



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO DE UN DINAMÓMETRO CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

Autor

Adrián Miqueo Delgado

Director

Daniel Mercado Barraqueta

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2014

DISEÑO DE UN DINAMÓMETRO CON COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo el diseño y construcción de un dispositivo de medida de fuerzas, o dinamómetro, que cuente con un sistema de comunicación inalámbrica y un software de captura de datos por ordenador. La principal aplicación será su utilización para labores docentes por el Área de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA) de la Universidad de Zaragoza.

El dispositivo incluye una célula de carga, un circuito electrónico de amplificación de tensión y conversión analógica/digital, así como un sistema de comunicación Bluetooth y un programa de captura de datos. Para su funcionamiento, la fuerza aplicada sobre la célula de carga se traduce en una pequeña diferencia de potencial, la cual es amplificada para llevar a cabo la conversión A/D y realizar el envío de la información al ordenador.

En el desarrollo del proyecto se diseña y construye un prototipo del instrumento. En primer lugar, se realiza un estudio preliminar global que permita el diseño detallado posterior de cada uno de los sistemas que componen el dispositivo. Para el diseño de la célula de carga es importante el estudio del estado de deformaciones en los puntos donde se hayan de instalar los sensores extensiométricos, para lo cual se seleccionan y analizan una variedad de posibles geometrías y materiales. En cuanto a la parte electrónica, la gestión de la comunicación es de vital importancia, a fin de que el software de captura de datos pueda desarrollar su función satisfactoriamente. Por último, tras la fabricación y montaje del dispositivo se procede a la calibración del instrumento y la toma de medidas para comprobar que efectivamente se cumplen los objetivos marcados.

Las conclusiones son que se ha alcanzado el objetivo del proyecto y los resultados obtenidos muestran que el instrumento funciona correctamente. El bajo coste total se considera adecuado y se proponen algunas mejoras del prototipo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	4
I : CONCEPTOS	6
Sistemas de medida electrónicos.....	6
Sensores de Fuerza: Células de carga	7
Transductores: Galgas Extensométricas.....	8
Acondicionamiento.....	9
Procesamiento de datos: Microcontrolador Arduino Nano	11
Bloque de alimentación	11
II : DISEÑO DEL DINAMÓMETRO	12
Cálculos previos	12
Célula de Carga.....	13
Etapa de acondicionamiento: amplificación y filtrado	18
Arduino Nano y Módulo Bluetooth de Comunicación Inalámbrica	19
Processing: software de captura de datos	20
III : FABRICACIÓN, MONTAJE Y CALIBRADO	24
Fabricación y Montaje del Prototipo.....	24
Calibración	26
IV : RESULTADOS	28
V : CONCLUSIONES	29
BIBLIOGRAFÍA	30
ANEXOS	31
ANEXO 1: DISEÑO DE LA CÉLULA DE CARGA	32
ANEXO 2: ESQUEMAS ELECTRÓNICA	46
ANEXO 3: Código de Arduino	47
ANEXO 4: Código del Programa en Processing.....	48
ANEXO 5: Datos de calibración y Resultados finales	57
ANEXO 6: Datasheet.....	58

INTRODUCCIÓN

Esta sección incluye el contexto en el que se ha desarrollado el Trabajo de Fin de Grado, incluyendo la función del instrumento objeto del mismo, sus aplicaciones y requisitos; las herramientas empleadas, así como los objetivos y alcance del proyecto y la metodología seguida en el desarrollo del mismo.

Contexto

Este Trabajo Fin de Grado se ha desarrollado en el Área de Ingeniería Mecánica del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza (EINA), y se engloba dentro del desarrollo de herramientas de medida para la docencia e investigación del Área. Pone fin al Grado de Ingeniería en Tecnologías Industriales por parte del autor, en la especialidad de Mecatrónica, y se ha realizado durante el periodo de primavera y verano de 2014.

El desarrollo de un aparato de medida de fuerzas y su software será de gran utilidad para las tareas docentes del Área, en especial en las prácticas, además de que se prevé que en un futuro forme parte del desarrollo de un sistema multisensor de bajo coste.

Herramientas y entorno de trabajo

El equipo utilizado para este proyecto se compone principalmente de las máquinas-herramienta de mecanizado para la fabricación del instrumento y un ordenador personal con el software necesario.

En cuanto a las máquinas-herramienta, se han empleado tanto las de Taller de Mecanizado Área de Ingeniería Mecánica como del Servicio de Mecánica de Precisión de la EINA. En concreto, para la fabricación del prototipo se ha utilizado una máquina de electroerosión por hilo, una fresadora, un taladro y una máquina de prototipado.

En lo referente al software, se ha utilizado PTC CREO 2.0 Pro/Engineer para el diseño, análisis, simulación y optimización de piezas mecánicas; Arduino IDE para la programación del micro-controlador y Processing para el desarrollo del programa de captura de datos.

Objetivos

El objetivo de este proyecto es el diseño y la construcción de un instrumento de medida de fuerzas prototipo, así como el desarrollo de un software de captura de datos por ordenador.

El dispositivo ha de ser portátil y tener unas dimensiones y peso reducidos, y su fondo de escala de medida será de 20kg-f. Por otra parte, es requisito que disponga de un sistema de comunicación inalámbrico para la transmisión de datos a un ordenador. También forma parte del presente proyecto el desarrollo de un software de captura de datos que permita visualizar las medidas y guardarlas para su posterior análisis.

Metodología

Debido a la naturaleza del proyecto, una de las principales dificultades es la integración de diferentes subsistemas cuyo funcionamiento depende de los demás. Es por este motivo que, tras la recopilación de información y documentación inicial, se han realizado unos cálculos previos que permitieran detectar las restricciones que cada parte del instrumento impone a los demás, además de proporcionar un punto de partida para el análisis y la búsqueda de una solución satisfactoria. En una segunda fase, se han analizado y diseñado los subsistemas separadamente, respetando las restricciones mencionadas anteriormente. Se ha comenzado a continuación con la fabricación y montaje del prototipo, a fin de poder comprobar el buen funcionamiento del conjunto. Finalmente se ha calibrado el instrumento y se han realizado medidas para verificarlo.

Estructura de la memoria

En el primer capítulo se introducen de manera global los subsistemas que componen el instrumento de medida de fuerzas, describiendo los conceptos básicos necesarios para comprender su funcionamiento. En el segundo se tratan los cálculos, consideraciones y análisis llevados a cabo durante el diseño. En el tercero se describe el proceso de fabricación, montaje y calibración del prototipo, mientras que en los capítulos cuarto y quinto se exponen los resultados y conclusiones, respectivamente. En el anexo de la memoria se incluyen los cálculos y simulaciones, los planos de fabricación del prototipo, el esquema del circuito electrónico, los programas del Arduino y del software de captura de datos, y las datasheet de los componentes utilizados.

I: CONCEPTOS

En esta sección se incluye una breve introducción a los sistemas de medida electrónicos así como una descripción general de los subsistemas que componen el dinamómetro diseñado.

Sistemas de medida electrónicos

Los sistemas de medida son aquellos equipos cuyo objetivo es la medición de cualquier tipo de magnitud física, de la conversión de la misma a magnitudes eléctricas y de su tratamiento para proporcionar la información adecuada a un sistema de control, a un operador humano, o a ambos.

La información de las variables que se desea conocer se almacena en una variable eléctrica, generalmente tensión, llamada señal. Una señal analógica puede contener información en cualquiera de los parámetros que la definen, verbigracia el valor instantáneo, la amplitud o la frecuencia. Por desgracia, habitualmente las señales suelen contener factores que dificultan su lectura, lo que se denomina ruido.

En un sistema de medida se pueden distinguir tres funciones principales: adquisición de datos, procesamiento de datos y distribución de los mismos.

La adquisición consiste en la captura y conversión de la información de las variables a medir a una señal eléctrica, así como la adecuación de la señal y su conversión digital. El procesamiento de datos supone su manipulación por parte de un procesador, comúnmente un microcontrolador. Por último, la distribución de datos consiste en el envío, recepción, almacenamiento y presentación del valor medido a un observador.

Aparte de estas tres funciones principales, todo sistema de instrumentación ha de contar con un bloque de alimentación que proporcione a cada parte la energía necesaria para su adecuado funcionamiento.

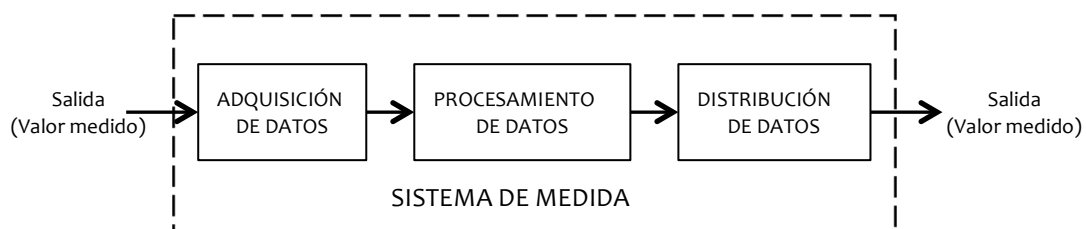


Figura 1. Funciones principales de un sistema de medida electrónico.

Fuente: Pérez 2006, Fig. 1.10, pág. 10.

En la etapa de adquisición de datos se pueden diferenciar tres subsistemas: transductor, acondicionador de la señal y convertidor analógico/digital (CA/D).

El transductor tiene como finalidad de acoplar la magnitud a medir al sistema de medida, para lo cual debe realizar una conversión de la propiedad física que se desea medir a una variable eléctrica. Cabe mencionar la diferencia entre sensor y transductor (Díaz 1995, p155) El sensor es el elemento directamente en contacto con la magnitud a medir, y que no tiene por qué proporcionar ninguna salida eléctrica. En el presente proyecto se utiliza una célula de carga como sensor, y un

sistema extensométrico, en configuración de puente de Wheatstone completo, como transductor propiamente dicho.

A menudo, la señal procedente del transductor tiene unas características poco adecuadas para ser procesada, por lo que se hace necesario una etapa de acondicionamiento. Ésta consiste en la realización de alguna o todas las operaciones siguientes: amplificación, filtrado, linealización y modulación/desmodulación. Para este TFG se ha empleado un circuito electrónico que filtra y amplifica la señal obtenida de las galgas.

Por último, nos encontramos la conversión A/D, realizada por un microcontrolador Arduino Nano en este caso, que se ocupa además del procesamiento de los datos antes de su envío al ordenador.

Sensores de Fuerza: Células de carga

Para medir una fuerza, es preciso evaluar el efecto que ésta produce sobre el material al cual se aplica: o bien un desplazamiento, o bien una deformación. Se hace preciso por lo tanto disponer de un sensor que se deforme bajo los efectos de la fuerza aplicada, y un transductor que se ocupe de transformarla en una señal eléctrica.

Las células de carga son piezas mecánicas de configuración muy variada, que se han diseñado de tal forma que en algunas partes de su estructura mecánica, el peso aplicado se transforme en una deformación proporcional.

Los materiales a emplear deben tener una rigidez, tensión de ruptura y límite elástico elevados, y un módulo de elasticidad bajo. (Díaz 1995, p.156) Estas premisas contradictorias obligan a diseñar diferentes geometrías en función de la magnitud y frecuencia de la fuerza a medir.

Las geometrías para las células de carga son muy variadas, en función de las características de las fuerzas a medir. En el caso de las fuerzas de tracción, los diseños más habituales son los mostrados en la Figura 2: viga de flexión simple (a), viga de flexión múltiple (b), binocular (c), en anillo (d), y en S (e).

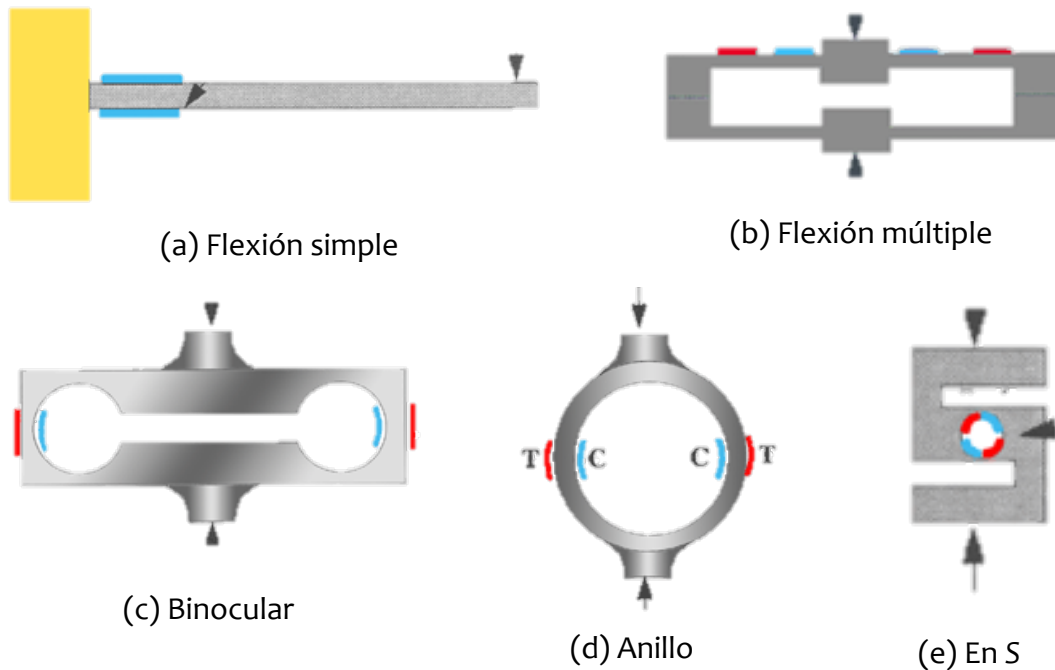


Figura 2. Geometrías comunes de células de carga.

Fuente: Sensorland

El modelo de viga de flexión simple tiene como principal característica su sencillez, lo que en la práctica limita la resolución de las medidas.

El modelo en S por su parte, tiene como principal inconveniente que la instalación de las galgas es excesivamente complicada.

Los modelos de flexión múltiple, binocular y circular presentan una mayor facilidad para el montaje de los transductores, permitiendo un puente de galgas completo.

Transductores: Galgas Extensométricas

Las galgas extensométricas son transductores resistivos de amplio uso en la medida de fuerzas mecánicas en materiales. Las deformaciones sufridas por la galga modifican su resistencia eléctrica efectiva. (Pérez 2006, p.228)

Dicha variación de su resistencia viene dado por la expresión 1, donde K es una constante denominada factor de galga, ϵ es la deformación a la que está sometida y R es la resistencia de la galga cuando no sufre deformación alguna.

$$\Delta R = K R \epsilon \quad (1)$$

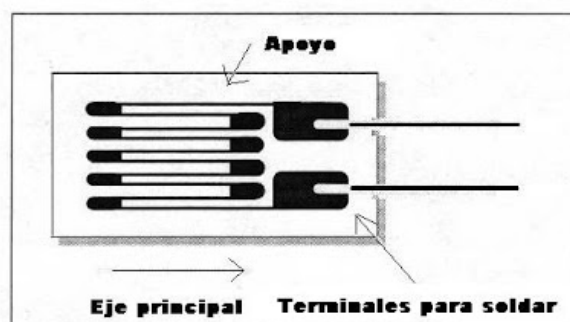
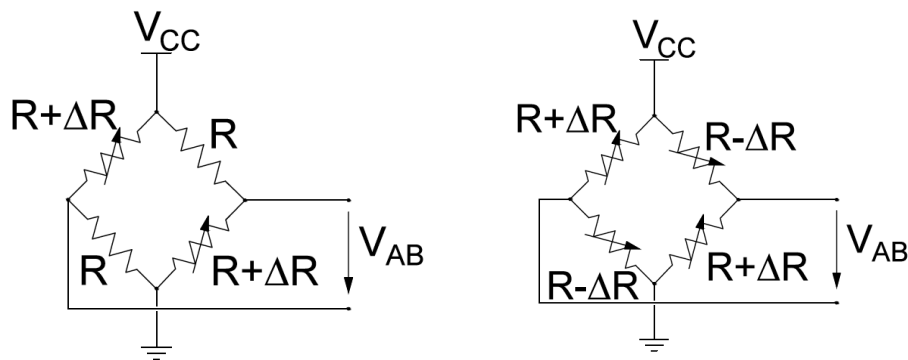


Figura3. Galga extensométrica

Las galgas extensométricas se pueden clasificar, según su material, en metálicas y semiconductoras. Atendiendo al tipo de esfuerzos a medir, se encuentran galgas uniaxiales, galgas biaxiales o rosetas y galgas para esfuerzos radiales y tangenciales. Las galgas más empleadas a día de hoy son las metálicas, principalmente debido a que su precio es sensiblemente inferior. Para este proyecto se utilizan galgas uniaxiales debido a que se desean medir únicamente fuerzas de tracción pura.

En cuanto a los montajes eléctricos empleados con las galgas, destacan los montajes en puente de Wheatstone, ya sean de una, dos o cuatro galgas (puente completo).



(a) Puente de dos galgas

(b) Puente completo

Figura 4. Puentes de Wheatstone.

Para el puente de dos galgas que trabajan con el mismo esfuerzo aplicado, se tiene una tensión de salida dada por la ec. 2:

$$V_{AB} = -\frac{k \varepsilon}{2} V_{CC} \quad (2)$$

Considerando el puente completo, y trabajando con estados tensionales “opuestos” pero iguales en valor absoluto, dos trabajando a tracción y dos a compresión, se consigue duplicar la sensibilidad. La tensión de salida es la mostrada en la ec. 3 (Pérez 2006, p.236).

$$V_{AB} = -k \varepsilon V_{CC} \quad (3)$$

Acondicionamiento

Montaje Amplificador

Una etapa de amplificación en un sistema electrónico es un bloque que se encarga de tomar la señal de una entrada y situarla en la salida con un mayor nivel de potencia.

Un amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial de tensión optimizado, capaz de trabajar con transductores que ofrecen señales eléctricas muy

débiles. Debe ser capaz de amplificar señales diferenciales del orden de microvoltios, y a la vez rechazar tensiones de modo común del orden de voltios, lo que implica un elevado rechazo al modo común (CMRR, *Common Mode Rejection Ratio*), del orden de 80 o 100dB por lo menos.

Los montajes más habituales incluyen uno, dos o tres amplificadores operacionales, siendo este último tipo el más empleado actualmente (Figura 5)

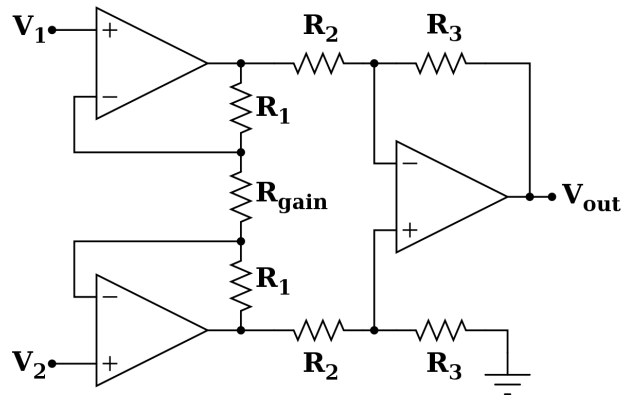


Figura 5. Amplificador de instrumentación de 3 operacionales

Los amplificadores monolíticos se pueden considerar la segunda generación de los amplificadores de instrumentación, y son montajes integrados que presentan ciertas ventajas respecto a los amplificadores clásicos, como la independencia del CMRR respecto del buen emparejamiento de las resistencias o la reducción de componentes, área y coste.

Los parámetros más importantes para caracterizar los amplificadores de instrumentación, para este proyecto, son:

- **Ganancia:** es el factor de amplificación de tensión al modo diferencial, A_d . En los circuitos integrados monolíticos, el fabricante suele ofrecer una expresión analítica para la misma, generalmente en función de una resistencia regulable R_G .
- **Margen de ganancia:** es el rango en el que puede estar comprendida la ganancia.
- **Error de la ganancia:** es la desviación real respecto a la ideal, para R_G constante. Se expresa en tanto por ciento respecto al valor de ganancia mayor del margen.
- **Rail-to-rail:** así se denomina a los amplificadores que proporcionan una tensión de salida máxima prácticamente de igual valor que la alimentación positiva, y no ligeramente inferior como es habitual.

Filtrado

Un filtro electrónico es un cuadripolo capaz de atenuar únicamente determinadas frecuencias del espectro de la señal. En el caso de una medida señal de frecuencias bajas, serán de interés los filtros paso bajo, que dejan pasar aquellas frecuencias por debajo de la de corte.

Procesamiento de datos: Microcontrolador Arduino Nano

Las variables analógicas de la medida, tras su transformación en señales eléctricas, requieren una conversión a un formato digital para poder ser tratadas por un procesador digital. De esta función se ocupa el convertidor analógico-digital (CA/D).

Un microcontrolador es un sistema computador autónomo, basado en un circuito integrado que incluye, genéricamente, la CPU, convertidores A/D y D/A, memorias RAM y ROM, puertos serie y paralelo y un temporizador.

Los microcontroladores pueden realizar un amplio rango de tareas, desde las más sencillas hasta complejos algoritmos de control, aportando una gran flexibilidad al diseño de cualquier sistema electrónico.

Arduino es una plataforma de hardware libre consistente en una placa con un microcontrolador y los periféricos necesarios para su funcionamiento y comunicación con el mundo exterior, mediante diferentes puertos de entradas y salidas; así como el software de programación necesario para su utilización. Sus principales ventajas son su reducido coste y su entorno de desarrollo, ideado para facilitar su aprendizaje y uso.

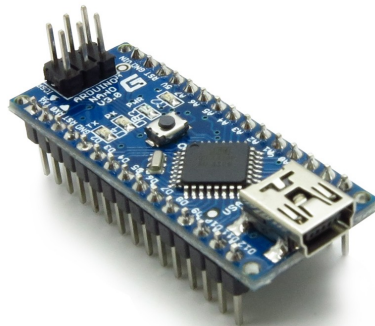


Figura 6. Arduino Nano

Bloque de alimentación

Los sistemas de medida electrónicos precisan de una fuente de alimentación para el funcionamiento de sus circuitos. El diseño de un instrumento portátil impone el uso de una batería, y ésta, la necesidad de un montaje de regulación de la tensión para alimentar correctamente los diferentes bloques electrónicos del sistema

II : DISEÑO DEL DINAMÓMETRO

Esta sección describe el proceso seguido para el diseño del instrumento. En primer lugar se abordan los cálculos iniciales, tras los cuales se trata en detalle cada uno de los subsistemas que componen el dinamómetro.

Cálculos previos

El primer paso para diseñar un instrumento de medida electrónico, tras conocer los conceptos teóricos fundamentales, consiste en definir los bloques principales del mismo, como se muestra en la Figura 7. Éstos son: célula de carga, puente de galgas, etapa de amplificación, montaje de alimentación, Arduino Nano con módulo Bluetooth, y software de captura de datos.

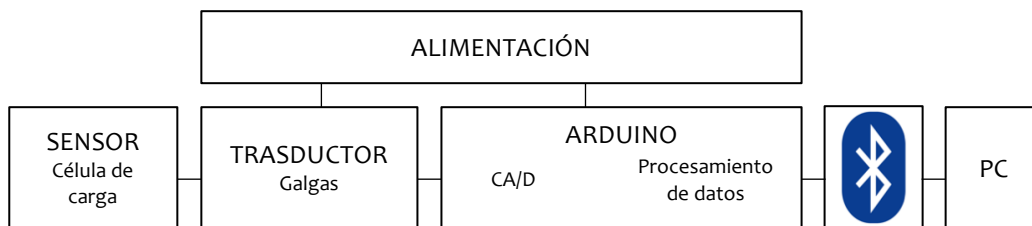


Figura 7. Bloques del dinamómetro.

A continuación, se enumeran sus requisitos y objetivos, así como las implicaciones que éstos tienen para otros subsistemas.

El dispositivo electrónico encargado de la CA/D, el procesamiento de datos y gestión de la comunicación es el Arduino Nano. Su elección se debe a sus pequeñas dimensiones, su precio y su capacidad más que suficiente para las funciones que desempeña. El Arduino Nano tiene una resolución de 10 bits para la conversión A/D, y requiere una alimentación asimétrica a 5V DC regulados.

Con el objetivo de reducir el número de componentes del montaje, el empleo de una única fuente de tensión regulada impone que ésta proporcione 5V DC a todas las etapas electrónicas.

En la célula de carga, por otra parte, se estima razonable que el valor de las deformaciones en el lugar donde se encuentren las galgas, bajo la carga máxima admisible (fondo de escala: 20kg-f), sea de aproximadamente 1000 microdeformaciones (Pérez 2006, cap. 7)

Teniendo en cuenta que el factor de galga k es aproximadamente 2 (pág. 19 del catalogo de galgas de HBM, Anexo 6), la tensión diferencial del puente completo, de acuerdo con la ec. 3, es del orden de 20 mV.

Considerando que Arduino lee entradas analógicas de 0 a 5V, la etapa de amplificación deberá proporcionar una ganancia de tensión del rango de 250, según la ec. 4.

$$A_d = \frac{v_s}{v_e} = \frac{5}{20 \cdot 10^{-3}} = 250 \quad (4)$$

Célula de Carga

Para construir un instrumento de fondo de escala 20kg-f se tuvieron en cuenta las siguientes restricciones: los materiales disponibles eran tres: acero, bronce y aluminio; y se consideró un coeficiente de seguridad (C_s) de 2, a aplicar a la tensión máxima admisible, utilizando el criterio de Von Mises.

El diseño de la célula de carga se realizó en tres etapas. En primer lugar se eligió la geometría, después el material, para finalmente optimizar el diseño.

En todas las fases se utilizó el software de análisis mecánico PTC CREO 2.0 Pro/Engineer.

Elección de la geometría

Las opciones de geometrías inicialmente consideradas, como se ha indicado en el capítulo anterior, fueron 3: en anillo, binocular y de viga de flexión múltiple.

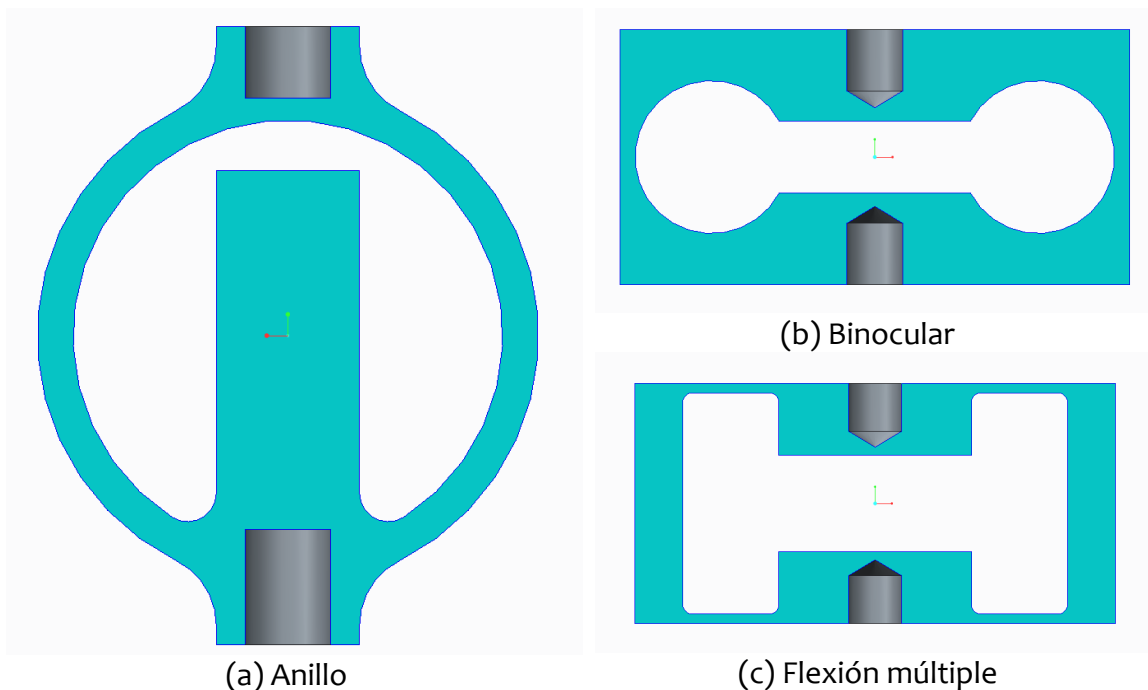


Figura 8. Geometrías consideradas en el análisis inicial.

El objetivo en esta primera fase es conseguir, sometiendo al elemento a una fuerza de tracción de 20kg-f, valores de deformación cercanos a 1000 microdeformaciones en la zona de medida, sin superar la mitad del límite elástico del material en ningún punto de la geometría.

Los materiales considerados fueron acero, bronce y aluminio, cuyas características están incluidas en la biblioteca de materiales del programa utilizado. Las geometrías de los modelos considerados se encuentran en el Anexo 1.1.

Para el análisis se fijaron las siguientes condiciones de contorno: la fuerza de tracción en uno de los agujeros roscados y una restricción del desplazamiento en el otro. Los resultados del análisis se recogen en la Tabla 1.

El cociente entre las microdeformaciones a tracción (ϵ^-) y a compresión (ϵ^+) es relevante en la medida en que, cuanto más cercano sea a uno, mejor equilibrado estará el puente de galgas, por lo que la calibración del instrumento de medida será más sencillo.

Geometría	Material	ϵ_+	ϵ_-	$ \epsilon_+/\epsilon_- $	σ_{VM}
Anillo	Aluminio	610	521	1,19	57
	Bronce	406	344		
	Acero	210	175		
Binocular	Aluminio	509	259	1,96	45
	Bronce	329	174		
	Acero	178	90		
Flexión múltiple	Aluminio	2360	2320	1,15	230
	Bronce	1644	1616		
	Acero	405	285		

Tabla 1. Comparación de geometrías y materiales.

La geometría elegida es la de anillo, debido a que:

A pesar de que los valores de deformación no son los más simétricos (valor de $|\epsilon_+/\epsilon_-|$ más cercano a la unidad), la experiencia con prototipos anteriores muestra que se trata de la geometría la que permite una mayor accesibilidad para el montaje de las galgas, el cual es un paso crítico en la construcción del instrumento. Esto es debido a que las medidas obtenidas de las galgas son muy sensibles a un mal posicionado sobre la célula.

Es teóricamente imposible conseguir simetría en el estado de deformaciones de la célula de carga anular. La pieza, en la posición donde se instalan las bandas, sufre la fuerza de tracción y también un momento flector. Éste hace que en la superficie interior la tensión de tracción se vea aumentada por la tracción derivada de la flexión, mientras que en la superficie exterior la tensión resultante es la diferencia entre la compresión derivada de la flexión y la tensión tracción del peso a medir.

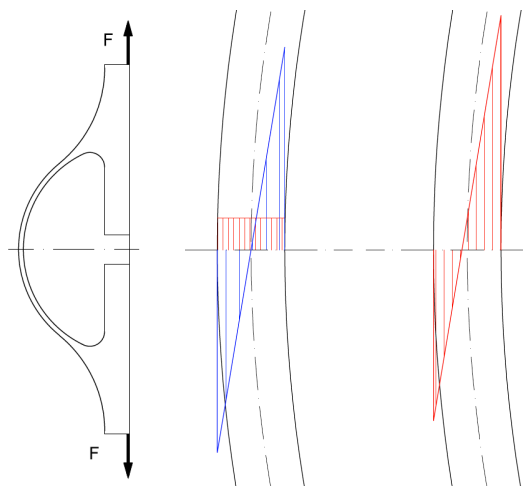


Figura 9. Diagrama de tensiones

Como puede apreciarse en la Figura 8.a, el diseño anular estudiado incluye una viga central, cuya función es la de ejercer de tope a compresión, evitando que la célula de carga se vea sometida a esfuerzos superiores a su límite elástico, comprometiendo la fiabilidad de las medias posteriores. Además, permite la instalación interior de un tornillo que realice la función análoga para las cargas de

tracción. El roscado permite ajustar con precisión el desplazamiento máximo permitido.

Elección del material

Una vez escogida la geometría, se estudiaron los diseños, para cada uno de los materiales disponibles, que permitieran cumplir los objetivos. Los resultados del estudio se encuentran en el Anexo1.3, y se recogen en la Tabla 2.

Material	D_{EXT}	Espesor	σ_{VM}	Cs	$\epsilon+$	$\epsilon-$	$ \epsilon+/\epsilon- $
Bronce	55	1,7	148	2,03	1150	895	1,28
Acero	47,5	1	300	2,00	1160	925	1,25
Aluminio	40	2	65	1,06	800	579	1,38

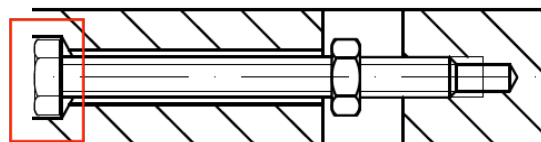
Tabla 2. Comparación de materiales para geometría de anillo.

El material elegido es el acero debido a los motivos que se explican a continuación: El aluminio no puede cumplir el requisito del coeficiente de seguridad 2, lo que lo descarta. El bronce necesita de un diámetro exterior mayor. Por otra parte, resulta más difícil encontrar disponible un bronce concreto para fabricar la célula de carga.

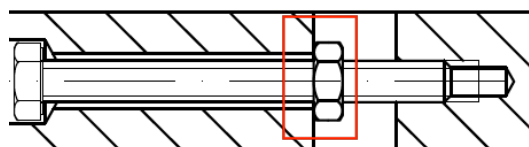
Optimización

Sobre la geometría de anillo analizada, se decidió modificar el sistema de tope. El tope en una sola pieza funciona por contacto en el caso de compresión, mientras que el recorrido a tracción queda limitado por un tornillo. Un tope en dos partes simétricas permite:

- Limitar el desplazamiento máximo a tracción de una manera ajustable por medio de un tornillo entre los dos extremos del tope, Figura 10.a.
- Limitar el desplazamiento máximo a compresión, por medio de una tuerca montada sobre el tornillo de ajuste. Esto hace que el recorrido máximo a compresión no dependa de la precisión del mecanizado de la distancia entre los topes. Figura 10.b.
- Aumentar la distancia entre las dos partes del tope, facilitando el mecanizado.
- Obtener una pieza final simétrica.



(a) El tornillo hace de tope, a tracción.



(b) La tuerca hace de tope, a compresión.

Figura 10. Detalle de funcionamiento del tope.

El objetivo principal de la optimización es hallar una geometría que maximice las deformaciones en los puntos de medida, respetando las siguientes restricciones:

- Mantener en toda la pieza un coeficiente de seguridad (C_S) mínimo de 2 entre la tensión de von Mises y el límite elástico del material.
- El espesor mínimo será de entre 1 y 2mm.
- El diámetro exterior máximo se mantendrá entre 40 y 50 mm.

Los parámetros a variar en el estudio fueron el espesor, el diámetro exterior y los radios de redondeo.

La anchura de la pieza se fijó en torno a los 10mm de manera que permitiera montar unas galgas de una anchura (manejable/aceptable/cómoda) sin aumentar la rigidez de la pieza. Aumentar la anchura de la célula implica la disminución proporcional de la tensión y deformación, por lo que para un mismo diámetro, sería necesario reducir el espesor; y para un mismo espesor, aumentar el diámetro.

En cuanto al proceso de optimización, los límites impuestos en CREO Pro/E son:

- σ_{VM} máxima < 300 MPa
- Diámetro exterior < 50 mm
- Espesor > 1 mm
- $\epsilon+$ y $\epsilon-$ > $1000 \cdot 10^{-6}$

Los detalles de la simulación están en el Anexo 1.5, y el plano con las dimensiones finales de la célula de carga se encuentran en el Anexo 1.7.

Se estudió también el efecto que tendría la aplicación de la fuerza de 20kg-f, en una dirección que no fuese únicamente la de tracción-compresión. Los resultados, recogidos en el Anexo 1.6, muestran que se supera ampliamente el límite elástico del material, lo que tendría consecuencias nefastas para las mediciones posteriores. Se ideó por este motivo un soporte que pueda absorber dichas fuerzas para evitar los efectos mencionados.

La geometría optimizada se puede ver en la Figura 11. Sometida a 20kg-f, las deformaciones obtenidas en los puntos en que irán montadas las bandas extensométricas son de 925 microdeformaciones a tracción y 1160 a compresión.

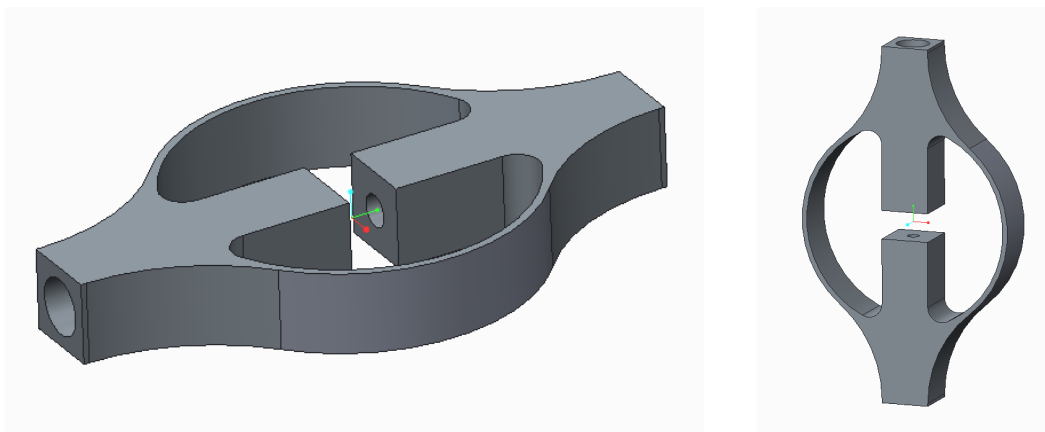


Figura 11. Geometría final de la célula de carga.

Soporte

Como se ha explicado, se ha estimado necesaria la inclusión de un soporte mecánico, que absorba las fuerzas que no sean de tracción pura, de manera que la célula de carga no se vea sometida en ningún caso a esfuerzos superiores a su límite elástico.

Este soporte metálico se plantea en aluminio, debido a su ligereza, y a partir de un perfil en U, según muestra la Figura 12.a. Ejerciendo la fuerza que se desea medir a través de un cable metálico pasante a través de un agujero en el soporte en U, se asegura que la célula de carga sólo sea sometida a las fuerzas de tracción pura. (Figura 10.b). El plano del soporte se encuentra en el Anexo 1.7.

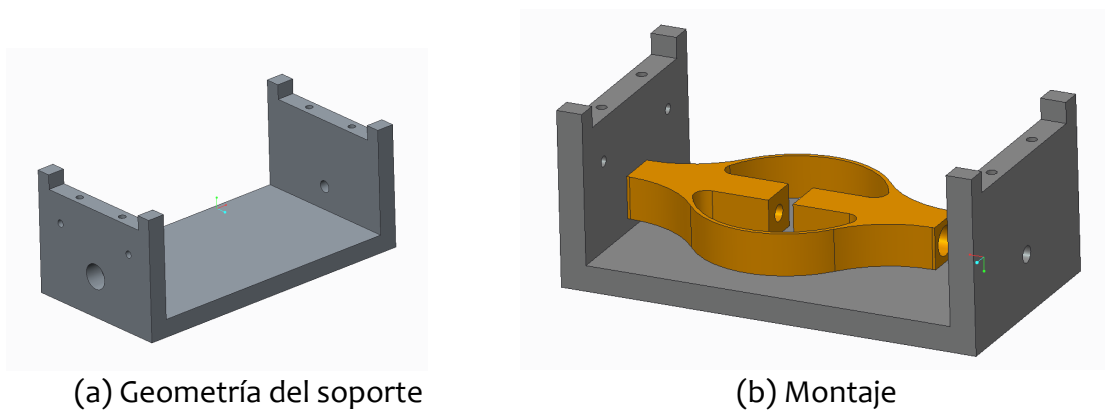


Figura 12. Soporte

Elección de las Galgas Extensométricas y Tensión de Salida

La célula de carga permite la instalación de cuatro galgas extensométricas, dos trabajando a tracción y dos a compresión, para realizar un montaje de puente de Wheatstone completo.

Las bandas utilizadas son las LY11-0.6 del fabricante HBM, debido a sus dimensiones adecuadas (el ancho del soporte de la banda es de 5mm, inferior a los 10mm de espesor de la célula de carga), resistencia de 120 ohm, factor de galga k aproximadamente 2 (k nominal 1,69) y coeficiente de temperatura emparejado al del acero. Éstas y otras características vienen recogidas en su catálogo, incluido en el Anexo 6.

Para el cálculo de la tensión teórica de salida del puente completo se ha considerado que las galgas no se encuentran en estados tensionales simétricos, y que la tensión de referencia es de 5V DC. La tensión diferencial de salida es de aproximadamente 10mV, como se calcula en la ecuación 5:

$$R_{galga} = R_0 + \Delta R = R_0 + R_0 k \varepsilon$$

$$R^+ = R_0 + \Delta R = R_0 + R_0 k \varepsilon^+ = 120(1 + 2 \cdot 1100 \cdot 10^{-6}) = 120,022\Omega$$

$$R^- = R_0 - \Delta R = R_0 + R_0 k \varepsilon^- = 120(1 - 2 \cdot 900 \cdot 10^{-6}) = 119,982\Omega$$

$$V_{AB} = V_{CC} \left(\frac{R^+}{R^+ + R^-} - \frac{R^-}{R^+ + R^-} \right) = 5 \cdot 0,001999 \cong 10mV \quad (5)$$

A pesar de que en teoría en ausencia de carga la tensión entre los extremos del puente es nula, en la práctica siempre existe una pequeña diferencia de potencial por diferencias entre las ramas del puente de las distintas bandas (longitud de cableado, soldaduras, valor de la resistencia, etc.). Para equilibrar el puente, se instalan un potenciómetro y una resistencia, como se muestra en la Figura 13. El valor de la resistencia se desea alto relativo a las galgas (del orden de decenas de $k\Omega$), para que no afecte a la medida, y se escoge experimentalmente.

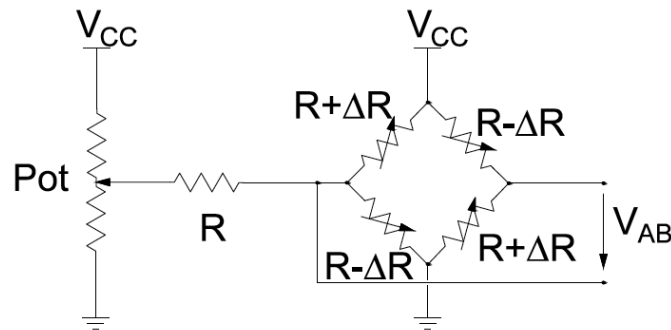


Figura 13. Puente completo con potenciómetro para equilibrado

Etapa de acondicionamiento: amplificación y filtrado

El elemento principal de esta etapa es un amplificador de instrumentación, encargado de amplificar con precisión las señales de muy bajo nivel aplicadas a su entrada, eliminando a su vez, las posibles interferencias y el ruido que lleguen en modo común. El montaje completo de la etapa de amplificación y filtrado está representado en la Figura 14.

Amplificación

La ganancia deseada es de aproximadamente 500, de acuerdo con la ec.6:

$$A_d = \frac{v_s}{v_e} = \frac{5 V}{10 mV} = 500 \quad (6)$$

La alimentación del amplificador deberá ser asimétrica de 0 a 5V DC, como se ha explicado en los cálculos previos. El tipo de encapsulado que mejor se adapta a la construcción de un prototipo es el DIP (*Dual In-line Package*), que se puede montar con facilidad en una protoboard.

Otras características relevantes para la selección son el error de ganancia, la corriente de polarización (*quiescent current*), el tipo de encapsulado, si el amplificador es rail-to-rail, el CMRR y el precio.

De entre los modelos disponibles, los más destacados vienen recogidos en la Tabla 3, junto con sus características, a fin de ser comparados:

Modelo	G_v máx	Error G_v	$I_{polariz.}$ (μA)	Encapsulado	Rail-to-rail	CMRR (dB)	Precio (€)
INA122	10000	0,05%	60	DIP	Si	90	5,46
INA126	10000	0,02%	175	DIP	No	90	1,98
INA327	10000	0,08%	*	MSOP	Si	120	5,50
INA211	500	1,00%	100	SOT	No	140	1,45
AD623	1000	0,35%	*	DIP	Si	110	3,24
AD627	1000	0,03%	85	SOIC	Si	90	4,82
AD8237	1000	0,005%	115	MSOP	Si	120	2,04

* Sin datos

Tabla 3. Comparación de amplificadores de instrumentación

El modelo escogido es el AD623, debido a que es el único que cumple los requisitos de contar con encapsulado DIP, ser *rail-to-rail*, y un precio bajo. Se trata de un modelo de gama media en todos los aspectos.

Para el ajuste de la ganancia de tensión se utiliza una resistencia, R_G , de valor 200 ohm, calculado según la tabla 1, obtenida de de la página 12 de la datasheet del amplificador, la cual se encuentra en el Anexo 6.

Filtrado

Se ha montado un filtro pasivo RC de primer orden paso bajo. La frecuencia de corte teórica es 30Hz, inferior a la frecuencia de la red eléctrica. Está compuesto por una resistencia de 22 k Ω y un condensador de 220 pF, lo que resulta en una f_c teórica de 32,88 Hz.

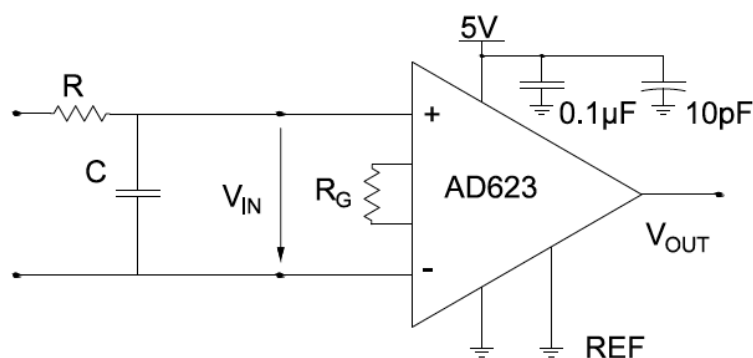


Figura 14. Etapa de acondicionamiento

Arduino Nano y Módulo Bluetooth de Comunicación Inalámbrica

Un microcontrolador Arduino Nano se ocupa de la conversión A/D, del procesamiento de la información captada y de la gestión de la comunicación con el ordenador.

La conversión A/D se realiza automáticamente leyendo la tensión de entrada de un pin analógico entre 0 y 5V, con una resolución de 10bits.

La programación del microcontrolador permite elegir la frecuencia de muestreo desde el PC.

La comunicación con el ordenador se realiza vía puerto serie, sin necesidad de cables gracias a un módulo Bluetooth.

Algoritmo de Arduino

El algoritmo consta de cuatro acciones principales:

- Comprobar si hay datos en el buffer del puerto serie. En caso afirmativo, actualizar el valor de la frecuencia de muestreo.
- Lectura del pin analógico y actualización del valor de la medida
- Envío de la medida vía puerto serie.
- Espera (*delay*) el tiempo establecido por la frecuencia de muestreo.

El código correspondiente se encuentra en el Anexo 3.

Protocolo utilizado para la comunicación

La resolución de la conversión A/D de Arduino es de 10 bits, por lo que la tensión de 0 a 5V se registra como un entero entre 0 y 1023. Sin embargo, para poder enviar la información de la medida en un menor número de bytes, la medida se descompone en dos bytes (alto y bajo). Cada vez que se desea enviar una medida, Arduino envía un “paquete” de cuatro bytes: dos bytes con valor 255, que actúan de marcador para que el software sepa identificar el comienzo del paquete, seguidos de los bytes alto y bajo (*lowByte* y *highByte*) en que se ha dividido el valor de la medida.

Comunicación Inalámbrica

La comunicación inalámbrica se realiza gracias a un módulo Bluetooth HC-06 modelo JY-MCU BT BOARD v1.3. Éste se alimenta a 5V y se conectan sus terminales de recepción RX y de transmisión TX con los TX y RX de Arduino, respectivamente (cruzados).

Montaje de alimentación

El instrumento requiere con una fuente de alimentación que proporcione una tensión regulada a 5V DC a partir de una batería de 9V.

Para ello, el montaje de alimentación cuenta con la batería, un regulador de tensión LM7805 y dos condensadores (Figura 15).

Los condensadores tienen una capacidad de 100nF y 330nF respectivamente, como se especifica en la página 7 de la datasheet del LM7805, recogida en el Anexo6.

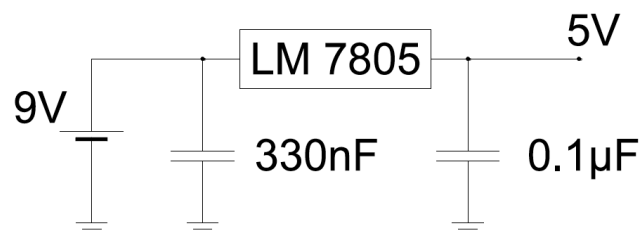


Figura 15 . Montaje de alimentación.

Processing: software de captura de datos

El programa desarrollado en el lenguaje Processing 2+ supone la última etapa del dinamómetro. Gracias a él, el usuario puede visualizar los resultados de las medidas,

guardar los datos, modificar la frecuencia de muestreo y seleccionar el modo de medida. El código del programa se encuentra en el Anexo 4.

Menú principal y modos de trabajo principales

El programa cuenta con una ventana gráfica principal, mostrada en la Figura 16. A través de ella, pulsando los botones con el ratón, se puede seleccionar el modo de medida que se desea utilizar.



Figura 16. Ventana principal del programa

Los botones disponibles en el menú principal son:

- | | | |
|---|------------------------|--|
| 1 | Guardar datos | Activa o desactiva el guardado de datos |
| 2 | Cerrar | Cierra el programa |
| 3 | Ventana gráfica | Permite graficar la medida continua |
| 4 | Medida única | Activa el modo de medida única |
| 5 | Inicio medida continua | Comienza el modo de medida continua |
| 6 | Fin medida continua | Finaliza el modo de medida continua |
| 7 | Ventana de texto | Permite introducir o mostrar información |
| 8 | Reset | Salta del modo de medida única |
| 9 | Frec. de muestreo | Permite introducir la frecuencia de muestreo |

Los dos modos de medida son *medida única* y *medida continua*. En el primero se muestra únicamente el valor medido en ese momento. El valor aparece en la ventana de texto junto al botón Reset, que permite finalizar la medida y volver al

menú principal. El modo de medida continua permite visualizar y guardar en un fichero las medidas de manera ininterrumpida conforme llegan del Arduino.

El botón de guardar permite el guardado de datos durante la medida continua. Para ello es necesario introducir el nombre del fichero que se creará con las medidas tomadas. Cuando los datos llegan del Arduino, el programa muestra el valor en la ventana de texto, realiza una gráfica en tiempo real en la ventana gráfica y escribe el dato medido en el archivo de texto creado. En caso de no estar activado el modo guardar, la medida continua únicamente dibuja la gráfica y muestra el valor de la medida en pantalla.

El formato del fichero de almacenamiento es de texto (.txt). La primera línea del archivo almacena la frecuencia de muestreo. Los datos se escriben separados por saltos de línea.

El botón de Frec. de muestreo permite introducir la frecuencia con que se desea que el Arduino tome datos. La frecuencia mínima admisible es 1Hz y la máxima, 100Hz. La frecuencia máxima se ha determinado experimentalmente, y es aquella a partir de la cual el programa no es capaz de realizar las funciones requeridas conforme llegan los datos.

Procesamiento de datos

El programa recibe y envía datos en paquetes de cuatro bytes según el protocolo expuesto previamente. Para obtener el valor de una medida, el programa espera a haber leído dos bytes consecutivos de valor 255, lee los bytes alto y bajo recibidos y monta el entero entre 0 y 1023 enviado por Arduino.

En el modo de medida continua, para reducir el ruido de los datos recibidos, se realiza una media aritmética de los últimos 15 valores enviados. Para evitar sumar 15 términos y hacer su división cada vez que se recibe una medida, el algoritmo de la media – función *media_aritmetica()* - es el siguiente:

- Una variable puntero indica cual es la siguiente posición dentro del vector *datos_medidaC[]* en la que hay que introducir un dato.
- Al llegar la medida, el valor de la media se actualiza restando el valor del dato antiguo que había en la posición del puntero y sumando el nuevo dato al valor anterior de la media multiplicado por 15.
- Después se divide el valor de la media entre 15.

$$\begin{aligned} \text{media} &= \text{media} * 15 - \text{datos}[\text{puntero}] + \text{medida}; \\ \text{media} &= \text{media} / 15; \end{aligned}$$

Por último se actualiza el valor del vector (sólo el dato de la posición indicada por el puntero) y el valor del puntero aumenta en uno. Si su valor es 14, entonces cambia a cero para continuar cíclicamente.

Para interpretar el valor de la medida, se emplea la función *calibración()*, que incorpora la recta de calibrado obtenida experimentalmente y que permite una correcta conversión.

Gráfica en medida continua

El programa representa los valores medidos en el modo de medida continua. Para ello, cada vez que se lee un dato, se traza una línea de 3 píxeles de altura en la posición dentro de la ventana gráfica proporcional al peso, entre 0 y 20kg. (Figura 17).

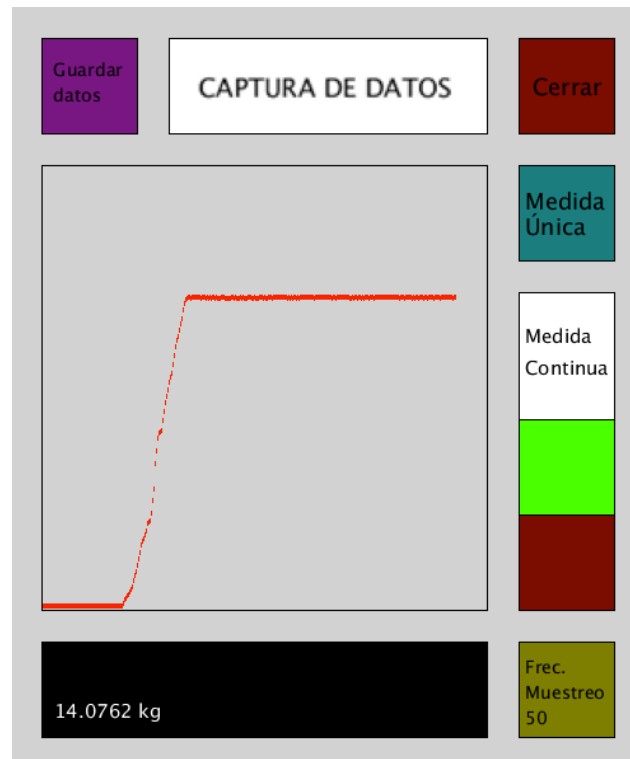


Figura 17. Gráfica de medida continua

III : FABRICACIÓN, MONTAJE Y CALIBRADO

En esta sección se describe en primer lugar la fabricación y el montaje del prototipo, a partir de las consideraciones de diseño expuestas en el apartado anterior. Después se explica el procedimiento de calibrado llevado a cabo.

Fabricación y Montaje del Prototipo

Célula de carga

La fabricación de la célula de carga se efectuó finalmente mediante EDM por hilo en las instalaciones del Taller de Mecanizado de Precisión de la EINA. El material empleado es el acero F-1140, cuyas características son adecuadas para esta aplicación: se trata de un acero al carbono semiduro para uso general cuya σ_E es aproximadamente 320 MPa (Serrano 2013, p.25). Posteriormente se pulieron las superficies donde se van colocadas las bandas extensométricas y se realizaron los taladros y roscados correspondientes, en el Taller de Mecanizado del Área de Ingeniería Mecánica. La Figura 18 muestra la pieza a su salida del taller de Mecanizado de Precisión.



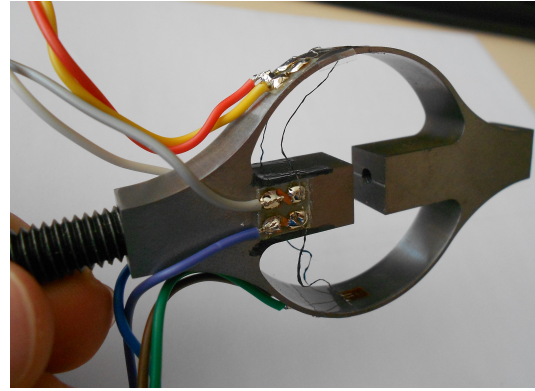
Figura 18. Célula de carga tras EDM.

Galgas extensométricas

Las bandas extensométricas se montaron con adhesivo de cianocrilato, de curado rápido. Se pegaron también los soportes para el estañado de las conexiones de las galgas, como se aprecia en la Figura 19.



(a) Bandas montadas



(b) Cables de conexión

Figura 19. Instalación de las bandas extensométricas.

Circuito electrónico

El circuito utilizado se encuentra en el Anexo 2. Se montó en una protoboard hasta asegurar el correcto funcionamiento. (Figura 20).

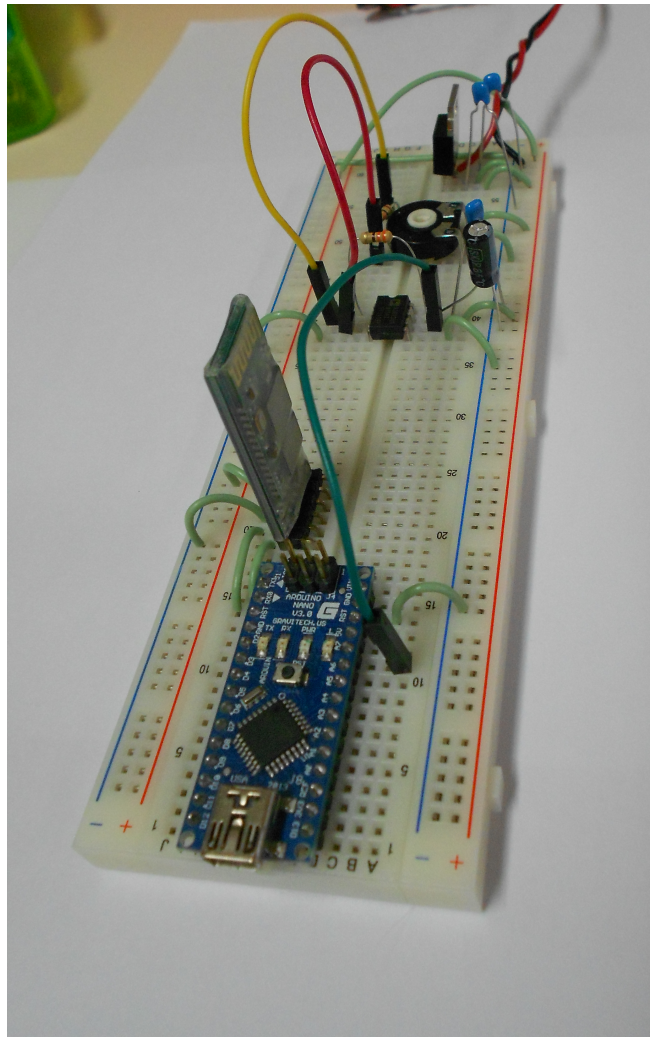


Figura 20. Circuito electrónico en protoboard

Soporte y Caja

La caja y el soporte se diseñaron con PTC CREO.

El soporte se fabricó por mecanizado a partir de un perfil en U de aluminio. La caja y su tapa (Figura 21) tienen como única función contener el resto de componentes. Se fabricaron en una máquina de prototipado (Stratsys Dimension sst) en ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), un termoplástico muy resistente al impacto.

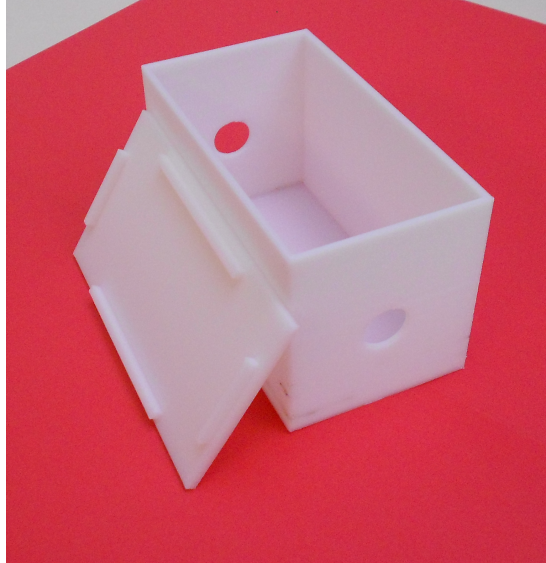


Figura 21. Caja y tapa

Calibración

Para la calibración del instrumento se realizaron medidas de pesos conocidos a fin de caracterizar la curva de medida, y poder compensarla por medio de la función *calibración()*, incluida en el programa de ordenador.

Los ensayos realizados en la EINA resultaron verse muy afectados por interferencias de tipo electromagnético y electrostático. Como solución, se llevó a cabo la calibración en un entorno alejado de tales efectos. La Figura 22 muestra los resultados del ensayo, cuyos datos se encuentran en el Anexo 5. Se observa que el error aumenta linealmente, lo que facilita enormemente la corrección de la medida.

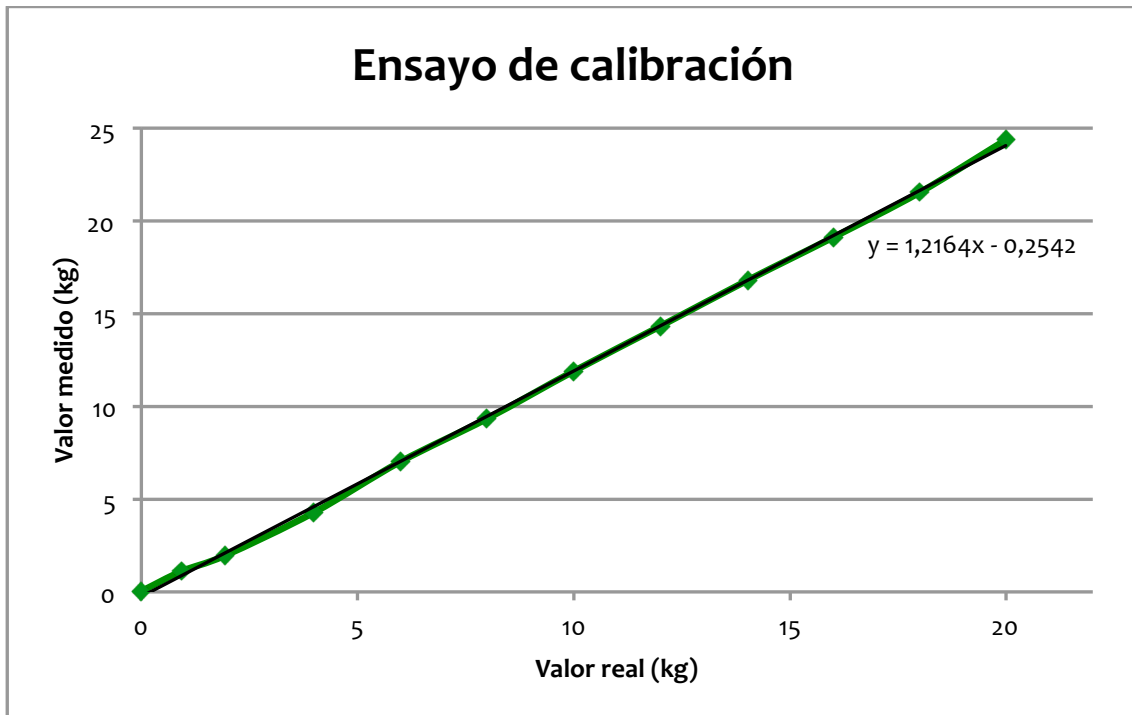


Figura 22. Resultado del segundo ensayo de calibración.

El ensayo de calibración muestra que las medidas se ajustan a una recta $y = 1,216x - 0,2542$. Por tanto, es posible corregir la medida bruta linealmente, mediante una función de calibración, incorporada por el programa de captura de datos. Ésta simplemente realiza la operación inversa a la recta de ajuste lineal de las medidas de calibración:

$$f^{-1} = y = 0,8221x + 0,2090$$

IV : RESULTADOS

Tras incorporar la función de calibración, se tomaron de nuevo medidas de pesos conocidos, obteniéndose los resultados recogidos en la Tabla 4, y la Figura 23.

Peso	1,004	2,910	4,914	6,869	8,884	10,887	12,923	14,904	16,912	18,479	19,987
Medido	0,941	2,870	5,016	7,058	8,955	10,555	13,023	15,052	17,200	18,457	19,737
Error rel. %	6,32	1,38	2,08	2,75	0,80	3,05	0,77	0,99	1,71	0,12	1,25

Tabla 4. Resultados de la medición, en kg

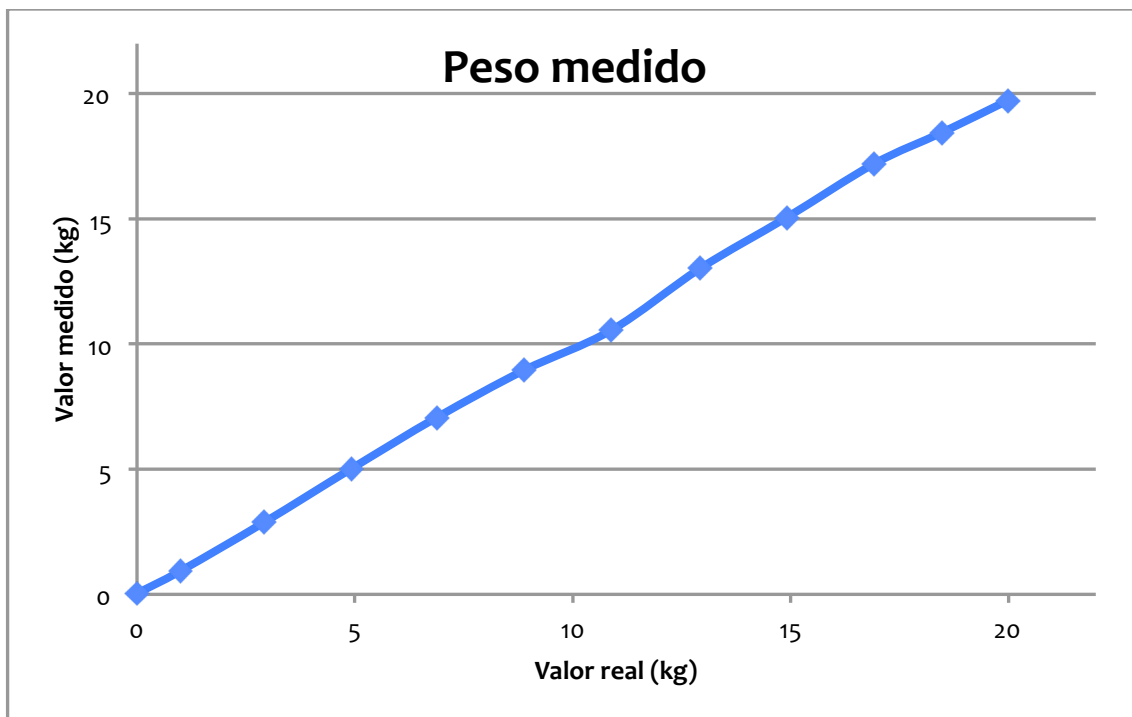


Figura 23. Resultados de la medición

El instrumento diseñado y fabricado presenta un comportamiento correcto en condiciones de ausencia de interferencias. Los resultados muestran que el ajuste gracias a la función de calibración es adecuado. El instrumento realiza mediciones con un 2% de error promedio. Sin embargo, el dinamómetro es muy susceptible al ruido.

V : CONCLUSIONES

1. Se ha alcanzado el objetivo del proyecto, que era el diseño y fabricación de un prototipo de dinamómetro inalámbrico, y el desarrollo del software necesario para la captura de datos.

Para lograrlo ha sido necesario seguir el siguiente procedimiento. En primer lugar, el estudio por separado de cada uno de los subsistemas que lo forman así como las relaciones entre ellos. En segundo lugar, el establecimiento de criterios para el diseño de las piezas mecánicas (célula de carga, soporte y caja) y para la selección de los componentes electrónicos (bandas extensométricas, montaje de amplificación y de procesamiento de datos). En tercer lugar, la determinación de las características del software a desarrollar. En cuarto lugar, la construcción del prototipo, calibrando y ajustando la integración de las diferentes partes. Los resultados obtenidos muestran que el prototipo funciona correctamente.

2. El bajo coste final del prototipo se considera adecuado: aproximadamente 42€, desglosados de la siguiente manera:

Mecanizado de piezas (2h)	30€
Módulo Bluetooth	6€
Microcontrolador Arduino	3€
Amplificador de Instrumentación	3€
<u>Total</u>	<u>42€</u>

3. A pesar de que el prototipo cumple los objetivos propuestos, existen algunas mejoras que podrían plantearse:

- a) Instalación de un filtro electrónico mejorado, ya sea de orden superior, activo, o ambas.
- b) Modificación del guardado de los datos, escribiendo un fichero de bytes, disminuyendo el tiempo de ciclo del programa.
- c) Inclusión de una pantalla LCD que permita visualizar la medida.
- d) Disminución del consumo: Control por parte de Arduino de la alimentación del resto del circuito, e implementación de una función que haga pasar al microcontrolador a un estado de espera y bajo consumo.
- e) Implementar una batería recargable y el sistema de carga correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA

DÍAZ, Jesús. *Introducción a la Electrónica de Medida*. Alcalá de Henares : Universidad, Servicio de publicaciones, 1995

MALVINO, Albert Paul. *Principios de Electrónica*. Madrid: McGraw-Hill, D.L. 1993

NORTON, Harry N. *Sensores y Analizadores*. Barcelona: Gustavo Gili, D.L.1984.

PÉREZ, Miguel Ángel. *Instrumentación Electrónica*. Madrid : International Thomson Editores Spain Paraninfo, 2006

PÉREZ, Miguel Ángel. *Problemas de Instrumentación Electrónica*. Madrid : Gaceta, D.L. 2012

SERRANO, Antonio. *Cálculo y selección de elementos de máquinas*. Universidad de Zaragoza, 2013

SENSORLAND. Geometrías en el diseño de células de carga. En:
<http://www.sensorland.com>

OMEGA. Introducción a las celdas de carga. En:
<https://es.omega.com/prodinfo/celulas-de-carga.html>

DIY MAKERS. Escritura en fichero con Processing. En: <http://diymakers.es/arduino-processing-primeros-pasos/>

DIY MAKERS. Comunicación Arduino con Bluetooth. En:
<http://diymakers.es/arduino-bluetooth/>