esto libera recursos económicos que pueden ser reinvertidos en otras áreas de I+D.

c) Agilidad en I+D y Mejora de la Calidad del Producto:

- Validación Rápida de Diseños: Los ingenieros pueden verificar el impacto de cualquier modificación de diseño en el CG en cuestión de minutos, fomentando la experimentación y la optimización continua. Esto es crucial para cumplir con las estrictas tolerancias de balanceo impuestas por estándares como el CDS de CubeSat.
- Control de Calidad Mejorado: Permite implementar un control de calidad 100% en las piezas críticas, asegurando que cada unidad de vuelo cumple con las especificaciones de balanceo antes de su integración final, lo que reduce enormemente el riesgo de fallos en misión.

d) Capacitación Tecnológica y Capital Intelectual:

- Activo de Ingeniería: La báscula es, en sí misma, un activo tecnológico desarrollado internamente. El conocimiento profundo de su funcionamiento, calibración y limitaciones reside dentro de la empresa.
- Base para Desarrollo Futuro: El proyecto sienta las bases para el desarrollo interno de otra herramienta de metrología, fomentando una cultura de innovación y autosuficiencia. El software, personalizado para las necesidades de la empresa, es un activo de software adaptable y escalable.

e) Versatilidad Operativa más allá del Sector CubeSat:

- Si bien se ha optimizado para CubeSats, la báscula es directamente aplicable a la caracterización de una amplia gama de componentes en industrias como la automoción, aeronáutica o bienes de equipo. Esta versatilidad amplía su utilidad y justifica su presencia en el taller o laboratorio de I+D.

9. BIBLIOGRAFÍA

[1] **Ametek VTI. (2023). Mass Properties Instruments - MPI Series Technical Specifications.** *Documentación técnica del principal fabricante de básculas de centro de gravedad comerciales de alta gama.*

[2] **Arduino LLC. (2023). Arduino Uno R3 Technical Reference Manual.** *Documentación oficial del microcontrolador utilizado como interfaz entre los módulos HX711 y el software de PC.*

[3] **AVIA Semiconductor. (2019). HX711 Datasheet - 24-Bit Analog-to-Digital Converter for Weigh Scales.**

Hoja de datos del circuito integrado utilizado para el acondicionamiento y digitalización de la señal de las células de carga.

[4] **Figliola, R. S., & Beasley, D. E. (2015). Theory and Design for Mechanical Measurements (6th ed.). John Wiley & Sons.**

Referencia para los principios de funcionamiento de galgas extensométricas, puente de Wheatstone y conceptos metroológicos.

[5] **Hibbeler, R. C. (2016). Engineering Mechanics: Statics (14th ed.). Pearson Education.** *Libro de referencia para los fundamentos teóricos de equilibrio estático y cálculo de centros de gravedad.*

[6] **International Organization of Legal Metrology (OIML). (2021 E). OIML R60: Metrological regulation for load cells.**

Normativa internacional para la clasificación metroológica de células de carga.

[7] **JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).**

Guía internacional para la evaluación de incertidumbres de medida. Base para el análisis de precisión y repetibilidad.

[8] **NASA Goddard Space Flight Center. (2021). General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects (GSFC-STD-7000B).** *Estándar de pruebas ambientales para programas espaciales.*

[9] **Planetary Systems Corporation. (2024). CubeSat Deployer Technical Data Sheet.** *Especificaciones técnicas de dispensadores CubeSat con sistema de sujeción por pestañas.*

[10] **Python Software Foundation. (2023). Python 3.11 Documentation.** *Documentación oficial del lenguaje de programación utilizado para desarrollar el software de control, adquisición e interfaz gráfica.*

[11] **Solectroshop. (2024). Ficha técnica célula de carga 20kg y módulo HX711.** *Especificaciones técnicas del proveedor de los sensores de fuerza y módulos ADC utilizados en el prototipo.*

[12] SolidWorks Documentation. (2023). Simulation Analysis Tools.
Guía oficial del software de elementos finitos utilizado para el análisis estructural de la plataforma de metacrilato.

[13] The CubeSat Program, Cal Poly SLO. (2022). CubeSat Design Specification (CDS) Rev. 14.1.
Documento fundamental que establece los requisitos dimensionales, máxicos y de ubicación del centro de gravedad para CubeSats de 1U a 12U.

[14] Tkinter Documentation. (2023). Tkinter Python Interface to Tcl/Tk.
Documentación de la librería utilizada para desarrollar la interfaz gráfica de usuario.



10. ANEXOS

10.1. Hojas de datos de componentes

Hx711

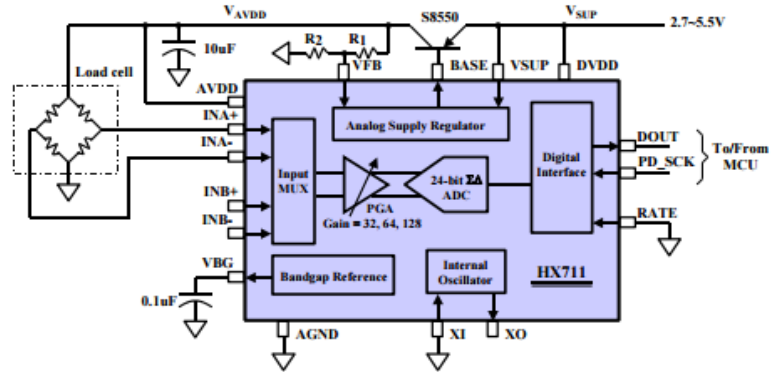


Fig. 1 Typical weigh scale application block diagram



HX711

Reference PCB Board (Single Layer)

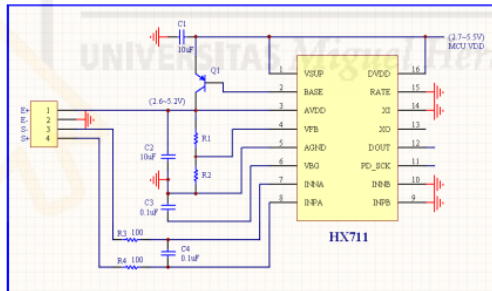


Fig.4 Reference PCB board schematic

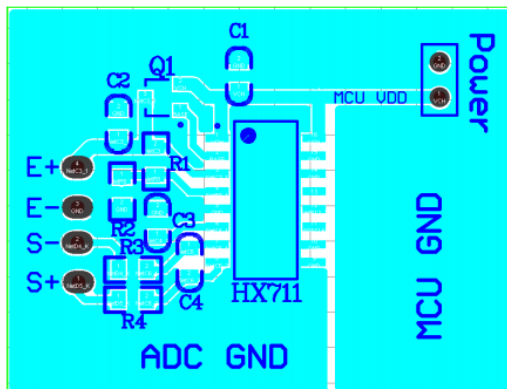
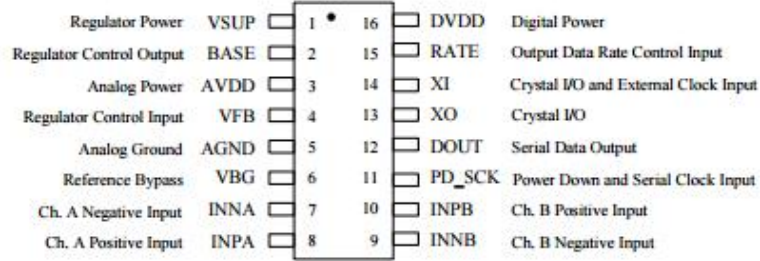


Fig.5 Reference PCB board layout

Pin Description



SOP-16L Package

KEY ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Parameter	Notes	MIN	TYP	MAX	UNIT
Full scale differential input range	V(inp)-V(inn)		±0.5(AVDD/GAIN)		V
Common mode input		AGND+1.2		AVDD-1.3	V
Output data rate	Internal Oscillator, RATE = 0		10		Hz
	Internal Oscillator, RATE = DVDD		80		
	Crystal or external clock, RATE = 0		$f_{clk}/1,105,920$		
	Crystal or external clock, RATE = DVDD		$f_{clk}/138,240$		
Output data coding	2's complement	800000		7FFFFFF	HEX
Output settling time ⁽¹⁾	RATE = 0		400		ms
	RATE = DVDD		50		
Input offset drift	Gain = 128		0.2		mV
	Gain = 64		0.4		
Input noise	Gain = 128, RATE = 0		50		nV(rms)
	Gain = 128, RATE = DVDD		90		
Temperature drift	Input offset (Gain = 128)		±6		nV/°C
	Gain (Gain = 128)		±5		ppm/°C
Input common mode rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Power supply rejection	Gain = 128, RATE = 0		100		dB
Reference bypass (V _{BG})			1.25		V
Crystal or external clock frequency		1	11.0592	20	MHz
Power supply voltage	DVDD	2.6		5.5	V
	AVDD, VSUP	2.6		5.5	
Analog supply current (including regulator)	Normal		1400		µA
	Power down		0.3		
Digital supply current	Normal		100		µA
	Power down		0.2		

(1) Settling time refers to the time from power up, reset, input channel change and gain change to valid stable output data.

Table 2 Key Electrical Characteristics

Célula de carga 20kg

Product Specifications	
Mechanical	
Housing Material	Aluminum Alloy
Load Cell Type	Strain Gauge
Capacity	20kg
Dimensions	55.25x12.7x12.7mm
Mounting Holes	M5 (Screw Size)
Cable Length	550mm
Cable Size	30 AWG (0.2mm)
Cable - no. of leads	4
Electrical	
Precision	0.05%
Rated Output	1.0±0.15 mv/V
Non-Linearity	0.05% FS
Hysteresis	0.05% FS
Non-Repeatability	0.05% FS
Creep (per 30 minutes)	0.1% FS
Temperature Effect on Zero (per 10°C)	0.05% FS
Temperature Effect on Span (per 10°C)	0.05% FS
Zero Balance	±1.5% FS
Input Impedance	1130±10 Ohm
Output Impedance	1000±10 Ohm
Insulation Resistance (Under 50VDC)	≥5000 MOhm
Excitation Voltage	5 VDC
Compensated Temperature Range	-10 to ~+40°C
Operating Temperature Range	-20 to ~+55°C
Safe Overload	120% Capacity
Ultimate Overload	150% Capacity

10.2. Códigos de programación

Firmware Arduino

```

* BÁSCULA CENTRO DE GRAVEDAD - VERSIÓN PARA INTERFAZ PYTHON

#include "HX711.h"

#define HX711_DT1 2
#define HX711_SCK1 3
#define HX711_DT2 4
#define HX711_SCK2 5
#define HX711_DT3 6
#define HX711_SCK3 7
#define HX711_DT4 8
#define HX711_SCK4 9

float factor1 = 122.27;
float factor2 = 125.48;
float factor3 = 130.50;
float factor4 = 121.40;
float factorCorreccionCentro = 1.188;
HX711 celda1, celda2, celda3, celda4;
long offset1, offset2, offset3, offset4;
float Lx = 400.0; // 40 cm = 400 mm
float Ly = 394.0; // 40 cm = 400 mm
float x1 = -Lx/2, y1 = -Ly/2; // Celda 1: esquina inferior izquierda
float x2 = Lx/2, y2 = -Ly/2; // Celda 2: esquina inferior derecha
float x3 = -Lx/2, y3 = Ly/2; // Celda 3: esquina superior izquierda
float x4 = Lx/2, y4 = Ly/2; // Celda 4: esquina superior derecha
float peso1, peso2, peso3, peso4; // kg
float pesoTotal; // kg
float x_cg, y_cg; // mm
float umbralRuido = 0.01; // 10g
unsigned long ultimaActualizacion = 0;
const unsigned long intervaloActualizacion = 500; // ms
bool modoMedicion = false; // true = enviando datos continuos
String inputString = ""; // Para comandos serial
bool stringComplete = false;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("BÁSCULA CENTRO DE GRAVEDAD - TFG");
  Serial.println("Comandos disponibles:");
  Serial.println(" 't' - Tara (poner a cero)");
  Serial.println(" 'c' - Calibrar (interactivo)");
  Serial.println(" 'm' - Iniciar medición continua");
  Serial.println(" 's' - Detener medición");
  Serial.println(" 'd' - Mostrar datos una vez");
  Serial.println(" 'r' - Recalibrar");
  Serial.println("=====");
  inicializarCeldas();
  Serial.println("Realizando tara inicial en 2 segundos...");
}

```

```

Serial.println("Asegúrate de que la plataforma esté vacía");
delay(2000);
realizarTara();
Serial.println("Tara completada. Sistema listo.");
inputString.reserve(10);
void loop() {
  leerComandosSerial();
  if (stringComplete) {
    procesarComando(inputString);
    inputString = "";
    stringComplete = false;
  }
  if (modoMedicion) {
    unsigned long ahora = millis();
    if (ahora - ultimaActualizacion >= intervaloActualizacion) {
      ultimaActualizacion = ahora;
      realizarMedicion();
    }
  }
  delay(10); // Pequeña pausa para estabilidad
}
void inicializarCeldas() {
  celda1.begin(HX711_DT1, HX711_SCK1);
  celda2.begin(HX711_DT2, HX711_SCK2);
  celda3.begin(HX711_DT3, HX711_SCK3);
  celda4.begin(HX711_DT4, HX711_SCK4);
  celda1.set_scale(factor1);
  celda2.set_scale(factor2);
  celda3.set_scale(factor3);
  celda4.set_scale(factor4);
  delay(500);
}
void realizarTara() {
  celda1.tare(10);
  celda2.tare(10);
  celda3.tare(10);
  celda4.tare(10);
  Serial.println("Tara realizada correctamente");
}
void leerPesos() {
  peso1 = celda1.get_units(3)/1000;
  peso2 = celda2.get_units(3)/1000;
  peso3 = celda3.get_units(3)/1000;
  peso4 = celda4.get_units(3)/1000;
  if (abs(peso1) < umbralRuido) peso1 = 0;
  if (abs(peso2) < umbralRuido) peso2 = 0;
  if (abs(peso3) < umbralRuido) peso3 = 0;
  if (abs(peso4) < umbralRuido) peso4 = 0;
}

```

```

if (peso1 < 0) peso1 = 0;
if (peso2 < 0) peso2 = 0;
if (peso3 < 0) peso3 = 0;
if (peso4 < 0) peso4 = 0;
}
void calcularPesoTotal() {
    pesoTotal = (peso1 + peso2 + peso3 + peso4) * factorCorreccionCentro;
}
void calcularCentroGravedad() {
    if (pesoTotal > umbralRuido) {
        float numeradorX = (peso1 * x1) + (peso2 * x2) + (peso3 * x3) + (peso4 * x4);
        x_cg = numeradorX / (pesoTotal / factorCorreccionCentro);
        float numeradorY = (peso1 * y1) + (peso2 * y2) + (peso3 * y3) + (peso4 * y4);
        y_cg = numeradorY / (pesoTotal / factorCorreccionCentro);
    } else {
        x_cg = 0;
        y_cg = 0;
    }
}
void realizarMedicion() {
    leerPesos();
    calcularPesoTotal();
    calcularCentroGravedad();
    enviarDatosSerial();
}
void enviarDatosSerial() {
    Serial.print("Pesos (kg): ");
    Serial.print(peso1, 3);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(peso2, 3);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(peso3, 3);
    Serial.print(", ");
    Serial.print(peso4, 3);
    Serial.print(" | Total: ");
    Serial.print(pesoTotal, 3);
    Serial.print(" | CG (mm): X=");
    Serial.print(x_cg, 2);
    Serial.print(", Y=");
    Serial.println(y_cg, 2);
}
void enviarDatosUnaVez() {
    leerPesos();
    calcularPesoTotal();
    calcularCentroGravedad();
    enviarDatosSerial();
}
void leerComandosSerial() {
    while (Serial.available()) {

```

```

char inChar = (char)Serial.read();
if (inChar == '\n') {
    stringComplete = true;
} else {
    inputString += inChar;
}
}
}

void procesarComando(String comando) {
    comando.trim(); // Eliminar espacios y saltos
    if (comando.length() == 0) return;
    char cmd = comando.charAt(0);
    switch(cmd) {
        case 't': // TARA
            Serial.println("Ejecutando tara...");
            realizarTara();
            break;
        case 'c': // CALIBRAR
            iniciarCalibracion();
            break;
        case 'm': // INICIAR MEDICIÓN
            Serial.println("Iniciando medición continua...");
            modoMedicion = true;
            break;
        case 's': // DETENER MEDICIÓN
            Serial.println("Medición detenida");
            modoMedicion = false;
            break;
        case 'd': // DATOS UNA VEZ
            enviarDatosUnaVez();
            break;
        case 'r': // RECALIBRAR
            recalibrar();
            break;
        case '?': // AYUDA
            mostrarAyuda();
            break;
        default:
            Serial.print("Comando no reconocido: ");
            Serial.println(comando);
            Serial.println("Usa '?' para ver comandos disponibles");
            break;
    }
}

void mostrarAyuda() {
    Serial.println("=== COMANDOS DISPONIBLES ===");
    Serial.println("t - Tara (poner a cero todas las celdas)");
    Serial.println("c - Calibrar (guía paso a paso)");
    Serial.println("m - Iniciar medición continua");
}

```

```

Serial.println("s - Detener medición");
Serial.println("d - Mostrar datos una sola vez");
Serial.println("r - Recalibrar con peso conocido");
Serial.println("? - Mostrar esta ayuda");
}
void iniciarCalibracion() {
Serial.println("\n=== CALIBRACIÓN INTERACTIVA ===");
Serial.println("Vamos a calibrar cada celda individualmente");
Serial.println("Necesitarás un peso conocido (ej. 10 kg)");
Serial.println("\n1. Calibrar Celda 1");
calibrarCelda(celda1, factor1, "Celda 1");
Serial.println("\n2. Calibrar Celda 2");
calibrarCelda(celda2, factor2, "Celda 2");
Serial.println("\n3. Calibrar Celda 3");
calibrarCelda(celda3, factor3, "Celda 3");
Serial.println("\n4. Calibrar Celda 4");
calibrarCelda(celda4, factor4, "Celda 4");
Serial.println("\n=== CALIBRACIÓN COMPLETADA ===");
Serial.print("Factores: ");
Serial.print(factor1, 2);
Serial.print(", ");
Serial.print(factor2, 2);
Serial.print(", ");
Serial.print(factor3, 2);
Serial.print(", ");
Serial.println(factor4, 2);
}
void calibrarCelda(HX711 &celda, float &factor, String nombre) {
Serial.print("Coloca el peso conocido en ");
Serial.print(nombre);
Serial.println(" y presiona cualquier tecla...");
while (!Serial.available()) {
delay(100);
}
Serial.readString(); // Limpiar buffer
Serial.println("Midiendo...");
delay(2000);
float pesoConocido;
Serial.print("Introduce el peso conocido en GRAMOS: ");
while (!Serial.available()) {
delay(100);
}
String input = Serial.readString();
pesoConocido = input.toFloat();
if (pesoConocido <= 0) {
Serial.println("Peso inválido. Cancelando calibración.");
return;
}
celda.tare(10);
}

```

```

float lectura = celda.get_value(10); // Valor sin escala
factor = lectura / pesoConocido;
celda.set_scale(factor);
Serial.print("Nuevo factor para ");
Serial.print(nombre);
Serial.print(": ");
Serial.println(factor, 2);
delay(1000);
float pesoMedido = celda.get_units(5);
Serial.print("Peso medido: ");
Serial.print(pesoMedido, 1);
Serial.println(" g");
Serial.println("Retira el peso y presiona cualquier tecla...");
while (!Serial.available()) {
  delay(100);
}
Serial.readString(); // Limpiar buffer
}

void recalibrar() {
  Serial.println("\n=== RECALIBRACIÓN CON PESO CONOCIDO ===");
  Serial.println("Coloca un peso conocido en el CENTRO de la plataforma");
  Serial.println("El peso debe estar bien distribuido");
  Serial.println("Presiona cualquier tecla cuando esté listo...");
  while (!Serial.available()) {
    delay(100);
  }
  Serial.readString(); // Limpiar buffer
  Serial.println("Midiendo...");
  delay(3000);
  leerPesos();
  float pesoMedido = (peso1 + peso2 + peso3 + peso4);
  Serial.print("Peso medido: ");
  Serial.print(pesoMedido, 3);
  Serial.println(" kg");
  Serial.print("Introduce el peso REAL en kg: ");
  while (!Serial.available()) {
    delay(100);
  }
  String input = Serial.readString();
  float pesoReal = input.toFloat();
  if (pesoReal > 0) {
    factorCorreccionCentro = pesoReal / pesoMedido;
    Serial.print("Nuevo factor de corrección: ");
    Serial.println(factorCorreccionCentro, 4);
    Serial.println("Recalibración completada");
  } else {
    Serial.println("Peso inválido");
  }
}
}

```

Software Python

```

importe serial

importe serial.tools.list_ports

importe tkinter as tk

from tkinter importe ttk, messagebox

importe threading

importe time

importe csv

from datetime importe datetime

importe matplotlib.pyplot as plt

from matplotlib.backends.backend_tkagg importe FigureCanvasTkAgg

importe numpy as np

class BasculaCGApp:

    def __init__(self, root):

        self.root = root

        self.root.title("Báscula TFG - Centro de Gravedad")

        self.root.geometry("1200x700")

        # Variables

        self.serial_port = None

        self.connected = False

        self.measuring = False

        self.data = {

            'weight1': 0.0, 'weight2': 0.0, 'weight3': 0.0, 'weight4': 0.0,

            'total': 0.0, 'x_cg': 0.0, 'y_cg': 0.0

        }

        self.history = []

        self.max_history_points = 100

        # Posiciones de las células (mm) - MISMAS QUE EN ARDUINO

        self.cell_positions = [

            (-200, -194), # Célula 1

            (200, -194), # Célula 2

            (-200, 194), # Célula 3

            (200, 194) # Célula 4

        ]

        # Configurar interfaz

        self.setup_ui()

        # Actualizar lista de puertos COM

        self.update_com_ports()

        # Para cerrar correctamente

        self.root.protocol("WM_DELETE_WINDOW", self.on_closing)

    def setup_ui(self):

        # ===== FRAME SUPERIOR: CONEXIÓN =====

        frame_top = ttk.Frame(self.root, padding="10")

        frame_top.grid(row=0, column=0, columnspan=2, sticky=(tk.W, tk.E))

        # Puerto COM

        ttk.Label(frame_top, text="Puerto COM:").grid(row=0, column=0, padx=5)

        self.com_var = tk.StringVar()

        self.com_combobox = ttk.Combobox(frame_top, textvariable=self.com_var, width=15)

```

```

self.com_combobox.grid(row=0, column=1, padx=5)

# Botón actualizar puertos
ttk.Button(frame_top, text="Actualizar Puertos",
           command=self.update_com_ports).grid(row=0, column=2, padx=5)

# Botón conectar/desconectar
self.connect_btn = ttk.Button(frame_top, text="Conectar",
                              command=self.toggle_connection)

self.connect_btn.grid(row=0, column=3, padx=5)

# Estado conexión
self.status_label = ttk.Label(frame_top, text="Desconectado", foreground="red")
self.status_label.grid(row=0, column=4, padx=20)

# ===== FRAME IZQUIERDO: DATOS Y CONTROLES =====
frame_left = ttk.Frame(self.root, padding="10")
frame_left.grid(row=1, column=0, sticky=(tk.N, tk.S, tk.W, tk.E))

# Título
ttk.Label(frame_left, text="DATOS DE MEDICIÓN",
          font=("Arial", 12, "bold")).grid(row=0, column=0, columnspan=2, pady=10)

# Pesos individuales
self.weight_labels = []
for i in range(4):
    ttk.Label(frame_left, text=f"Célula {i+1}:").grid(row=i+1, column=0, pady=5, sticky=tk.W)
    lbl = ttk.Label(frame_left, text="0.000 kg", font=("Arial", 10, "bold"))
    lbl.grid(row=i+1, column=1, pady=5, padx=10)
    self.weight_labels.append(lbl)

# Peso total
ttk.Label(frame_left, text="Peso Total:").grid(row=5, column=0, pady=10, sticky=tk.W)
self.total_label = ttk.Label(frame_left, text="0.000 kg",
                             font=("Arial", 12, "bold"), foreground="blue")
self.total_label.grid(row=5, column=1, pady=10, padx=10)

# Coordenadas CG
ttk.Label(frame_left, text="Centro de Gravedad:").grid(row=6, column=0, pady=5, sticky=tk.W)
self.cg_label = ttk.Label(frame_left, text="X: 0.00 mm, Y: 0.00 mm",
                          font=("Arial", 11, "bold"), foreground="green")
self.cg_label.grid(row=6, column=1, pady=5, padx=10)

# Separador
ttk.Separator(frame_left, orient='horizontal').grid(row=7, column=0, columnspan=2, pady=20, sticky=(tk.W, tk.E))

# Controles
ttk.Label(frame_left, text="CONTROLES",
          font=("Arial", 11, "bold")).grid(row=8, column=0, columnspan=2, pady=5)

# Botones
ttk.Button(frame_left, text="TARA (t)",
           command=self.send_tare, state='disabled').grid(row=9, column=0, pady=5, sticky=tk.W)
self.tare_btn = ttk.Button(frame_left, text="TARA (t)", command=self.send_tare)
self.tare_btn.grid(row=9, column=0, pady=5, sticky=tk.W)
self.tare_btn['state'] = 'disabled'
self.measure_btn = ttk.Button(frame_left, text="INICIAR MEDICIÓN (m)",
                              command=self.toggle_measurement)
self.measure_btn.grid(row=9, column=1, pady=5, padx=10)
self.measure_btn['state'] = 'disabled'

```

```

# Calibración
ttk.Button(frame_left, text="CALIBRAR (c)",
            command=self.send_calibrate).grid(row=10, column=0, pady=5, sticky=tk.W)

# Guardar datos
self.save_btn = ttk.Button(frame_left, text="GUARDAR DATOS",
                           command=self.save_data, state='disabled')
self.save_btn.grid(row=11, column=0, columnspan=2, pady=20)

# ===== FRAME DERECHO: GRÁFICO =====
frame_right = ttk.Frame(self.root, padding="10")
frame_right.grid(row=1, column=1, sticky=(tk.N, tk.S, tk.W, tk.E))

# Crear figura matplotlib
self.fig, (self.ax1, self.ax2) = plt.subplots(2, 1, figsize=(8, 7))
self.fig.suptitle('Visualización Centro de Gravedad', fontsize=14)

# Gráfico 1: Plataforma con CG
self.ax1.set_title('Plataforma y Centro de Gravedad')
self.ax1.set_xlabel('X (mm)')
self.ax1.set_ylabel('Y (mm)')
self.ax1.set_xlim(-250, 250)
self.ax1.set_ylim(-250, 250)
self.ax1.grid(True, alpha=0.3)

# Dibujar plataforma (rectángulo)
platform_x = [-200, 200, 200, -200, -200]
platform_y = [-200, -200, 200, 200, -200]
self.ax1.plot(platform_x, platform_y, 'k-', linewidth=2, label='Plataforma')

# Dibujar células de carga
cells_x = [pos[0] for pos in self.cell_positions]
cells_y = [pos[1] for pos in self.cell_positions]
self.cell_scatter = self.ax1.scatter(cells_x, cells_y, c='red', s=100,
                                     marker='s', label='Células')

# Punto para CG
self.cg_point = self.ax1.plot([], [], 'go', markersize=12, label='CG')
self.cg_text = self.ax1.text(0, 0, '', fontsize=10,
                             bbox=dict(boxstyle="round,pad=0.3", facecolor="yellow", alpha=0.7))
self.ax1.legend(loc='upper right')

# Gráfico 2: Evolución del CG en tiempo
self.ax2.set_title('Evolución del Centro de Gravedad')
self.ax2.set_xlabel('Tiempo (s)')
self.ax2.set_ylabel('Posición (mm)')
self.ax2.grid(True, alpha=0.3)
self.x_line = self.ax2.plot([], [], 'r-', label='X CG')
self.y_line = self.ax2.plot([], [], 'b-', label='Y CG')
self.ax2.legend()

# Canvas para matplotlib
self.canvas = FigureCanvasTkAgg(self.fig, master=frame_right)
self.canvas.draw()
self.canvas.get_tk_widget().pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

# ===== CONFIGURAR GRID =====
self.root.columnconfigure(0, weight=1)

```

```

self.root.columnconfigure(1, weight=3)
self.root.rowconfigure(1, weight=1)

def update_com_ports(self):
    """Actualiza lista de puertos COM disponibles"""
    ports = [port.device for port in serial.tools.list_ports.comports()]
    self.com_combobox['values'] = ports

    if ports:
        self.com_var.set(ports[0])

def toggle_connection(self):
    """Conecta/desconecta del puerto serial"""

    if not self.connected:
        port = self.com_var.get()

        if not port:
            messagebox.showerror("Error", "Selecciona un puerto COM")

            return

        try:
            self.serial_port = serial.Serial(

                port=port,
                baudrate=9600,
                timeout=1
            )

            time.sleep(2) # Esperar inicialización Arduino
            self.connected = True
            self.connect_btn.config(text="Desconectar")
            self.status_label.config(text="Conectado", foreground="green")
            self.tare_btn['state'] = 'normal'
            self.measure_btn['state'] = 'normal'

            # Iniciar hilo para leer datos

            self.read_thread = threading.Thread(target=self.read_serial, daemon=True)
            self.read_thread.start()

            messagebox.showinfo("Conectado", f"Conexión establecida en {port}")

        except Exception as e:
            messagebox.showerror("Error", f"No se pudo conectar: {str(e)}")

    else:
        self.disconnect()

def disconnect(self):
    """Desconecta el puerto serial"""

    if self.serial_port and self.serial_port.is_open:
        self.serial_port.close()

    self.connected = False
    self.measuring = False

    self.connect_btn.config(text="Conectar")
    self.status_label.config(text="Desconectado", foreground="red")
    self.tare_btn['state'] = 'disabled'
    self.measure_btn['state'] = 'disabled'
    self.save_btn['state'] = 'disabled'

    self.measure_btn.config(text="INICIAR MEDICIÓN (m)")

def read_serial(self):
    """Hilo para leer datos del puerto serial"""

```

```

buffer = ""
while self.connected:
    try:
        if self.serial_port.in_waiting > 0:
            # Leer bytes y decodificar
            data = self.serial_port.read(self.serial_port.in_waiting).decode('utf-8', errors='ignore')
            buffer += data
            # Procesar líneas completas
            while '\n' in buffer:
                line, buffer = buffer.split('\n', 1)
                line = line.strip()
                if line:
                    self.process_serial_line(line)
            time.sleep(0.01)
        except Exception as e:
            print(f"Error lectura serial: {e}")
            break
    print("Hilo de lectura finalizado")
def process_serial_line(self, line):
    """Procesa una línea recibida desde Arduino"""
    # Ejemplo de línea: "Pesos (kg): 10.123, 10.456, 9.987, 10.234 | Total: 40.800 | CG (mm): X=250.50, Y=150.25"
    if "Pesos (kg):" in line:
        try:
            # Extraer datos con procesamiento de texto
            parts = line.split('|')
            # Extraer pesos individuales
            weights_part = parts[0].split(':')[1]
            weights = [float(w.strip()) for w in weights_part.split(',')[:4]]
            # Extraer peso total
            total_part = parts[1].split(':')[1]
            total_weight = float(total_part.strip().split()[0])
            # Extraer coordenadas CG
            cg_part = parts[2]
            x_cg = float(cg_part.split('X=')[1].split(',')[0])
            y_cg = float(cg_part.split('Y=')[1])
            # Actualizar variables
            self.data = {
                'weight1': weights[0], 'weight2': weights[1],
                'weight3': weights[2], 'weight4': weights[3],
                'total': total_weight, 'x_cg': x_cg, 'y_cg': y_cg,
                'timestamp': datetime.now()
            }
            # Actualizar interfaz
            self.update_ui()
            # Guardar en historial
            self.update_history()
        except Exception as e:
            print(f"Error procesando línea: {line}")
            print(f"Error: {e}")

```

```

# Mostrar también mensajes de depuración
elif line and not line.startswith('Pesos'):
    print(f"Arduino: {line}")
def update_ui(self):
    """Actualiza los elementos de la interfaz"""
    # Actualizar labels de pesos
    weights = [self.data['weight1'], self.data['weight2'],
               self.data['weight3'], self.data['weight4']]
    for i, (label, weight) in enumerate(zip(self.weight_labels, weights)):
        label.config(text=f"{weight:.3f} kg")
    # Peso total
    self.total_label.config(text=f"{self.data['total']:.3f} kg")
    # Coordenadas CG
    self.cg_label.config(text=f"X: {self.data['x_cg']:.2f} mm, Y: {self.data['y_cg']:.2f} mm")
    # Actualizar gráficos
    self.update_plots()
def update_plots(self):
    """Actualiza los gráficos matplotlib"""
    # Gráfico 1: Actualizar punto CG
    self.cg_point.set_data([self.data['x_cg']], [self.data['y_cg']])
    self.cg_text.set_text(f"CG\n({self.data['x_cg']:.1f}, {self.data['y_cg']:.1f})")
    self.cg_text.set_position((self.data['x_cg'] + 10, self.data['y_cg'] + 10))
    # Gráfico 2: Actualizar líneas de evolución temporal
    if len(self.history) > 1:
        times = [i for i in range(len(self.history))]
        x_values = [h['x_cg'] for h in self.history]
        y_values = [h['y_cg'] for h in self.history]
        self.x_line.set_data(times, x_values)
        self.y_line.set_data(times, y_values)
    # Ajustar límites
    self.ax2.relim()
    self.ax2.autoscale_view()
    self.canvas.draw()
def update_history(self):
    """Actualiza el historial de mediciones"""
    self.history.append(self.data.copy())
    # Mantener solo últimos N puntos
    if len(self.history) > self.max_history_points:
        self.history.pop(0)
def send_tare(self):
    """Envía comando de tara a Arduino"""
    if self.connected and self.serial_port:
        self.serial_port.write(b't\n')
def send_calibrate(self):
    """Envía comando de calibración a Arduino"""
    if self.connected and self.serial_port:
        self.serial_port.write(b'c\n')
        messagebox.showinfo("Calibración",
                             "Sigue las instrucciones en el Monitor Serie de Arduino")

```

```

def toggle_measurement(self):
    """Inicia/detiene medición continua"""
    if not self.measuring:
        if self.connected and self.serial_port:
            self.serial_port.write(b'm\n')
            self.measuring = True
            self.measure_btn.config(text="DETENER MEDICIÓN (s)")
            self.save_btn['state'] = 'normal'
        else:
            if self.connected and self.serial_port:
                self.serial_port.write(b's\n')
                self.measuring = False
                self.measure_btn.config(text="INICIAR MEDICIÓN (m)")

def save_data(self):
    """Guarda los datos en un archivo CSV"""
    if not self.history:
        messagebox.showwarning("Sin datos", "No hay datos para guardar")
        return
    filename = f"medicion_{datetime.now().strftime('%Y%m%d_%H%M%S')}.csv"
    try:
        with open(filename, 'w', newline='', encoding='utf-8') as f:
            writer = csv.writer(f)
            # Encabezados
            writer.writerow(['Timestamp', 'Peso1_kg', 'Peso2_kg', 'Peso3_kg', 'Peso4_kg',
                             'Total_kg', 'X_CG_mm', 'Y_CG_mm'])
            # Datos
            for data in self.history:
                writer.writerow([
                    data.get('timestamp', ''),
                    data['weight1'], data['weight2'], data['weight3'], data['weight4'],
                    data['total'], data['x_cg'], data['y_cg']
                ])
            messagebox.showinfo("Guardado", f"Datos guardados en: {filename}")
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Error", f"No se pudo guardar: {str(e)}")

def on_closing(self):
    """Maneja el cierre de la aplicación"""
    if self.connected:
        self.disconnect()
    self.root.destroy()

# ===== EJECUCIÓN PRINCIPAL =====
if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = BasculaCGApp(root)
    root.mainloop()

```

10.3. Librerías y configuraciones

Librerías

Librería HX711 para Arduino

- Función: Control del convertidor analógico-digital de 24 bits
- Características: Lectura de puentes de Wheatstone, gestión de ganancia, compensación de offsets
- Versión utilizada: Adaptación basada en la librería de Bogdan Necula
- Configuración: Ganancia 128, tasa de muestreo 10 SPS

Core Arduino Framework

- Función: Abstracción del hardware del microcontrolador ATmega328P
- Características: Gestión de pines, comunicación serial UART, temporizadores
- Versión: Arduino IDE 1.8.x

Stack Python para Aplicaciones Científicas

- PySerial: Protocolo de comunicación serie Arduino-PC
- Matplotlib: Visualización en tiempo real de posiciones
- Pandas: Gestión de datos tabulares y exportación CSV
- NumPy: Implementación de algoritmos de estática

Configuraciones

Factores de Calibración de Células de Carga:

- Celda 1: Factor 122.27 - Ubicación esquina inferior izquierda
- Celda 2: Factor 125.48 - Ubicación esquina inferior derecha
- Celda 3: Factor 130.50 - Ubicación esquina superior izquierda
- Celda 4: Factor 121.40 - Ubicación esquina superior derecha
- Global: Factor de corrección de 1.188

Obtenidos mediante procedimiento de calibración con masas patrón

Configuración Geométrica de la Plataforma:

- Dimensiones totales: 400 mm × 400 mm
- Sistema de coordenadas cartesianas con origen en centro geométrico
- Coordenadas de células: (± 200 mm, ± 194 mm) respecto al centro
- Material: Madera de 6 mm de espesor

Parámetros de Comunicación Serial:

- Protocolo: UART a 115200 baudios
- Configuración: 8 bits datos, 1 bit parada, sin paridad
- Timeout: 1000 ms para operaciones de lectura

Asignación de Pines Arduino:

- Célula 1: DT (pin 2), SCK (pin 3)
- Célula 2: DT (pin 4), SCK (pin 5)
- Célula 3: DT (pin 6), SCK (pin 7)
- Célula 4: DT (pin 8), SCK (pin 9)

Configuración HX711:

- Ganancia: 128x para máxima relación señal/ruido
- Tasa de muestreo: 10 muestras por segundo
- Resolución efectiva: ~ 20 bits

Umbral y Límites del Sistema:

- Peso mínimo detectable: 0.01 kg
- Peso máximo por celda: 5 kg (25% capacidad nominal)
- Peso máximo total: 20 kg
- Tiempo estabilización: 2 segundos antes de captura

Parámetros de Filtrado y Procesamiento:

- Muestras para promedio móvil: 10 lecturas
- Umbral estabilidad: ± 0.5 mm en posición CG
- Resolución posición CG: 0.1 mm

Configuración de Visualización:

- Color plataforma: Azul claro semitransparente
- Color células de carga: Rojo
- Color centro gravedad: Verde
- Escala gráfica: ± 200 mm desde centro

Procedimiento de Rotación:

- Eje de rotación predeterminado: Eje X de la plataforma
- Ángulo de rotación: 90° exactos
- Verificación: Comparación coordenadas X entre mediciones
- Tolerancia posición Z: ± 3 mm

Formatos de Salida y Exportación:

- Formato fecha: AAAA-MM-DD (ISO 8601)
- Formato hora: HH:MM:SS (24 horas)
- Separador CSV: Coma
- Precisión numérica: 3 decimales pesos, 2 decimales coordenadas

Periodicidad de Verificaciones:

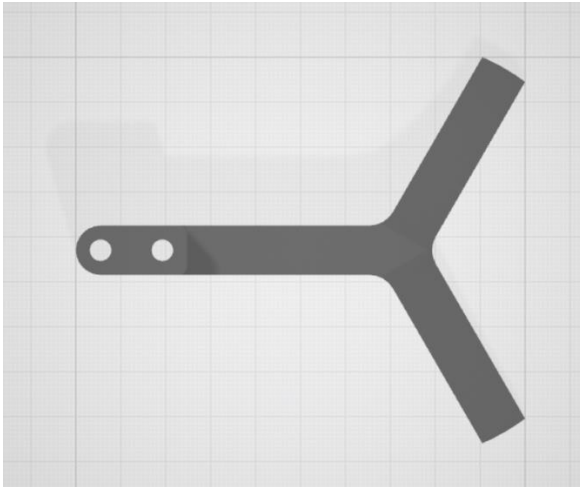
- Verificación cero: Semanal
- Verificación calibración: Mensual
- Recalibración completa: Anual
- Revisión mecánica: Semestral

Archivos de Configuración Persistente:

- Formato: JSON con codificación UTF-8
- Ubicación: Archivo local "config_bascula.json"
- Elementos guardados: Factores calibración, geometría, preferencias

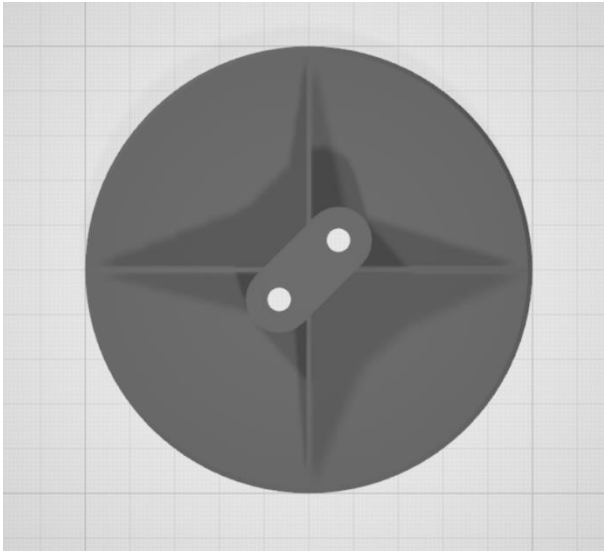
10.4. Planos detallados

Base 3D



<u>BASE</u> <u>3D</u>	Altura total	10	Altura desde la base de apoyo hasta la parte superior.
	Ancho parte alta	15	Ancho de la superficie superior donde se apoya el plato.
	Longitud	10	Profundidad de la pieza.
	Ancho base	7	Ancho de la base de apoyo.
	Diámetro agujeros (patas)	Ø5.2 (para M5)	Dos agujeros para tornillos M5 (sujeción a estructura).
	Diámetro agujeros (superior)	Ø4.2 (para M4)	Dos agujeros para tornillos M4 (sujeción del plato).
	Ángulo de inclinación patas	30° / 150°	Inclinación de las patas para mayor estabilidad.

Plato 3D



<u>PLATO 3D</u>	Altura total	15	Altura desde la base hasta la superficie superior.
	Radio externo	5	Radio del plato circular.
	Espesor de pared	5	Grosor del anillo circular.
	Diámetro agujeros	Ø4.2 (para M4)	Agujeros para tornillos M4 (sujeción a la base).

Notas técnicas:

- **Tolerancias:** Se recomienda ± 0.2 mm para dimensiones críticas (agujeros, planitud).
- **Material:** PLA+ para impresión 3D.

- **Acabado:** *Superficies lisas para garantizar contacto uniforme con las células de carga.*
- **Montaje:** *Verificar paralelismo entre base y plato durante el ensamblaje.*

