



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

Trabajo Fin de Grado

CURSO 2018/19

*SISTEMA INALÁMBRICO PARA LA MEDICIÓN DE
ESFUERZOS DE CONTACTO EN MULETAS*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNA/O

Elisabet Pérez Porto

TUTORAS/ES

Urbano Lugrís Armesto

Florian Michaud

FECHA

JULIO 2019

1 TÍTULO Y RESUMEN

1.1 Sistema inalámbrico para la medición de esfuerzos de contacto en muletas

El objetivo fundamental de este trabajo es la implementación de un sistema inalámbrico para medir, amplificar y filtrar la señal del conjunto de galgas extensiométricas instaladas en un par de muletas. En el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad de A Coruña se cuenta con un sistema de captura de movimiento humano, donde se emplean muletas instrumentadas, equipadas con puentes de galgas que se conectan a amplificadores, y, de esta manera se mide el movimiento y las fuerzas de contacto con el suelo para obtener con un análisis dinámico inverso, los pares articulares que realiza un individuo.

El problema que existe actualmente es que las muletas empleadas van conectadas con cables a los amplificadores y hacer las capturas de movimiento de esta manera puede ocasionar algún accidente con los cables, además de limitar la movilidad de los lesionados para realizar las mediciones.

Por esa razón se ha realizado el diseño de un circuito de amplificación y filtrado de señal, además de la programación de un microcontrolador para adquirir la señal y transmitirla mediante un sistema de comunicación inalámbrica que incluye una interfaz gráfica para la visualización de resultados, y de esta manera se logra resolver el problema planteado.

1.2 Sistema sen fíos para a medición de esforzos de contacto en muletas

O obxectivo fundamental deste traballo é a implementación dun sistema sen fíos para medir, amplificar e filtrar o sinal do conxunto de tensímetros instalados nun par de muletas. No Laboratorio de Enxeñería Mecánica da Universidade da Coruña hai un sistema de captación de movemento humano, onde se usan muletas instrumentadas, equipadas con pontes de galgas que están conectadas a amplificadores e deste xeito mídese o movemento e as forzas de contacto co chan para obter, cunha análise dinámica inversa, os pares articulares realizados por un individuo.

O problema que existe actualmente é que as muletas empregadas están conectadas con cables aos amplificadores e que a captura de movemento deste xeito pode causar un accidente cos cables, ademais de limitar a mobilidade dos lesionados para facer as medicións.

Por esta razón, realizouse o deseño dun circuío de amplificación e filtrado de sinal, ademais da programación dun microcontrolador para adquirir o sinal e transmitilo a través dun sistema de comunicación sen fíos que inclúe unha interface gráfica para a visualización de resultados, e deste xeito o problema resólvese.

1.3 Wireless system for measuring contact efforts on crutches

The fundamental objective of this work is the implementation of a wireless system to measure, amplify and filter the signal of a set of strain gauges installed on a pair of crutches. In the Mechanical Engineering Laboratory of the University of A Coruña there is a human movement capture system, where instrumented crutches are used, equipped with strain gauge bridges that are connected to amplifiers, and in this way the movement and the ground contact forces are measured to obtain, with an inverse dynamic analysis, the joint torques performed by an individual.

The problem that currently exists is that the crutches used are connected with cables to the amplifiers and performing the motion capture in this way can cause an accident with the cables, in addition to limiting the mobility of the patient to make the measurements.

For this reason, the design of a signal amplification and filtering circuit has been carried out, in addition to the programming of a microcontroller to acquire the signal and transmit it through a wireless communication system that includes a graphical interface for the visualization of results, and this way the problem is solved.

ÍNDICE

1 Título y Resumen	2
1.1 Sistema inalámbrico para la medición de esfuerzos de contacto en muletas	2
1.2 Sistema sen fíos para a medición de esfuerzos de contacto en muletas.....	3
1.3 Wireless system for measuring contact efforts on crutches.....	4
2 Motivación y estado actual de la técnica	8
3 Extensometría.....	10
3.1 Galgas extensiométricas.....	10
3.1.1 Principio de funcionamiento.....	10
3.1.2 Factor de Galga	12
3.1.3 Montaje en puente de Wheatstone	12
3.1.4 Calibración.....	17
3.2 Acondicionamiento de señal	18
3.2.1 Conversión analógico-digital.....	19
3.2.2 Amplificación	20
3.2.3 Filtrado	26
4 Comunicación Inalámbrica	28
4.1 Bluetooth	29
4.2 Zigbee.....	30
4.3 Wi-Fi	30
4.4 Comparación de las redes inalámbricas	34
4.5 Adafruit Feather	35
5 Aplicación experimental	36
5.1 Puentes existentes en las muletas.....	36
5.2 Circuito de acondicionamiento	40
5.3 Equilibrado de los puentes: PWM	42
5.4 Cálculo de ganancias para amplificadores.....	43
5.5 Implementación en PCB	47
5.6 Circuito del LED.....	51
5.7 Circuito Apagado/Encendido.....	52
6 Software de adquisición y visualización de datos.....	54
6.1 Software de Arduino	54
6.2 Python	55
6.2.1 Software Qt.....	56
6.2.2 Bibliotecas PyQt en Python	56
6.3 Estructura del programa.....	57

6.3.1 ArduinoPlot.....	57
6.3.2 Main_crutches.py.....	58
7 Montaje y Resultados.....	59
8 Conclusiones y trabajo futuro.....	64
8.1 Conclusión.....	64
8.2 Trabajo futuro.....	65
9 Bibliografía.....	66
10 Anexos.....	68
10.1 Presupuesto.....	68
10.2 Código de programación: ArduinoPlot.....	70
10.3 Main_crutches.py.....	73



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



Escola Politécnica Superior

**TRABAJO FIN DE GRADO
CURSO 2018/19**

*SISTEMA INALÁMBRICO PARA LA MEDICIÓN DE
ESFUERZOS DE CONTACTO EN MULETAS*

Grado en Ingeniería Mecánica

Documento

MEMORIA

2 MOTIVACIÓN Y ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA

El desarrollo de la bioingeniería o ingeniería biomédica ha permitido que los conocimientos ingenieriles expandieran su campo de acción hacia sistemas biológicos, poniendo a su disposición los métodos y herramientas necesarias para que un ingeniero pueda analizar el comportamiento y resolver problemas relacionados a los sistemas vivos de igual manera que lo estudiaría con cualquier otro sistema inerte.

Una de las definiciones más aceptadas de Bioingeniería es la propuesta por el “Committees of the Engineer’s Joint Council” de EE. UU. En 1972: “La bioingeniería es la aplicación de los conocimientos recabados de un fértil cruce entre la Ciencia Ingenieril y la Médica, tal que a través de ambas pueden ser plenamente utilizados para el beneficio del hombre. [1]”

A pesar de ser una disciplina de creación reciente, sus principios se han implementado desde la antigüedad, donde se encuentran aplicaciones conocidas como la pata de palo o el ojo de cristal. Sin embargo, no ha sido hasta la segunda mitad del siglo XX cuando se unificaron los conocimientos de la biología con las técnicas de la ingeniería, surgiendo así la bioingeniería. Tras la creación del primer programa académico en EE. UU en 1967 esta ciencia comenzó un crecimiento exponencial que a día de hoy no se ha detenido.

Dado que la bioingeniería ocupa un campo amplio dentro de las ciencias, para enfocar los esfuerzos a áreas específicas se ha dividido en varias disciplinas. Una de ellas y la de mayor interés en este trabajo es la biomecánica. De forma muy concreta se puede decir que ésta representa el área que analiza el movimiento y sus causas en los seres vivos, además de sus estructuras móviles, usando la ciencia de la mecánica. Y es precisamente sobre este fenómeno físico que la biomecánica basa su aplicabilidad, pues el movimiento es la causa de muchos fenómenos biológicos en los seres vivos [2].

Desde la edad griega clásica, Aristóteles se interesó por el análisis del movimiento animal desde un punto de vista científico, más adelante, ilustres como Da Vinci elaboraron complejos estudios sobre biomecánica. Sin embargo, el avance tecnológico de los últimos años ha contribuido a la evolución de esta ingeniería y al incremento de investigaciones en este campo, más concretamente, en el estudio del movimiento humano, lo cual representa la base de la motivación para llevar a cabo la realización de este trabajo.

Se utiliza la medición de reacciones para adquirir información acerca de las fuerzas de interacción existentes, ya que con la simple observación no sería posible resolver la indeterminación de fuerzas exteriores que se produce al aplicar las ecuaciones del movimiento de un sistema de sólidos rígidos. De esta manera, se pueden obtener en un análisis dinámico inverso, los pares articulares que realiza el individuo.

En el Laboratorio de Ingeniería Mecánica (LIM) de la Universidad de A Coruña se cuenta con un sistema de captura de movimiento mediante cámaras de infrarrojo, donde se analiza el movimiento humano. En el laboratorio se trabaja con lesionados medulares que requieren el uso de muletas para mantener la estabilidad, y, para ello se emplean muletas instrumentadas de desarrollo propio, equipadas con marcadores reflectantes y medidores de tensión (extensometría) que se conectan por cable a amplificadores y de esta manera se mide su movimiento y las fuerzas de contacto con el suelo [3].

El problema que existe actualmente es que las muletas que se emplean van conectadas con cables, como se dijo anteriormente, y trabajar de esta manera tiene cierto nivel de complejidad, ya que hacer capturas de movimiento con cables puede ser peligroso y ocasionar algún accidente si no se está prestando atención a los obstáculos que se puedan interponer en el recorrido, además de limitar la movilidad de los lesionados para realizar la toma de datos y las comprobaciones correspondientes.

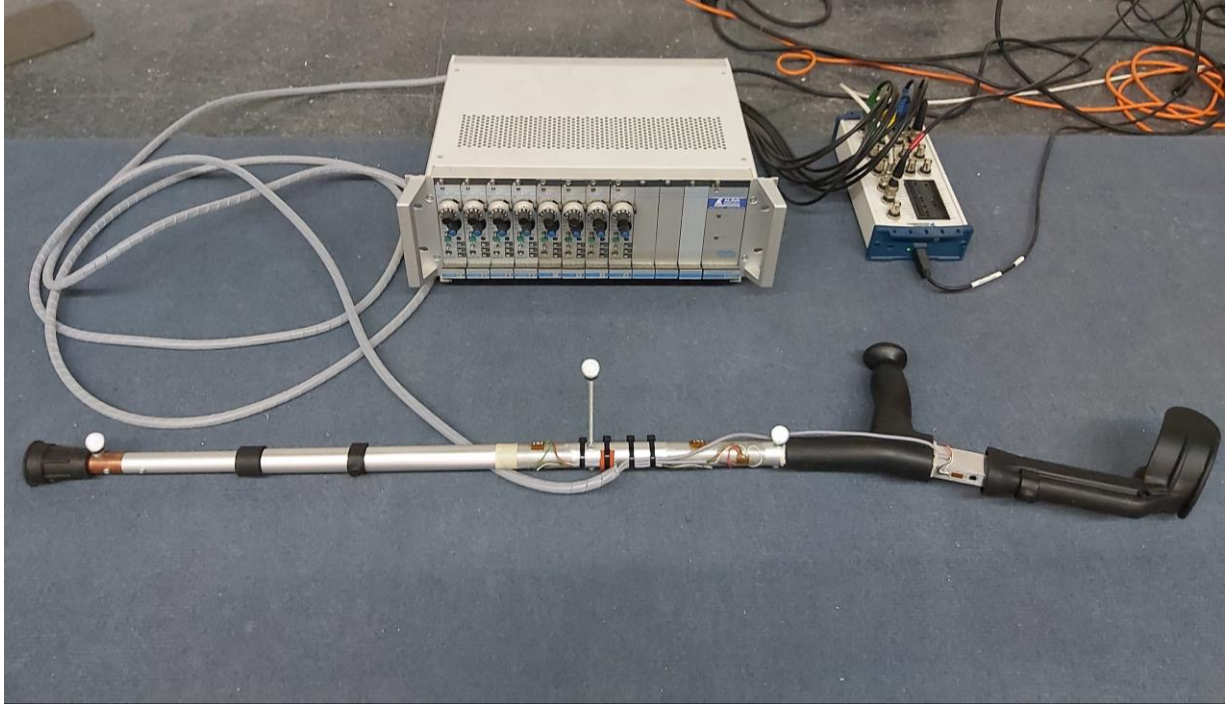


Figura 1. Muleta instrumentada con un sistema de amplificación con cables.

Por este motivo el objetivo principal del trabajo será la implementación de un sistema inalámbrico para amplificar, filtrar y digitalizar la señal del conjunto de galgas extensiométricas instaladas en un par de muletas, Para ello será necesario cumplir una serie de objetivos específicos que permitan completar el alcance del mismo.

En primer lugar, habrá que realizar el diseño de un circuito de amplificación y filtrado de la señal de las galgas, seguido de esto, se realizará la programación de un microcontrolador para adquirir y reenviar dicha señal, después, se implementará un sistema de comunicación inalámbrica y por último se hará el desarrollo de un programa para la sincronización y recogida de datos desde el PC.

3 EXTENSOMETRÍA

Un cuerpo sometido a la acción de cargas externas sufrirá una serie de deformaciones elásticas que darán lugar a la aparición de tensiones y, por tanto, fuerzas de carácter interno, que equilibren las cargas externas que le están siendo aplicadas.

En la mayor parte de los casos, las tensiones no podrán ser medidas de forma directa, éstas se obtendrán a partir de las deformaciones que haya sufrido el material. La extensometría es la técnica más utilizada para el análisis experimental de dichas tensiones. Su fundamento básico es la variación de la resistencia eléctrica de un material al sufrir una deformación.

Esta técnica se basa en el uso de galgas extensiométricas.

3.1 Galgas extensiométricas

En 1856 Lord Kelvin descubrió que al aplicar una fuerza mecánica sobre un conductor se presentaba una variación en su resistencia eléctrica. La utilidad de este principio se manifiesta en la construcción de las galgas extensiométricas. Estos dispositivos son transductores pasivos que, aplicados sobre un material elástico, permiten medir la fuerza ejercida sobre él a partir de la deformación resultante. Así, fuerzas de compresión o torsión, aplicadas sobre algún material, generan deformaciones que son transmitidas a una galga extensiométrica, respondiendo ésta con una variación de su propia resistencia.

Las galgas se utilizan ampliamente en diversas aplicaciones a nivel industrial en todos los campos donde se requieran mediciones precisas de fuerza aplicada sobre algún elemento mecánico.

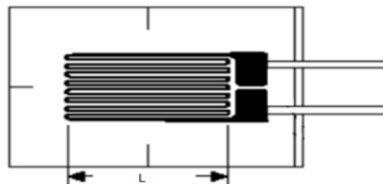


Figura 2. Galga extensiométrica.

3.1.1 Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material del que este hecho y el diseño adoptado.

Si se considera un hilo metálico de longitud l , sección transversal A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R será:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3.1)$$

Si se somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R cambia, por tanto, el cambio de R se puede expresar como:

$$dR = \frac{A(\rho dl + ld\rho) - \rho l dA}{A^2} \quad (3.2)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico), está dado por la ley de Hooke.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{dl}{l} \quad (3.3)$$

Donde E es módulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young, σ es el esfuerzo uniaxial y ε es la deformación unitaria.



Figura 3. Relación entre esfuerzos y deformaciones.

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la deformación axial también es una propiedad del material, esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = -\frac{dD/D}{dl/l} \quad (3.4)$$

Donde D es el diámetro del hilo y μ es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5. En términos de la razón de Poisson tendremos:

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l}(1 + 2\mu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (3.5)$$

Los cambios en la resistencia se originan por la modificación de la geometría en la longitud o el área y el cambio en la resistividad. La dependencia de la resistividad en deformación mecánica se expresa en términos del coeficiente de piezoresistencia π_1 definido por la siguiente expresión:

$$\pi_1 = \frac{1}{E} \frac{d\rho/\rho}{dl/l} \quad (3.6)$$

Por lo tanto el cambio en la resistencia es:

$$\frac{dR/R}{dl/l} = 1 + 2\mu + \pi_1 E \quad (3.7)$$

El cambio en resistencia de un medidor de deformación por lo general se expresa en términos de un parámetro determinado por el fabricante empíricamente, llamado factor de galga [4].

3.1.2 Factor de Galga

Existe un parámetro fundamental entre las características de las galgas extensiométricas, que es la sensibilidad de elongación o llamado simplemente factor de galga (k). El factor de galga es definido como la relación de variación unitaria de resistencia eléctrica y la variación unitaria de longitud, como se describe en la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (3.8)$$

El factor de galga (G) de un conductor metálico depende en gran parte de las características de la aleación en particular: trabajo en frío, nivel de impurezas en la aleación y el rango de deformaciones sobre el cual se mide. El factor de galga típico para una galga extensiométrica metálica es de aproximadamente 2 [5].

A continuación, se presenta una tabla con la composición y el factor de galga de algunos de los materiales más empleados en la fabricación de bandas extensiométricas.

Material	Composición	Factor Galga
Advance o Constantan	45 Ni, 55 Cu	2.1
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe	2.0
Isoelastic	36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo, 55.5 Fe	3.6
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2.1
Platino-Tungsteno	92 Pt, 8 W	4.0
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al	2.0

Tabla 1. Composición y factores de galga de distintos materiales [6].

3.1.3 Montaje en puente de Wheatstone

Las mediciones de carga requieren detectar cambios muy pequeños de resistencia, el puente de Wheatstone es el circuito más utilizado para medir estas variaciones ya que tiene una gran sensibilidad y precisión, consiste en un sistema de cuatro resistencias que forman un circuito cerrado, alimentado por una fuente de tensión que puede ser de corriente alterna o continua, U_E representa el voltaje de excitación y U_A el voltaje de salida, como se muestra en la figura siguiente [7].

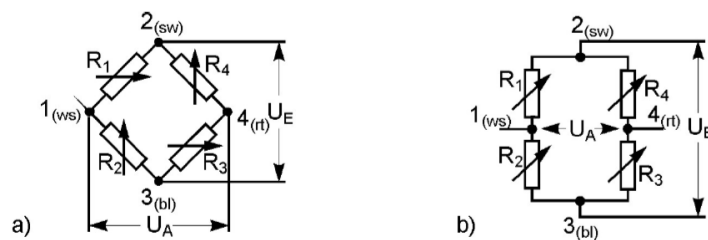


Figura 4: Representación esquemática del circuito del Puente de Wheatstone.

Como se explicó anteriormente, las galgas extensiométricas tienen la función de transformar una deformación aplicada en una variación proporcional de la resistencia. La relación entre la deformación ε ($\varepsilon = \Delta L/L_0$) y el cambio relativo de la resistencia en las galgas extensiométricas se describen en la siguiente ecuación, donde k representa el factor de galga definido anteriormente:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.9)$$

Las relaciones que deben existir entre las resistencias de las cuatro ramas para que exista equilibrio en el puente, es decir, la tensión U_A sea nula, son las siguientes:

Se debe cumplir:

$$I1 \cdot R1 = I4 \cdot R4 \quad (3.10)$$

Siendo:

$$I1 = \frac{U_E}{R1+R2} \quad I4 = \frac{U_E}{R3+R4} \quad (3.11)$$

Donde, la condición de equilibrio resulta:

$$\frac{R1}{R1 + R2} = \frac{R4}{R3 + R4} \quad (3.12)$$

Operando se llega a la siguiente simplificación:

$$\frac{R2}{R1} = \frac{R3}{R4} \quad (3.13)$$

Una vez aclarado las condiciones que deben darse para que el puente esté equilibrado, la relación entre el voltaje de salida y el de entrada puede expresarse de la siguiente manera:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{R1}{R1 + R2} - \frac{R4}{R3 + R4} \quad (3.14)$$

Si existe variación en las resistencias ΔR_i , pero se cumple que esta variación es mucho más pequeña que la resistencia R_i , se puede obtener la siguiente relación:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \quad (3.15)$$

Si sustituimos la ecuación (3.9) se puede obtener la siguiente relación:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (3.16)$$

Los principales campos de aplicación de las galgas extensiométricas son el análisis experimental de tensión y deformaciones, dependiendo del problema de medición que se tenga, se utilizarán una o más galgas extensiométricas en el punto real de medición.

Las designaciones tales como “Puente Completo”, “Medio Puente” o “Cuarto de Puente” indican dichas configuraciones, aunque en realidad, el circuito utilizado para la medición siempre está completo, está total o parcialmente formado por las galgas extensiométricas de la muestra y luego se completa con resistencias fijas, que se incorporan en los instrumentos para formar el puente de Wheatstone. Es decir, se considera “Puente Completo” cuando las cuatro ramas del puente son galgas, “Medio Puente” cuando dos de las ramas son galgas y las otras dos son resistencias y “Cuarto de Puente” cuando una rama es galga y las otras tres son resistencias.

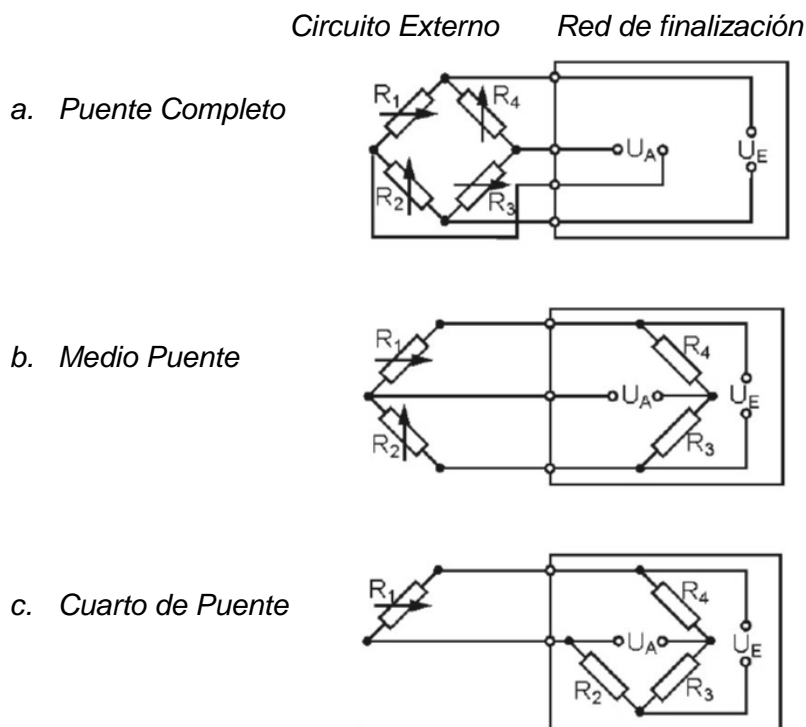


Figura 5. Configuraciones del puente de Wheatstone

Las galgas extensiométricas dependen del propósito final del estudio. Se pueden usar configuraciones que implican una o más galgas que estén en diferentes direcciones, de esta manera se conseguirá cierta sensibilidad ante los distintos tipos de carga como puede ser flexión, tracción-compresión o torsión. La configuración depende también de la dirección de los esfuerzos que han de medirse, si están en direcciones uniaxiales, biaxiales o en diferentes direcciones.

Para la realización del proyecto interesa que cada puente tenga sensibilidad ante las magnitudes que quiere medir, en este caso se utilizará uno que presente mayor sensibilidad ante esfuerzos de flexión y otro que sea sensible ante la tracción-compresión, por esa razón se explicarán las ecuaciones por las que se rigen a continuación.

Caso 1: Deformación en un cuerpo bajo carga axial unidireccional

Con una barra sometida a una carga axial unidireccional, se tendrá una deformación longitudinal directamente proporcional a la tensión e inversamente al módulo de Young en la dirección de la fuerza aplicada. En la dirección transversal, aparecerá una contracción transversal.

$$\varepsilon_1 = \sigma / E \quad (3.17)$$

$$\varepsilon_2 = -\nu \cdot \varepsilon_1 \quad (3.18)$$

Donde:

ε_1 : Deformación en dirección longitudinal

σ : Tensión normal de la barra

E : Módulo de Young

ε_2 : Deformación en dirección transversal

ν : Coeficiente de Poisson

De esta manera, existirá un cambio de resistencia $\Delta R_1 = \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_1$ en la galga extensiométrica 1, para la galga extensiométrica 2, esta diferencia será $\Delta R_2 = \nu \cdot \varepsilon_1 \cdot k \cdot R_2$. En consecuencia, esto también se cumplirá para las galgas 3 y 4 respectivamente.

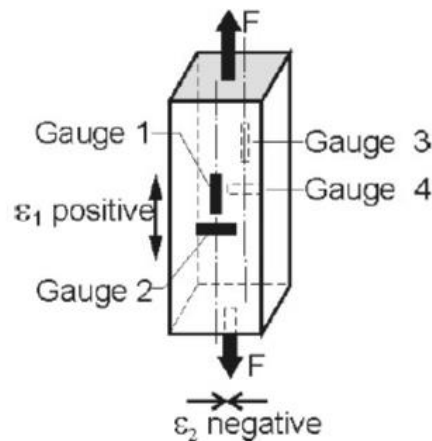


Figura 6. Barra traccionada

La variación del voltaje se obtendrá a partir de la siguiente ecuación para un circuito en puente completo:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - (-\nu\varepsilon_1) + \varepsilon_3 - (-\nu\varepsilon_3)) \quad (3.19)$$

Si se hacen algunas consideraciones: $\varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \varepsilon$ y $\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = \nu \cdot \varepsilon$

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot \varepsilon \quad (3.20)$$

Siendo B el factor del puente, que vale $2 \cdot (1 + \nu)$.

De esta manera se obtiene:

$$\varepsilon = \frac{4}{B \cdot k} \cdot \frac{U_A}{U_E} \quad (3.21)$$

Caso 2: Deformación en un cuerpo bajo carga a flexión

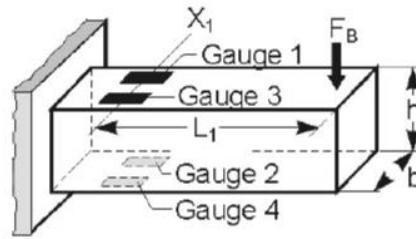


Figura 7. Viga a flexión

Las condiciones en el caso de una carga a flexión son un poco más simples y favorables. Los valores de tensión tendrán el mismo valor absoluto, pero con signo contrario, Es decir, los valores de tensión en el lado superior y en la parte inferior de la viga son los mismos, pero con el signo opuesto. Se obtendrán condiciones particularmente favorables cuando agregamos los valores medidos según la ecuación:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot (\varepsilon_1 - (-\varepsilon_2) + \varepsilon_3 - (-\varepsilon_4)) \quad (3.22)$$

Asumiendo:

$$|\varepsilon_1| = |\varepsilon_2| = |\varepsilon_3| = |\varepsilon_4| = \varepsilon \quad (3.23)$$

En este caso, el factor de puente B tendrá un valor de 4, de esta manera se obtiene:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} \cdot B \cdot \varepsilon = k \cdot \varepsilon \quad (3.24)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E} \quad (3.25)$$

A continuación, se presenta una tabla que muestra la dependencia que existe ente la posición de las galgas, el tipo de puente utilizado y el factor B resultante ante una fuerza normal, momento flector, momento torsor o temperatura, con las respectivas ecuaciones que permiten obtener el valor más efectivo de la tensión de salida para las configuraciones utilizadas en el presente trabajo.

<p>a. <i>Puente Completo:</i> <i>Sensible ante carga axial.</i></p>		$\varepsilon = \varepsilon_n = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"> <tr> <td>T</td> <td>F_N</td> <td>M_b</td> <td>M_d</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>$2(1+\nu)$</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </table>	T	F_N	M_b	M_d	0	$2(1+\nu)$	0	0
T	F_N	M_b	M_d								
0	$2(1+\nu)$	0	0								
<p>b. <i>Puente Completo:</i> <i>Sensible ante carga a flexión.</i></p>		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2(1+\nu)} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"> <tr> <td>T</td> <td>F_N</td> <td>M_b</td> <td>M_d</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>$2(1+\nu)$</td> <td>0</td> </tr> </table>	T	F_N	M_b	M_d	0	0	$2(1+\nu)$	0
T	F_N	M_b	M_d								
0	0	$2(1+\nu)$	0								
<p>c. <i>Medio Puente:</i> <i>Sensible ante carga a flexión.</i></p>		$\varepsilon = \varepsilon_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{k} \cdot \frac{U_A}{U_E}$	<table border="1"> <tr> <td>T</td> <td>F_N</td> <td>M_b</td> <td>M_d</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> <td>0</td> </tr> </table>	T	F_N	M_b	M_d	0	0	2	0
T	F_N	M_b	M_d								
0	0	2	0								

Figura 8. Configuraciones del Puente de Wheatstone

3.1.4 Calibración

Cuando se emplean células de carga, o se usan galgas extensiométricas, siempre se puede predecir de forma teórica cual va a ser la respuesta del sensor utilizado ante una fuerza determinada.

En primer lugar, el fabricante de la célula de carga indicará cuál es la relación entre la señal de salida y la fuerza aplicada que se conoce como sensibilidad, esta dependerá tanto de las galgas extensiométricas como de la elasticidad del material donde han sido colocadas para formar la célula. La forma más habitual es expresarla como milivoltios de salida por voltio de alimentación cuando se aplica la carga nominal (mV/V).

Sin embargo, la sensibilidad de la célula de carga puede no ser la nominal, e incluso el efecto de los componentes añadidos para equilibrar el circuito puede modificar el comportamiento del puente de Wheatstone. En el caso del amplificador también puede haber efectos no contemplados como la ganancia, en general nunca va a ser exactamente la teórica, debido a que puede haber resistencias de contacto entre distintos puntos, etc.

Por todo esto, cuando no es posible realizar un proceso de calibración, se impone el uso de componentes perfectamente caracterizados y de gran precisión, que suele conllevar un aumento importante de los costes. Sin embargo, suele ser posible realizar un proceso de calibración que permite compensar todos estos errores, de forma que se pueden emplear componentes de bajo coste sin una penalización excesiva en precisión.

Para realizar la calibración se procede a aplicar a la célula de carga una serie de cargas conocidas (siempre que sea posible, lo más cómodo es usar pesos conocidos), y se comprueba la salida de todo el conjunto (célula de carga y acondicionamiento de señal). Una vez aplicadas todas las cargas de prueba, se aplicará un ajuste lineal a los puntos experimentales obtenidos para encontrar la ecuación de una recta que permita determinar la magnitud de cualquier fuerza aplicada. Una vez realizado el ajuste lineal se deberá comprobar el coeficiente de correlación, que dará una idea de la precisión de la medición que se podría esperar en el sistema.

Si el coeficiente de correlación diera un resultado muy malo, significaría que la recta calculada se ajusta mal a los datos experimentales, o que indica que existe un problema en la instalación [8].

3.2 Acondicionamiento de señal

Cada vez es más importante en el campo de la ingeniería comprender cómo acceder directamente a información y datos analógicos desde el entorno circundante. Se conoce como adquisición de datos al proceso de registrar y almacenar los datos obtenidos de una señal analógica desde un sensor con el uso de un microprocesador o computadora, este procedimiento provee un almacenamiento de los datos más compacto que se traduce en poder conseguir manejabilidad en los resultados obtenidos.

Para ingresar los datos analógicos a un circuito digital, estos datos se deben transformar en valores digitales codificados. Para lograr esta transformación, se requiere de una etapa de acondicionamiento, que adecúa la señal a niveles compatibles con el elemento que hace la conversión. El primer paso es evaluar numéricamente la señal en instantes discretos de tiempo. Este proceso se llama muestreo, y el resultado es una señal digitalizada compuesta de valores discretos correspondientes a cada muestra, como se muestra la figura 9. Por tanto, una señal digitalizada es una secuencia de números que es una aproximación de la señal analógica.

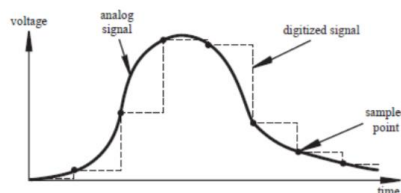


Figura 9. Señal analógica y muestreo equivalente

Es de gran importancia conocer cómo de rápido o con qué frecuencia se debe muestrear la señal para obtener una representación precisa, para ello se debe seleccionar la tasa de muestreo mínima que se requiera con la que logre retener toda la información de señal importante.

Según el teorema de muestreo conocido como teorema de Nyquist, se afirma que es necesario muestrear una señal a una tasa de más de dos veces la componente de frecuencia máxima para retener todos los componentes de frecuencia. Es decir, para representar fielmente la señal analógica, las muestras digitales se deben tomar a una frecuencia tal que:

$$f_s > 2 \cdot f_{m\acute{a}x} \quad (3.26)$$

El término “ f_s ” se conoce como tasa de muestreo y el límite en la tasa mínima requerida “ $2 \cdot f_{m\acute{a}x}$ ” se llama frecuencia de Nyquist. El intervalo de tiempo entre las muestras será el inverso de la frecuencia de muestreo.

$$\Delta t = \frac{1}{f_s} \quad (3.27)$$

Si la frecuencia de muestreo es menor de ese valor, puede resultar el fenómeno de frecuencia “fantasma” o “aliasing” ocasionando no sólo errores, si no creando también falsa información en las muestras.

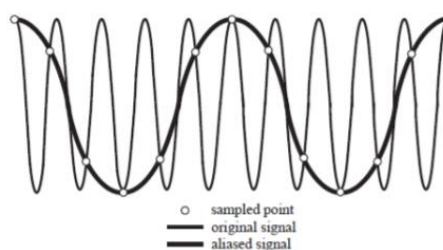


Figura 10. Fenómeno de frecuencia “fantasma”

3.2.1 Conversión analógico-digital

Al proceso que se requiere para cambiar un voltaje analógico muestreado en forma digital se le conoce como conversión analógica-digital. Conceptualmente tiene que ver con dos pasos: cuantificar y codificar. Cuantificar se define como la transformación de una entrada analógica continua en un conjunto de estados de salida discretos. Codificar es la asignación de una palabra o número código digital a cada salida.

En la figura 11 se muestra como un rango de voltaje continuo se divide en estados de salida discretos, a cada uno de los cuales se le asigna un único código. Cada estado de salida cubre un subrango del rango de voltaje global. La señal escalonada representa los estados de una señal digital generada al muestrear una rampa lineal de una señal analógica que ocurre sobre el rango de voltaje que se muestra.

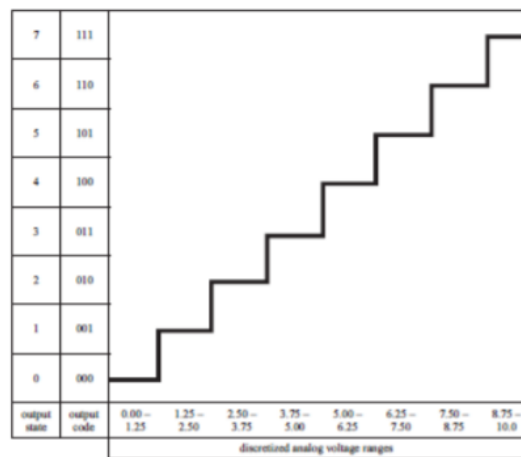


Figura 11. Conversión analógico digital.

Un conversor A/D (analógico-digital) es un dispositivo electrónico que convierte un voltaje analógico en un código digital. La salida del conversor A/D puede ser directamente interrelacionada con dispositivos digitales tales como microcontroladores y ordenadores. La resolución de un convertidor A/D es el número de bits usados para aproximar digitalmente el valor analógico de la entrada. El número de estados posibles N es igual al número de combinaciones de bits que puede ser salida del convertidor, donde n es el número de bits.

$$N = 2^n \quad (3.28)$$

Los estados de salida se enumeran normalmente consecutivamente de 0 a $(N-1)$. La mayoría de los convertidores A/D utilizados en dispositivos de bajo coste son de 8, 10 o 12 bits, con lo que su resolución es de 256, 1024, y 4096 estados de salida, respectivamente.

El tamaño de cuantificación analógica Q , a veces llamado ancho de código, se define como el rango de escala completa del convertidor dividido por el número de estados de salida. Es el cambio analógico más pequeño que puede percibir el convertidor. Aunque el término resolución se define como el número de bits de salida de un convertidor A/D, en ocasiones se usa para referirse al tamaño de cuantización analógica.

$$Q = (V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}) / N \quad (3.29)$$

Para adquirir adecuadamente una señal de voltaje analógico y procesarla a digital, se debe aplicar una etapa de acondicionamiento de la señal, esta etapa es la encargada de adaptar la señal proveniente del sensor a la entrada del convertidor. Para ello se aplica la siguiente secuencia:

1. Amplificador buffer
2. Filtro paso bajo
3. Dispositivo de muestra y retención
4. Convertidor analógico digital
5. Ordenador

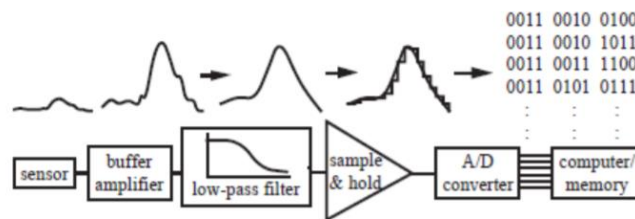


Figura 12. Fases de la conversión A/D

El amplificador buffer mantiene aislada la salida de la entrada y suministra una señal en un rango cercano pero que no supera el nivel de voltaje de entrada del convertidor A/D, el filtro paso bajo es necesario para eliminar cualquier componente indeseable de alta frecuencia en la señal que pueda producir el fenómeno de "aliasing" explicado anteriormente, el dispositivo de muestra y retención mantiene un valor de entrada fijo en cada muestra instantánea durante el corto periodo de tiempo de la conversión analógico-digital, el convertidor debe tener una resolución y un tamaño de cuantificación analógica apropiado al sistema y a la señal, y por último el ordenador debe tener una interfaz adecuada para permitir la interconexión con el convertidor A/D para almacenar y procesar los datos, además debe tener memoria y medios de almacenamiento suficientes para retener todos los datos.

En general, el objetivo principal del acondicionamiento de la señal es, por una parte, adaptar el rango de la tensión de salida del sensor al rango de entrada del convertidor, esto permite aprovechar el margen dinámico del convertidor. Por otro lado, acoplar la impedancia de salida de uno con la impedancia de entrada del otro, esto es imprescindible ya que los transductores presentan una salida de alta impedancia, que normalmente no puede excitar la entrada de un convertidor [9].

3.2.2 Amplificación

Como se dijo anteriormente, la primera tarea a realizar por el acondicionador de señal será amplificar las señales débiles entregadas por el sensor, hasta niveles utilizables por el resto de la cadena de medida. El amplificador de señales débiles que realice esta tarea será, por lo tanto, un componente crítico del sistema de instrumentación. Sin embargo, el concepto de amplificación no tiene que ver solo con la capacidad para aumentar de tamaño una señal eléctrica en forma de voltaje o corriente, sino también con la capacidad de entregarla a otra instancia con más energía de la que tenía originalmente.

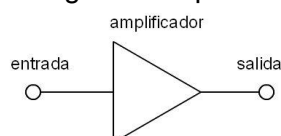


Figura 13. Representación esquemática de un amplificador

Lo ideal de un amplificador es que aumente la amplitud de una señal sin afectar las relaciones de fase de los diferentes componentes de la señal, aunque en la realidad, algunas veces la amplificación puede causar que la señal a la salida del amplificador salga distorsionada a causa de una amplificación muy grande o por efectos propios del amplificador. Hay que tener en cuenta que un amplificador no puede tener en su salida niveles de voltaje mayores a los que la fuente de alimentación le puede dar.

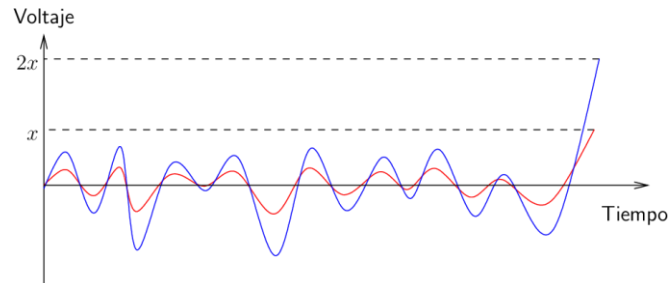


Figura 14 Amplificación de la señal.

Por lo general, un amplificador se modela como un dispositivo de dos puertos, con voltajes de entrada y salida referidos a tierra. La ganancia de voltaje de un amplificador se define como la razón de las amplitudes del voltaje de salida y de entrada.

$$A_v = \frac{V_{sal}}{V_{ent}} \quad (3.30)$$

Normalmente se requiere un amplificador para mostrar linealidad de la amplitud, donde la ganancia sea constante para todas las frecuencias. Sin embargo, los amplificadores se pueden diseñar para amplificar intencionalmente ciertas frecuencias, lo que resulta en un efecto de filtrado. En tales casos, las características de salida están gobernadas por el ancho de banda del amplificador y las frecuencias de corte asociadas.

Las impedancias de entrada y salida de un amplificador, Z_{ent} y Z_{sal} , se encuentran al medir la razón de sus respectivos voltaje y corriente.

$$Z_{ent} = \frac{V_{ent}}{I_{ent}} \quad (3.31)$$

$$Z_{sal} = \frac{V_{sal}}{I_{sal}} \quad (3.32)$$

Existen diferentes tipos de amplificadores. A continuación, se hablará en detalle de algunos de ellos, los amplificadores operacionales tanto inversor como no inversor y los amplificadores de instrumentación.

3.2.2.1. Amplificación con operacionales

En la actualidad la mayoría de los amplificadores para sistemas de instrumentación se realizan utilizando amplificadores operacionales, por su versatilidad y sencillez de utilización.

Este dispositivo es un amplificador de la diferencia que existe entre sus dos entradas, con una alta ganancia. Además, presenta una impedancia de entrada muy alta y una baja impedancia de salida. Con estas características se deduce que las corrientes de entrada son prácticamente nulas y que tiene la característica de poder entregar corriente relativamente alta. Se encuentra disponible como circuito en chips de silicio. Tiene dos entradas: una inversora (-) y otra no inversora (+). La salida depende de cómo se hagan las conexiones de estas entradas.

Los terminales de un amplificador operacional son:

- V_+ : Entrada no inversora
- V_- : Entrada inversora
- V_{OUT} : Salida
- V_{S+} : Alimentación positiva
- V_{S-} : Alimentación negativa

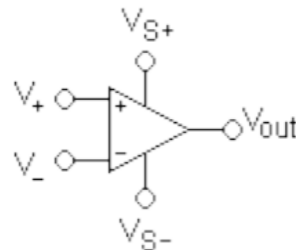


Figura 15. Representación esquemática de un amplificador operacional

Uno de los voltajes se aplica a la entrada inversora y el otro a la no inversora, El voltaje de salida será igual a la diferencia de los voltajes de entrada multiplicada por la ganancia de lazo abierto A . Cuando las dos entradas son iguales, no hay voltaje de salida.

$$V_{OUT} = A \cdot (V_+ - V_-) \quad (3.33)$$

Dentro de los amplificadores operacionales podemos encontrar el montaje como amplificador inversor y el no inversor que presentan bastante interés en la resolución del presente trabajo.

Amplificador inversor

Un amplificador inversor se construye al conectar dos resistencias externas a un amplificador operacional. Como su nombre indica, este circuito invierte y amplifica el voltaje de entrada. La resistencia R_f forma el lazo de retroalimentación. Cuando este lazo va de la salida a la entrada inversora del amplificador operacional, se denomina retroalimentación negativa.

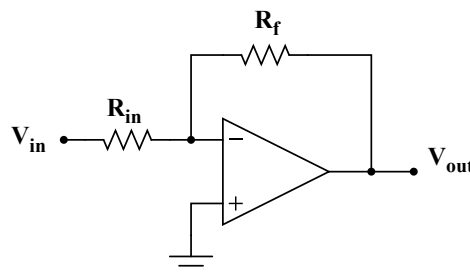


Figura 16. Representación esquemática de un amplificador inversor

En el modo amplificador inversor, el voltaje de salida varía con polaridad opuesta al voltaje de entrada. Se parte de la ecuación de ganancia general presentada anteriormente.

$$V_{OUT} = A \cdot (V_+ - V_-) \quad (3.34)$$

En este caso, V_- es función de V_{OUT} y V_{in} dada por el divisor de tensión formado por R_f y R_{in} . No hay efecto de carga en V_- debido a la alta impedancia del amplificador operacional, con lo que:

$$V_- = \frac{1}{R_f + R_{in}} \cdot (R_f \cdot V_{in} + R_{in} \cdot V_{OUT}) \quad (3.35)$$

Si se sustituye V_- en la ecuación de ganancia, teniendo en cuenta que V_+ es cero por estar la entrada no inversora conectada a tierra, se obtiene:

$$V_{OUT} = V_{in} \cdot \frac{-A \cdot R_f}{R_f + R_{in} + A \cdot R_{in}} \quad (3.36)$$

Si A es muy grande, la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$V_{OUT} \approx -V_{in} \cdot \frac{R_f}{R_{in}} \quad (3.37)$$

Amplificador no inversor

Como su nombre indica, este circuito amplifica el voltaje de entrada sin invertir la señal.

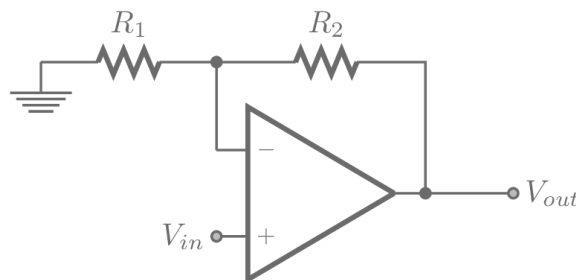


Figura 17. Representación esquemática de un amplificador inversor

En el modo amplificador no inversor, el voltaje de salida varía con la misma polaridad que el voltaje de entrada. Si se parte de la misma ecuación de ganancia general que en el caso anterior.

$$V_{OUT} = A \cdot (V_+ - V_-) \quad (3.38)$$

Sin embargo, en este circuito V_- es una función de V_{OUT} debido a la realimentación negativa a través de la red constituida por R_1 y R_2 , donde R_1 y R_2 forman un divisor de tensión, y como V_- es una entrada de alta impedancia, no hay efecto de carga. Por consiguiente:

$$V_- = \beta \cdot V_{OUT} \quad (3.39)$$

Donde

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.40)$$

Sustituyendo esto en la ecuación de ganancia, se obtiene:

$$V_{OUT} = A \cdot (V_{in} - \beta \cdot V_{OUT}) \quad (3.41)$$

Resolviendo para V_{OUT} :

$$V_{OUT} = V_{in} \cdot \left(\frac{1}{\beta + 1/A} \right) \quad (3.42)$$

Si A es muy grande, se simplifica a

$$V_{OUT} \approx \frac{V_{in}}{\beta} = V_{in} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \quad (3.43)$$

Si en el circuito del amplificador operacional no inversor se hacen algunas consideraciones: $R_1 = \infty$ y $R_2 = 0$, el circuito resultante se conoce como “buffer” o “seguidor”.

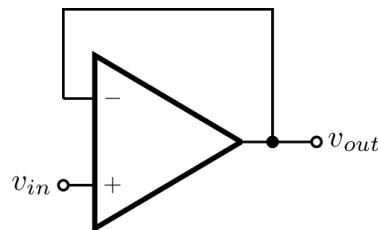


Figura 18. Representación esquemática de un buffer

Es un circuito que proporciona la misma tensión a la salida que a la entrada. Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevada, mientras que la de salida es prácticamente nula. Este circuito es útil para eliminar efectos de carga o para adaptar impedancias es decir, conectar un dispositivo con gran impedancia a otro con baja impedancia y viceversa, y para realizar mediciones de tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte sensiblemente a la medición.

3.2.2.2. Amplificador de instrumentación

Los amplificadores de instrumentación son dispositivos de precisión específicamente concebidos para la amplificación de señales de tensión diferencial débiles, siendo por tanto idóneos para preamplificar la señal de salida de montajes en puente de Wheatstone.

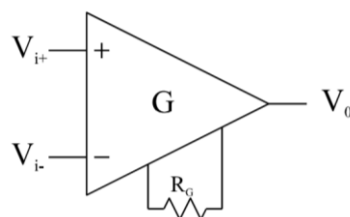


Figura 19. Representación esquemática de un amplificador de instrumentación

Un amplificador de instrumentación deberá reunir las siguientes características fundamentales:

- Alta impedancia de entrada, para que su ganancia no se vea afectada por la impedancia de la fuente.
- Ancho de banda consistente sobre un amplio rango de ganancias.
- Capacidad para amplificar señales de bajo nivel en un ambiente ruidoso, con frecuencia un requisito en ampliaciones de acondicionamiento de señal de sensores de salida diferencial.
- Gran relación de rechazo en modo común (CMRR), esta relación se define como la capacidad del amplificador de rechazar las señales de interferencia comunes a ambas entradas y amplificar únicamente la diferencia entre las entradas. Un amplificador de instrumentación tiene tanto ganancia diferencial, como ganancia de modo común; La primera hace referencia a el factor de ampliación para la diferencia entre las señales de entrada, mientras que la segunda es el factor de ampliación para el promedio de las señales de entrada. Es deseable minimizar la ganancia en modo común para suprimir las señales como el ruido, que son comunes a ambas entradas.

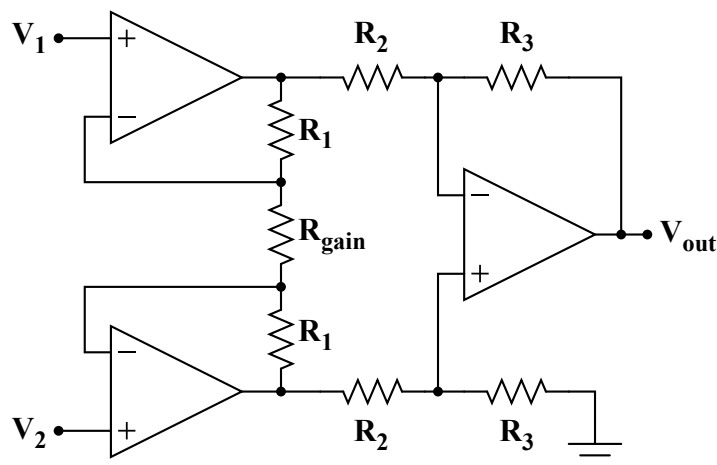


Figura 20. Representación esquemática de un amplificador de instrumentación

Al existir realimentación negativa se puede considerar un cortocircuito virtual entre las entradas inversoras y no inversoras (símbolos - y + respectivamente) de los dos operacionales de entrada. Por ello se tendrán las tensiones en dichos terminales en los extremos de la resistencia R_{gain} .

Así que por ella circulará una corriente

$$I_g = (V_2 - V_1) \left(\frac{1}{R_g} \right) \quad (3.44)$$

Y debido a la alta impedancia de entrada del amplificador operacional, esa corriente será la misma que atraviesa las resistencias R_1

Por lo tanto, la tensión que cae en toda la rama formada por R_g, R_1 y R_1 será:

$$V_{intermedia} = \frac{(V_2 - V_1)}{R_g} (R_g + 2R_1) = (V_2 - V_1) \left(\frac{R_g}{R_g} + \frac{2R_1}{R_g} \right) \quad (3.45)$$

Simplificando:

$$V_{intermedia} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \quad (3.46)$$

Que será la diferencia de tensión entre la salida inmediata de los dos amplificadores operacionales (justo antes de las R_2). Puesto que el resto del circuito es un restador de ganancia la unidad ($R_2 = R_3$) su salida será exactamente la diferencia de tensión de su entrada (sin añadir ganancia), la cual se acaba de definir.

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \quad (3.47)$$

Se ha simplificado la expresión dando valores iguales a las resistencias R_2 y R_3 ; En caso de que las resistencias no sean iguales, la ganancia total del amplificador de instrumentación será:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_1}{R_g} \right) \frac{R_3}{R_2} \quad (3.48)$$

En circuitos integrados suele encapsularse todo excepto la resistencia R_g para poder controlar la ganancia. También puede sustituirse la conexión a tierra por otra a una tensión dada, que será sumada a la salida.

3.2.3 Filtrado

En ocasiones, las señales de interés están mezcladas con otras señales y no es posible distinguirlas o separarlas por medio de análisis basados en técnicas temporales. La separación de señales atendiendo a su distribución frecuencial es una técnica muy común en procesado de señal. Esta técnica es conocida con el termino filtrado y consiste en cancelar o atenuar unas zonas frecuenciales determinadas donde la señal deseada no existe y dejar pasar aquellas frecuencias en que la señal deseada tiene su contenido frecuencial. Principalmente se utiliza para mejorar la calidad de señales ruidosas, el análisis frecuencial de señales contaminadas permite disminuir el ruido que esté fuera de la banda de interés [10].

El rango de frecuencias que pasa por un filtro se conoce como banda de paso, y el que no pasa se conoce como banda de supresión; la frontera entre lo que se suprime y lo que pasa se conoce como frecuencia de corte. Los filtros se clasifican de acuerdo con los rangos de frecuencias que transmiten o rechazan de la siguiente manera:

- Filtro paso bajo: Tiene una banda de paso que acepta la transmisión de todas las frecuencias desde cero hasta un cierto valor.
- Filtro paso alto: Tiene una banda de paso que acepta la transmisión de todas las frecuencias a partir de un determinado valor hasta el infinito.
- Filtro paso banda: Permite la transmisión de todas las frecuencias que están dentro de una banda especificada.
- Filtro supresor de banda: Rechaza e impide la transmisión de todas las frecuencias de cierta banda.

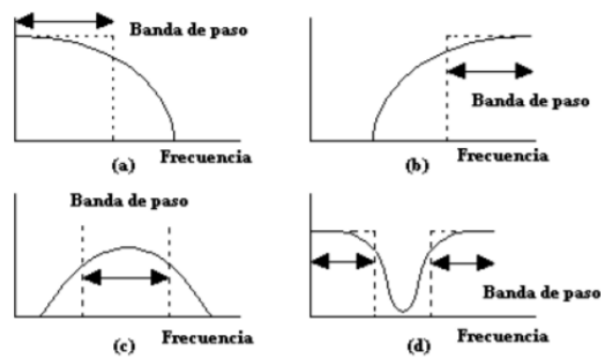


Figura 21. Clasificación de los tipos de filtro [11].

En todos los casos, la frecuencia de corte se define como aquella para la cual el voltaje de salida es 70,7 % de la entrada.

4 COMUNICACIÓN INALÁMBRICA

En el mundo actual, la comunicación entre dispositivos electrónicos es una necesidad tecnológica básica, en particular, los dispositivos que se encuentran a corta distancia y que normalmente se comunican entre sí por medios alambrados. Éstos utilizan una amplia gama de cables y conectores que hacen la comunicación, en un momento dado, limitada, falible e incómoda en situaciones donde existen demasiados cables. Debido a este escenario, la tendencia ahora es establecer enlaces inalámbricos entre dichos dispositivos, de esta manera se reduce el gasto de implementación de redes y aumenta la flexibilidad en la colocación de los equipos, así como la compatibilidad con diversos de ellos y una amplia oferta de hardware de gran fiabilidad. En ocasiones se requiere de una mínima instalación y se consigue una velocidad de transmisión que está en constante aumento [12].

La implementación de tecnologías inalámbricas en las muletas que se han de utilizar para llevar a cabo el proyecto será indispensable, ya que como se ha dicho anteriormente, unas muletas cableadas limitarían en gran medida el desplazamiento y la movilidad de los pacientes. Por lo tanto, con esta nueva tecnología se obtendrá una comunicación entre dispositivos, mucho más dinámica y sencilla.

Para poder estudiar los esfuerzos de las dos muletas de un paciente, será necesario conectar los dispositivos que corresponden a cada una de ellas simultáneamente a un cliente, por lo tanto, el tipo de conexión que se utilice debe permitir recibir los datos procedentes de ambas muletas al mismo tiempo. Además, otro aspecto de gran importancia es que debe proporcionar un ancho de banda adecuado, que permita hacer una representación cercana al tiempo real de todos los esfuerzos obtenidos. El último factor que se tendrá en cuenta para la elección del dispositivo que permita la comunicación, es el consumo de energía, se desea que sea lo más bajo posible ya que estará alimentado mediante baterías. Este último es el factor menos crítico, pues el propósito de la aplicación no es para estar funcionando durante largos periodos de tiempo, sin embargo, se ha de tener en cuenta.

Por consiguiente, los aspectos fundamentales que debe cumplir la comunicación inalámbrica que se va a implementar son los siguientes:

- Conexión de múltiples dispositivos a un cliente.
- Ancho de banda suficiente.
- Bajo consumo.

En la actualidad, a la hora de transmitir datos, se ha recurrido a muchas tecnologías inalámbricas como puede ser ZigBee, Bluetooth o Wi-Fi. Cada una de ellas presenta una serie de ventajas e inconvenientes que las hacen tener mayor o menor validez. En consecuencia, la elección tecnológica deberá depender de los requisitos de la aplicación en concreto, es decir, se debe hallar una relación de compromiso entre el precio, el consumo de energía y el ancho de banda que es capaz de brindar. A continuación, se describirá brevemente las diferentes tecnologías implicadas en varios proyectos a fin de estimar y justificar el uso de una de ellas [13].

4.1 Bluetooth

Se corresponde con un estándar de comunicaciones inalámbricas basado en radiofrecuencia, de bajo coste y bajo consumo energético. Originariamente, en 1994, Ericsson lo desarrolló como un mecanismo alternativo que permitiese sustituir paulatinamente los enlaces cableados de diversos periféricos. No obstante, las características y versatilidad que presenta Bluetooth han hecho que se pueda utilizar en una gran cantidad de situaciones diferentes, como pueden ser el establecimiento de conexiones entre dos terminales móviles inteligentes como puedan ser una PDA o un teléfono móvil, conectado de periféricos o dispositivos de audio.



Figura 22. Logo de bluetooth.

Como se ha mencionado anteriormente, Bluetooth nace de la mano de Ericsson en 1994 junto con otras grandes compañías del sector tecnológico como son Intel, IBM, Nokia y Toshiba. Este conjunto de multinacionales constituyó en 1998 el “Bluetooth Special Interest Group”, organismo que se encarga de gestionar y desarrollar las distintas versiones del núcleo de Bluetooth. Más tarde, en 1999, se unirían empresas de la talla de Microsoft, 3Com o Agilent. El trabajo conjunto de los diferentes miembros del Bluetooth SIG permitió una rápida aceptación por parte de los fabricantes; así como la compatibilidad entre dispositivos de los diferentes fabricantes. Este hecho, provocó que las redes Wireless Personal Area Network (WPAN) basadas en Bluetooth estuviesen reguladas por el IEEE bajo la denominación 802.15 [14].

Las principales características de esta forma de comunicación son:

- Opera en la banda libre de los 2,4 GHz por lo que no necesitamos adquirir ninguna licencia de emisión.
- Tiene una capacidad máxima de transmisión de hasta 3 Mbps.
- Implementa diversos mecanismos de ahorro energético de forma que el dispositivo no siempre va a consumir la misma potencia con el consiguiente ahorro energético en la batería del dispositivo.
- Posee un precio económico que permite implementarlo en casi cualquier dispositivo sin encarecerlo desmesuradamente. Un sistema Bluetooth empotrado tiene un precio cercano a 20€ la unidad.
- Alcance de hasta 100 metros en función de la potencia de emisión que posea el transmisor Bluetooth.
- No obstante, se corresponde con protocolo de comunicaciones cuyo uso queda restringido para enlaces punto a punto, puesto que el sistema de establecimiento de conexiones hace difícil poder realizar redes puntomultipunto. Esto se debe a que en un principio estaba destinado para sustituir a los enlaces establecidos mediante un cable físico.

4.2 Zigbee

Se corresponde con una especificación global creada por un consorcio de múltiples marcas destinadas a la venta de sistemas de control inalámbrico denominados ZigBee Alliance. Dicha especificación se basa en el estándar 802.15.4 definido por el IEEE donde se especifica la capa física y de enlace del protocolo. Es una tecnología de red inalámbrica que opera a 2,4GHz, más centrada en aplicaciones domóticas e industriales que requieren comunicaciones con baja tasa de envío de datos dentro de áreas delimitadas con un alcance de 100 metros, como viviendas o edificios.



Figura 23. Logo de ZigBee.

La idea principal sobre la que se ha desarrollado ZigBee ha sido la facilidad a la hora de implementarlo en un sistema de control, o lo que es lo mismo, se busca que de una manera sencilla y rápida se pueda desarrollar un sistema robusto y duradero fácilmente integrable en una red inalámbrica destinada a la supervisión y el control. ZigBee tiene algunas ventajas significativas como el bajo consumo en sistemas complejos, seguridad superior, robustez, alta escalabilidad y capacidad para soportar un gran número de nodos. Así, es una tecnología bien posicionada para marcar el camino del control inalámbrico y las redes de sensores en aplicaciones IoT y M2M.

En consecuencia, para poder satisfacer estos puntos, ZigBee se va a caracterizar por tener una baja capacidad de transmisión, en torno a 250 Kilobit, que permitirá desarrollar sistemas de muy bajo coste. Constará de un protocolo sencillo, pudiendo ser implementado sin ningún tipo de limitación en sistemas microcontroladores de 8 bits y un muy bajo consumo energético permitiendo que la fuente de alimentación del sistema pueda durar años.

Como gran desventaja, se puede mencionar la baja capacidad de transmisión adoptada, lo que restringe el uso de esta especificación para casos muy concretos y actividades que requieran poco intercambio de datos, como accionar un interruptor de la luz o monitorizar un sensor de temperatura o luminosidad. Además, su bajo consumo de energía limita las distancias de transmisión de 10 a 100 metros de línea de visión, dependiendo de la potencia de salida y las características ambientales. Los dispositivos ZigBee pueden transmitir datos a largas distancias pasando información a través de una red de malla de dispositivos intermedios para llegar a otros más distantes. ZigBee se utiliza típicamente en aplicaciones de baja velocidad de datos que requieren larga vida útil de la batería y redes seguras.

4.3 Wi-Fi

Es una tecnología para dispositivos de redes inalámbricas de área local basados en los estándares IEEE 802.11. Wi-Fi es una marca comercial de Wi-Fi Alliance, que restringe el uso del término Wi-Fi Certified a productos que completan con éxito las pruebas de certificación de interoperabilidad.



Figura 24. Logo de Wi-Fi.

Los dispositivos que pueden utilizar la tecnología Wi-Fi incluyen ordenadores personales, consolas de videojuegos, teléfonos inteligentes, cámaras digitales, tabletas, reproductores de audio digital e impresoras modernas. Los dispositivos compatibles con Wi-Fi pueden conectarse a Internet a través de una red WLAN y un punto de acceso inalámbrico. Este punto de acceso tiene un alcance de unos 20 metros en interiores y un rango mayor al aire libre. La cobertura de puntos de acceso puede ser tan pequeña como una habitación individual con paredes que bloquean las ondas de radio, o tan grande como muchos kilómetros cuadrados logrados mediante el uso de múltiples puntos de acceso superpuestos.

Wi-Fi suele utilizar las bandas de radio ISM de 2,4 GHz UHF y 5 GHz SHF. Al no tener conexiones físicas, es más vulnerable al ataque que las conexiones por cable, como Ethernet.

El IEEE no prueba los equipos para cumplir con sus estándares. La Wi-Fi Alliance sin ánimo de lucro se formó en 1999 para llenar este vacío: establecer y hacer cumplir las normas de interoperabilidad y compatibilidad con versiones anteriores, y promover la tecnología inalámbrica de redes de área local. En 2010, la Wi-Fi Alliance consistía en más de 375 empresas de todo el mundo. La Wi-Fi Alliance hace cumplir el uso de la marca Wi-Fi a las tecnologías basadas en los estándares IEEE 802.11 del IEEE. Esto incluye las conexiones inalámbricas de red de área local (WLAN), la conectividad de dispositivo a dispositivo (como Wi-Fi Peer to Peer aka Wi-Fi Direct), la red de área personal (PAN), la red de área local (LAN) Conexiones de red (WAN). Los fabricantes que forman parte de la Wi-Fi Alliance, cuyos productos pasan el proceso de certificación, obtienen el derecho de marcar esos productos con el logotipo Wi-Fi.

IEEE 802.11

El estándar IEEE 802.11 es un conjunto de especificaciones de control de acceso a medios (MAC) y capa física (PHY) para implementar la comunicación inalámbrica de la red de área local (WLAN) en las bandas de frecuencia de 2,4, 3,6, 5 y 60 GHz. Son creados y mantenidos por el IEEE LAN / MAN Standards Committee (IEEE 802). La versión base de la norma se publicó en 1997, y ha tenido enmiendas posteriores. La norma y las enmiendas proporcionan la base para los productos de redes inalámbricas que utilizan la marca Wi-Fi. Aunque cada enmienda es revocada oficialmente cuando se incorpora a la última versión de la norma, el mundo corporativo tiende a comercializar las revisiones porque denotan de forma concisa capacidades de sus productos. Como resultado, en el mercado, cada revisión tiende a convertirse en su propio estándar.

Hay varias especificaciones en la 802.11. Son populares en el producto industrial estándar los a, b, g y n. La mayoría de los enrutadores inalámbricos domésticos se han trasladado a la norma de 802.11g y 802.11n desde las 802.11a y 802.11b para una mejor transmisión desde los últimos 10 años. Para la especificación, el contenido de "Transmisión" se refiere a menudo a los pocos aspectos importantes de la comunicación: Interferencias, consumo de energía, velocidad y fiabilidad. Por ejemplo, una buena transmisión significa baja interferencia / ruido, bajo consumo de energía, alta velocidad / bps y baja tasa de error.

A medida que las especificaciones 802.11 evolucionaron para soportar un mayor rendimiento, los requisitos de ancho de banda también aumentaron para soportarlos. 802.11n utiliza el doble espectro radioeléctrico / ancho de banda (40 MHz) en comparación con 802.11a o 802.11g (20 MHz). Esto significa que sólo puede haber una red 802.11n en la banda de 2,4 GHz en un lugar determinado, sin interferencia con / De otro tráfico WLAN. 802.11n también se puede configurar para limitarse a 20 MHz de ancho de banda para evitar la interferencia en una comunidad densa.

Los estándares más utilizados actualmente en las redes Wi-Fi son los siguientes [15]:

802.11a

Esta versión del estándar se corresponde con la tercera generación de redes inalámbricas debido a que apareció en el mercado después de las redes 802.11 y 802.11b. Aunque en un principio, su desarrollo se había iniciado antes que el estándar 802.11b. A pesar de ello, se retrasó debido a los requisitos tecnológicos necesarios para poder llevarlo a cabo.

En concreto, las redes inalámbricas 802.11a se caracterizan por operar a una frecuencia de 5 GHz. en los EEUU, Sin embargo, esta forma de comunicación inalámbrica no está autorizada para su utilización en Europa porque la banda que usa para operar se encuentra ocupada por el estándar HyperLAN2.

Las principales características que aporta son:

- Una capacidad de enlace de 54 Mbps.
- Al trabajar en la banda UNII, posee mayor inmunidad frente a las interferencias por solapamiento puesto que dicha banda contempla el uso de 4 canales para este fin.
- Uso de un rango de frecuencias relativamente libre como son los 5 GHz.

802.11b

Este estándar apareció en 1999 con la idea de permitir a los usuarios comunicarse con sus dispositivos con redes Ethernet a través de transmisores/receptores de radiofrecuencia. Por este motivo, la institución IEEE se vio obligada a cambiar los mecanismos de acceso a las redes Ethernet para añadir el soporte de las nuevas capas físicas y de enlace introducidas por 802.11b. En concreto, se optó por usar CSMA/CA (Carrier-Sense Multiple Access with Collision Avoidance) en la capa de enlace y para la capa física se eligieron tres técnicas:

- DSSS (Direct-Sequence Spread Spectrum) usando la banda de los 2,4 GHz.
- FHSS (Frequency-Hopping Spread Spectrum) operando en el rango de los 2,4GHz.
- Infrarrojos.

La principal ventaja de este estándar es que ha sido ampliamente usado en todo el mundo para establecer redes inalámbricas por ser el primero que salió de forma comercial. No obstante, presenta una serie de inconvenientes que en revisiones posteriores se han intentado corregir. Entre estas se pueden citar:

- Problemas de interferencias debido a que el rango de frecuencias en el que opera se encuentra saturado al tratarse de una banda libre.
- Capacidad de transmisión reducida, admite hasta 11 Mbps.
- Requiere de modulaciones que contrarresten los efectos de multitrayectos.
- Sensible a la distancia de tal forma que, a una distancia a más de 75 metros, la capacidad del enlace cae a 2 Mbps.

802.11g

Este estándar surgió como una extensión del 802.11b con el que se pretendía mejorar la capacidad de transmisión del enlace usando el mismo rango de frecuencias, es decir, la banda de 2,4 GHz. Para ello, lo que se hizo fue introducir un segundo modo de acceso basado en OFDM usado ya en las redes 802.11a que permitió aumentar la capacidad del enlace hasta los 54 Mbps. De esta forma, al disponer de las dos técnicas de modulación, las usadas en 802.11b y la usada en 802.11a, este estándar podía dar servicio a dispositivos que cumplieren la normativa 802.11b y a la vez a los nuevos dispositivos compatibles con el estándar 802.11g.

Por tanto, la principal ventaja de las redes 802.11g es el aumento considerable de la capacidad de transmisión, hasta 54 MBPS. No obstante, al compartir la misma banda que 802.11b presenta las mismas desventajas.

802.11n

Se corresponde con una norma todavía en fase de propuesta, es decir, sigue siendo evaluado por los grupos de trabajo del IEEE. En junio de 2.009 estaba prevista su publicación como estándar, pasando a constituir de esta forma la última revisión del estándar 802.11. Se caracteriza principalmente por conseguir un aumento de la capacidad de transmisión muy superior a la proporcionada por 802.11a/b/g. Se podrían alcanzar hasta 600 Mbps. Para poderlo conseguir ha sido necesario emplear dos conceptos claves en la definición de la capa física: el uso de sistemas MIMO (Multiple In Multiple Out) y un ancho de banda de 40 MHz. para los diversos canales existentes. La unión de estas dos decisiones de diseño ha originado ese aumento de la capacidad de transmisión.

Por su parte, durante la formulación de este estándar se ha mantenido siempre el carácter compatible del mismo con las revisiones anteriores de 802.11 por lo que permite el uso de modulaciones OFDM para poder usar dispositivos compatibles con 802.11a/b y las técnicas de acceso vistas en 802.11b. De esta forma, pueden usarse los más de 250 millones de dispositivos existentes en el mercado actual de las comunicaciones inalámbricas en este tipo de redes. Esta característica supone una gran ventaja comercial puesto que el usar un nuevo estándar de comunicaciones inalámbricas no supone tener que cambiar los dispositivos que el usuario pueda ya haber adquirido.

En consecuencia, entre las principales ventajas de 802.11n podemos citar:

- Mayor capacidad de transmisión, hasta 600 Mbps.
- Retrocompatibilidad con los dispositivos 802.11a/b/g.
- Uso de modos para ahorrar consumo y mejorar la utilización de los canales.
- Aprovechamiento de los rayos multitrayectos para mejorar la capacidad de transmisión.

Estándar	Frecuencia	Modulación	Ancho de banda Max.
802.11	2.4 GHz	FHSS o DSSS	2 Mbps
802.11a	5 GHz	OFDM	54 Mbps
802.11b	2.4 GHz	HR-DSSS	11 Mbps
802.11g	2.4 GHz	OFDM	54 Mbps
802.11n	2.4 o 5 GHz	OFDM	600 Mbps
802.11ac	5 GHz	256-QAM	1.3 Gbps

Tabla 2: Comparativa entre las diferentes versiones de la especificación Wi-Fi [16].

4.4 Comparación de las redes inalámbricas

1. Estándar: Bluetooth 4.2 basado en IEEE 802.15.

- Frecuencia: 2,4 GHz (ISM)
- Alcance: 50-150 m (Smart/LE)
- Velocidad de transferencia: 1 Mbps (Smart/LE)

2. Estándar: ZigBee 3.0 basado en IEEE 802.15.4

- Frecuencia: 2.4 GHz
- Alcance: 10-100 m
- Velocidad de transferencia: 250 kbps

3. Estándar: Wi-Fi basado en IEEE 802.11a

- Frecuencia: 5.4 GHz
- Alcance: 390 m
- Velocidad de transferencia: 54 Mbps

4. Estándar: Wi-Fi basado en IEEE 802.11b

- Frecuencia: 2.4 GHz
- Alcance: 460 m
- Velocidad de transferencia: 11 Mbps

5. Estándar: Wi-Fi basado en IEEE 802.11g

- Frecuencia: 2.4 GHz
- Alcance: 460 m
- Velocidad de transferencia: 54 Mbps

6. Estándar: Wi-Fi basado en IEEE 802.11n

- Frecuencia: 2.4 o 5.4 GHz
- Alcance: 820 m
- Velocidad de transferencia: 600 Mbps

7. Estándar: Wi-Fi basado en IEEE 802.11ac

- Frecuencia: 5.4 GHz
- Alcance: 80 - 60 m
- Velocidad de transferencia: 1.3 Gbps

Una vez realizado el estudio y la comparación acerca de las diferentes tecnologías que existen en el mercado, se eligió establecer una comunicación inalámbrica de área local basados en los estándares IEEE 802.11 conocido como Wi-Fi ya que cumple con las necesidades que se tienen. En particular se optó por la utilización de una placa cuyas características se describirán a continuación. Dicha placa tiene una relación calidad – precio de mucho interés, además de cumplir con todos los requisitos en cuanto a resolución y autonomía que se tienen para la realización del trabajo.

4.5 Adafruit Feather

Feather es la nueva placa de desarrollo de Adafruit, y como su nombre indica, es muy delgada y liviana. Es un nuevo estándar para núcleos de microcontroladores portátiles. La WiFi Adafruit Feather M0 con ATWINC1500 es una versión que consta con una conexión WiFi de alta velocidad, con puerto USB incorporado y que permite cargar una batería LiPo desde el puerto USB, además es compatible con la programación Arduino [17].



Figura 25. Adafruit Feather M0i.

La placa cuenta con un nuevo módulo WiFi certificado por FCC de Atmel. Este módulo WiFi con capacidad 802.11bgn es la mejor novedad para la conexión en red de sus dispositivos, con capacidades de administración de bajo consumo de energía incorporadas, y un rendimiento absolutamente sólido. Este módulo es muy rápido y fácil de usar en comparación con otros módulos WiFi que existen. Funciona con redes 802.11b, g o n y admite el cifrado WEP, WPA y WPA2. Además, cuenta con 12MHz para una transmisión de paquetes rápida y confiable. Y permite conectarse a redes muy rápido, con una duración de uno o dos segundos.

Para facilitar su uso en proyectos portátiles, cuenta con un conector de baterías de polímero de litio de 3.7 V incorporado. No necesita usar una batería, funciona de forma correcta directamente desde el conector micro USB. Pero, si se tiene una batería, se puede utilizar con la misma y luego conectar el USB para recargarla. La Feather cambiará automáticamente a la alimentación USB cuando esté disponible. Además, la batería se encuentra conectada a través de un divisor a un pin analógico, para poder medir y monitorear el voltaje de la misma y detectar cuándo necesita ser recargada.

Algunas de las especificaciones son las siguientes:

- Procesador ATSAM21G18 ARM Cortex M0, velocidad de reloj de 48 MHz y una lógica de 3.3V
- FLASH de 256 KB, SRAM 32 KB, sin EEPROM
- Regulador de 3.3 V (AP2112K-3.3) con una salida de corriente máxima de 600 mA, WiFi puede generar un pico de 300 mA durante la emisión
- Soporte nativo USB, viene con cargador de arranque y depuración de puerto serie
- 20 pines GPIO
- Conexión por puerto serie, I2C y SPI
- 8 terminales PWM
- 10 entradas analógicas
- 1 salida analógica
- Cargador LiPo incorporado de 200 mA con indicador de estado de carga LED
- Pin # 13 LED rojo para uso general
- 4 agujeros de montaje
- Botón de reinicio

5 APLICACIÓN EXPERIMENTAL

5.1 Puentes existentes en las muletas

Como se ha dicho en la Introducción, se cuenta con un par de muletas convencionales, instrumentadas mediante extensometría. En cada muleta, se pretende medir cuatro fuerzas, por una parte, se medirá la fuerza axial y las dos componentes de fuerza cortante que recibe la muleta del suelo. Para ello, se tienen tres puentes de Wheatstone bajo la empuñadura que miden, respectivamente, la fuerza axial y los momentos flectores en dos direcciones perpendiculares. Y, por otro lado, se ha de medir la fuerza que hace el antebrazo sobre el soporte superior de la muleta, por lo que se ha instalado un cuarto puente sobre la empuñadura que mide el momento flector correspondiente [18].



Figura 26. Muleta instrumentada con galgas extensiométrica [18].

Para la medición de la fuerza axial se utilizaron rosetas a 90 grados Micro-Measurements CEA-13-125UT-350, con factor de galga de 2.15 y se empleó una configuración del puente de wheatstone como la que se muestra en la siguiente figura.

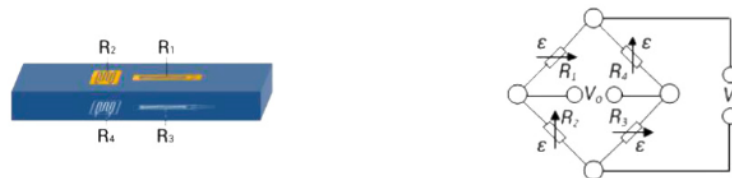


Figura 27. Configuración del puente de Wheatstone para esfuerzos axiales.

Cuya expresión del voltaje de salida es la siguiente:

$$UA = \frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot (1 + \nu) \cdot k \cdot UE \quad (5.1)$$

Donde:

Factor de galga: $k = 2.15$.

Tensión de excitación: $UE = 3.3 \text{ V}$

Coeficiente de Poisson y módulo de Young del material: $\nu = 0.334$ y $E = 69 \cdot 10^9 \text{ Pa}$

La deformación de compresión se calcula:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{N/A}{E} \quad (5.2)$$

De las mediciones realizadas anteriormente con el sistema antiguo, se estima que la carga de compresión máxima ejercida sobre la muleta, dejando un margen de seguridad, será de $N = 700 \text{ N}$.

El área de la sección transversal es:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot ((D \cdot 10^{-3})^2 - (d \cdot 10^{-3})^2) \quad (5.3)$$

Donde

Diámetro exterior: $D = 18.25 \text{ mm}$.

Diámetro interior: $d = 15.25 \text{ mm}$.

Por otro lado, la ganancia requerida por el amplificador será:

$$k = f \cdot \frac{UI}{UA} = 4882.98 \quad (5.4)$$

Donde el rango de entrada del ADC será: $UI = 3.3 \text{ V}$, la tensión del puente para la carga nominal será $UA = 0.61 \text{ mV}$, obtenida a partir de la ecuación 5.1, y, f será el rango ADC reservado para cargas de compresión (90% para compresión y 10% para tracción). Esta célula trabajará mayormente a compresión, por esa razón solo se reserva un 10% del rango para cargas de tracción. Es decir, en lugar de medir valores entre 0N y 700N, se mide entre -77.77N y 700N, de modo que los 700N son el 90% del rango total que será 777.77N

De esta manera, sustituyendo en las ecuaciones anteriores se obtiene:

- La tensión máxima y mínima de la celda de compresión:

$$V_{\text{máx}} = UA = 0.61 \text{ mV} \quad (5.5)$$

$$V_{\text{mín}} = \left(\frac{UA}{f} - UA\right) = -0.07 \text{ mV} \quad (5.6)$$

- La resolución para un ADC de 12 bits

$$\frac{N}{f \cdot 2^{12}} = 189.89 \text{ mN} \quad (5.7)$$

- La sensibilidad de la célula de carga

$$\frac{UA}{UE} = 0.18 \text{ mV / V} \quad (5.8)$$

Para el cálculo de los momentos flectores se empleó el mismo tipo de galgas que en el puente de compresión, pero en este caso se empleó una configuración del puente diferente como se muestra en la siguiente figura.



Figura 28. Configuración del puente de Wheatstone para momentos flectores.

La expresión del voltaje de salida en esta configuración es la siguiente:

$$UA = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot (1 + \nu) \cdot k \cdot UE \quad (5.9)$$

Donde los parámetros UE , k , ν y E son iguales para todos los montajes del puente. La tensión de flexión se calcula:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M \cdot y}{E \cdot I} \quad (5.10)$$

Se estima una carga de flexión máxima de $M = \pm 50$ Nm.

El momento de inercia de la sección es:

$$I = \frac{\pi \cdot ((D \cdot 10^{-3})^4 - (d \cdot 10^{-3})^4)}{64} \quad (5.11)$$

$$y = \frac{D \cdot 10^{-3}}{2} \quad (5.12)$$

En este caso, la ganancia requerida por el amplificador será:

$$k = \frac{1}{2} \cdot \frac{UI}{UA} = 147.14 \quad (5.13)$$

De igual manera que en caso anterior, el rango de entrada del ADC será: $UI = 3.3$ V y el valor de UA se obtendrá de la ecuación 5.9. Y, como en éstas células la carga es simétrica, es decir, el valor va entre -50N y 50N, el valor de f será igual a $\frac{1}{2}$

De esta manera, se obtiene:

- La tensión máxima y mínima de la celda de flexión, que en este caso será la misma, pero de sentido contrario:

$$Vmáx = UA = 11.21 \text{ mV} \quad (5.14)$$

$$Vmín = -UA = -11.21 \text{ mV} \quad (5.15)$$

La resolución para un ADC de 12 bits

$$\frac{2 \cdot M}{2^{12}} = 24.41 \text{ mNm} \quad (5.16)$$

- La sensibilidad de la célula de carga

$$\frac{UA}{UE} = 3.40 \text{ mV / V} \quad (5.17)$$

Por ultimo se explicará la configuración del puente de wheatstone empleada para la medición de los momentos flectores debidos a la fuerza que hace el antebrazo sobre el soporte superior de la muleta que tiene sección rectangular en lugar de circular. En este caso, por razones de espacio, se optó por usar galgas simples en lugar de rosetas, de modo que se cuenta con una configuración de medio puente como se muestra en la siguiente figura.



Figura 29. Configuración del puente de Wheatstone para momentos flectores.

La expresión del voltaje de salida en esta configuración es la siguiente:

$$UA = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot k \cdot UE \quad (5.18)$$

La tensión de flexión se calcula igual que en la configuración anterior:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M \cdot y}{E \cdot I} \quad (5.19)$$

Se estima una carga de flexión máxima de $M = 50 \text{ Nm}$.

La sección en este caso es rectangular. El momento de inercia es:

$$I = \frac{1 \cdot 10^{-12}}{12} \cdot (a \cdot b^3 - (a - 2t) \cdot (b - 2t)^3) \quad (5.20)$$

$$y = \frac{b \cdot 10^{-3}}{2} \quad (5.21)$$

Donde:

Lado corto de la sección transversal: $a = 15 \text{ mm}$.

Lado largo de la sección transversal: $b = 25 \text{ mm}$.

Espesor: $t = 1,25 \text{ mm}$.

La ganancia requerida por el amplificador será

$$k = f \cdot \frac{UI}{UA} = 708.55 \quad (5.22)$$

Como en los casos anteriores, el rango de entrada del ADC será: $UI = 3.3 \text{ V}$ y el valor de UA se obtendrá de la ecuación 5.18. En este caso, como ocurre en la célula de compresión, las cargas normalmente actuarán en una sola dirección, así que se deja el 90% del rango de la salida para valores positivos y el 10% para valores negativos.

De esta manera, sustituyendo en las ecuaciones anteriores se obtienen:

- La tensión máxima y mínima de la celda de flexión:

$$Vmáx = UA = 4.19 \text{ mV} \quad (5.23)$$

$$Vmín = \frac{UA}{f} - UA = -0.47 \text{ mV} \quad (5.24)$$

- La resolución para un ADC de 12 bits

$$\frac{M}{f \cdot 2^{12}} = 13.56 \text{ mNm} \quad (5.25)$$

- La sensibilidad de la célula de carga

$$\frac{UA}{UE} = 1.27 \text{ mV / V} \quad (5.26)$$

Como se explicó anteriormente, las muletas tienen diferentes configuraciones de puente de Wheatstone, según sea el requerimiento de medición que se necesite en cada caso, sin embargo las tres configuraciones utilizadas cuentan con el efecto de compensación de algunos factores que podrían afectar el valor de la tensión que se está midiendo, como por ejemplo el efecto de la temperatura o de la resistencia de los cables.

Si existiera variación en la temperatura durante la aplicación de la carga, obtendríamos una señal de deformación compuesta. Una componente sería el efecto deseado de la tensión mecánica y la otra, el efecto no deseado de la expansión térmica. Por esta razón existen diferentes configuraciones en las que variando la disposición de las galgas en el puente, se puede demostrar que se consigue compensar este efecto, haciendo que la temperatura no tenga influencia en el resultado.

Para el caso de la resistencia de los cables, cuando se tiene un puente completo como en dos de nuestros tres tipos de configuraciones, no habría inconveniente porque las resistencias al ser cuatro cables de igual longitud se compensan unas con otras, además en este caso como el amplificador va muy cerca de las células de carga y los cables son de poca longitud, no existiría dicho efecto, se ven más afectados los casos en los que se tiene el puente muy alejado del circuito de acondicionamiento y por tanto, los cables pueden introducir variaciones al sistema.

5.2 Circuito de acondicionamiento

El circuito de acondicionamiento empleado consta de una serie de amplificadores y filtros que se describirán a continuación. Se tendrá un amplificador de instrumentación AD623, y dos amplificadores MCP6004 para cada célula de carga. Éste es un modelo que contiene cuatro amplificadores en un mismo encapsulado, que comparten alimentación.

En primer lugar, al salir la señal del puente de Wheatstone, pasa a través de un amplificador AD623, el cual es un amplificador de instrumentación integrado, de alimentación única o doble, que ofrece una salida rail-to-rail, es decir, la salida puede alcanzar voltajes muy cercanos a los de la alimentación y por lo tanto se puede utilizar más eficientemente el rango de tensión bajo el cual trabaja. Además, admite tensiones de alimentación desde 3V a 12V. En este caso se alimentará con una tensión de 3.3V. Este amplificador ofrece una flexibilidad superior al permitir programar la ganancia con una resistencia de ajuste. Sin resistencia externa está configurado para ganancia unitaria y con resistencia externa, se puede programar para ganancias de hasta 1000.

La precisión superior que se consigue con el AD623 es el resultado de un aumento de la relación de rechazo en modo común (CMRR) coincidente con una ganancia creciente; Los armónicos de ruido de línea son rechazados debido a CMRR constante hasta 200 Hz. El AD623 tiene un amplio rango de entrada de modo común y amplifica las señales con voltajes comunes de hasta 150mV bajo tierra.

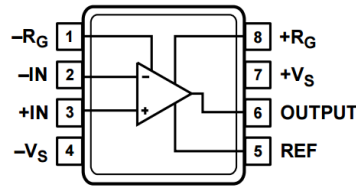


Figura 30. Configuración de pines del amplificador AD623.

Dado que el sistema utiliza comunicación inalámbrica, se empleó un circuito como se muestra en la figura 21, que permite atenuar la interferencia por radiofrecuencia, según la hoja de especificaciones. Éste circuito permite una buena supresión de señales RFI sin tener que reducir el rendimiento de la banda de paso del amplificador. La resistencia R1 y el condensador C1 forman un filtro RC de paso bajo, de igual manera que la resistencia R2 y el condensador C2. Para que los dos filtros afecten por igual a ambas señales, y no afecten a la señal diferencial, los condensadores deben ser lo más parecidos posible, por esta razón fueron medidos con un analizador de impedancias para emparejarlos entre sí antes de su montaje. Mientras que, el condensador C3 es necesario para mantener el rechazo en modo común en bajas frecuencias.

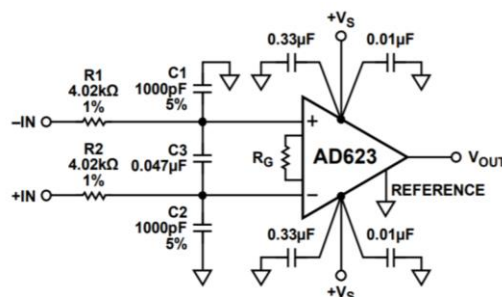


Figura 31. Circuito para Atenuar la interferencia de radiofrecuencia [19].

Una vez que la señal sale del amplificador AD623, pasa a través de un filtro activo de segundo orden, basado en la arquitectura de Sallen-Key. En este caso se emplea para cada célula de carga uno de los cuatro canales de un amplificador MCP6004, que utiliza una tecnología CMOS avanzada que proporciona baja corriente de polarización, operación a alta velocidad, alta ganancia de bucle abierto y oscilación de salida rail-to-rail que cumple con la misma propiedad que el amplificador anterior, además tiene un rango de suministro de 2.7V a 5.5V, por tanto se podrá alimentar con 3.3V. Este dispositivo es apropiado para circuitos de baja potencia operados por baterías debido a la baja corriente de reposo, para los amplificadores convertidores A/D debido a su amplio ancho de banda o para filtros “anti-aliasing” en virtud de su baja corriente de polarización de entrada.

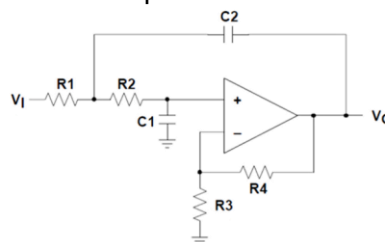


Figura 32. Filtro de Sallen-Key.

Una característica importante de este amplificador es que cuenta con un encapsulado que contiene 14 pines, es decir, cuatro amplificadores iguales que pueden ser alimentados con la misma fuente, para este caso en particular presenta un beneficio importante ya que para cada muleta se necesitaría solo un amplificador de este tipo para la señal de las cuatro células de carga, de esta manera se conseguiría un circuito de menor dimensión. Este amplificador es el MCP6004

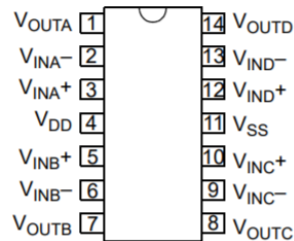


Figura 33. Amplificador MCP6004.

5.3 Equilibrado de los puentes: PWM

Existen diferentes factores que ocasionan desequilibrios en el puente, por ejemplo, diferencias entre las resistencias de las galgas, tensiones residuales que quedan después del montaje de las mismas o resistencias en contactos eléctricos, etc. Por estos motivos es necesario equilibrar los puentes antes de poder utilizarlos. Equilibrar el puente significa hacer que la tensión en bornes del mismo sea cero cuando no hay fuerza aplicada sobre el elemento. Cuando se usan ganancias pequeñas, no hay tanto problema, sin embargo, cuando se usan ganancias muy grandes como en este caso, necesarias porque el ADC tiene una resolución relativamente baja, un pequeño desequilibrio puede mandar fuera de rango toda la señal.

Por ejemplo, en el caso de las células a compresión se tendrá que amplificar la señal por 5000, si se tuviera un desequilibrio de 1mV, estaría sumando 5V a la señal y por este motivo se saldría del rango sin haber aplicado ninguna carga, por tanto, hay que tratar de centrar esa señal dentro de la zona de rango.

Existen diferentes métodos para equilibrar un puente de Wheatstone, aunque en el caso de una célula de carga no todos son válidos, ya que las ramas del puente no suelen ser accesibles. En este caso, una posible solución para conseguir el equilibrado del puente es la siguiente: a la salida del amplificador se le suma un voltaje por el V_{REF} , de esta manera se puede mover el rango de salida del amplificador. La manera ideal de obtener el V_{REF} para aplicar al AD623 es usando una salida analógica, pero la placa Adafruit Feather solo tiene una, y se necesitan cuatro por muleta. La solución es utilizar las salidas PWM, aplicándoles un filtro RC para obtener un voltaje constante. Para asegurar que dicho voltaje es estable, cada señal se pasa por un buffer o seguidor. Dado que se necesitarán cuatro señales, dichos buffers se implementarán utilizando otro amplificador MCP6004. Utilizando este método, únicamente se podrá subir el voltaje, no bajarlo, ya que la alimentación que tiene el amplificador va entre 0 y 3.3V, por tanto, por el V_{REF} solo se podrán sumar voltajes dentro de ese rango. Sin embargo, si se tiene un desequilibrio del puente positivo, se podrían invertir los cables y en vez de poner que la fuerza máxima está en 3.3V y la mínima en 0, se tendría que la fuerza máxima esté en 0 y la mínima en 3.3V, es decir, se invierte la pendiente de la recta, de esta manera el desequilibrio positivo se convertiría en negativo.

En conclusión, como no se puede modificar la resistencia de los puentes, lo más cómodo es desplazar el 0 para que la salida del sistema completo cuando no haya carga, esté en el medio, o cerca de un lado si se quiere que la célula funcione sólo hacia el otro.

5.4 Cálculo de ganancias para amplificadores

Como se describió anteriormente, el circuito de acondicionamiento cuenta con dos etapas de amplificación, la primera se lleva a cabo en el amplificador operacional AD623, y la segunda en el filtro de Sallen–Key. Esto se hace para que, al introducir la señal de equilibrado del PWM por el V_{REF} , se tenga más margen para variar la salida. Si se implementara una sola etapa de amplificación y el filtro tuviera ganancia igual a 1, lo que se introduce mediante el PWM solo podría sumar entre 0 y 3.3V, en cambio, teniendo las dos etapas, a la salida del amplificador se estaría usando 1/5 de la señal en el caso de la célula de compresión y 1/3 en el caso de la de flexión y a ese valor se le puede llegar a sumar hasta 3.3V, que al ser luego amplificado se cuenta con más margen para modificar la señal.

En primer lugar, se va a definir el amplificador AD623, para ello se calcula el valor de K_1 y de V_{REF} . La salida de la primera etapa de amplificación debe estar entre 0 y 3.3 /3 V si el puente es de flexión o 0 y 3.3 /5 V si es de compresión, como se explicó anteriormente.

Para ello se resolverá el siguiente sistema de ecuaciones para los diferentes tipos de puentes:

$$V_{m\acute{a}x} = Vin_{m\acute{a}x} \cdot K_1 + V_{REF} \quad (5.27)$$

$$V_{m\acute{i}n} = Vin_{m\acute{i}n} \cdot K_1 + V_{REF}$$

Los voltajes $V_{m\acute{a}x}$ y $V_{m\acute{i}n}$ dependerán de si se trata de las células a flexión o de la célula a compresión. Mientras que Los voltajes $Vin_{m\acute{a}x}$ y $Vin_{m\acute{i}n}$ son los teóricos para la carga nominal P que se calcularon en el apartado anterior, $Vin_{m\acute{i}n}$ es el voltaje para -P y $Vin_{m\acute{a}x}$ es el que sale al aplicar +P.

➤ Célula a Compresión

$$\begin{aligned} V_{m\acute{a}x} &= 0.66 \text{ V} \\ V_{m\acute{i}n} &= 0 \text{ V} \\ Vin_{m\acute{a}x} &= 0.61 \text{ mV} \\ Vin_{m\acute{i}n} &= -0.07 \text{ mV} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación 5.27 se obtuvo:

$$K_1 = 970.59 \text{ y } V_{REF} = 0.07 \text{ V}$$

➤ Célula a Flexión

$$\begin{aligned} V_{m\acute{a}x} &= 1.10 \text{ V} \\ V_{m\acute{i}n} &= 0 \text{ V} \end{aligned}$$

➤ Puente Completo

$$\begin{aligned} Vin_{m\acute{a}x} &= 11.21 \text{ mV} \\ Vin_{m\acute{i}n} &= -11.21 \text{ mV} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación 5.27 se obtuvo:

$$K_1 = 49.06 \text{ y } V_{REF} = 0.55 \text{ V}$$

➤ Medio Puente

$$\begin{aligned} Vin_{m\acute{a}x} &= 4.19 \text{ mV} \\ Vin_{m\acute{i}n} &= -0.47 \text{ mV} \end{aligned}$$

Sustituyendo en la ecuación 5.27 se obtuvo:

$$K_1 = 236.06 \text{ y } V_{REF} = 0.11 \text{ V}$$

Una vez calculadas K_1 y V_{REF} , se ha de validar K_1 con las ecuaciones que se especifican en la hoja de características del amplificador AD623, donde se expresa que el valor de la K_1 calculada deberá ser menor cualquiera de las dos $K_{m\acute{a}x}$ resultante de las siguientes ecuaciones. El amplificador de instrumentación lleva dos amplificadores operacionales, estas ecuaciones proporcionan la ganancia máxima que hará saturar dichos amplificadores, para los voltajes de entrada considerados.

$$K_{max} = 2 \cdot (3.3 - 0.7 - 1.65) / V_{inMax} \quad (5.28)$$

$$K_{max} = -2 \cdot (1.65 - 1 + 0.59) / V_{inMin}$$

De esta manera se comprobó que los valores de K_1 cumplen la condición del amplificador. Ahora se procede a calcular el valor de R_g a través de la siguiente ecuación:

$$K_1 = 1 + \frac{10^5}{R_g} \quad (5.29)$$

Y, los valores obtenidos son los siguientes:

- Célula a Compresión
 $R_g = 102.50 \Omega$
- Célula a Flexión
 - Puente Completo
 $R_g = 2081.38 \Omega$
 - Medio Puente
 $R_g = 425.20 \Omega$

Para concluir con los cálculos de este amplificador, se buscaron resistencias reales en el mercado que se aproximarán a las teóricas anteriormente calculadas, y se obtuvo:

- Célula a Compresión
 $R_g = 100 \Omega$
- Célula a Flexión
 - Puente Completo
 $R_g = 2 k\Omega$
 - Medio Puente
 $R_g = 430 \Omega$

Con estas resistencias reales, se hizo el cálculo inverso para obtener las ganancias reales que se tendrán. Y se obtuvo que no hay mucha diferencia con el valor teórico calculado anteriormente.

- Célula a Compresión
 $K_1 = 1001.00$
- Célula a Flexión
 - Puente Completo
 $K_1 = 51.00$
 - Medio Puente
 $K_1 = 230.56$

Una vez definida la primera etapa de amplificación. Se procede a definir el filtro de Sallen-Key y el filtro RC del PWM, donde, el primero debe cumplir las condiciones necesarias de respuesta en frecuencia y ganancia, mientras que el segundo debe eliminar de forma efectiva el rizado introducido por el PWM.

Las ecuaciones de cálculo del filtro de Sallen-Key, al igual que algunas consideraciones, fueron obtenidas de la simplificación nº 3 del documento de Texas Instruments [20].

$$R1 = mR$$

$$R2 = R$$

$$C1 = C2 = C$$

En primer lugar, se ha fijado el valor del condensador $C = 0.1 \mu F$. Y, de igual manera se fijó un factor de calidad $Q = 1/\sqrt{2}$, que se corresponde con el filtro de Butterworth, un filtro electrónico diseñado para producir la respuesta más plana que sea posible hasta la frecuencia de corte. En otras palabras, la salida se mantendrá inalterada casi hasta la frecuencia de corte. En diversas aplicaciones de los filtros paso bajo se necesita que la ganancia en lazo cerrado se aproxime lo más posible a la unidad dentro de la banda de paso. Para este tipo de aplicación lo mejor es el filtro Butterworth.

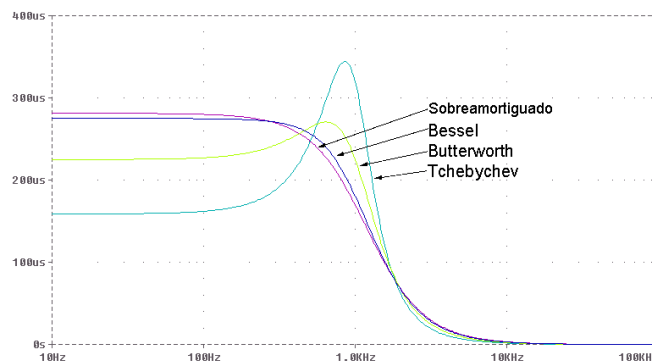


Figura 34. Comparativa de filtros de segundo orden.

Si se tiene una $K = 3$ para las células a flexión y $K = 5$ para la de compresión, se puede determinar el valor de m mediante la siguiente ecuación.

$$Q = \frac{\sqrt{m}}{1 + 2 \cdot m - m \cdot K} \quad (5.30)$$

El sistema de captura óptica tiene una frecuencia de 100 Hz, así que la señal de las muletas se adquirirá a la misma frecuencia. Según el teorema de Nyquist, habrá que aplicar al filtro una frecuencia de corte igual a la mitad de la frecuencia de muestreo, es decir 50 Hz. La resistencia R correspondiente se puede obtener con la siguiente ecuación:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C \cdot \sqrt{m}} = 50 \text{ Hz} \quad (5.31)$$

Los valores de R y m obtenidos para cada tipo de célula son los siguientes:

- Célula a Compresión
 - $m = 0.15$
 - $R = R_2 = 82058.23 \Omega$
 - $R_1 = m \cdot R = 12347.47 \Omega$
- Célula a Flexión
 - $m = 0.27$
 - $R = R_2 = 61492.75 \Omega$
 - $R_1 = m \cdot R = 16476.93 \Omega$

De igual manera que en el caso anterior, se buscaron resistencias reales en el mercado que se aproximaran a las teóricas anteriormente calculadas, y se obtuvo:

- Célula a Compresión

$$R_1 = 12.4 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 82.5 \text{ k}\Omega$$

- Célula a Flexión

$$R_1 = 16.2 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 63.4 \text{ k}\Omega$$

Para cálculo de R_3 y R_4 , se utiliza la siguiente fórmula, donde se establecerá el valor de una resistencia y se calcula la otra en función de ella.

$$K = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (5. 32)$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

- Célula a Compresión

$$K = 5$$

$$R_3 = 30 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 120 \text{ k}\Omega$$

- Célula a Flexión

$$K = 3$$

$$R_3 = 15 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 30 \text{ k}\Omega$$

Al igual que para el caso anterior, con estas resistencias se hizo el cálculo de los valores reales de m , Q y K que se tendrán con las resistencias reales. Y, se puede comprobar que los valores de Q y K reales son casi iguales a las teóricas, por tanto, se ha diseñado el filtro que se quería.

Por último, se procede con los cálculos del filtro RC que se utilizará para el equilibrado del puente. Como la señal de entrada de este filtro viene de un PWM, se quiere transformar en una señal continua, lo más estable posible. Para ello se tendrá que cumplir un compromiso entre tiempo de respuesta, que se refiere al tiempo que tarda en estabilizarse el valor cuando se ajusta el PWM, y el rizado de la señal; cuanto más rápido es el tiempo de respuesta más rizado se tendrá en la salida. Entonces, se estableció que un rizado de 0.1mV como máximo podría ser aceptable, ya que la alimentación será de 3.3V y esas variaciones podrían ser despreciables. Este rizado será el que se tenga al final de la etapa de amplificación, ya que la señal del PWM atraviesa los dos filtros: primero el RC y luego el de Sallen-Key.

Para ello se realizó un proceso de iteración entre diferentes valores de R donde se buscó la que mejor se ajustaba al valor del rizado que se quería obtener, habiendo establecido un condensador $C = 1 \mu F$. Finalmente, con un valor de resistencia $R = 330 \text{ k}\Omega$ se consiguieron los siguientes resultados.

La amplitud de la respuesta del filtro RC en función de la frecuencia de entrada será

$$|H| = \frac{1}{\sqrt{1 + (C \cdot R \cdot 2 \cdot \pi \cdot f)^2}} \quad (5. 33)$$

La atenuación a 730 Hz, que es la frecuencia que tiene por defecto el PWM de la Feather, será el resultado de evaluar la ecuación anterior a esa frecuencia.

$$A_{RC} = |H(730)|; \quad (5. 34)$$

El rizado y el tiempo de respuesta a la salida del filtro RC será:

$$Rizado = 3.3 \cdot A_{RC} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 1000 = 3.42 \text{ mV} \quad (5.35)$$

$$t = -\log(1 - 0.9) \cdot R \cdot C = 0.76 \text{ s} \quad (5.36)$$

Siendo el tiempo de respuesta, el tiempo que tarda la salida del filtro en alcanzar el 90% del valor final para una entrada escalón.

La función de transferencia del filtro de Sallen- Key será:

$$H_c = \frac{K}{-\left(\frac{f}{f_c}\right)^2 + \frac{jf}{Qf_c} + 1} \quad (5.37)$$

La atenuación a 730 Hz será el resultado de evaluar el módulo de la ecuación anterior a esa frecuencia.

$$A_{SK} = |H_c(730)| \quad (5.38)$$

Para el cálculo del rizado total, se tendrá un valor del rizado para la célula de compresión y otro para la célula de flexión, y los valores obtenidos fueron los siguientes:

$$Rizado \text{ Total compresión} = 3.3 \cdot A_{RC} \cdot A_{SK} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 1000 = 0.08 \text{ mV} \quad (5.39)$$

$$Rizado \text{ Total flexión} = 3.3 \cdot A_{RC} \cdot A_{SK} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 1000 = 0.05 \text{ mV} \quad (5.40)$$

El tiempo de respuesta total será aproximadamente igual al tiempo de respuesta del filtro RC ($t = 0.76 \text{ s}$), ya que el filtro de Sallen-Key, al tener una frecuencia de corte más alta, tiene un tiempo de respuesta comparativamente mucho menor y, por tanto, se puede despreciar. De esta manera se obtiene la relación de rizado y tiempo que se buscaba.

5.5 Implementación en PCB

En un principio todo el circuito iba a estar implementado en una sola PCB, sin embargo, después de realizar algunas pruebas, se identificó que el circuito de acondicionamiento al tener ganancias tan altas era sensible a interferencias de la WiFi. Por esa razón se optó por la utilización de dos PCB, una que contenga la Feather y por tanto sea la encargada de la comunicación vía WiFi con el ordenador, y otra que contenga todo el circuito de amplificación. Ambas placas estarán ajustadas en sus respectivas cajas, siendo la que contenga el circuito de acondicionamiento, apantallada, para de esta manera garantizar el aislamiento de la placa de alguna señal que pueda causar interferencia o hacer que deje de funcionar correctamente.

Para la realización de estas placas, se utilizó un programa de diseño llamado EAGLE, el cual contiene un editor de diagramas electrónicos y un editor de PCBs con un autoenrutador bastante eficiente, además, EAGLE trae incluidas bibliotecas de componentes, sencillas de hacer y disponibles por parte de empresas que las distribuyen alrededor de la red de forma gratuita, una vez diseñadas las placas, éstas se mandaron a fabricar en una empresa que se dedica a ello, en éste caso se hizo a través de Eurocircuits, un fabricante especializado de prototipos y PCB de lotes pequeños.

El diseño del circuito de ambas placas es el siguiente:

- Placa Feather

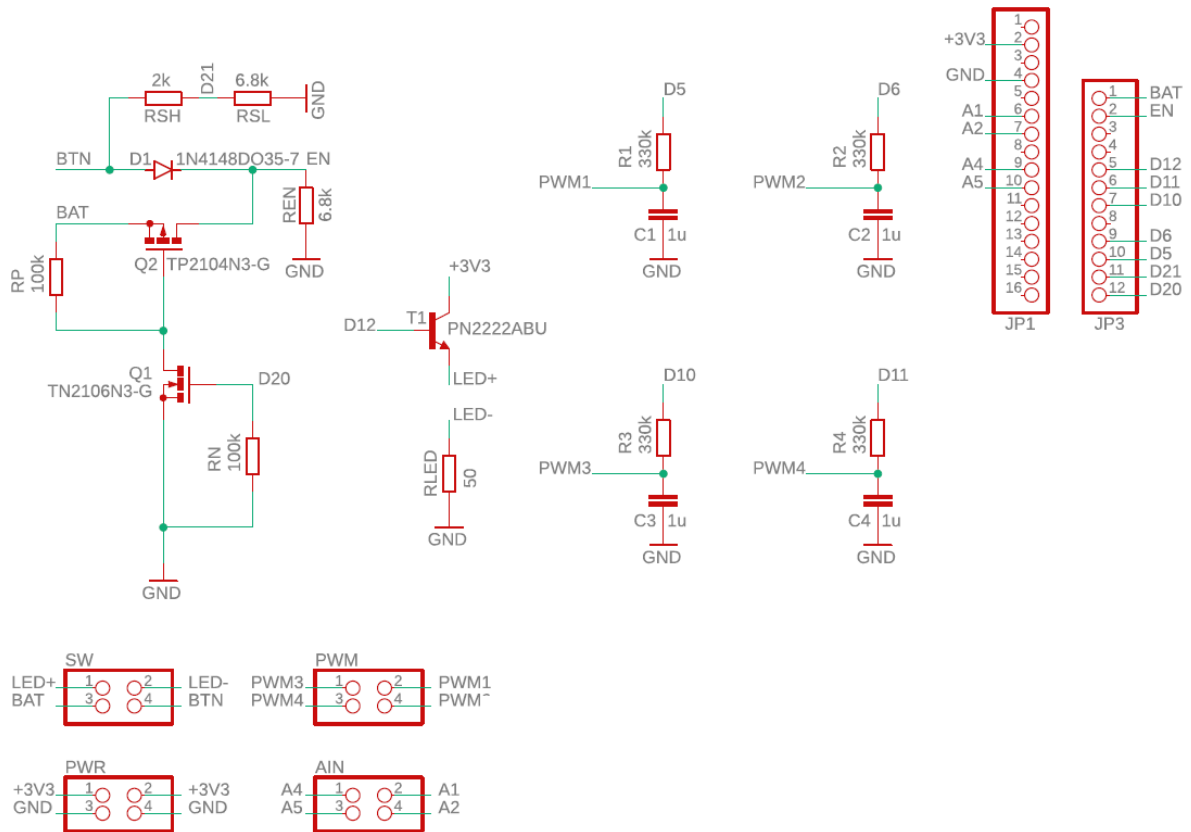


Figura 35. Esquema de la placa Feather.

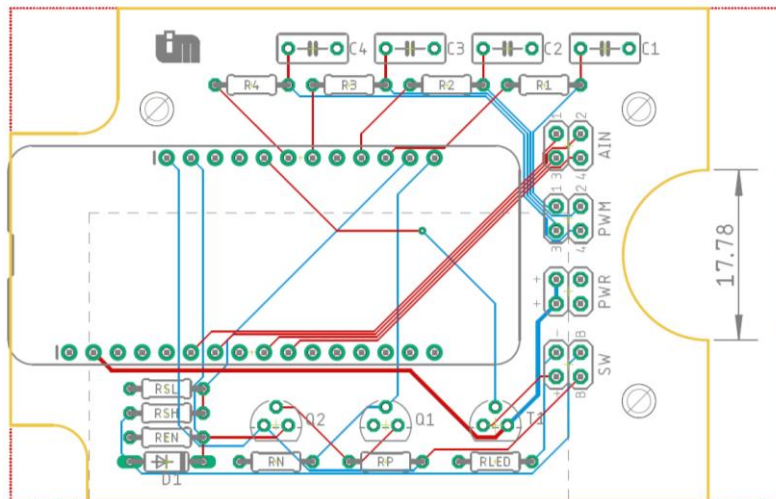


Figura 36. Board de la placa Feather.

➤ Placa de acondicionamiento

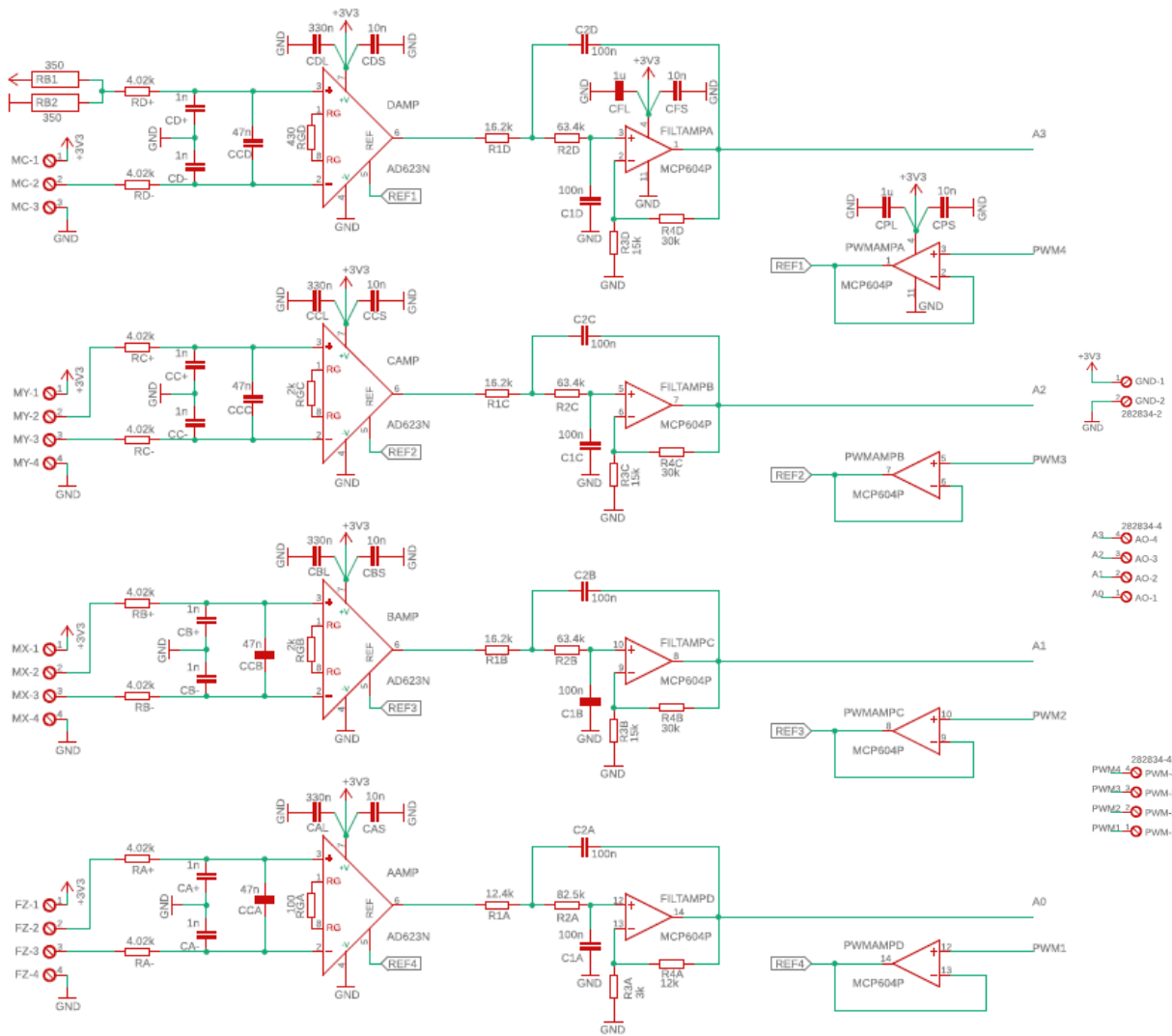


Figura 37. Esquema de la placa de acondicionamiento.

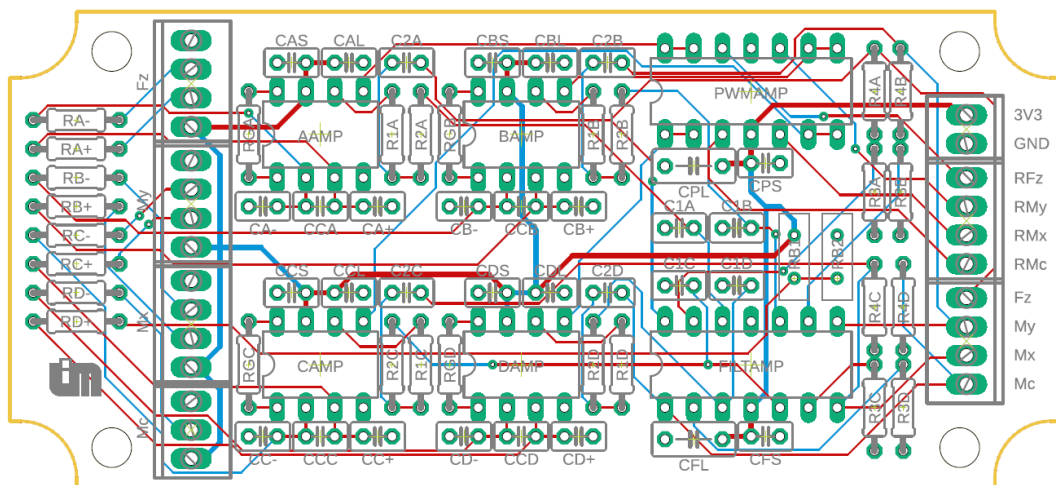


Figura 38. Board de la placa de acondicionamiento.

Finalmente, el diseño de las placas sería el siguiente:

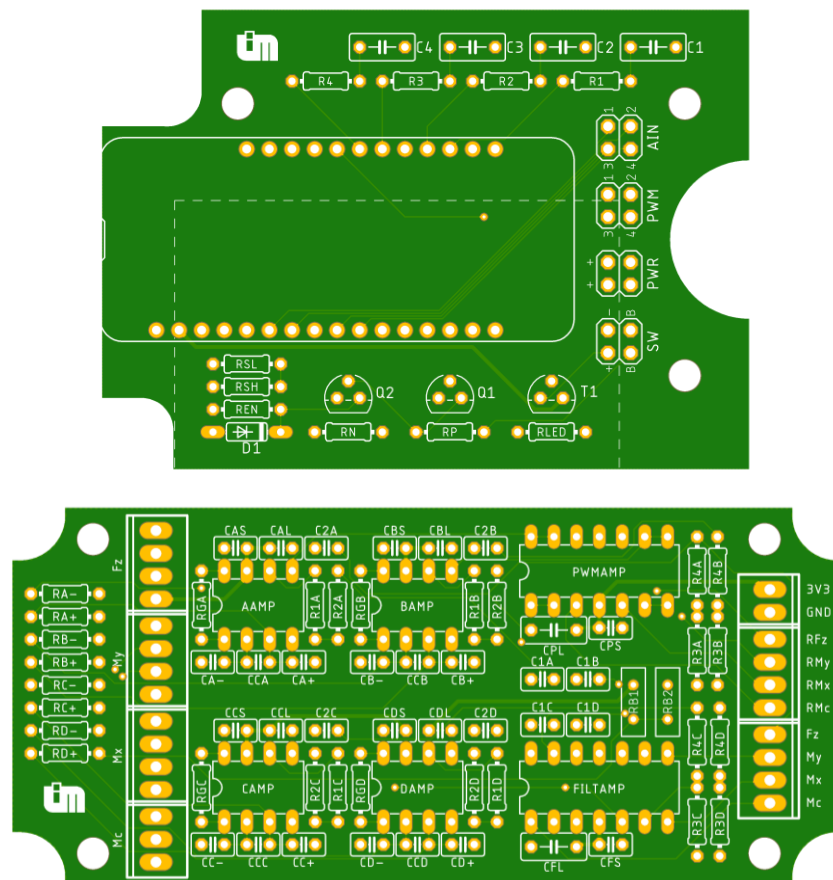


Figura 39. Diseño final de las placas.

Como se comentó anteriormente, cada placa irá ubicada dentro de una caja ajustada a su tamaño, una de ellas necesitará caja apantallada mientras que la otra será de plástico. Sin embargo, ambas deberán cumplir los siguientes objetivos:

- Robustez para proteger a los sistemas electrónicos de golpes y caídas
- Aislar a los sistemas electrónicos de las condiciones medioambientales (Polvo y humedad), así como de ruidos ocasionados por la red WiFi.
- Mínimo tamaño y peso posibles que sean lo más cómodas posibles para los pacientes.
- Posibilidad de apertura fácil para acceder a los elementos electrónicos en caso de ser necesario.

Además de los circuitos comentados anteriormente, se puede observar que en el diseño de la placa que contiene la Feather existen dos circuitos adicionales que no se han comentado. Estos circuitos son para lograr un mejor manejo de la placa por parte del usuario. Uno de ellos corresponde con la instalación de un LED que indique si la placa se encuentra encendida y si se ha conectado a la red WiFi, y el otro, con la instalación de un botón para el encendido y apagado de la misma.

5.6 Circuito del LED

En la parte externa de la caja que contiene la placa con la Feather se instaló un LED que permite saber si la placa se encuentra encendida y si se ha conectado a la WiFi. Cuando la placa esté encendida, dicho LED alumbrará en forma de “parpadeo” y cuando se conecte a la WiFi cesará el parpadeo y alumbrará de color rojo, de esta manera se podrá saber el estado de la conexión de la placa a pesar de estar dentro de la caja.

Para el encendido del LED, se añadió a la placa un montaje como el que se muestra a continuación. Esto se realiza debido a que se tiene una limitación de 7mA en los pines de la Feather y se quiere que el LED funcione a su corriente nominal. Para ello se implementó un sistema que actúa como fuente de corriente constante. A continuación, se explica el funcionamiento del montaje.

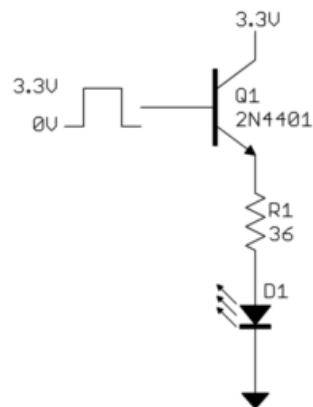


Figura 40. Montaje para el encendido del LED.

Utilizando un transistor NPN, la caída de potencial entre la base y el emisor es de aproximadamente 0.7 V, mientras que el LED tiene una caída de tensión de 2.0 V ya que cuando se conecta un LED, éste no tiene resistencia interna, dejando pasar toda la corriente, pero sí tiene una caída de potencia. Por lo tanto, quedarán aproximadamente 0.6 V a través de la resistencia cuando esté encendido. De esta manera se permitirá regular la corriente que fluye a través del LED en función de la resistencia, siguiendo la siguiente ecuación:

$$I_R = \frac{0.6}{R} = 12 \text{ mA} \quad (5.41)$$

Una ventaja de este circuito es que funciona de manera similar a una fuente de corriente, de manera que siempre se tendrá la misma corriente en función de la resistencia, sin importar el valor del voltaje de alimentación. El colector del transistor puede conectarse a un voltaje más alto que 3.3 V y esto no cambiará la corriente a través del LED, solo la caída de voltaje en el transistor que no estará ni en régimen de saturación ni de corte, sino que se encuentra en el régimen de comportamiento lineal. Esto puede ser útil si la fuente de alimentación proviene de un regulador pequeño y la corriente del LED agregara una carga significativa.

En general, en este montaje se puede vincular el colector a cualquier suministro práctico desde 3.3V hasta 11.6 V. Ni siquiera es necesario regularlo. Podría fluctuar activamente en cualquier lugar dentro de ese rango y la corriente del LED se mantendría estable. Este circuito, además, es muy tolerante a las variaciones de las características

del transistor. Mientras el transistor tenga una ganancia mínima, que está muy por debajo de lo que ofrecen los transistores de señal más pequeños, el circuito funcionará bien.

Para el cálculo de la resistencia que se requiere, se empleó la ecuación 5. 41. Si se sabe que la Intensidad nominal a la que funciona el LED es 12 mA , se necesitará una resistencia de unos $50\ \Omega$.

5.7 Circuito Apagado/Encendido.

Para el apagado y encendido de las placas, se dispuso de un botón ubicado en la parte exterior de la caja que contiene a la Feather. Este botón funciona como un pulsador, donde la electrónica es la encargada de controlar el encendido y el apagado.

El circuito que se muestra a continuación permite que, empleando pocos componentes, al presionar un pulsador se encienda el sistema y para apagarlo, se puede tanto aplicar el mismo método, como emplear el software con un temporizador o programándolo para que, por ejemplo, la placa se apague cuando la batería se encuentre por debajo de un umbral. Este método es una forma de autoproteger el sistema, haciéndolo más seguro y con menos probabilidades de que permanezca encendido después de haberlo utilizado.

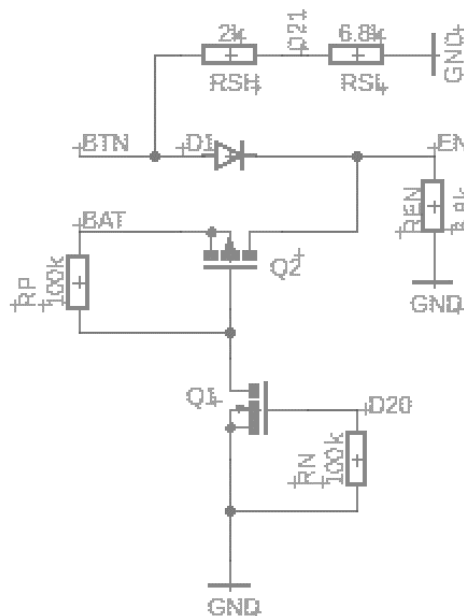


Figura 41. Montaje para el encendido y apagado de la placa.

La Feather tiene un regulador de voltaje que tiene como entrada la batería (BAT en la figura 41), como salida los 3.3V regulados, y un pin “enable” (EN en la figura 41), que cuando baja de 0.4V desconecta la salida de 3.3V. Además hay una resistencia pull-up de $100\text{ k}\Omega$ entre el pin EN y la entrada de la batería.

En la parte superior del esquema de la figura 41 hay un divisor de tensión que hace que la señal en D21 sea de unos 3.3V al presionar el pulsador, para poder detectar la pulsación desde la Feather (El voltaje de la Feather puede variar entre 3.7 y 4.2 V).

La Feather permite acceder al voltaje de la batería (BAT) y al pin EN. El pulsador se sitúa entre BTN y BAT, de modo que al cerrarlo, el voltaje en BTN se hace igual al de la batería. Esto hace que la tensión en EN sea igual a la de la batería, activando el regulador de 3.3V y encendiendo por tanto el microcontrolador.

Una vez encendido el microcontrolador, lo primero que tiene que hacer es poner su pin D20 a 3.3 V (hasta este momento, hay que mantener el pulsador cerrado). Cuando D20 se pone a 3.3 V, el MOSFET Q1 (de canal N) se cierra al elevarse su VGS. Esto cierra también el MOSFET Q2 (de canal P), ya que su VGS se hace negativo. Si Q2 está cerrado, BAT queda conectado a EN, y se puede soltar el pulsador sin que se apague el sistema. En cualquier momento, si se pone el pin D20 a 0 V, el sistema se apagará, ya que se abrirá Q1, y eso hará que se abra también Q2.

El pin EN no se puede poner a tierra porque, al cerrar tanto el pulsador como Q2, se estaría cortocircuitando la batería. Para poder reducir el voltaje de EN por debajo de 0.4V cuando los transistores y el pulsador están abiertos, se coloca una resistencia de 6.8 K Ω a tierra que, junto con la resistencia pull-up de 100 K Ω que llevaría la Feather entre EN y BAT, form un divisor de tensión.

Con el sistema funcionando, se pueden detectar pulsaciones del botón en el pin D21, ya que el diodo D1 evita que BTN esté al mismo voltaje en EN.

Finalmente, el funcionamiento será el siguiente, Para encender la placa habrá que mantener pulsado el botón durante unos segundos, hasta que arranque la Feather y al soltar ésta se quedará encendida gracias a la programación por software, se deberá mantener unos segundos pulsado de manera que le dé tiempo a la Feather a arrancar y poner en "Alto" el pin del transistor sin que se vuelve a apagar. Una vez que este encendida, cada vez que se pulse el botón, la Feather lo va a detectar y se puede programar para que, si mantiene pulsado un tiempo determinado, el pin de controlador cambie a "Bajo" y se apague o por ejemplo si se detecta que baja de un umbral de carga la batería, el pin cambie a "Bajo" y se apague automáticamente. Este montaje brinda diferentes posibilidades.

6 SOFTWARE DE ADQUISICIÓN Y VISUALIZACIÓN DE DATOS

Una de las etapas de mayor importancia para llevar a cabo la realización de este trabajo es el proceso de adquisición y visualización de datos. Para ello se utilizaron dos lenguajes de programación que son: Arduino y Python. Por un lado, se empleó el software de Arduino para programar el microcontrolador de la placa Feather. A través de este software se genera el PWM y se envía la señal a la misma placa para realizar el equilibrado del puente, además se recibe la información del puente de Wheatstone después de haber pasado por circuito de acondicionamiento de la señal. Por otro lado, se utilizó Python para generar la interfaz gráfica y la visualización de los resultados anteriormente recibidos, y para enviar al programa de Arduino la orden de generar el PWM que permite el equilibrado del puente, como se ha descrito anteriormente.

En los apartados siguientes se explicará con detalle el funcionamiento de los softwares utilizados para la adquisición y visualización de datos comentados anteriormente, así como la estructura del programa que se realizó en cada uno de ellos para conseguir cumplir los objetivos del trabajo.

6.1 Software de Arduino

Arduino es un programa para microcontroladores que fue desarrollado en 2005 y comenzó a desarrollarse como un proyecto estudiantil. Hoy en día se utiliza para hacer que la creación de aplicaciones interactivas y otros programas sea mucho más accesible para los usuarios permitiendo que los usuarios carguen un programa a un microcontrolador sin la necesidad de un chip u otro dispositivo. Arduino incluye una gama de herramientas y funciones y viene equipado en una plataforma de código abierto.

La plataforma Arduino tiene un lenguaje propio que está basado en C/C++ y por ello soporta las funciones del estándar C y algunas de C++. Sin embargo, es posible utilizar otros lenguajes de programación y aplicaciones populares en Arduino como Java, Processing, Python, Mathematica, Matlab, Perl, Visual Basic, etc. Esto es posible debido a que se comunica mediante la transmisión de datos en formato serie que es algo que la mayoría de los lenguajes anteriormente citados soportan. Para los que no soportan el formato serie de forma nativa, es posible utilizar software intermediario que traduzca los mensajes enviados por ambas partes para permitir una comunicación fluida. Es bastante interesante tener la posibilidad de interactuar con Arduino mediante esta gran variedad de sistemas y lenguajes puesto que dependiendo de cuales sean las necesidades del problema que vamos a resolver podremos aprovecharnos de la gran compatibilidad de comunicación que ofrece.

El entorno de desarrollo de este software es sencillo e intuitivo, y además puede descargarse gratuitamente desde su página oficial para distintos sistemas operativos. Está formado por una serie de menús, una barra de herramientas con botones para las funciones comunes, un editor de texto donde escribiremos el código, un área de mensajes y una consola de texto que recibe el nombre de monitor serial, es una ventana del que permite al usuario enviar y recibir desde el ordenador datos textuales a la placa Arduino usando el cable USB. Es importante elegir la misma velocidad de transmisión que se haya especificado en el programa ejecutado en la placa, porque si no, los caracteres transferidos no serán reconocidos correctamente.

6.2 Python

Python es un lenguaje de programación de propósito general muy poderoso y flexible, a la vez que sencillo y de fácil utilización. Es un lenguaje que permite procesar fácilmente todo tipo de estructuras de datos, tanto numéricos como de texto.

La idea surgió en 1989 cuando su creador Guido van Rossum se enfrentó a las deficiencias del lenguaje ABC. Rossum comenzó a trabajar en el desarrollo de un nuevo lenguaje que integrara todas las características positivas del lenguaje ABC y las nuevas características deseadas, como la extensibilidad y el manejo de excepciones. De esta manera, Python 1.0 fue lanzado en 1994; Tomó prestado el módulo del sistema de Modula-3, tuvo la capacidad de interactuar con el sistema operativo Amoeba, e incluía herramientas de programación funcional.

En la actualidad, es considerado un lenguaje de alto nivel interpretado, orientado a objetos con semántica dinámica. Su estructura de datos incorporada de alto nivel, combinada con la tipificación y vinculación dinámica, lo hacen muy atractivo para el desarrollo rápido de aplicaciones, así como para su uso como un lenguaje de secuencias para conectar componentes existentes. La sintaxis sencilla basada en la indexación enfatiza la legibilidad y por lo tanto reduce el coste del mantenimiento del programa. Python admite módulos y paquetes, lo que fomenta la modularidad del programa y la reutilización del código.

El intérprete de Python y la amplia biblioteca estándar están disponibles en forma de código fuente o binario sin cargo para todas las plataformas principales, y se pueden distribuir libremente desde su sitio web, el mismo sitio contiene también distribuciones y enlaces de muchos módulos libres de Python de terceros, programas y herramientas, y documentación adicional.

Con la utilización de este lenguaje de programación se puede alcanzar una mayor productividad debido a que no hay ningún paso de compilación, el ciclo de edición-prueba-depuración es increíblemente rápido. La depuración de los programas es sencilla: un error o un input incorrecto nunca causará un error de segmentación, cuando el intérprete descubre un error, genera una excepción. Cuando el programa no captura la excepción, el intérprete imprime un informe de las líneas que contienen el error. Un debugger de nivel fuente permite la inspección de las variables locales y globales, evaluación de expresiones, establecimiento de puntos de interrupción o breakpoints, analizar el código línea a línea, etc. Sin embargo, a menudo, la forma más rápida de depurar un programa es añadir algunas instrucciones de impresión por pantalla: el ciclo de edición -prueba - depuración rápido hace que este enfoque sencillo sea muy efectivo.

A día de hoy, la última versión existente de Python es la 3.7, incluyendo importantes mejoras en cuanto a velocidad de ejecución y utilización de memoria. Sin embargo, esto no es tan relevante como el hecho de que se trata de un lenguaje que se encuentra en continua evolución y constantemente actualizado. Sus grandes ventajas, como se comentaba anteriormente, son la modularidad y la extensibilidad a diferentes lenguajes. La modularidad tiene relevancia en la comunidad de desarrolladores que elaboran y mantienen una gran cantidad de librerías para ampliar el uso de este lenguaje, mientras que la extensibilidad está fundamentada en la facilidad de exportar este código a otros lenguajes. Estas son las razones principales por las que está considerado uno de los lenguajes más populares hoy en día y más vivos en cuanto a desarrollo y ampliación de capacidades.

6.2.1 Software Qt

Qt es un entorno de trabajo multiplataforma orientado a objetos, ampliamente usada para desarrollar software que utilice interfaz gráfica de usuario, así como diferentes tipos de herramientas para la línea de comandos y consolas para servidores que no necesitan una interfaz gráfica de usuario. Éste es desarrollado como un software libre y de código abierto a través de Qt Project, donde participa tanto la comunidad, como desarrolladores de otras empresas como Nokia y Digia.

El principal motivo por el que Qt se ha hecho tan popular es su propiedad de ser multiplataforma, esto significa que, con un mismo código, las aplicaciones se pueden compilar sin tocar una sola línea en distintos sistemas operativos. Qt utiliza el lenguaje de programación C++ de forma nativa, sin embargo, sus librerías están disponibles en otros lenguajes de programación como son Python (PyQt), Java (Jambi), JavaScript, etc...

Además, proporciona una serie de herramientas y documentación imprescindibles para el desarrollador:

- Qt Designer: Sirve para diseñar y construir interfaces gráficas de usuario (GUI) a partir de widgets Qt. Se puede componer y personalizar sus widgets o diálogos en un editor visual y probarlos utilizando diferentes estilos y resoluciones.
- Qt Linguist: Sirve para localizar aplicaciones. Contiene herramientas para los roles típicamente involucrados en la localización de aplicaciones.
- Qt Assistant: Contiene la documentación.
- Qmake: Sirve para crear aplicaciones para diferentes plataformas de destino.

Las clases Qt emplean un mecanismo de señales/ranuras o Signals/Slots para comunicarse entre objetos independientes facilitando la creación de componentes de software reutilizables. Este entorno de trabajo es más que un conjunto de herramientas GUI. Incluye abstracciones de sockets de red, hilos, Unicode, expresiones regulares, bases de datos SQL, SVG, OpenGL, XML, un navegador web totalmente funcional, un sistema de ayuda, un marco multimedia, así como una rica colección de widgets GUI

6.2.2 Bibliotecas PyQt en Python

Como se dijo anteriormente Python es un lenguaje simple pero potente. Su simplicidad hace que sea fácil de utilizar, pero su capacidad permite que se puedan crear aplicaciones grandes y complejas. Gran parte de la potencia de Python proviene de su amplio conjunto de módulos de extensión que proporcionan una amplia variedad de funciones, incluyendo servidores HTTP, acceso a bases de datos, herramientas de compresión de datos y, por supuesto, interfaces gráficas de usuario. Los módulos de extensión suelen implementarse en Python, C o C ++. Utilizando herramientas como SIP, es sencillo crear un módulo de extensión que encapsule una biblioteca C o C ++ existente. De esta manera, Python puede convertirse en el pegamento para crear nuevas aplicaciones de bibliotecas establecidas.

PyQt es un enlace de la biblioteca gráfica Qt para el lenguaje de programación Python. La biblioteca está desarrollada por la firma británica Riverbank Computing y está disponible para Windows, GNU/Linux y Mac OS X bajo diferentes licencias. Éste reúne el framework de aplicaciones multiplataforma Qt en C++ y el lenguaje interpretado en multiplataforma Python. PyQt es capaz de generar código Python desde Qt Designer y también es posible agregar nuevos controles GUI escritos en Python a Qt Designer.

De esta manera, PyQt combina todas las ventajas tanto de Qt como de Python para tener todo el poder de Qt, y ser capaz de explotarlo con la simplicidad de Python.

6.3 Estructura del programa

El programa que se va a explicar a continuación consta de 2 archivos.

- ArduinoPlot
- Main_crutches.py

6.3.1 ArduinoPlot

Este programa corto y sencillo es el encargado de habilitar la comunicación inalámbrica a través de la WiFi para poder recibir la información procedente de la placa Feather, es decir, la que se tiene de las muletas después de haber pasado por el circuito de acondicionamiento. Además, se encarga de generar el PWM que se necesita para el equilibrado del Puente de Wheatstone, como se dijo anteriormente.

En primer lugar, se incluyen las librerías <WiFi101.h> y <WiFiUdp.h> necesarias para la comunicación, así como una cabecera que contiene el nombre de la network SSID y la contraseña. Seguidamente, se verifica que se pueda llevar a cabo la conexión y una vez ésta se ha establecido, se crea un puerto UDP (User Datagram Protocol).

UDP es un protocolo del nivel de transporte basado en el intercambio de datagramas. Permite el envío de datagramas a través de la red sin que se haya establecido previamente una conexión, ya que el propio datagrama incorpora suficiente información de direccionamiento en su cabecera. Tampoco tiene confirmación ni control de flujo, por lo que los paquetes pueden adelantarse unos a otros. Su principal ventaja es que provoca poca carga adicional en la red ya que es sencillo y emplea cabeceras muy simples. Aunque pueda parecer un problema grave que este protocolo no utilice control de flujo de paquetes, en realidad no lo es. Los sensores transmiten a una frecuencia que hace poco relevante si los paquetes llegan ligeramente desordenados, es un error asumible que se pierda algún paquete o no llegue en el orden correcto. En las gráficas se puede apreciar que la respuesta es inmediata al generar esfuerzos en los sensores y los datos de frecuencia de paquetes recibidos garantizan que se pierden muy pocos paquetes.

Una vez abierto el puerto UDP, entra en una rutina de esperar a recibir un paquete. Cuando recibe un paquete, lo lee y esto sirve para guardar la dirección a donde tiene que enviar los datos. Esto se hace mediante la función "packetSize = Udp.parsePacket()" empleada para recibir el paquete y procesarlo. Se establece una configuración de conexión Cliente-Servidor en la que el ordenador está actuando de cliente y el programa de Arduino como servidor, en el que escucha o se conecta a través de un puerto fijo. Cada vez que el ordenador se conecta al servidor, como es una conexión saliente, el sistema operativo le asigna un puerto aleatorio, dicha función se emplea para guardar el puerto asignado y de esta manera el ordenador sabe que todo lo que reciba después lo tiene que mandar a esa dirección.

Una vez establecida la conexión UDP, se tienen dos funciones importantes, por un lado, si el programa recibe del servidor el comando de equilibrado, éste se ejecuta haciendo que, con un PWM, el voltaje en un punto específico sea el previamente establecido, esto se realiza mediante un controlador "P" que sigue el siguiente algoritmo. La salida del controlador será proporcional a la señal de error, que es la diferencia entre el punto objetivo que se desea y la variable de proceso. Es decir, será proporcional al resultado del producto entre la señal de error y la ganancia proporcional.

Esto puede ser expresado matemáticamente con la siguiente expresión:

$$P_{out} = K_p \cdot e(t)$$

Donde:

- P_{out} : Salida del controlador proporcional
- K_p : Ganancia proporcional
- $e(t)$: Error de proceso instantáneo en el tiempo t .

Este valor de PWM conseguido pasa a través de un circuito Rc para el acondicionamiento de la señal y luego se introduce por el V_{ref} del amplificador AD623. De esta manera se logra el equilibrado del puente. Por otro lado, se tiene un temporizador de tal manera que, cada 10 milisegundos se envíen los parámetros recibidos del circuito de amplificación al servidor para poder hacer las gráficas y evaluar los resultados.

Además, se programó el parpadeo de un LED cuando la placa se encuentre encendida y el alumbrado continuo cuando se logre la conexión vía WiFi, así como el mecanismo mediante un botón para el encendido y apagado de la placa.

6.3.2 Main_crutches.py

Este programa se encarga principalmente de generar la interfaz gráfica y permitir la visualización de los resultados recibidos del programa de Arduino, además permite el equilibrado del puente mediante un botón, cuando el usuario lo presione, se envía una señal al otro programa que tiene comunicación directa con la Feather para que genere el PWM del valor previamente calculado.

En este programa se tiene un objeto que contiene un socket de red o socket UDP, éste cada cierto tiempo verifica si tiene algún contenido, en el caso de que así sea, coge el paquete, mira de donde viene, se extraen los datos, se clasifican y se envían a las curvas correspondientes.

Dentro de la clase, existen diferentes métodos:

- *self.initSocket*:

Encargada de establecer la comunicación con el servidor, se envía un mensaje vacío con la finalidad de que el otro programa guarde la dirección de donde fue enviado el mensaje y sepa a dónde enviar la información, Esto se hace para los dos puertos de conexión WiFi, uno para cada Feather.

- *self.initPlot*:

Genera la ventana principal, haciendo la distribución y proporción de las 4 gráficas que se van a mostrar, así como la configuración de los colores de las líneas de datos, ejes, límites, fondo, etc.

Además, se encarga de la configuración de los dos botones de equilibrado automático, los cuales tienen incluido un método (*equilibradoAutomatico(self, equi)*) para cada botón, los cuales se activan si se oprime alguno de ellos, lanzando unos comandos a los dispositivos para que genere el PWM respectivo para cada puente de cada muleta.

- *self.updatePlot*:

Se encarga de actualizar las gráficas periódicamente con los datos obtenidos de las muletas, esta función se lleva a cabo una vez cada 10 milisegundos.

Tanto el código de Arduino "ArduinoPlot" como el código de Python "Main_crutches.py" se encuentran comentados en el apartado final del documento de los anexos.

7 MONTAJE Y RESULTADOS

El montaje de las placas en las muletas ha consistido en lo siguiente: en primer lugar, se mandaron a fabricar las cuatro placas, dos de la Feather y dos de amplificación, como se dijo anteriormente. Además, se compraron los componentes que van soldados a cada una de ellas (resistencias, condensadores, amplificadores, diodos, transistores, pines de soldadura, entre otros) así como las cuatro cajas correspondientes. Una vez se tuvo todo el material se procedió a soldar todos los componentes en las placas fundiendo estaño sobre los *pads* de soldadura.

Cuando se tuvieron todas las cajas con sus componentes soldados, se comprobó el funcionamiento de cada una de ellas asegurando que funcionaban adecuadamente los 4 canales de transmisión de datos (Fz , My , Mx , Mc) de cada placa y surgió un problema con una de ellas. La célula de carga que recibía los datos del esfuerzo de compresión (Fz) de una de las muletas, probablemente debido a tensiones residuales de montaje de las galgas, tenía un desequilibrio mucho mayor que el esperado, de 3 mV, es decir, más de 5 veces la carga nominal que se estimó para su funcionamiento. Por tanto, con el circuito de amplificación que se había planteado, el amplificador AD623 que tenía una ganancia $K_1 = 1000$ correspondiente a la primera de las dos etapas de amplificación, llegaba a una zona de saturación y dejaba de funcionar correctamente. Por esta razón se hizo un replanteamiento del circuito cambiando las resistencias para conseguir que el Amplificador AD623 en la primera etapa tenga una ganancia menor y en la segunda el resto de la necesaria para conseguir una amplificación total al final del circuito de 5000. Para ello se hicieron los siguientes cambios en las resistencias.

En el amplificador AD623, Sustituyendo el nuevo valor de $V_{in_{m\acute{a}x}} = (0.61 + 3) \text{ mV}$ en la ecuación 5.27 se obtuvo:

$$K_1 = 428.57 \text{ y } V_{REF} = 1.25\text{V}$$

Por tanto, sustituyendo en la ecuación 5.29 se necesita una resistencia:

$$R_g = 220 \text{ k}\Omega$$

De igual manera en el amplificador MCP6004 se cambió la ganancia a $K = 11$ y sustituyendo en la ecuación 5.31 se obtuvo los siguientes valores de resistencias:

$$R_1 = 6.8 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

Y sustituyendo en la ecuación 5.32

$$R_3 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_4 = 100 \text{ k}\Omega$$

De esta manera queda completamente definido el circuito de amplificación de este canal, el cual se comprobó que funciona correctamente.

Una vez que la placa funciona correctamente se procedió a el montaje en las cajas, en primer lugar, se comprobó que ambas placas encajaban perfectamente en sus cajas correspondientes, y una vez verificado, se procedió a acondicionar las mismas para que tuvieran los respectivos agujeros cada una de ellas. La caja que contiene la Feather tendrá un agujero para el cable USB que permita cargar la batería, un agujero para el botón de apagado y encendido de la placa y por último tres agujeros por donde pasarán cables hacia la placa de amplificación, por el primero saldrán los cables de 3.3V y tierra, por el segundo saldrá la señal del PWM para el equilibrado de los puentes y por el último pasan los cables

que salen de la etapa de amplificación que se verán por la interfaz gráfica. Por otro lado, la caja que contiene el circuito de amplificación tendrá los mismos tres agujeros de la caja anterior y 4 agujeros más por donde entran los cables de los puentes de galgas de las muletas.

Cuando se tuvieron las cajas acondicionadas para la colocación de las placas, se introdujeron las mismas, se soldaron los cables y se comprobó el funcionamiento final de las dos muletas simultáneamente. De esta manera se comprobó que las cuatro placas funcionan correctamente, obteniendo por la interfaz gráfica las curvas correspondientes al esfuerzo de compresión y los tres momentos de las dos muletas. En un principio el puente está sin equilibrar, y las curvas se encuentran desplazadas, pero tras presionar el botón correspondiente se equilibran automáticamente.



Figura 42. Montaje final placa Feather.

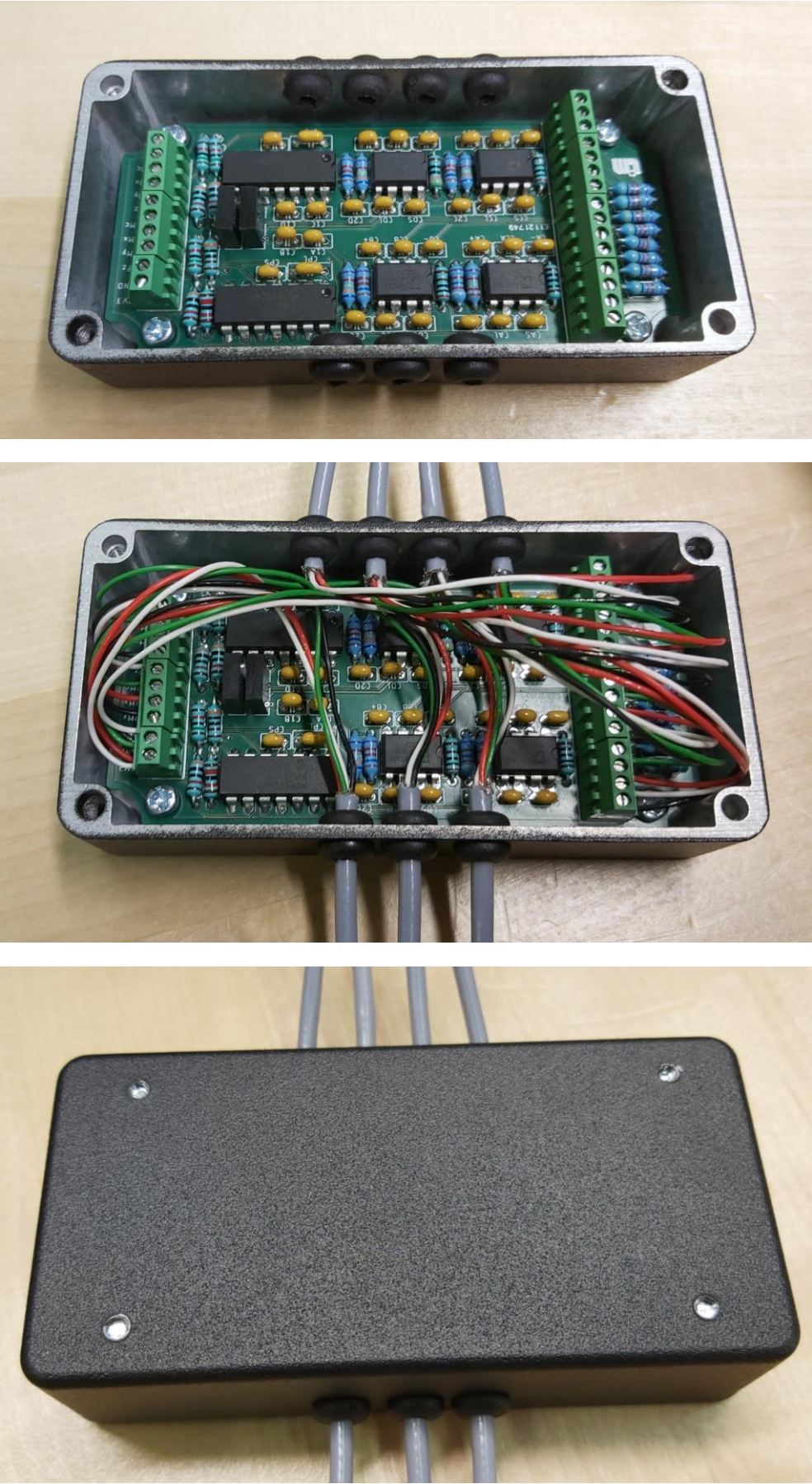


Figura 43. Montaje final placa Amplificación.



Figura 44. Montaje final de las placas en la muleta.

En la interfaz gráfica se representan, en la ventana superior izquierda, las curvas de compresión de las dos muletas, en la ventana superior derecha las curvas de momento flector en Y, en la ventana inferior izquierda de momento flector en X y en la ventana inferior derecha las curvas de momento que se toman en el apoyo del codo.

En la parte inferior de las cuatro ventanas se observan los dos botones de equilibrado automático, tanto para la muleta izquierda como para la muleta derecha.

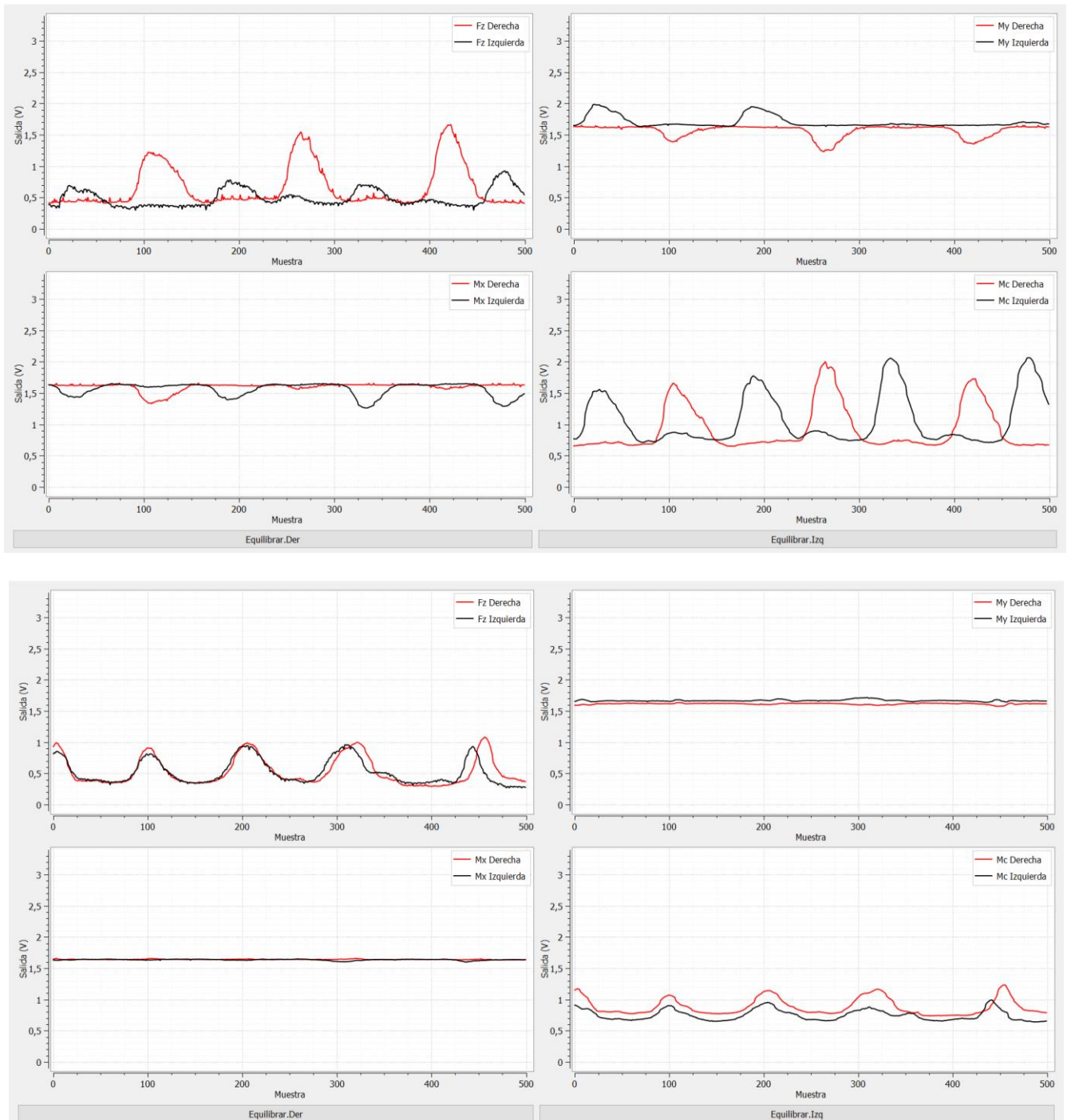


Figura 45. Funcionamiento del programa.

8 CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

8.1 Conclusión

Este trabajo tenía un objetivo principal muy marcado, el cual consistía en la implementación de un sistema inalámbrico que permitiera amplificar, filtrar y medir la señal del conjunto de galgas extensiométricas instaladas en un par de muletas. Como se pudo observar en el apartado anterior, este objetivo se ha cumplido. Se ha logrado desarrollar un sistema inalámbrico que va a facilitar el estudio del movimiento y la recogida de datos ya que como se ha dicho anteriormente, en el sistema con el que se contaba antes de la realización del trabajo, las muletas iban conectadas con cables y presentaban dificultades limitando la movilidad y la comodidad para los lesionados.

Para lograr completar el alcance de este objetivo principal fue necesario cumplir una serie de objetivos específicos a lo largo de todo el desarrollo, empezando por el diseño de un circuito de amplificación y filtrado de la señal de las galgas, la programación de un microcontrolador para adquirir la señal, la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica y por último el montaje de las placas en las correspondientes carcasas para conseguir mayor robustez y el aislamiento de los sistemas electrónicos para evitar daños y garantizar el funcionamiento.

Para la puesta en marcha del sistema simplemente será necesario mantener presionado el botón de la placa Feather durante unos segundos, en ese momento el LED que tiene el mismo botón empezará a parpadear, lo que significará que se ha encendido y se encuentra conectándose a la red WiFi, una vez que se conecte a la misma, el LED dejará de parpadear y se quedará alumbrando. En ese momento se puede abrir la interfaz gráfica, y se observan las cuatro ventanas que tienen dos curvas cada una de ellas que corresponden a los esfuerzos anteriormente mencionados. Como último paso, se debe equilibrar los puentes de galgas para conseguir los datos de manera adecuada, esto se consigue de una forma muy intuitiva, simplemente habrá que presionar los dos botones de equilibrado automático y esperar unos segundos a que se estabilice en el valor programado, manteniendo las muletas en una posición sin carga. Una vez completado este procedimiento el sistema estará listo para ser utilizado y cuando se quiera apagar, se repetirá el procedimiento inverso.

Finalmente se cuenta con un sistema que tiene capacidad para representar en tiempo real y registrar a 100 Hz los datos relativos a las cuatro curvas de cada muleta, que se corresponden con el esfuerzo de compresión y los tres momentos. Todo esto se consiguió con un presupuesto de materiales de menos de 400€ que se ve reflejado en los anexos, que está diseñado para sustituir al antiguo amplificador con el que se contaba en el laboratorio el cual está valorado en más de 6000€. El sistema antiguo tiene una resolución de 16 bits, y el nuevo de 12 bits, pero las placas de fuerza que se usan para medir las reacciones de los pies con el suelo también son de 12 bits, así que se puede considerar suficiente para esta aplicación.

8.2 Trabajo futuro

Si bien es cierto que se cumplieron los objetivos planteados para el trabajo y que el sistema cuenta con un funcionamiento correcto, como trabajo a futuro se podrían implementar un par de procedimientos posteriores en cuanto la utilización de las muletas, para su finalidad en la práctica.

En primer lugar, se podría realizar un proceso de calibración de las células de carga, que consistirá en comparar las células de las muletas con un instrumento conocido. En este caso se utilizará una placa de fuerza disponible en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica, la cual permite la medición de las tres componentes de la fuerza (F_x , F_y y F_z) así como de las tres componentes del momento (M_x , M_y y M_z) respecto al centro de la placa. Ésta será utilizada como un estándar de referencia para la calibración, aunque sólo se tomarán en cuenta las tres componentes de la fuerza.

Para ello se debe colocar la muleta encima de la placa, alineada con los ejes de la misma, y se le debe aplicar una carga variable tratando de que afecte a todos los grados de libertad, guardando los valores medidos por la placa y los voltajes de las células de carga simultáneamente. Así, para cada paso de tiempo se puede establecer que:

$$\begin{aligned}M_X &= F_{Y_{PLACA}} \cdot H_X \\M_Y &= F_{X_{PLACA}} \cdot H_Y \\F_Z &= F_{Z_{PLACA}}\end{aligned}\tag{8.1}$$

Donde H_X y H_Y son las distancias al extremo de la muleta de las células de carga M_X y M_Y respectivamente. Además, los voltajes de las células F_z , M_x y M_y de la muleta, teniendo en cuenta efectos de posibles acoplamientos, se corresponden con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}M_X &= K_1 \cdot V_{MX} + K_2 \cdot V_{MY} + K_3 \cdot V_{FZ} + C_1 \\M_Y &= K_4 \cdot V_{MX} + K_5 \cdot V_{MY} + K_6 \cdot V_{FZ} + C_2 \\F_Z &= K_7 \cdot V_{MX} + K_8 \cdot V_{MY} + K_9 \cdot V_{FZ} + C_3\end{aligned}\tag{8.2}$$

Si se igualan ambas expresiones se obtiene:

$$\begin{aligned}K_1 \cdot V_{MX} + K_2 \cdot V_{MY} + K_3 \cdot V_{FZ} + C_1 &= F_{Y_{PLACA}} \cdot H_X \\K_4 \cdot V_{MX} + K_5 \cdot V_{MY} + K_6 \cdot V_{FZ} + C_2 &= F_{X_{PLACA}} \cdot H_Y \\K_7 \cdot V_{MX} + K_8 \cdot V_{MY} + K_9 \cdot V_{FZ} + C_3 &= F_{Z_{PLACA}}\end{aligned}\tag{8.3}$$

De esta manera para cada uno de los tres grados de libertad (F_z , M_x y M_y) se tiene una ecuación para cada instante de tiempo y 4 incógnitas que se corresponden con los valores de K y C , es decir, un sistema de ecuaciones sobre determinado que se resuelve por mínimos cuadrados. De esta manera se calculan las 12 constantes que definen la calibración de la muleta. En el artículo [18] se indica cómo se resolvería la calibración teniendo en cuenta el movimiento de las muletas.

El último procedimiento a futuro consistiría en integrar los datos de las muletas instrumentadas a un programa de captura de movimiento completo de una persona, con visualización en tiempo real con el que se cuenta en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica. Es decir, sustituir la utilización del programa de Python como interfaz gráfica, el cual sirve como referencia de los datos obtenidos, por un programa en C++ que hace la captura del movimiento en tiempo real. Para desarrollar el programa resulta más cómodo hacerlo en el programa de Python, sin embargo, una vez hecho, la idea final es utilizarlo de manera integrada en el programa general.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Manchini, «Trabajo de Investigación Bioingeniería. UCA-CYT T.A.I 2.,» 2005.
- [2] G. Gismondi, «Ingeniería biomédica.,» *Revista Ciencia y Cultura*, nº 24, pp. 99-118, 2010.
- [3] F. Mouzo, «Tesis Doctoral. Análisis y simulación mediante dinámica directa de modelos multicuerpo humanos.,» 2018.
- [4] Alzate, E., Montes, J., Silva, C., «Medidores de deformación por resistencia: Galgas Extensiométricas.,» nº 34, 2007.
- [5] Yapur, M., Orellana, J., Tello, D., «Medición de Esfuerzos y Deformaciones en Barras Metálicas Utilizando Galgas Extensométricas.,» 2015.
- [6] Orellana, J., Tello, D., «Medición de esfuerzos y deformaciones en barras metálicas utilizando galgas extensiométricas.,» 2015.
- [7] K. Hoffmann, «Applying the wheatstone bridge circuit,» 1986.
- [8] A. Amil, «Trabajo de Fin de Grado. Instrumentación de un vehículo automóvil para el estudio de las fuerzas en el neumático.,» 2015.
- [9] Alciatore, D., Hstand, M., *Introducción a la mecatrónica*, 2008.
- [10] Moreno, A., Bonafonte, A., «Señales y Sistemas I. Filtros,» 2009.
- [11] W. Bolton, *Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en ingeniería mecatrónica*, Alfaomega, 1995.
- [12] Linales, R., Quijano, J., Holguín, G., «Implementación del protocolo bluetooth para la conexión inalámbrica de dispositivos electrónicos programables.,» *Scientia Et Technica [en línea]*, vol. X, nº 24, pp. 31-36, 2004.
- [13] C. Marín, «Bluetooth: criterios de selección y comparativa con otras tecnologías inalámbricas,» 2011.
- [14] B. Morgalo, «Módulo inalámbrico para redes de sensores biomédicos,» *Revista Científica de Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, vol. 31, nº 2, pp. 16-22, 2010.
- [15] D. Gutierrez, «Trabajo de Fin de Master. Diseño de redes móviles AD HOC en aplicaciones de transporte sobre entornos NS-2».
- [16] A. Varela, «Trabajo de Fin de Master. Sistema inalámbrico para monitorizar el movimiento de animales basado en sensores inerciales.,» 2017.
- [17] L. Ada, «Adafruit learning system. Adafruit Feather M0 Basic Proto,» 2019.
- [18] Lugrís, U., Carlín, J., Luaces, A., Cuadrado, J., «Gait analysis system for spinal cord-injured subjects assisted by active orthoses and crutches.,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, nº 227(4), p. 363–374, 2013.

- [19] «Data Sheet. AD623».
- [20] «Texas Instruments. Analysis of the Sallen-Key Architecture.,» 2002.. [En línea].
- [21] Cuadrado, J., Lugrís, U., Alonso, F.J., Font-Llagunes, J.M., «Aplicación de técnicas de dinámica multicuerpo al diseño de ortesis activas para ayuda a la marcha,» 2012.

10 ANEXOS

10.1 Presupuesto

Concepto	Fabricante	Modelo	Proveedor	Ref. prov.	Ud.	Precio/Ud.	Precio Tot.
PCB Amplificadores	Eurocircuits	N/A	Eurocircuits	N/A	2	27.830 €	55.66 €
PCB Feather	Eurocircuits	N/A	Eurocircuits	N/A	2	20.630 €	41.26 €
Batería LiPo 1000 mAh	SparkFun	PRT-13813	BricoGeek	BAT-0004	2	7.750 €	15.50 €
Adafruit Feather M0 WiFi	Adafruit	3010	RS	124-5500	2	32.830 €	65.66 €
Pulsador NO con LED rojo	Multicomp	MCPAS6-B2-M1CES2-5L3	Farnell	2146911	2	2.890 €	5.78 €
Diodo	ON Semiconductor	1N4148TR	RS	671-5477	2	0.053 €	0.11 €
Pasacables de goma	Pro-Power	PV2	Farnell	1189027	20	0.108 €	2.16 €

Resistencias							
Resistencia 350 Ω ±0.01%	Vishay Foil Resistors	Y0785350R000T9L	RS	684-1539	4	17.200 €	68.80 €
Resistencia 4,02 kΩ ±0.1%	TE Connectivity	YR1B4K02CC	RS	754-5853	16	0.176 €	2.82 €
Resistencia 16,2 kΩ ±0.1%	TE Connectivity	YR1B16K2CC	RS	755-0981	6	0.398 €	2.39 €
Resistencia 63,4 kΩ ±0.1%	TE Connectivity	YR1B63K4CC	RS	754-6786	6	0.398 €	2.39 €
Resistencia 12,4 kΩ ±0.1%	TE Connectivity	YR1B12K4CC	RS	755-0833	2	0.202 €	0.40 €
Resistencia 82,5 kΩ ±0.1%	TE Connectivity	YR1B82K5CC	RS	754-6979	2	0.398 €	0.80 €
Resistencia 330 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F330K	RS	149-105	8	0.123 €	0.98 €
Resistencia 51 Ω ±1%	TE Connectivity	LR1F51R	RS	148-180	2	0.135 €	0.27 €
Resistencia 100 Ω ±1%	TE Connectivity	LR1F100R	RS	125-1155	2	0.090 €	0.18 €
Resistencia 2 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F2K0	RS	148-578	6	0.130 €	0.78 €
Resistencia 430 Ω ±1%	TE Connectivity	LR1F430R	RS	148-411	2	0.135 €	0.27 €
Resistencia 15 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F15K	RS	125-1165	6	0.062 €	0.37 €
Resistencia 30 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F30K	RS	148-843	6	0.130 €	0.78 €
Resistencia 3 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F3K0	RS	148-613	2	0.135 €	0.27 €
Resistencia 12 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F12K	RS	148-758	2	0.102 €	0.20 €
Resistencia 100 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F100K	RS	125-1168	4	0.135 €	0.54 €
Resistencia 6.8 kΩ ±1%	TE Connectivity	LR1F6K8	RS	148-691	4	0.130 €	0.52 €

Sistema inalámbrico para la medición de esfuerzos de contacto en muletas
Pérez Porto Elisabet

Cajas							
Caja ABS	Hammond	1591XXMSBK	RS	818-0508	2	4.500 €	9.00 €
Caja aluminio	Hammond	1590GBK	RS	528-7094	2	9.480 €	18.96 €

Transistores							
Transistor BJT NPN	ON Semiconductor	PN2222ABU	RS	739-0555P	2	0.167 €	0.33 €
MOSFET canal N	Texas Instruments	TN2106N3-G	RS	177-9850	2	0.441 €	0.88 €
MOSFET canal P	Texas Instruments	TP2104N3-G	RS	879-3270	2	0.430 €	0.86 €

Condensadores							
Condensador 1 µF ±10%	Kemet	C322C105K5R5TA91707301	Farnell	2673124	12	0.460 €	5.52 €
Condensador 1 nF ±5%	Kemet	C320C102J1G5TA91707301	Farnell	2673121	16	0.240 €	3.84 €
Condensador 47 nF ±20%	Kemet	C320C473M5U5TA7303	Farnell	2575653	8	0.090 €	0.72 €
Condensador 330 nF ±10%	Kemet	C320C334K5R5TA91707301	Farnell	2673123	8	0.140 €	1.12 €
Condensador 10 nF ±5%	Kemet	C320C103J5G5TA91707301	Farnell	2673120	12	0.240 €	2.88 €
Condensador 100 nF ±5%	Kemet	C320C104J5R5TA7303	Farnell	2575975	16	0.230 €	3.68 €

Conectores							
Conector PCB 2.54 mm hembra 1x12	Samtec	SLW-112-01-T-S	Farnell	1803929	2	0.600 €	1.20 €
Conector PCB 2.54 mm hembra 1x16	Samtec	SLW-116-01-T-S	Farnell	2779550	2	0.820 €	1.64 €
Conector PCB 2.54 mm macho 1x12	Samtec	TSW-112-05-T-S	Farnell	2035138	2	0.350 €	0.70 €
Conector PCB 2.54 mm macho 1x16	Samtec	TSW-116-05-T-S	Farnell	2035142	2	0.430 €	0.86 €
Conector PCB 2.54 mm macho 2x2	Samtec	TSW-102-07-T-D	Farnell	2984553	8	0.164 €	1.31 €

Amplificadores							
Amplificador de instrumentación	Analog Devices	AD623ANZ	Farnell	9603700	8	4.180 €	33.44 €
Amplificador operacional 4x	Microchip	MCP6004-I/P	Farnell	1605571	4	0.390 €	1.56 €

Terminales de tornillo							
Terminal tornillo 2.54 mm 2x	TE Connectivity	282834-2	Farnell	2112482	2	0.490 €	0.98 €
Terminal tornillo 2.54 mm 3x	TE Connectivity	282834-3	Farnell	2396254	2	0.820 €	1.64 €
Terminal tornillo 2.54 mm 4x	TE Connectivity	282834-4	Farnell	2396253	10	1.440 €	14.40 €
						TOTAL (+ IVA)	374.41 €

10.2 Código de programación: ArduinoPlot

```
#include <SPI.h>
#include <WiFi101.h>
#include <WiFiUdp.h>

int status = WL_IDLE_STATUS;

// Datos de la Wifi en la pestaña: arduino_secrets.h
#include "arduino_secrets.h"

char ssid[] = SECRET_SSID;           // Network SSID (nombre)
char pass[] = SECRET_PASS;          // Network password (contraseña)
unsigned long t0 = 0;
unsigned int localPort = 2390;      // Puerto local de comunicación
char packetBuffer[255];             // Cadena para recibir el paquete
char replyBuffer[255];             // Cadena para enviar los datos
int HOLDTIME = 1000;
int ledPin = 12;                    // Pin conectado al LED

// Variables para el equilibrado
bool calib1 = false;
bool calib2 = false;
bool calib3 = false;
bool calib4 = false;

float PWM1 = 1;
float PWM2 = 1;
float PWM3 = 1;
float PWM4 = 1;

WiFiUDP Udp;

void setup() {
  pinMode(20, OUTPUT);              // Pin conectado al interruptor
  digitalWrite(20, HIGH);
  pinMode(21, INPUT);              // Pin conectado al interruptor
  digitalWrite(21, HIGH);
  pinMode(ledPin, OUTPUT);

  // Se hace parpadear el LED para indicar el encendido de la placa
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  delay(500);
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  delay(500);
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(ledPin, LOW);

  analogReadResolution(12);        //Resolución de 12 bits
  analogWriteResolution(12);
  pinMode(5, OUTPUT);              //Pin que recibe Fz
  analogWrite(5, 1);
  pinMode(6, OUTPUT);              //Pin que recibe My
  analogWrite(6, 1);
  pinMode(10, OUTPUT);             //Pin que recibe Mx
  analogWrite(10, 1);
  pinMode(11, OUTPUT);            //Pin que recibe Mc
  analogWrite(11, 1);

  WiFi.setPins(8,7,4,2);
```

```
// Verifica la presencia del apantallado
if (WiFi.status() == WL_NO_SHIELD) {
  while (true);

  // Se conecta a la red Wifi

  while ( status != WL_CONNECTED) {
    Serial.print("Attempting to connect to SSID: ");
    Serial.println(ssid);

    // Se conecta a la red WPA / WPA2
    status = WiFi.begin(ssid, pass);
    digitalWrite(ledPin, HIGH);           // Enciende el LED
    delay(10000);                         // Espera 10 segundos para la conexión:
  }
  Serial.println("Connected to wifi");
  Serial.println("\nStarting connection to server...");
  Udp.begin(localPort);
}

void loop() {

  float Ao1;                               // Variable para Fz
  float Ao2;                               // Variable para My
  float Ao4;                               // Variable para Mx
  float Ao5;                               // Variable para Mc
  float tiempo;
  unsigned long t = millis();

  // Apagado de la Placa
  long unsigned int start;                 // Variable de tiempo
  long unsigned int now;                  // Variable de tiempo

  if(digitalRead(21)){                    // Si el botón está presionado
    start = millis();                     // inicia el contador

    // Bucle mientras se mantiene pulsado el botón
    while(digitalRead(21)){
      now = millis();

      // Si el botón se mantiene presionado por 1000ms
      if(now > (start + HOLDTIME)){
        digitalWrite(ledPin,LOW);         // Se apaga el LED
        while(digitalRead(21)){
          delay(150);
          digitalWrite(20,LOW);           // Apaga el circuito
        }
      }
    }
  }

  // Variables para el equilibrado
  float k = 0.1;
  char Equilibrar [ ] = "False";
  // Si hay datos disponibles, lee el paquete
  int packetSize = Udp.parsePacket();
  if (packetSize)
  {
    // Lee el paquete en el packetBuffer
    int len = Udp.read(packetBuffer, 4095);
    if (len > 0) packetBuffer[len] = 0;

    // Recibe la orden para generar el PWM
    if (strcmp(packetBuffer, Equilibrar) == 0)
    {
      calib1 = true;
      calib2 = true;
    }
  }
}
```

```
        calib3 = true;
        calib4 = true;
    }

    Udp.beginPacket(Udp.remoteIP(), Udp.remotePort());
    Udp.write("Ok");
    Udp.endPacket();
}

if (calib1) {
    //Equilibra la curva de compresión Z en 0.33V mediante el PWM
    float error = 0.33-(analogRead(A1)*3.3/4095);
    PWM1 = constrain(PWM1 + k*error, 0 , 4095);
    analogWrite(5, PWM1);
    if (abs(error) < 0.001)
        calib1 = false;
}
if (calib2) {
    //Equilibra la curva de flexión Y en 1.65V mediante el PWM
    float error = 1.65-(analogRead(A2)*3.3/4095);
    PWM2 = constrain(PWM2 + k*error, 0 , 4095);
    analogWrite(6, PWM2);
    if (abs(error) < 0.001)
        calib2 = false;
}
if (calib3) {
    //Equilibra la curva de flexión X en 1.65V mediante el PWM
    float error = 1.65-(analogRead(A4)*3.3/4095);
    PWM3 = constrain(PWM3 + k*error, 0 , 4095);
    analogWrite(10, PWM3);
    if (abs(error) < 0.001)
        calib3 = false;
}
if (calib4) {
    //Equilibra la curva de flexión C en 0.66V mediante el PWM
    float error = 0.66-(analogRead(A5)*3.3/4095);
    PWM4 = constrain(PWM4 + k*error, 0 , 4095);
    analogWrite(11, PWM4);
    if (abs(error) < 0.001)
        calib4 = false;
}

// Cada 10 millis se actualiza la información
if (t - t0 >= 10) {
    Ao1 = analogRead (A1)*3.3/4095;
    Ao2 = analogRead (A2)*3.3/4095;
    Ao4 = analogRead (A4)*3.3/4095;
    Ao5 = analogRead (A5)*3.3/4095;
    tiempo = t/1000;

    // Se envían los parámetros para la interfáz gráfica
    sprintf(replyBuffer, "%f %f %f %f %f", Ao1, Ao2, Ao4, Ao5, tiempo);

    // Se envía la respuesta a la dirección IP y al puerto de la feather
    Udp.beginPacket(Udp.remoteIP(), Udp.remotePort());
    Udp.write(replyBuffer);

    Udp.endPacket();
    t0=t;
}
}
```


10.3 Main_crutches.py

```
import numpy as np
import time, sys, socket
from guiqwt.builder import make
from guiqwt.curve import CurvePlot
from PyQt5.QtGui import QIcon
from PyQt5.QtWidgets import QWidget, QMainWindow, QMessageBox, QApplication, QGridLayout
from PyQt5.QtWidgets import QFrame, QDialog, QInputDialog, QHBoxLayout, QPushButton
from PyQt5.QtCore import Qt, QTimer

class ArduinoPlot(QWidget):
    def __init__(self):
        QWidget.__init__(self)
        self.initUI()
        plotLen = 500 # Longitud de la gráfica
        host1 = '192.168.137.187'
        host2 = '192.168.137.47'
        port = 2390
        data = []
        n1 = 0
        n2 = 0
        s = False
        x = np.arange(0, plotLen)
        y1 = np.zeros(plotLen)
        y2 = np.zeros(plotLen)
        y3 = np.zeros(plotLen)
        y4 = np.zeros(plotLen)
        y5 = np.zeros(plotLen)
        y6 = np.zeros(plotLen)
        y7 = np.zeros(plotLen)
        y8 = np.zeros(plotLen)
        timer = QTimer()
        skip = 0
        max1 = 0
        max2 = 0

    def initUI(self):
        self.initSocket() #Se establece la comunicación con el servidor
        self.initPlot() #Se definen las gráficas y botones
        if self.s:
            #Se actualizan los valores de las gráficas
            self.timer.timeout.connect(self.updatePlot)
            self.timer.start(0)
        else:
            sys.exit()

    def initSocket(self):
        self.s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
        self.s.sendto(bytearray('Connecting', 'UTF-8'), (self.host1, self.port))
        self.s.recvfrom(1024)
        self.s.sendto(bytearray('Connecting', 'UTF-8'), (self.host2, self.port))
        self.s.recvfrom(1024)
        self.s.setblocking(0)

    def initPlot(self):
        # Se crea una lista de 4 gráficas y 2 botones
        self.plots = [CurvePlot(xlabel="Muestra", ylabel="Salida (V)") for i in range(4)]
        self.pushButton1 = QPushButton("Equilibrar.Der",self)
        self.pushButton2 = QPushButton("Equilibrar.Izq",self)

        # Se crea un layout de cuadrícula vacío
        self.mainLayout = QGridLayout()
        self.lowerLayout1 = QHBoxLayout()
        self.lowerLayout2 = QHBoxLayout()
```

```
# Se asignan los plots a sus posiciones en la cuadrícula
self.mainLayout.addWidget(self.plots[0], 0, 0)
self.mainLayout.addWidget(self.plots[1], 0, 1)
self.mainLayout.addWidget(self.plots[2], 1, 0)
self.mainLayout.addWidget(self.plots[3], 1, 1)

self.mainLayout.addLayout(self.lowerLayout1, 2, 0)
self.mainLayout.addLayout(self.lowerLayout2, 2, 1)

self.lowerLayout1.addWidget(self.pushButton1, 0)
self.lowerLayout2.addWidget(self.pushButton2, 0)

# Se hace que las dos filas ocupen lo mismo
self.mainLayout.setRowStretch(0, 2)
self.mainLayout.setRowStretch(1, 2)

# Se asigna el layout a la ventana
self.setLayout(self.mainLayout)

# Se ajusta el tamaño de ventana
self.setGeometry(300, 300, 800, 450)
self.setWindowTitle("Salida Arduino")
self.setWindowIcon(QIcon('LIM.ico'))

for i in range(4):
    #Se crean las 4 ventanas
    self.plots[i].set_antialiasing(True)
    self.plots[i].set_plot_limits(0, self.plotLen, -0.1, 3.4)
    self.plots[i].canvas().setFrameShape(QFrame.StyledPanel)
    self.plots[i].setCanvasBackground(Qt.white)
    self.plots[i].add_item(make.legend('TR'))

#Leyenda de las curvas
self.A1_1 = make.curve([], [], color='r', linewidth=2.0, title="Fz Derecha")
self.A2_1 = make.curve([], [], color='r', linewidth=2.0, title="My Derecha")
self.A4_1 = make.curve([], [], color='r', linewidth=2.0, title="Mx Derecha")
self.A5_1 = make.curve([], [], color='r', linewidth=2.0, title="Mc Derecha")
self.A1_2 = make.curve([], [], color='k', linewidth=2.0, title="Fz Izquierda")
self.A2_2 = make.curve([], [], color='k', linewidth=2.0, title="My Izquierda")
self.A4_2 = make.curve([], [], color='k', linewidth=2.0, title="Mx Izquierda")
self.A5_2 = make.curve([], [], color='k', linewidth=2.0, title="Mc Izquierda")

#Se asignan las funciones de equilibrado al presionar los botones
self.pushButton1.clicked.connect(self.equilibradoAutomatico1)
self.pushButton2.clicked.connect(self.equilibradoAutomatico2)

#Se distribuyen las 8 curvas en las 4 ventanas correspondientes
self.plots[0].add_item(self.A1_1)
self.plots[1].add_item(self.A2_1)
self.plots[2].add_item(self.A4_1)
self.plots[3].add_item(self.A5_1)
self.plots[0].add_item(self.A1_2)
self.plots[1].add_item(self.A2_2)
self.plots[2].add_item(self.A4_2)
self.plots[3].add_item(self.A5_2)

self.show()

# Se envía el comando de equilibrar a la Primera Feather
def equilibradoAutomatico1(self, equi1):
    print (equi1)
    cal1 = bytearray(str(equi1), 'UTF-8')
    try :
        self.s.sendto(cal1, (self.host1, self.port))
        print(cal1)
    except socket.timeout:
```

```
        print('Socket timed out')
    except (socket.error, call):
        print('Error Code: ' + str(call[0]) + ' Message ' + str(call[1]))
        sys.exit()
# Se envía el comando de equilibrar a La Primera Feather
def equilibradoAutomatico2(self, equi2):
    print (equi2)
    cal2 = bytearray(str(equi2), 'UTF-8')
    try :
        self.s.sendto(cal2, (self.host2, self.port))
        print(cal2)
    except socket.timeout:
        print('Socket timed out')
    except (socket.error, cal2):
        print('Error Code: ' + str(cal2[0]) + ' Message ' + str(cal2[1]))
        sys.exit()

def updatePlot(self):
    try:
        reply, address = self.s.recvfrom(1024)
        self.data = [float(val) for val in reply.split()]
    except:
        self.data = False

    if self.data:
        #Se reciben los datos y se guardan en las curvas correspondientes
        if address[0] == self.host1:
            self.skip += 1

            self.n1 += 1
            self.y1 = np.hstack([self.data[0], np.delete(self.y1, -1)])
            self.y2 = np.hstack([self.data[1], np.delete(self.y2, -1)])
            self.y3 = np.hstack([self.data[2], np.delete(self.y3, -1)])
            self.y4 = np.hstack([self.data[3], np.delete(self.y4, -1)])

            if self.n1 < self.plotLen:
                self.max1 = self.n1
            else:
                self.max1 = self.plotLen

        #Se reciben los datos y se guardan en las curvas correspondientes
        elif address[0] == self.host2:
            self.n2 += 1
            self.y5 = np.hstack([self.data[0], np.delete(self.y5, -1)])
            self.y6 = np.hstack([self.data[1], np.delete(self.y6, -1)])
            self.y7 = np.hstack([self.data[2], np.delete(self.y7, -1)])
            self.y8 = np.hstack([self.data[3], np.delete(self.y8, -1)])

            if self.n2 < self.plotLen:
                self.max2 = self.n2
            else:
                self.max2 = self.plotLen

    #Se actualizan los datos de las curvas una vez cada 100 milisegundos
    if self.skip % 10 is 0:
        self.A1_1.set_data(self.x[0:self.max1], self.y1[0:self.max1])
        self.A2_1.set_data(self.x[0:self.max1], self.y2[0:self.max1])
        self.A4_1.set_data(self.x[0:self.max1], self.y3[0:self.max1])
        self.A5_1.set_data(self.x[0:self.max1], self.y4[0:self.max1])
        self.A1_2.set_data(self.x[0:self.max2], self.y5[0:self.max2])
        self.A2_2.set_data(self.x[0:self.max2], self.y6[0:self.max2])
        self.A4_2.set_data(self.x[0:self.max2], self.y7[0:self.max2])
        self.A5_2.set_data(self.x[0:self.max2], self.y8[0:self.max2])
        self.skip = 0
```

```
if __name__ == '__main__':  
    app = QApplication(sys.argv)  
    window = ArduinoPlot()  
    sys.exit(app.exec_())
```