

Proyecto Fin de Máster en Ingeniería Industrial

Diseño y montaje de un sistema para la medición de fuerzas en el manillar de una bicicleta

Autor: Cristóbal López Batista

Tutor: Joaquin Ojeda Granja

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2013



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Diseño y montaje de un sistema para la medición de fuerzas en el manillar de una bicicleta

Autor:

Cristóbal López Batista

Tutor:

Joaquín Ojeda Granja

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Autor: Cristóbal López Batista

Tutor: Joaquin Ojeda Granja

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

En primer lugar debo agradecerle a mi familia los esfuerzos realizados para que yo pudiese tener la oportunidad de poder llegar al final de este largo camino. Gracias a sus esfuerzos y sacrificio yo a día de hoy puedo dedicarme al trabajo con el que siempre he soñado.

También he de agradecer el esfuerzo y apoyo de mi tutor Joaquin Ojeda, que con sus consejos me ha hecho mucho más llevadera la realización de los trabajos realizados con su tutela. Sin olvidarme de Alejandro Durán, quien me ayudó en el desarrollo del proyecto y quien me hizo amenas las largas jornadas de calibración.

Por todo esto, gracias a todos.

Cristóbal López Batista

Sevilla, 2020

Resumen

En la actualidad, existen una gran cantidad de estudios biomecánicos sobre ciclistas y su interacción con la bicicleta. Aunque en su gran mayoría tratan sobre la fuerza que el ciclista realiza sobre el pedal. En este proyecto se va a estudiar la interacción del ciclista sobre el manillar de la bicicleta.

Este estudio va a consistir en realizar la instrumentación del manillar, de una bicicleta comercial, para obtener los esfuerzos producidos por el ciclista en el manillar. En primer lugar, se realizó un estudio previo que consistió en un modelo de elementos finitos de la mitad del manillar. Este estudio dio como resultado la localización de las galgas a colocar en cada lado del manillar.

Determinada la posición de las galgas y una vez se instrumentó el manillar, se procedió a la fase de calibración. En este punto se realizó una gran cantidad de mediciones, hasta que se obtuvo una cierta repetitividad en los resultados medidos por las galgas. Con estas mediciones se obtuvo una matriz de conversión para cada masa. A partir de las matrices obtenidas se calculó la matriz promedio, que posteriormente se validó.

En la validación, se obtuvieron unos resultados muy buenos para la matriz promedio, con unos errores inferiores al 3% en los ejes X e Y. En el eje Z se los errores eran de entorno al 10%, aunque se considerarán válidos por la escasa fuerza que se aplica en dicha dirección (dirección lateral-medial).

Por último, se realizó una prueba cualitativa del comportamiento del dispositivo con varios usuarios. Dichas pruebas consistieron en una primera sentado y a un ritmo de pedalada bajo, y otra realizando el pedaleo de pie y a un ritmo alto.

Para finalizar el documento, se concluyó con que la matriz promedio era adecuada ya que era la que menores errores cometía a lo largo del rango de masas. Además, se verificó que el comportamiento cualitativo del sistema, a lo largo de las pruebas con usuarios, era el comportamiento lógico y previsto. Por otro lado, se realizó una serie de posibles mejoras futuras del dispositivo como el diseño de un utillaje para la colocación de las masas en la fase de calibración.

Abstract

Currently, there are a large number of biomechanical studies on cyclists and their interaction with the bicycle. Although the vast majority are about the force that the cyclist performs on the pedal. In this project, the interaction of the cyclist on the handlebars of the bicycle will be studied.

This study will consist of carrying out the instrumentation of the handlebars of a commercial bicycle to obtain the efforts produced by the rider on the handlebars. First, a preliminary study was conducted consisting of a finite element model of half of the handlebar. This study resulted in the location of the gauges to be placed on each side of the handlebar.

Once the position of the gauges has been determined and once the handlebar has been inserted, the calibration phase proceeds. A large number of measurements were made at this point, until a certain repeatability was obtained in the results measured by the gauges. With these measurements, a conversion matrix was obtained for each mass. From the obtained matrices, the average matrix was calculated, which was subsequently validated.

In the validation, very good results were obtained for the average matrix, with errors of less than 3% in the X and Y axes. In the Z axis, the errors were around 10%, although they were considered valid due to the scarce force applied in that direction (lateral-medial direction).

Finally, a qualitative test of the behavior of the device was carried out with several users. These tests consisted of a first sitting and a low pedaling rhythm, and another one while pedaling while standing and at a high rhythm.

To finalize the document, it was concluded that the average matrix was adequate since it was the one that made the fewest errors throughout the mass range. Furthermore, it was verified that the qualitative behavior of the system, throughout the tests with users, was the logical and expected behavior. On the other hand, a series of possible future improvements of the device were made, such as the design of a tooling for the placement of the masses in the calibration phase.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xv
1 Introducción	1
1.1 <i>Estado del arte</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	5
2 Metodología	11
2.1 <i>Conceptos básicos de extensometría</i>	11
2.2 <i>Estudio previo.</i>	11
2.2.1 Estudio de elementos finitos	¡Error! Marcador no definido.
2.2.1.1 Modelado del manillar	12
2.2.1.2 Condiciones de contorno:	14
2.2.1.3 Resultados	15
2.2.1.4 Análisis de la respuesta del sistema	17
2.3 <i>Instrumentación</i>	18
2.4 <i>Calibración.</i>	20
2.4.1 Matriz de conversión.	23
2.4.2 Validación	25
3 Pruebas del dispositivo	34
3.1 <i>Condiciones de las pruebas.</i>	34
3.2 <i>Prueba de pedaleo sentado.</i>	34
3.3 <i>Prueba de pedaleo de pié.</i>	36
3.4 <i>Discusión de resultados.</i>	37
4 Conclusiones	39
4.1 <i>Posibles mejoras.</i>	39
Referencias	41

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad podemos encontrar una gran cantidad de dispositivos electrónicos diseñados para diferentes estudios de la biomecánica o de la interacción entre el deportista y su herramienta de trabajo, para poder mejorar tanto el rendimiento como la ergonomía del deportista, de manera que se reduzcan así las posibles lesiones.

En primer lugar se va a realizar una revisión por los diferentes dispositivos y estudios encontrados en la literatura, con especial atención a los dispositivos diseñados para el cálculo de fuerzas en el manillar.

1.1 Estado del arte

A lo largo del tiempo, se han realizado numerosos estudios de cara al diseño de cuadros de bicicletas de competición. La mayoría de los estudios se centran en el pedal, ya que es la zona en la que se produce la fuerza efectiva. En relación a la instrumentación del pedal, se pueden encontrar en la literatura numerosos estudios.

A finales de los años 70 y principio de los 80, Soden [1] utilizó el pedal instrumentado propuesto por Adeyefa en 1978 que se muestra en la figura.

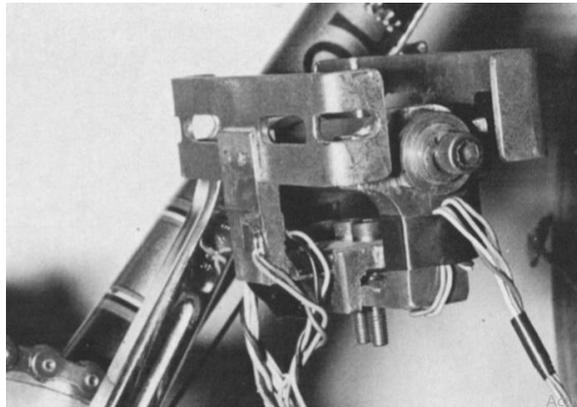


Figura 1. Pedal instrumentado propuesto por Adeyefa en 1978. Imagen obtenida del documento (Soden et al., 1979)

Este pedal se compone de un pedal normal al cual se le acoplan dos vigas cruzadas en la parte inferior del pedal, que son las encargadas de transmitir la fuerza al eje del pedal. La tecnología usada para la medición de fuerzas está basada en el uso de galgas extensiométricas, de manera que se puedan monitorear las fuerzas normales al pedal y los esfuerzos cortantes paralelas a la plataforma del pedal.

La instrumentación de los pedales de bicicletas ha ido avanzando respecto a estos primeros diseños, también llamados método clásico. Omar Valle Casas [2], desarrolla un sistema que proporciona mediciones de fuerzas en la manivela en 3D (proyección perpendicular, paralela y lateral) en relación con el posicionamiento del

pedal, de manera que se pueden realizar análisis más especializados como el de simetría de pedaleo.

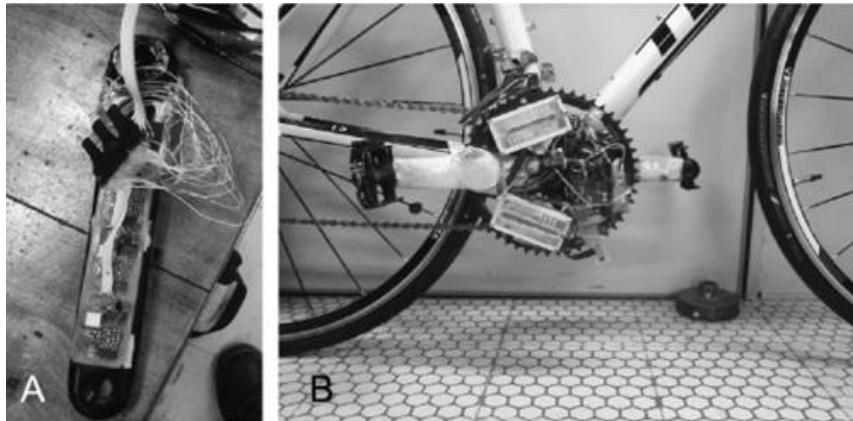


Figura 2. Instrumentación de la manivela el pedal. Imagen obtenida del documento (Omar Valle Casas et al., 2016).

Por otro lado los estudios sobre las fuerzas que se producen en el manillar y en el sillín son muy escasos. A pesar de que para el cálculo de los esfuerzos que soporta el cuadro es necesario saber las fuerzas que se le transmiten a través del manillar y del sillín. Además, también ha aumentado el conocimiento sobre la ergonomía del usuario en la bicicleta y las fuerzas que se producen en el manillar y en el sillín tiene una influencia directa en la posición adoptada.

Centrando la búsqueda en los estudios sobre la instrumentación de manillares, se encuentran varios estudios a lo largo de la historia. Empezando con uno de los métodos más simple, J.Vanwalleghem [3] evalúa el manillar como si de una viga en voladizo, con sección constante, se tratase. De esta manera, se consigue obtener los esfuerzos en dirección de avance de la bicicleta y vertical, con independencia del lugar en donde se coloquen las manos.

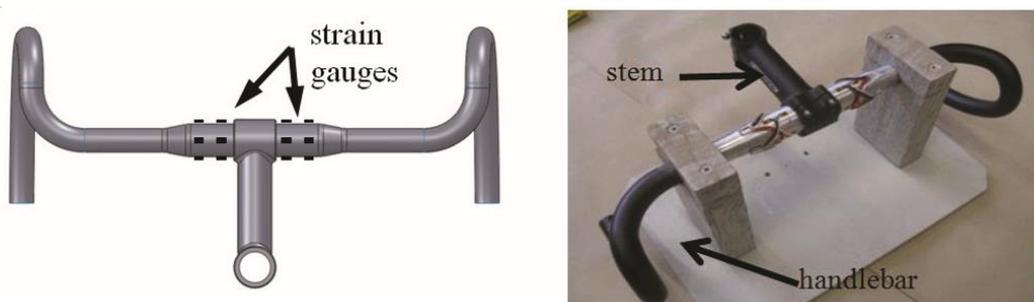


Figura 3. Esquema e imagen de la instrumentación de un manillar. Imagen obtenida del documento J. Vanwalleghem et al., 2012.

A pesar de este logro, este método tiene grandes limitaciones. La principal es que se debe colocar las manos en la zona recta del manillar, ya que al tratar al manillar como una viga en voladizo si no se coloca en esa zona se produciría una excentricidad de la carga, lo que introduciría un torsor en la zona de las galgas y las mediciones no serían precisas. Adicionalmente al introducir un gran número de galgas extensiométricas, aumenta la probabilidad de que alguna falle y dificulta el trabajo de reparación en dicho caso. Otra de las limitaciones de este modelo es, que al tratar el manillar como una viga en voladizo, se omite la fuerza lateral-medial. Es decir, solo calcula las fuerzas verticales y en dirección de avance.

De nuevo J.Vanwalleghem [4], en su afán por conseguir una mejor precisión en las medidas dinámicas de las fuerzas entre el ciclista y el manillar propuso otro modelo en el que se tenía en cuenta la influencia de la masa

suspendida y la amortiguación del sistema sobre la precisión de medición de la galga extensométrica en una configuración de viga en voladizo como la anteriormente propuesta.

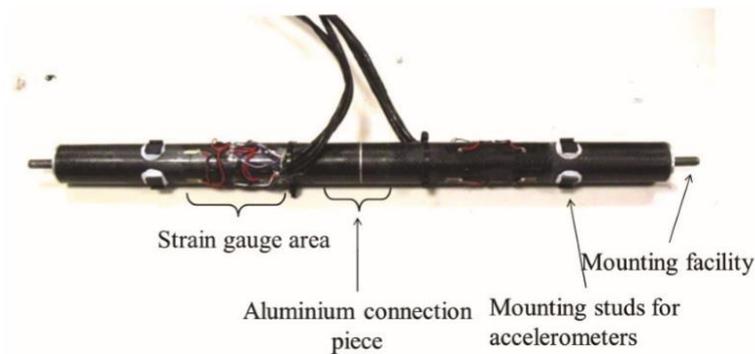


Figura 4. Imagen del manillar instrumentado. Imagen obtenida de J.Vanwalleghem et al., (2016).

En este caso el manillar está compuesto por fibra de carbono con una sección transversal circular. En esta ocasión coloca unos acelerómetros y realiza una calibración dinámica de las fuerzas. De esta manera consigue una gran precisión en las medidas dinámicas de las fuerzas, aunque de nuevo nos encontramos con grandes limitaciones. Una de las grandes limitaciones del modelo es que la precisión solo se consigue si el modo de vibración es el de flexión pura, por lo que el material debe de ser muy ligero y con una gran amortiguación. Además, de tener que omitir el cuerno de las bicicletas de carretera, ya que introducen una excentricidad en la fuerza. Otra limitación, que también comparte con el modelo anterior, es que omite la fuerza lateral, pudiendo medir solo las fuerzas verticales y en dirección de avance de la bicicleta.

Otra forma de realizar la instrumentación, esta vez más destinada al cálculo de cuadros de bicicletas, es la propuesta por J.M. Drouet [5]. En esta ocasión, donde se colocarán las galgas es en el vástago del manillar, así se obtienen las fuerzas que transmite el manillar al cuadro.

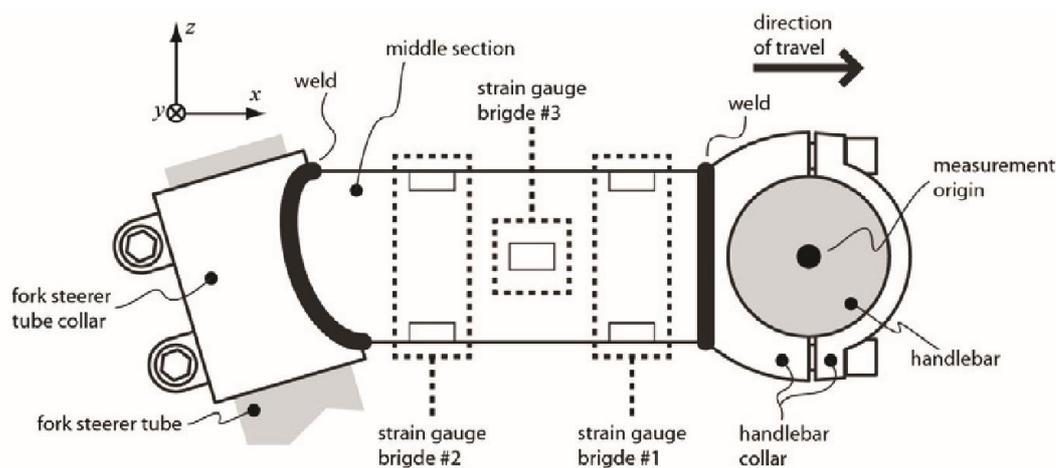


Figura 5. Esquema de la colocación de las galgas en el vástago del manillar. Imagen obtenida del documento J.M. Drouet et al., 2012.

Con este diseño se van a medir tanto la fuerza vertical (F_z), como los momentos ortogonales (M_x y M_y). Para ello se disponen de un total de doce galgas extensiométricas, formando tres puentes de Wheatstone. Teóricamente, con la posición de las galgas que aparece en la figura, se consigue que las señales no se vean alteradas por cargas que no son objetos de medidas para este estudio.



Figura 6. Imagen del vástago del manillar instrumentado. Imagen obtenida del documento J.M. Drouet et al., 2012.

Este método tiene el inconveniente de que obtiene la fuerza resultante del manillar, obviando los esfuerzos correspondientes a cada lado del manillar. Esta información podría cobrar especial importancia de cara a mejorar la ergonomía de la bicicleta, corregir posturas indeseadas y evitar lesiones.

A la hora del estudio del confort en la bicicleta, también es interesante la medida de la fuerza de agarre que se realiza en el manillar. Para este propósito, E.K.J. Chadwick [6] diseñó un aparato cuyo objetivo es obtener las fuerzas radiales que se producen en el agarre de un manillar. La solución principal fue un dinamómetro en forma de cilindro hueco. Este contiene una abrazadera y dos vigas de flexión enfrentadas que estaban equipadas con galgas extensiométricas. Se colocaron cuatro galgas en cada viga, dos en la parte superior y dos en la parte inferior, de manera que estuvieran dos de ellas a tracción y las otras dos a compresión, puestas en una configuración de puente de Wheatstone.

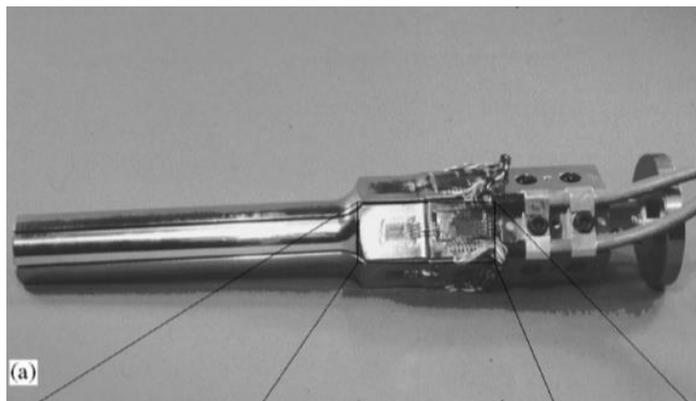


Figura 7. Dispositivo diseñado para la medición del agarre en el manillar propuesto por E.K.J. Chadwick. Imagen obtenida del documento E.K.J. Chadwick et al., 2000.

Este dispositivo tiene grandes limitaciones, la primera de ellas es que el dispositivo es muy voluminoso y difícil de acoplar al manillar. Además su mayor inconveniente es que solo sirve para calcular la fuerza de agarre, dicha fuerza sería de gran utilidad si se midiese junto con las vibraciones para la realización de estudios de la comodidad.

Realizando un pequeño resumen del estado del arte actual, se han encontrado numerosos estudios sobre la instrumentación de una bicicleta, aunque en su mayoría tratan sobre el pedal. Los estudios realizados a los manillares en general tienen varias limitaciones. Los diseños de J. Vanwalleghem toman al manillar como una viga en voladizo, por lo que no sería útil para el cálculo de fuerzas que se dan en una bicicleta de carrera (manillar con cuernos). Esto último lo soluciona J.M. Drouet proponiendo la instrumentación del vástago de la bicicleta, aunque también tenga sus inconvenientes como que no se sabe en qué parte del manillar se realiza la fuerza. Con el conocimiento de los diseños previos, se propondrá un modelo de instrumentación de bicicleta que trate de paliar las carencias actuales.

1.2 Objetivos

Revisado el estado actual de la instrumentación de un manillar de bicicleta, se fijó como objetivo la realización de un manillar instrumentado con el menor número de galgas posibles, que tuviera la capacidad de calcular las fuerzas en las tres direcciones y en cada lado del manillar de manera independiente. Adicionalmente, se quiso dar un paso más y dejar de modelar el manillar como un problema plano de una viga en voladizo, como se había modelado en los artículos anteriores encontrados en la literatura. Por lo tanto, se propuso la aplicación de la fuerza en el cuerno del manillar, para que así el usuario pudiese adoptar la postura habitual de un ciclista.

2 METODOLOGÍA

2.1 Conceptos básicos de extensometría

En la actualidad, uno de los métodos más usados para la obtención de esfuerzos mecánicos en partes estructurales es la extensometría. La extensometría es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un material. Para este trabajo, se utilizan las galgas extensométricas de rejilla.

Las galgas o bandas extensométricas son elementos que sirven para la medición de deformaciones de una superficie. Dicho elemento está compuesto por un material de soporte en forma de banda, una rejilla de medición y unos conectores.

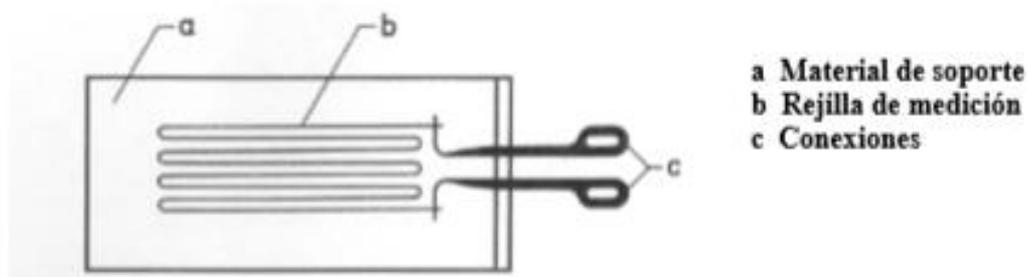


Figura8. Esquema de una galga extensométrica de rejillas. Imagen obtenida del libro “Introducción a la medición mediante bandas extensométricas” Karl Hoffmann.

Su funcionamiento es muy sencillo, cuando la banda se deforma hace que se deforme, a su vez, la rejilla de medición de manera que cambia ligeramente su resistencia eléctrica. Dicho cambio resistivo se produce como consecuencia de la deformación del conductor y por la variación de la resistividad del material tras haber sufrido cambios estructurales. Este fenómeno fue descubierto por Wheatstone y Thomson.

Conectando la galga con un puente de wheatstone se puede observar una variación de potencial a la salida del mismo. Esta diferencia de potencial se puede asociar a unas deformaciones a través de una calibración, y así poder calcular las fuerzas asociadas a una deformación.

2.2 Modelo de elementos finitos.

Previo a la instalación de las galgas, en primer lugar se deben obtener las regiones en las que la deformación sea máxima, según la dirección de aplicación de la fuerza, para así obtener unas medidas más precisas mediante las galgas extensométricas.

Se realiza un estudio previo que va a consistir en la realización de un ensayo por medio de un programa comercial (ANSYS ®) de elementos finitos. Para realizar este análisis previo, primero debemos realizar un

modelo que se asemeje al manillar de la bicicleta.

2.2.1 Modelado del manillar

El modelo debe reproducir fielmente tanto las medidas de las diferentes secciones del manillar, como el lugar donde se aplican las cargas. Se parte del manillar de una bicicleta btwin triban 300.



Figura 9. Imagen del manillar que se va a instrumentar. Imagen de elaboración propia.

Para obtener las medidas reales de la estructura del manillar, primero se quitan las protecciones que envuelven el mismo. Una vez quitados los elementos decorativos se mide, obteniendo las siguientes medidas.

Las dimensiones del manillar son:

- Diámetro mayor 32 mm
- Diámetro menor 24,22 mm
- Longitud de medio manillar 189 mm

Para el modelo, como dice Jean-Marc Drouet [8] la fuerza que aplica el ciclista sobre el manillar la realiza sobre el sistema de freno, por lo que en vez de realizar un modelo idéntico del manillar se opta por realizar hasta el sistema de freno, omitiendo el cuerno hacia abajo, e introduciendo el sistema de frenos mediante una unión rígida.

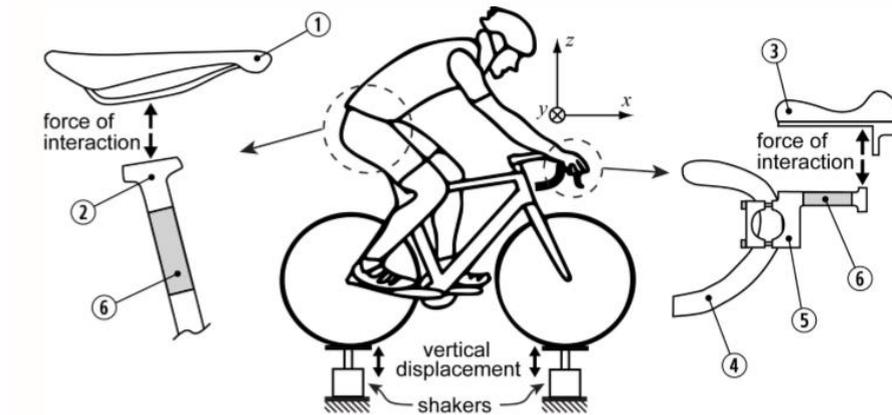


Figura 10. Esquema de los puntos de apoyo de un ciclista durante el pedaleo. Imagen obtenida del documento J.M. Drouet et al., 2014.

Por otro lado, como el manillar está sujeto mediante un vástago al eje de la bicicleta, dicha unión, como consecuencia de que el vástago tiene una mayor rigidez que el manillar, se va a tratar como si de un empotramiento se tratase y por lo tanto por simetría se va a realizar solo el modelo de una mitad del manillar.

Con todo lo que se ha comentado, el resultado final del modelo realizado en Solid Works es el que se muestra en la siguiente figura.

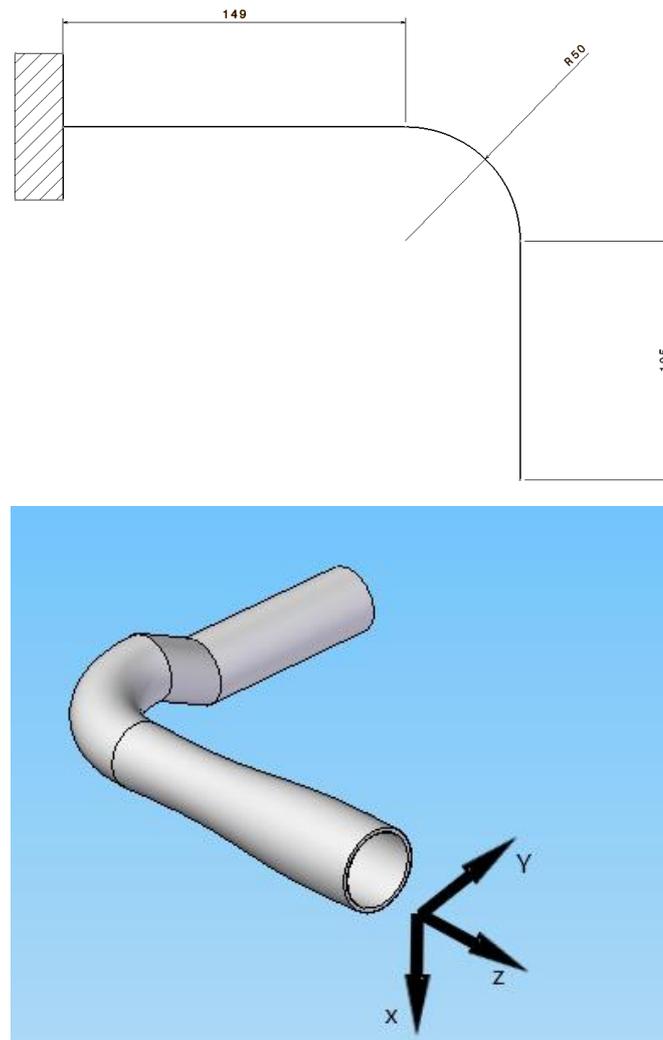


Figura 11. Imagen superior- Esquema de la mitad del manillar. Imagen inferior- Modelo 3D de la mitad del manillar. Imagen de elaboración propia.

Por último, para finalizar el modelo, se debe de definir el material del que está compuesto el manillar. Dicho material se recoge en la ficha técnica de la bicicleta y es un aluminio 6061.

2.2.2 Condiciones de contorno:

Con el modelo del manillar realizado, se introduce el modelo de Solid Works® en el programa de elementos finitos ANSYS®, más concretamente en su herramienta Workbench. En este punto, se introducen las condiciones de contorno y las cargas aplicadas.

En cuanto a las condiciones de contorno, se introduce un empotramiento en donde iría conectado al vástago (banderola morada de la Fig. 12). Además se introduce una fuerza en el otro extremo, donde iría colocada la mano (banderola roja de la Fig. 12).

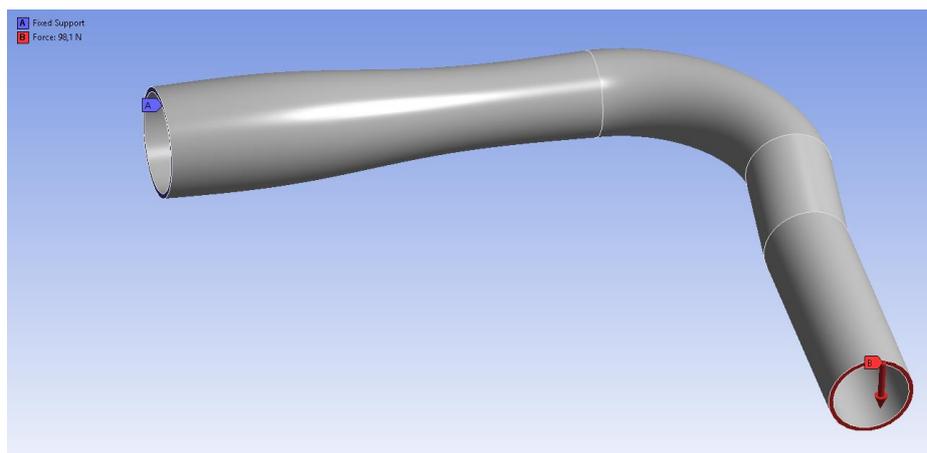


Figura 12. Modelo de la mitad del manillar introducido en el programa de elementos finitos (ANSYS). Imagen de elaboración propia.

La fuerza introducida, la fuerza debida a una pesa calibrada de 10 Kg, se coloca en cada dirección y se mide la deformación que se produce en dicha mitad del manillar. De esta información podremos obtener qué zonas del manillar se deforman más según la dirección de la fuerza, que dará pie a la colocación de las galgas extensiométricas.

2.2.3 Resultados

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos con el modelo y las condiciones de contorno aplicadas. Además, conocidas las deformaciones, se propondrán las posiciones de las galgas.

Aplicando la fuerza en dirección vertical (eje X), se obtienen las siguientes deformaciones

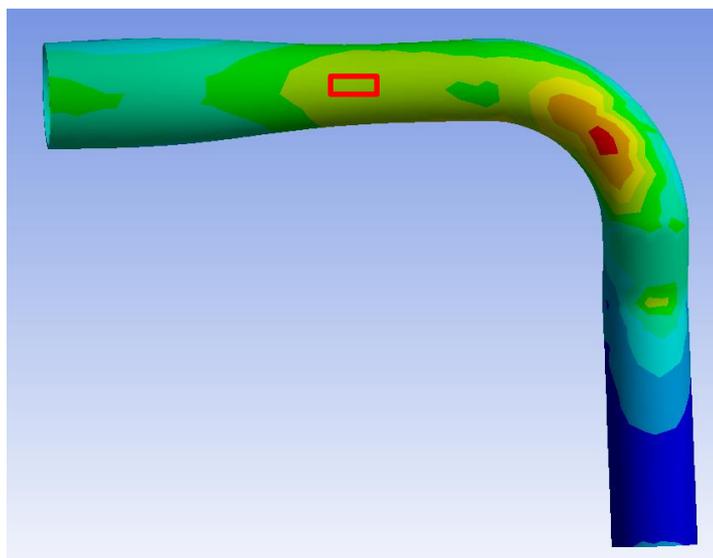


Figura 13. Deformaciones obtenidas con la aplicación de la fuerza en el eje X, con el lugar de la galga G1. Imagen de elaboración propia.

Analizando el comportamiento del manillar al aplicarle la fuerza en el eje X, se observa que donde se produce la mayor deformación es en la parte superior en la curva. Este lugar, se descarta para la colocación de la galga porque al estar en curva dificulta su instalación. Por lo que, finalmente, se decide colocar en la zona recta

posterior al cambio de sección (zona señalada en la figura 13), ya que en ese punto también se obtienen deformaciones suficientes para una lectura precisa.

Se procede a realizar el mismo análisis, pero en este caso colocando la fuerza en dirección frontal (eje Y).

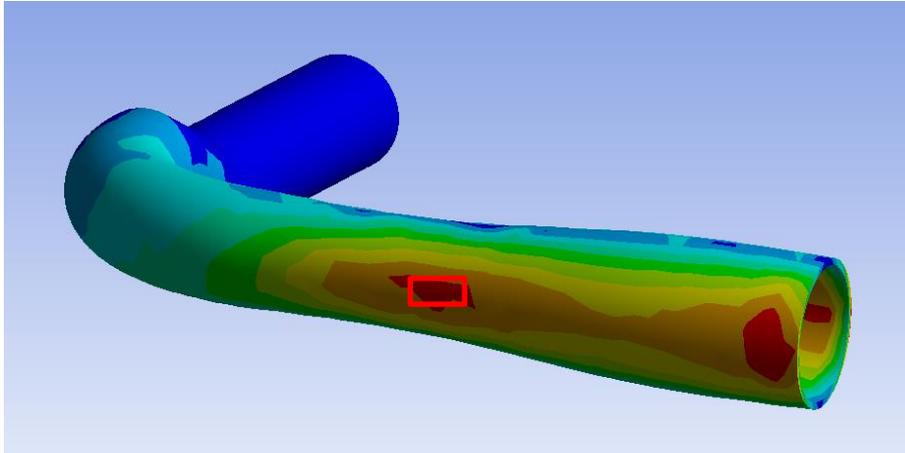


Figura 14. Deformaciones obtenidas con la aplicación de la fuerza en el eje Y, con el lugar de la galga G2. Imagen de elaboración propia

Siguiendo el procedimiento, se observan dos zonas en donde la deformación es máxima. La zona más próxima al empotramiento se descarta, ya que al estar tan cerca de dicho empotramiento, puede obtener diferentes medidas según aprietes la abrazadera del vástago del manillar. Por lo que se vuelve a optar por la zona recta posterior al cambio de sección, pero en la parte frontal como se muestra en la figura 14.

Por último, se realiza de nuevo pero con la fuerza en dirección lateral (eje Z).

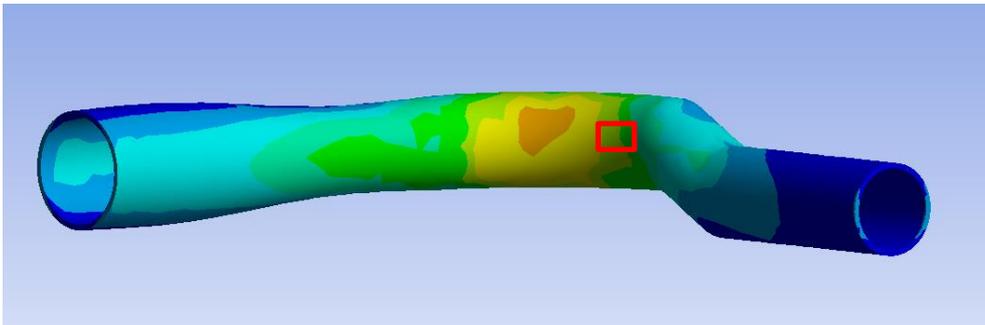


Figura 15. Deformaciones obtenidas con la aplicación de la fuerza en el eje Z, con el lugar de la galga G3. Imagen de elaboración propia

En este último análisis, se puede ver que las mayores deformaciones se producen en el interior de la curva del manillar. Como ya se ha explicado antes, en esta zona la colocación de la galga resulta muy complicada. Por lo que se opta por colocar la galga en el tramo posterior a la curva en la zona lateral, ya que en dicha zona también se obtienen unas deformaciones adecuadas.

2.2.4 Análisis de la respuesta del sistema

Una vez se han elegido las localizaciones de las galgas extensiométricas, se procede a analizar las interacciones de las fuerzas en cada dirección con las tres galgas. Para esto, se procede a ver las deformaciones que se obtienen en cada zona mediante ANSYS®.



Figura 16. Localizaciones de las galgas en el manillar. Imagen de elaboración propia.

Los resultados, en deformaciones, que se han obtenido en los puntos elegidos son los que se muestran en la siguiente tabla.

Fuerza	Galga	Deformaciones $\mu\epsilon$
Fuerza en el eje X	G1	170
	G2	4
	G3	4
Fuerza en el eje Y	G1	-33
	G2	187
	G3	28
Fuerza en el eje Z	G1	-66
	G2	313
	G3	-170

Tabla 1. Deformaciones medidas por cada galga durante la colocación de las cargas en los diferentes ejes.

2.3 Instrumentación

Una vez elegidos los puntos óptimos para la colocación de las galgas se procede a su colocación. La tarea de instalación de las galgas exige un gran esfuerzo y dedicación. En nuestro caso se ha empleado un material adhesivo para la instalación de las galgas. A continuación se expondrá el método utilizado para la fijación de las galgas al manillar:

1. En primer lugar, se debe pulir lijar la zona en la que se colocará la galga. Para ello, se dispondrá de papel de lija de diferentes grosores, partiendo del más grueso y finalizando con el de menor grosor. Posteriormente, se realiza el pulido de la zona.
2. Una vez pulida la zona, se debe de limpiar para retirar todas las virutas depositadas durante el paso anterior. La limpieza se realiza siempre en una misma dirección para evitar esparcir la suciedad y se utiliza un algodón mojado en acetona.
3. Con la zona ya preparada, se aplica una capa de catalizador en la zona de la galga donde se aplicará el adhesivo y se espera a que dicho catalizador se seque.
4. Con la galga y la zona preparada, se deposita en la zona del manillar el adhesivo y se pega la galga.
5. Con la galga colocada y una vez se ha secado el adhesivo, se liman las películas protectoras que tienen las galgas en los conectores, hasta que se vean de color cobre.
6. A continuación se sueldan los cables a los conectores con estaño.
7. Finalmente, se aplica una capa de silicona para evitar que se dañe la galga durante el uso de la bicicleta.

Las galgas se conectarán a una placa de arduino en la que se disponen tres puentes completos de Wheatstone, uno para cada galga.

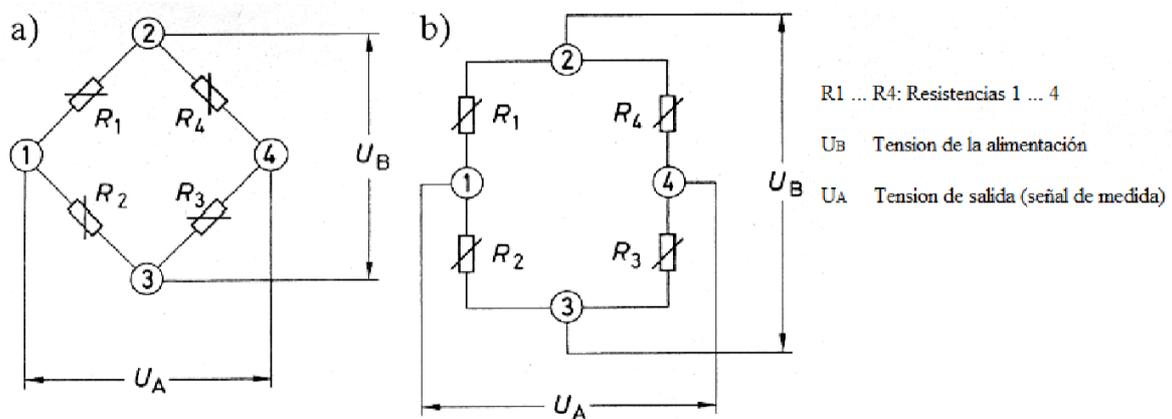


Figura 20. Esquema del puente de Wheatstone. Imagen obtenida del libro "Introducción a la medición mediante bandas extensométricas" Karl Hoffmann.

Su funcionamiento es como un divisor de tensión en cada mitad del puente, es decir, si se aplica una tensión de alimentación (U_B) a los puntos de alimentación del puente 2 y 3, ésta se dividirá entre las dos mitades del puente, R_1 , R_2 , y R_3 , R_4 . Por lo tanto, la tensión de salida (U_A) será la diferencia entre los puntos 1 y 4.

$$U_A = u_1 - u_4 \quad (3-1)$$

Donde

$$u_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * U_B \quad (3-2)$$

$$u_4 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} * U_B \quad (3-3)$$

En un inicio se colocaron potenciómetros en paralelo para ajustar el puente de Wheatstone, pero con las vibraciones se modificaba su resistencia. Por lo que, finalmente, se colocaron resistencias en paralelo para realizar el ajuste.

Realizada la última modificación, una vez comenzada la fase de calibración, se observa en las primeras medidas realizadas que la salida del arduino obtenida variaba acorde a los movimientos realizados por el personal durante la medición.

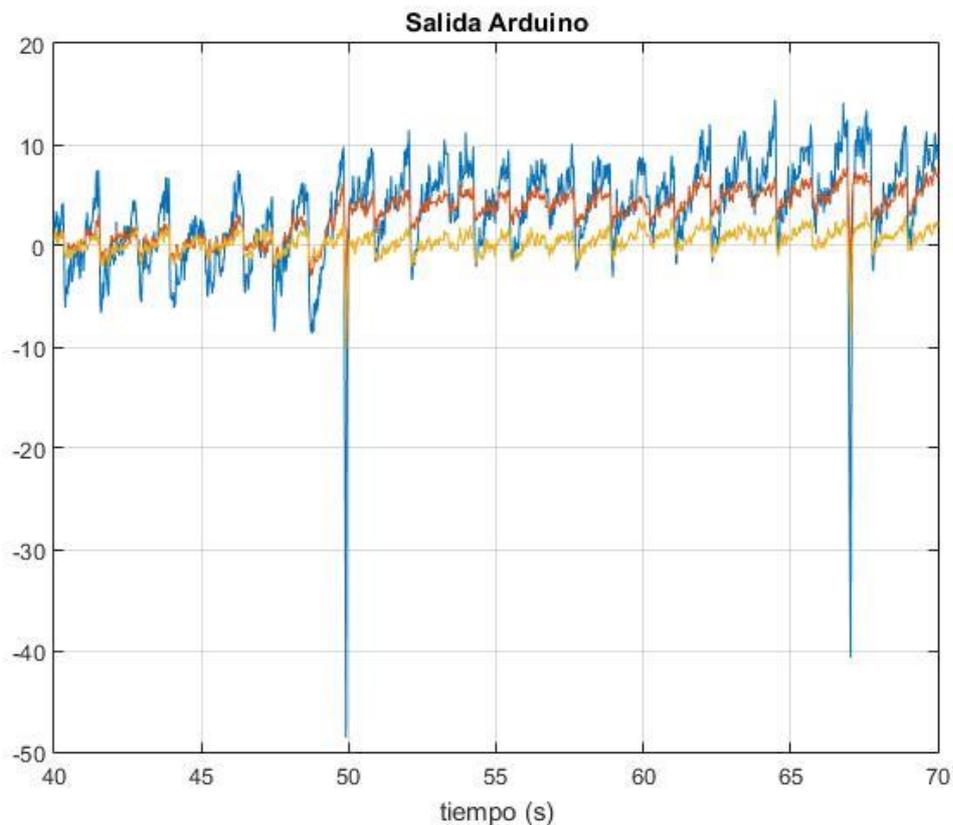


Figura 21. Salida del Arduino en el momento previo a la colocación de la carga. Imagen de elaboración propia.

Se puede observar en la gráfica (figura 21) como justo antes de la colocación de la pesa, cuando el personal se acercaba a colocar la pesa, la señal aumenta ligeramente. Dicha variación en la señal se acentuaba según la forma en la que los operarios se acercaban al manillar. En vista a este fenómeno, se conecta el ordenador al dispositivo para poder obtener lecturas a tiempo real, de la salida del sistema. Con esta disposición y tras realizar un gran número de pruebas, se concluye con que el manillar ejerce de antena, variando así la lectura según la posición en la que se dispongan los operarios en el laboratorio. Esta conclusión se acepta hasta realizar futuros estudios para determinar, con fundamentos, el fenómeno que ocurre con el manillar de la bicicleta.

Tras este análisis se volvió a la solución con potenciómetros en paralelo, ya que de esta manera se podía realizar un ajuste de la entrada al arduino de manera más sencilla y rápida. Además, para paliar los efectos del manillar, se optó por utilizar cables apantallados consiguiéndose unas medidas muy estables.

2.4 Calibración.

La calibración consta de una serie de pasos que se deben realizar para obtener la fuerza aplicada a partir de las deformaciones registradas por las galgas extensiométricas. Las galgas extensiométricas al deformarse y cambiar su valor de resistencia eléctrica, proporcionan unas entradas al Arduino que van entre 0 y 5V. Internamente, Arduino tiene un conversor analógico-digital que transforma la tensión recibida en números enteros entre el 0 y el 1023. A continuación hay que realizar la conversión de dicho parámetro al valor de la fuerza aplicada, para ello se asume un comportamiento lineal y se realiza una matriz de conversión.

Para la calibración de la entrada al arduino, se procede a ajustar los potenciómetros en paralelo a la resistencia de la galga en el puente de Wheatstone, de manera que la salida del arduino con el sistema en reposo, sin cargas aplicadas, se encuentre en el rango medio de salida. Con esto se consigue poder medir las fuerzas en cada sentido, ya que arduino no emite medidas negativas.

Una vez que las salidas del arduino con el sistema descargado se encuentran en torno a la mitad del rango de salida, se deben realizar una serie de pruebas con varias cargas y comprobar que el sistema se comporta de manera lineal y estable, pudiendo así obtener una matriz de conversión fiable.

Las mediciones se realizan siguiendo las siguientes pautas:

1. En primer lugar, se introduce la tarjeta SD y se conecta la pila para una recogida de datos inalámbrica, o bien se conecta el cable USB al arduino.
2. Se empieza a realizar la lectura con el sistema descargado y se deja así durante al menos dos minutos.
3. Posteriormente, se carga el sistema con la carga correspondiente y se deja, de nuevo, en torno a dos minutos.
4. Finalmente se descarga el sistema y se vuelve a esperar un minuto a que el sistema se estabilice y se detiene la lectura.

Durante el proceso de las mediciones unas de las mayores dificultades resultaron ser la fijación del manillar y la colocación de la carga en las diferentes direcciones. Además para realizar las pruebas en las mismas condiciones para cada masa, se fijaba el manillar en la posición correspondiente y se procedían a realizar todas las medidas con las diferentes masas, eviando así cambios en las condiciones entre las medidas. Las soluciones a estos problemas fueron las siguientes:

La solución para el eje X (vertical) resultó la más sencilla, el manillar se dejó en su posición habitual en la bicicleta y la carga fue aplicada en el cuerno del freno, colgándose de él las pesas en el lugar anteriormente mencionado.



Figura 22. Imagen de la calibración en el eje X. Imagen de elaboración propia.

Para el eje Y (dirección frontal), el manillar se giró 90° respecto a la posición anterior, de manera que la galga 2 quedase en la parte superior. La carga se colocó en el freno para que fuese lo más vertical posible desde el punto de apoyo del ciclista.



Figura 23. Imágenes de la calibración en el eje Y. Imagen de elaboración propia.

En cuanto al eje Z (dirección lateral), el manillar para este eje se colocó fijado en su posición habitual. La

bicicleta se colocó tumbada apoyándose en el manillar y en el rodillo que se encontraba fijada la rueda trasera. La pesa se puso en el lugar de apoyo de la mano, intentando que la resultante de la carga aplicada se encuentre justo en el punto que determinamos en el estudio teórico. En la imagen se muestra la disposición.



Figura 24. Imagen de la calibración en el eje Z. Imagen de elaboración propia.

Para poder demostrar que el sistema tiene un comportamiento lineal, y por lo tanto se pueden obtener las fuerzas aplicadas a partir de una matriz de conversión, se debe realizar las mismas mediciones para 4 masas distintas y analizar las matrices obtenidas para cada masa. Para ello, se procede a la medición para las masas de 5, 7.5, 10 y 13 kg.

Para paliar el problema de que al cambiar de posición para la medición de cada eje de una masa, luego no se pueda fijar el manillar en la misma posición de cada eje para la siguiente masa. Se opta por realizar las mediciones por ejes, es decir, se fija el manillar en la posición para el eje X y se realizan todas las mediciones de para cada masa. Una vez realizada la medición de un eje, se procede a la fijación y medición del siguiente eje. Los resultados a la salida del arduino son los siguientes:

Las lecturas para el eje x fueron las siguientes:

Masas	G1	G2	G3
5 kg	118	9	-15
7.5 kg	181	12	-19
10 kg	235	14	-21
13 kg	308	20	-24

Tabla 2. Deformaciones media obtenida por cada galga, colocándose la fuerza en dirección vetical.

Las lecturas para el eje y fueron las siguientes:

Masas	G1	G2	G3
5 kg	-11	131	21
7.5 kg	-15	192	25
10 kg	-22	265	50
13 kg	-27	342	57

Tabla 3. Deformaciones media obtenida por cada galga, colocándose la fuerza en dirección de avance de la bicicleta.

Por último, las lecturas para el eje z fueron las siguientes:

Masas	G1	G2	G3
5 kg	12	-120	-140
7.5 kg	20	-187	-230
10 kg	27	-255	-289
13 kg	34	-316	-340

Tabla 4. Deformaciones media obtenida por cada galga, colocándose la fuerza en dirección lateral.

2.4.1 Matriz de conversión.

Una vez obtenidas las salidas del arduino para cada carga, se puede obtener la matriz de conversión, que será la encargada de calcular las fuerzas a partir de las deformaciones.

El cálculo de las fuerzas se realizará mediante la siguiente operación matricial:

$$[F] = [D] * [B] \quad (2-1)$$

Dónde:

- [F] es una matriz de 1x3, formada por los valores de las fuerzas en los distintos ejes.
- [D] es una matriz de 1x3, compuesta por los datos obtenidos de las distintas galgas.
- [B] es una matriz de 3x3, compuesta por los factores de conversión.

El objetivo es la obtención de los nuevos valores de la matriz de conversión para que cuando le introduzcamos cualquier valor de lectura de las galgas se obtenga la fuerza correspondiente.

La obtención de dicha matriz de conversión se realiza despejando de la ecuación anterior, y realizando la siguiente operación con los datos obtenidos anteriormente para las diferentes masas:

$$[B] = [D]_{inv} * [F] \quad (2-2)$$

Los resultados obtenidos para las diferentes masas son:

	5KG	7.5KG	10KG	13KG	MMEDIA
B ₁₁	0,4139	0,4056	0,4053	0,4131	0,4095
B ₁₂	0,0337	0,0303	0,0318	0,0304	0,0316
B ₁₃	0,0066	0,0106	0,0098	0,0130	0,0100
B ₂₁	0,0801	0,0648	0,0493	0,0605	0,0637
B ₂₂	-0,4276	-0,4237	-0,4403	-0,4368	-0,4321
B ₂₃	0,3733	0,3501	0,3931	0,4120	0,3821
B ₃₁	0,0564	0,0406	0,0099	0,0393	0,0365
B ₃₂	-0,0605	-0,0436	-0,0761	-0,0711	-0,0628
B ₃₃	0,4071	0,3588	0,4075	0,4451	0,4046

Tabla 5. Componentes de la matriz de conversión obtenida con cada masa y la obtenida a partir de la media aritmética

Calculadas las matrices de conversión, se puede analizar los resultados obtenidos. Se observa que, a pesar de encontrarnos en un rango elástico del material, las matrices no son exactamente iguales, como nos dice la teoría. Se realiza el cálculo de las diferencias entre matrices, tomando como referencia la matriz de 5 kg, obteniendo los siguientes resultados:

- Diferencia con la matriz de 7,5kg

$$\begin{pmatrix} 2,02 & 19,02 & 28,05 \\ 10,08 & 0,89 & 28,04 \\ 38 & 6,21 & 11,84 \end{pmatrix} \%$$

- Diferencia con la matriz de 10 kg

$$\begin{pmatrix} 2,07 & 38,39 & 82,36 \\ 5,63 & 2,97 & 25,67 \\ 32,82 & 5,28 & 0,10 \end{pmatrix} \%$$

- Diferencia con la matriz de 13 kg

$$\begin{pmatrix} 0,20 & 24,49 & 30,26 \\ 9,67 & 2,16 & 17,43 \\ 97,42 & 10,35 & 9,34 \end{pmatrix} \%$$

Analizando las diferencias entre las matrices, se observa que donde se producen diferencias significativas son en posiciones donde el valor de la componente es prácticamente insignificante de cara al cálculo. En cuanto a los diferencias en los valores de la diagonal principal, se observa que los errores son menores del 5%, con la excepción de la componente del eje Z. Este valor se encuentra en torno al 10%, como consecuencia de la

dificultad de reproducir el lugar exacto de colocación de la carga para dicho eje.

Con estos resultados se puede decir que el comportamiento es lineal, adoptando una matriz promedio que minimice el error entre matrices.

- Matriz promedio:

Matriz que se adopta para compensar la desviación entre las matrices calculadas, de manera que se obtenga un resultado que se ajuste a los ensayos reales para cada masa. Para obtener esta matriz se realiza una media aritmética con las matrices obtenidas con cada masa. La matriz obtenida es la siguiente:

$$[B] = \begin{pmatrix} 0,4095 & 0,0637 & 0,0365 \\ 0,0316 & -0,4321 & -0,0628 \\ 0,0100 & 0,3821 & 0,4046 \end{pmatrix}$$

2.4.2 Validación

Una vez calculada la matriz de conversión promedio, se procede a validar dicha matriz. Para esto, se va a calcular el error cuadrático medio absoluto y relativo comparándolo con el de las matrices obtenidas con las diferentes masas. El error cuadrático medio se calcula mediante la siguiente formula:

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_c - F_t)^2}{n}} \quad (2-3)$$

$$e = \frac{E}{|F_t|} * 100 \quad (2-4)$$

Donde:

- E es el error cuadrático medio absoluto.
- e es el error cuadrático medio relativo.
- F_c es la fuerza obtenida mediante las matrices de conversión.
- F_t es la fuerza real.
- n es el número de muestras obtenidas en la medición.

Mediante Matlab® se procede a calcular las fuerzas aplicadas con cada matriz de conversión. Para ello, se parte de las mediciones realizadas para cada masa y cada dirección previamente obtenidas en la fase de calibración. Los resultados que se obtengan con cada matriz de conversión se comparará con el valor real aplicado, mediante la fórmula (4-3).

En primer lugar se van a mostrar los resultados obtenidos para el eje X con las diferentes masas utilizadas. Para este caso deberían de obtenerse esfuerzos nulos en las direcciones Y y Z, mientras que para el eje X se debería obtener el correspondiente a la masa utilizada. A continuación se muestran los resultados:

A continuación se van a mostrar las gráficas de los resultados obtenidos para la masa de 5 kg. Y se realizará una tabla resumen con los resultados para las diferentes masas.

- Fuerza en X de 49.05N:

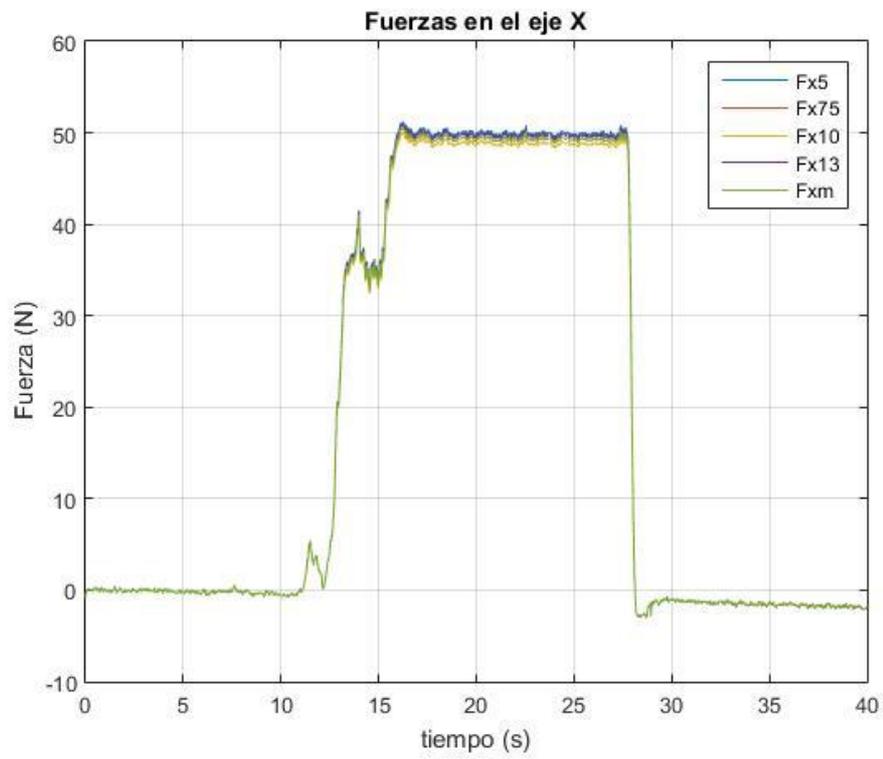


Figura 25. Fuerza en X obtenida por las diferentes matrices de conversión.

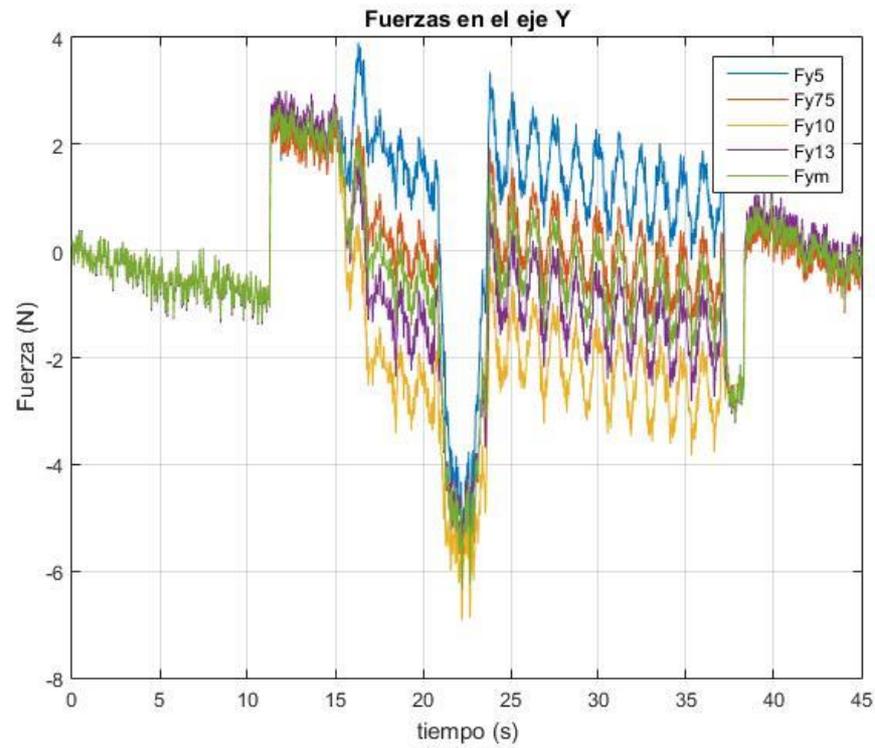


Figura 26. Fuerza en Y obtenida por las diferentes matrices de conversión.

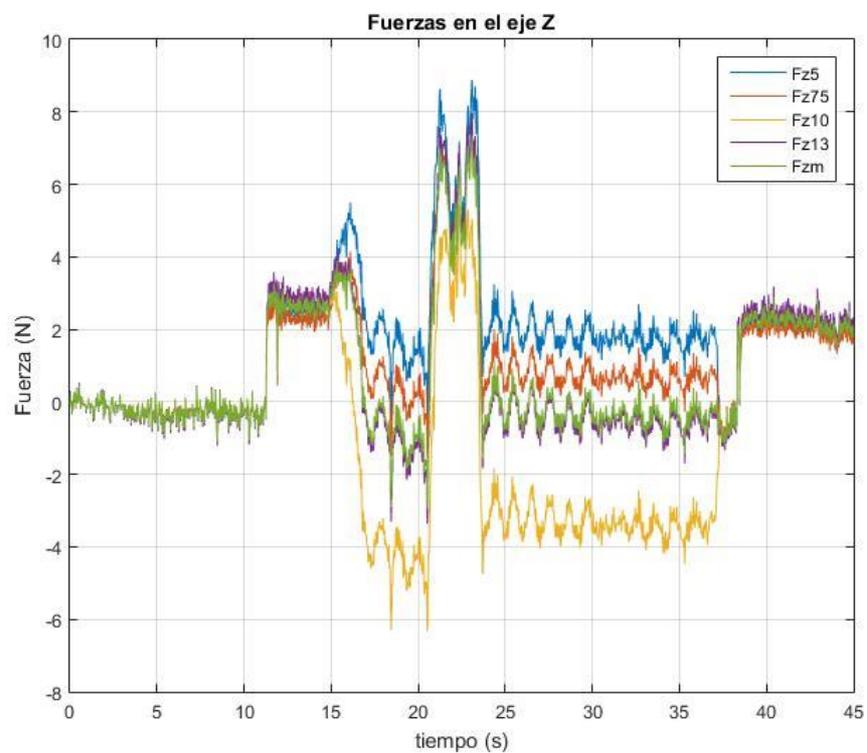


Figura 27. Fuerza en Z obtenida por las diferentes matrices de conversión.

- Fuerza en el eje Y de 49.05N:

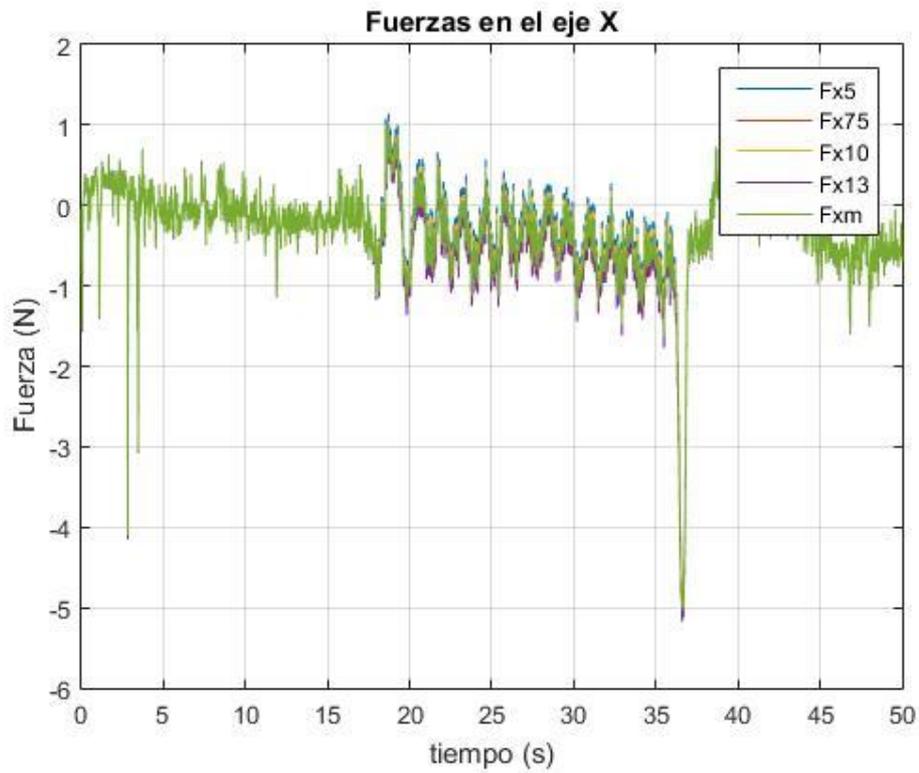


Figura 28. Fuerza en X obtenida por las diferentes matrices de conversión.

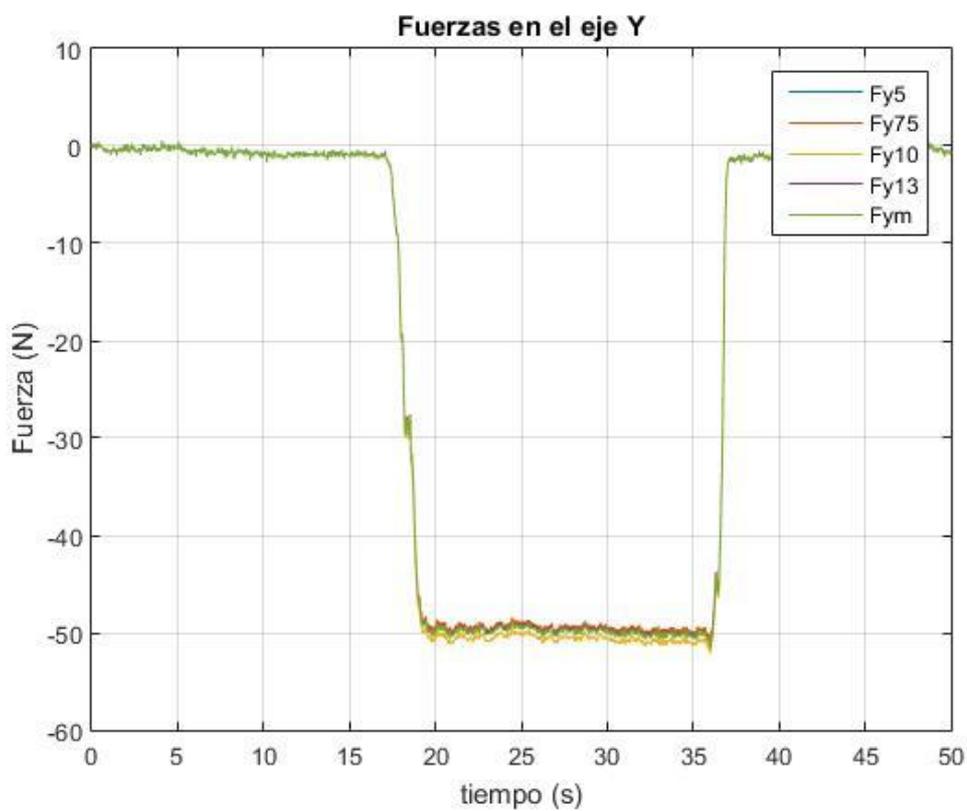


Figura 29. Fuerza en Y obtenida por las diferentes matrices de conversión.

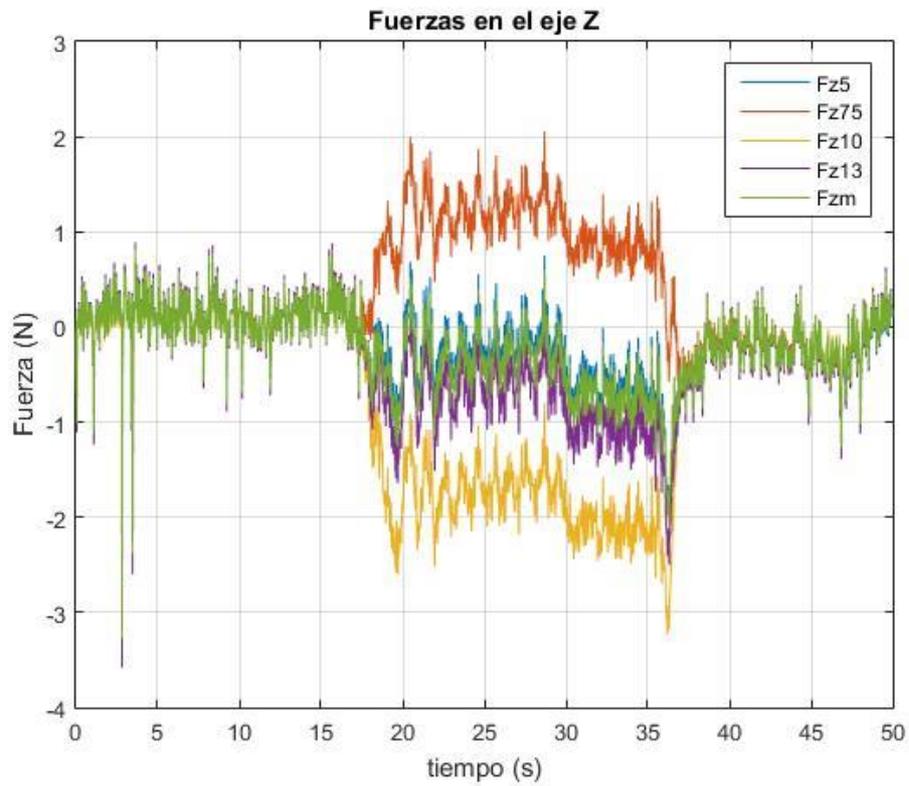


Figura 30. Fuerza en Z obtenida por las diferentes matrices de conversión.

- Fuerza en Z de 49.05N:

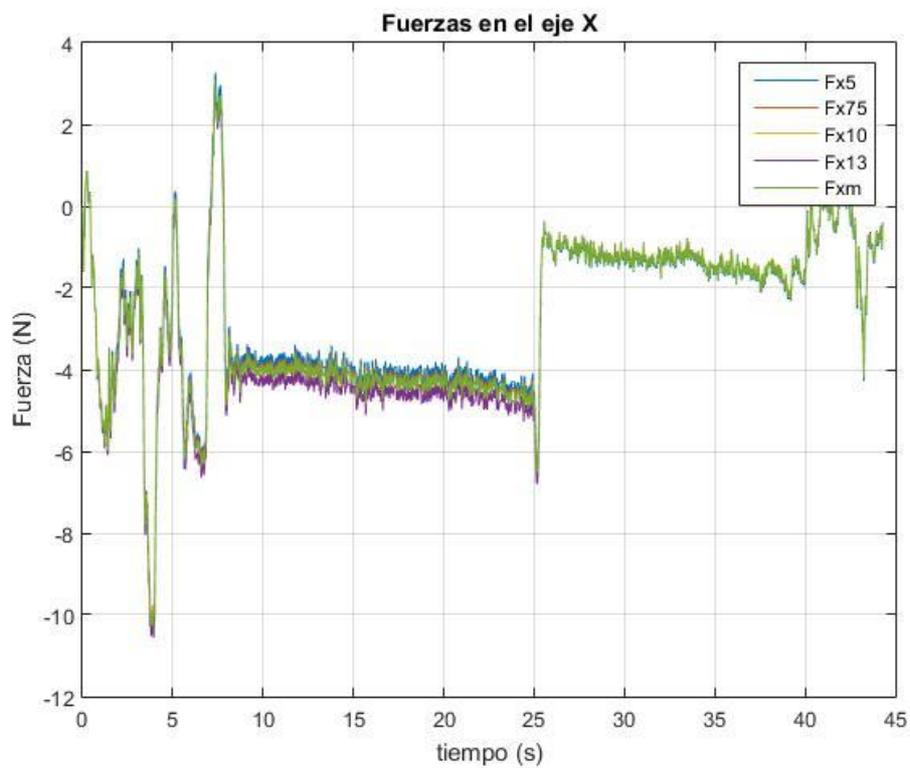


Figura 31. Fuerza en X obtenida por las diferentes matrices de conversión.

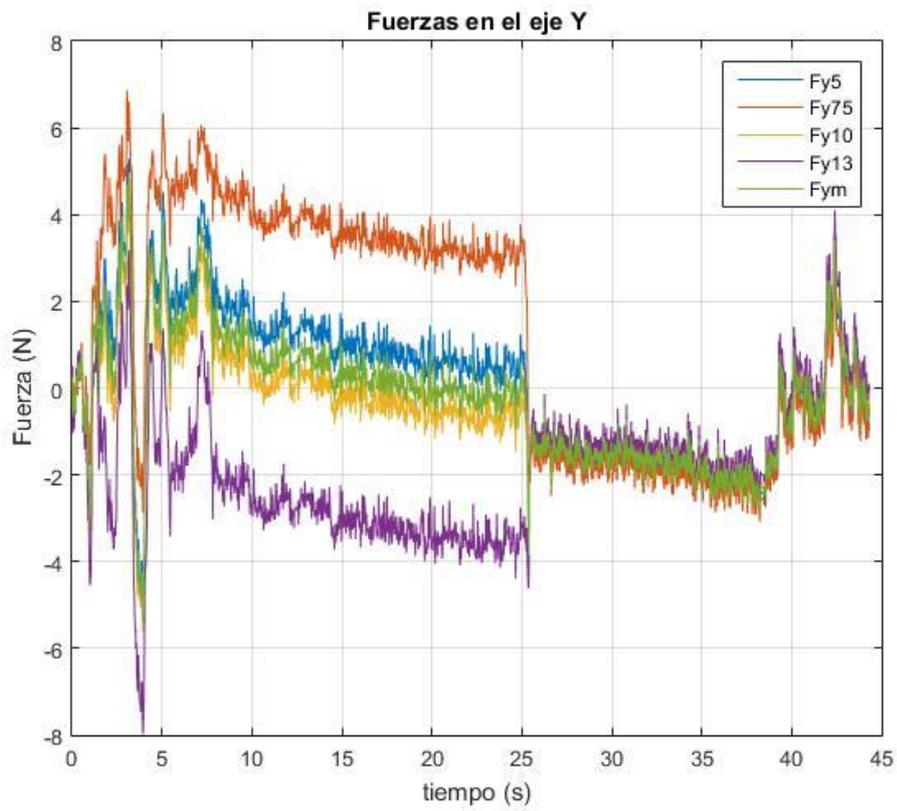


Figura 32. Fuerza en Y obtenida por las diferentes matrices de conversión.

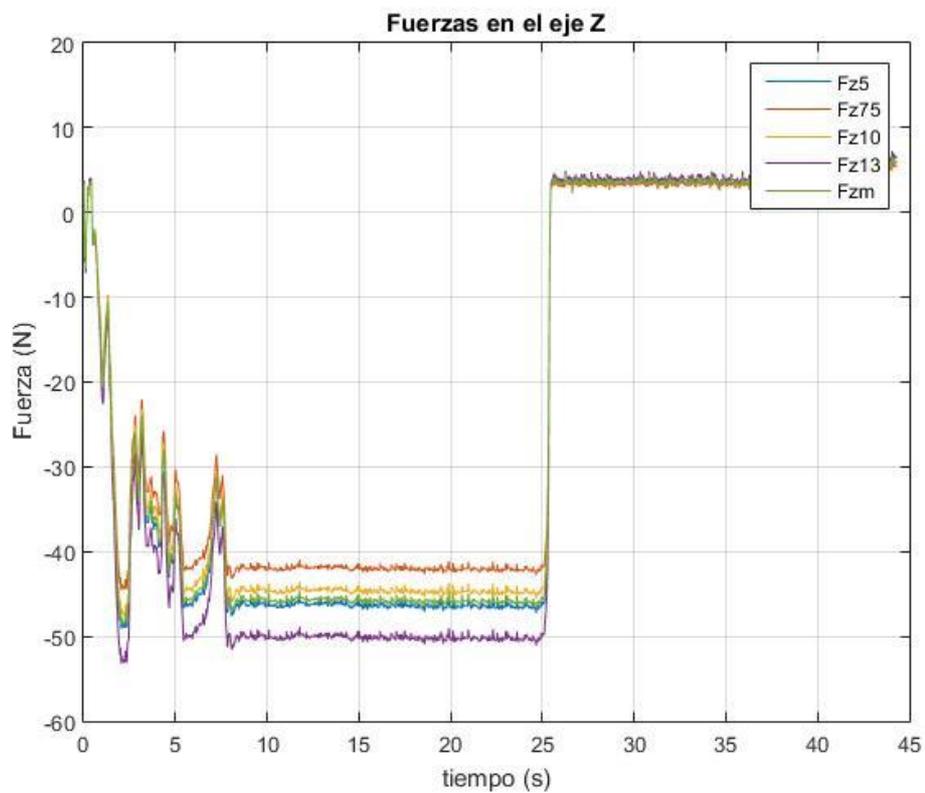


Figura 33. Fuerza en Z obtenida por las diferentes matrices de conversión.

En estas gráficas se puede ver como el dispositivo reproduce fielmente las cargas en el eje X e Y, aunque para el eje Z se producen mayores errores.

Siguiendo este análisis se va a mostrar una tabla por eje con los errores cuadráticos medios que se obtienen para las demás masas.

MATRIZ	FUERZA (N)	EJE	ERROR ABSOLUTO (N)			ERROR RELATIVO (%)		
			EJE X	EJE Y	EJE Z	EJE X	EJE Y	EJE Z
5	49,05	X	1,62	1,75	1,68	3,30	3,56	3,43
7,5			0,72	0,43	0,68	1,46	0,89	1,38
10			0,71	2,44	4,30	1,45	4,98	8,77
13			1,43	1,33	1,29	2,91	2,71	2,64
MEDIA			1,08	0,64	1,08	2,20	1,30	2,21
5	73,575	X	2,08	3,38	2,29	2,83	4,59	3,12
7,5			0,59	1,10	0,54	0,81	1,50	0,74
10			0,58	2,76	6,37	0,79	3,75	8,66
13			1,79	1,08	1,69	2,43	1,46	2,29
MEDIA			1,22	0,40	1,37	1,66	0,54	1,86
5	98,1	X	0,73	3,70	2,97	0,75	3,77	3,02
7,5			1,59	0,82	0,73	1,62	0,84	0,75
10			1,61	4,33	8,38	1,64	4,42	8,55
13			0,46	2,11	2,27	0,47	2,16	2,31
MEDIA			0,71	0,73	1,85	0,73	0,74	1,88
5	127,53	X	0,82	6,85	6,25	0,64	5,37	4,90
7,5			3,40	2,84	2,93	2,66	2,23	2,30
10			3,42	3,31	8,29	2,68	2,60	6,50
13			1,23	0,49	0,47	0,96	0,38	0,37
MEDIA			2,19	1,57	0,46	1,71	1,23	0,36

Tabla 6. Error cuadrático medio absoluto y relativo obtenido en la medición de las fuerzas en los diferentes ejes, durante la colocación de fuerzas en dirección X.

MATRIZ	FUERZA (N)	EJE	ERROR ABSOLUTO (N)			ERROR RELATIVO (%)		
			EJE X	EJE Y	EJE Z	EJE X	EJE Y	EJE Z
5	49,05	Y	0,42	0,26	0,27	0,86	0,53	0,54
7,5			0,28	0,20	1,53	0,57	0,40	3,13
10			0,35	1,12	1,42	0,72	2,28	2,90
13			0,28	0,41	0,34	0,58	0,84	0,69
MEDIA			0,32	0,45	0,21	0,64	0,92	0,42
5	73,575	Y	1,03	1,27	3,66	1,40	1,72	4,97
7,5			0,64	0,84	1,24	0,87	1,14	1,69
10			0,87	2,84	5,98	1,18	3,86	8,13
13			0,63	1,93	4,63	0,85	2,62	6,30
MEDIA			0,78	1,71	3,88	1,07	2,33	5,27
5	98,1	Y	1,16	1,01	2,92	1,18	1,03	2,97
7,5			0,66	1,17	5,36	0,68	1,19	5,47
10			0,99	0,96	0,38	1,01	0,98	0,39
13			0,67	0,87	2,33	0,69	0,88	2,37
MEDIA			0,87	0,63	2,58	0,88	0,64	2,63
5	127,53	Y	2,80	2,91	1,30	2,20	2,28	1,02
7,5			2,08	3,36	2,36	1,63	2,63	1,85
10			2,52	0,52	5,39	1,97	0,41	4,23
13			2,09	2,19	2,55	1,64	1,72	2,00
MEDIA			2,37	2,21	1,74	1,86	1,73	1,37

Tabla 7. Error cuadrático medio absoluto y relativo obtenido en la medición de las fuerzas en los diferentes ejes, durante la colocación de fuerzas en dirección Y.

MATRIZ	FUERZA (N)	EJE	ERROR ABSOLUTO (N)			ERROR RELATIVO (%)		
			EJE X	EJE Y	EJE Z	EJE X	EJE Y	EJE Z
5	49,05	Z	1,23	4,70	1,07	2,51	9,58	2,18
7,5			1,47	2,11	5,61	3,00	4,30	11,44
10			1,52	6,26	2,25	3,10	12,76	4,59
13			1,75	9,09	3,16	3,56	18,52	6,44
MEDIA			1,49	5,53	1,47	3,04	11,28	2,99
5	73,575	Z	1,94	9,16	4,43	2,63	12,46	6,02
7,5			2,35	4,96	3,08	3,20	6,74	4,19
10			2,43	11,73	2,51	3,30	15,94	3,41
13			2,80	16,30	11,18	3,81	22,15	15,20
MEDIA			2,38	10,53	3,76	3,23	14,31	5,11
5	98,1	Z	2,12	6,44	2,23	2,16	6,57	2,28
7,5			2,62	1,23	7,31	2,67	1,25	7,46
10			2,73	9,67	0,61	2,78	9,86	0,62
13			3,17	15,61	10,85	3,23	15,91	11,06
MEDIA			2,66	8,19	1,41	2,71	8,35	1,43
5	127,53	Z	12,79	6,25	3,39	10,03	4,90	2,66
7,5			13,14	13,25	12,69	10,30	10,39	9,95
10			13,34	3,35	6,22	10,46	2,62	4,88
13			14,03	5,07	10,41	11,00	3,98	8,16
MEDIA			13,33	4,57	3,88	10,45	3,58	3,04

Tabla 8. Error cuadrático medio absoluto y relativo obtenido en la medición de las fuerzas en los diferentes ejes, durante la colocación de fuerzas en dirección Z.

Analizando las tablas y empezando por la correspondiente al eje X, se ve claramente como la matriz promedio obtenida es la que mejores resultados obtiene en el rango de masas escogido. Además los errores de medición obtenidos en este eje son prácticamente despreciables, manteniéndose el error relativo siempre por debajo del 3%.

En cuanto al eje Y se observan unos resultados muy parecidos a los obtenidos para el eje X. En los cuales la matriz de conversión obtiene los mejores resultados en el rango de masas, siendo los errores relativos inferiores al 5% con relación a la fuerza aplicada.

Por último, los resultados que refleja la tabla de errores en el eje Z, aunque la matriz de conversión obtiene los mejores resultados, estos resultados son significativamente peores que en los otros ejes. Para este eje el error relativo se mantiene por debajo del 10%, con la excepción de algunas mediciones que rondan el 15% con respecto a la fuerza aplicada. Esto es consecuencia directa de la dificultad en la calibración de dicho eje.

2.4.2.1 Discusión de resultados

Una vez calculados los errores cuadráticos medios se puede concluir con que los resultados tanto en el eje X como en el eje Y son muy precisos además de estables. Los errores en estos ejes no superan en ningún caso el $\pm 5\%$, y en la mayoría de las mediciones están muy próximos al valor teórico.

En cuanto al eje Z, se obtienen unos resultados menos precisos y estables. Esto es consecuencia directa de que la colocación de la masa es de gran dificultad debido a la forma del manillar. Además, dicha forma del manillar también dificulta la colocación del mismo de manera vertical. Debido a su forma curva el manillar tiende a inclinarse ligeramente, lo que introduce una componente en el eje Y. A pesar de dichas dificultades, los resultados en el eje X son muy buenos (no se ve alterado por la inclinación del manillar), mientras que los obtenidos en los ejes Y y Z tienen un error en torno al $\pm 10\%$.

Por otro lado, cabe destacar que la elección de la matriz de conversión promedio (mediante una media aritmética de las matrices obtenidas) ha sido un acierto, ya que en la mayoría de las mediciones son las que más se aproximan al valor real.

3 PRUEBAS DEL DISPOSITIVO

Una vez validada la matriz promedio de compromiso obtenida, se pasa a realizar una serie de pruebas con diferentes sujetos, para comprobar que el comportamiento dinámico de las galgas se corresponde con un comportamiento real.

El objetivo de estas pruebas es obtener un comportamiento lógico de las mediciones de fuerzas según las distintas condiciones.

3.1 Condiciones de las pruebas.

Para dicha comprobación se van a realizar pruebas con dos usuarios de distinta complejión. Los usuarios con los que se van a realizar la prueba del dispositivo son dos jóvenes de sexo masculino y en torno a los 26 años. El usuario 1 tiene una estatura de 1.70m y un peso de 68 kg. El usuario 2 tiene una estatura de 1.75m y un peso de 75 kg. Ambos individuos utilizan con frecuencia la bicicleta en sus desplazamientos diarios.

Los ensayos se van a realizar en un laboratorio de análisis de movimiento, con la bicicleta colocada en un rodillo estático. Estos consistirán en realizar el pedaleo sentado a un ritmo bajo, como si de un paseo se tratase. Y otra realizándolo de pie a modo de esprint.

3.2 Prueba de pedaleo sentado.

Para la realización de la prueba sentado, los usuarios deben subirse a la bicicleta y apoyar las manos en el manillar, sin realizar fuerza sobre el. En esa posición deberán esperar un minuto para establecer el cero, y pasado ese minuto empezaran a realizar un pedaleo normal, es decir, sin realizar un gran esfuerzo. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con cada usuario.

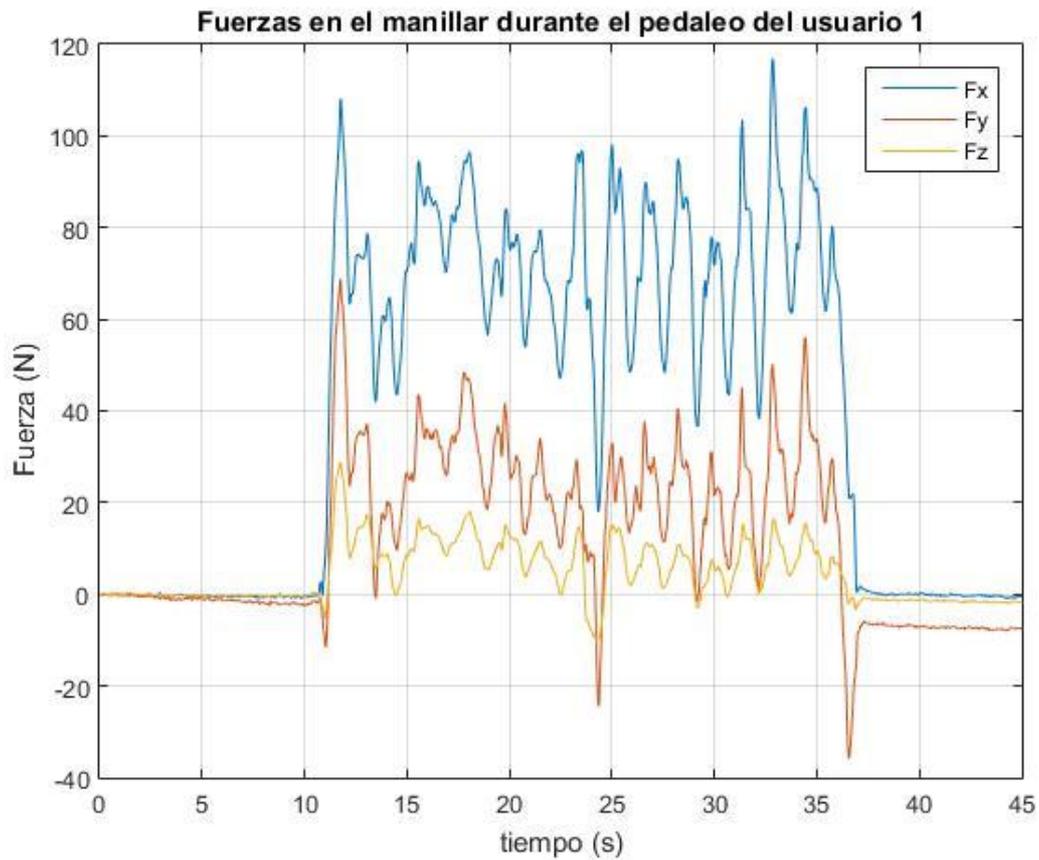


Figura 29. Fuerza en el manillar durante el pedaleo en las 3 direcciones.

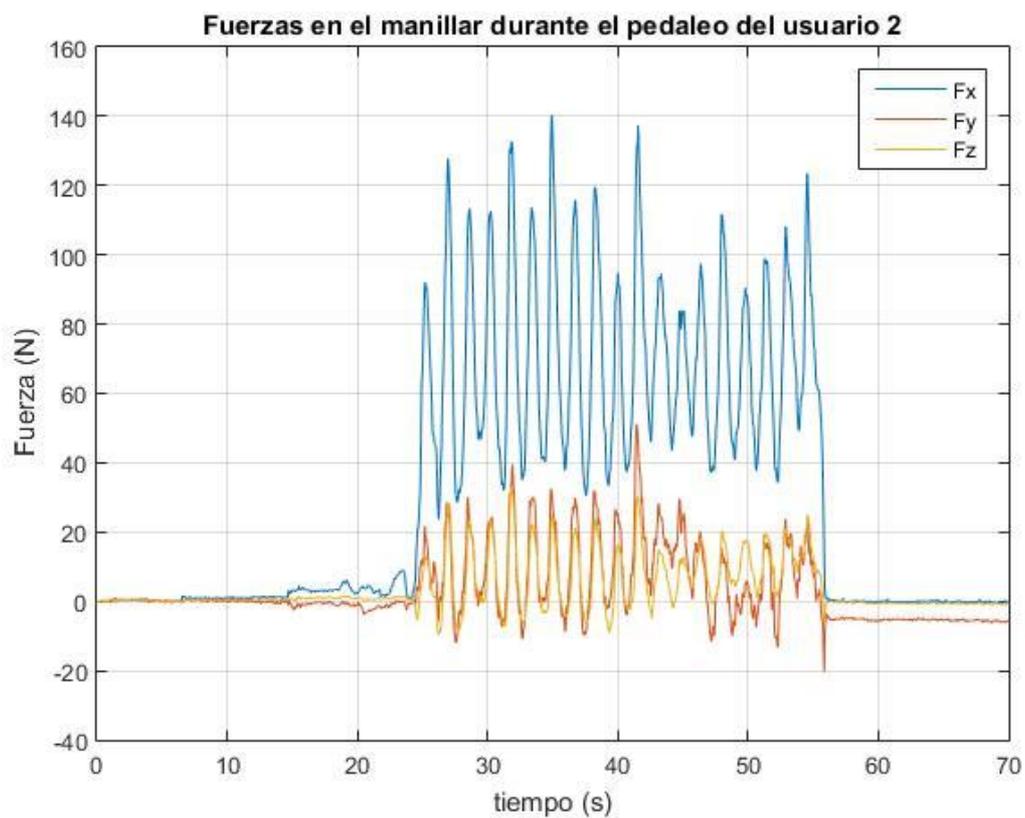


Figura 30. Fuerza en el manillar durante el pedaleo en las 3 direcciones.

3.3 Prueba de pedaleo de pié.

Para la realización de la prueba de pié, los usuarios deben de seguir el mismo procedimiento que para la prueba anterior. Deberán permanecer sentados en la bicicleta apoyando las manos en el manillar sin realizar esfuerzo sobre el. Una vez pasa el minuto de espera, procederán a colocarse de pié sobre los pedales y a realizar un pedaleo sin realizar un esfuerzo excesivo. Los resultados obtenidos para cada usuario son:

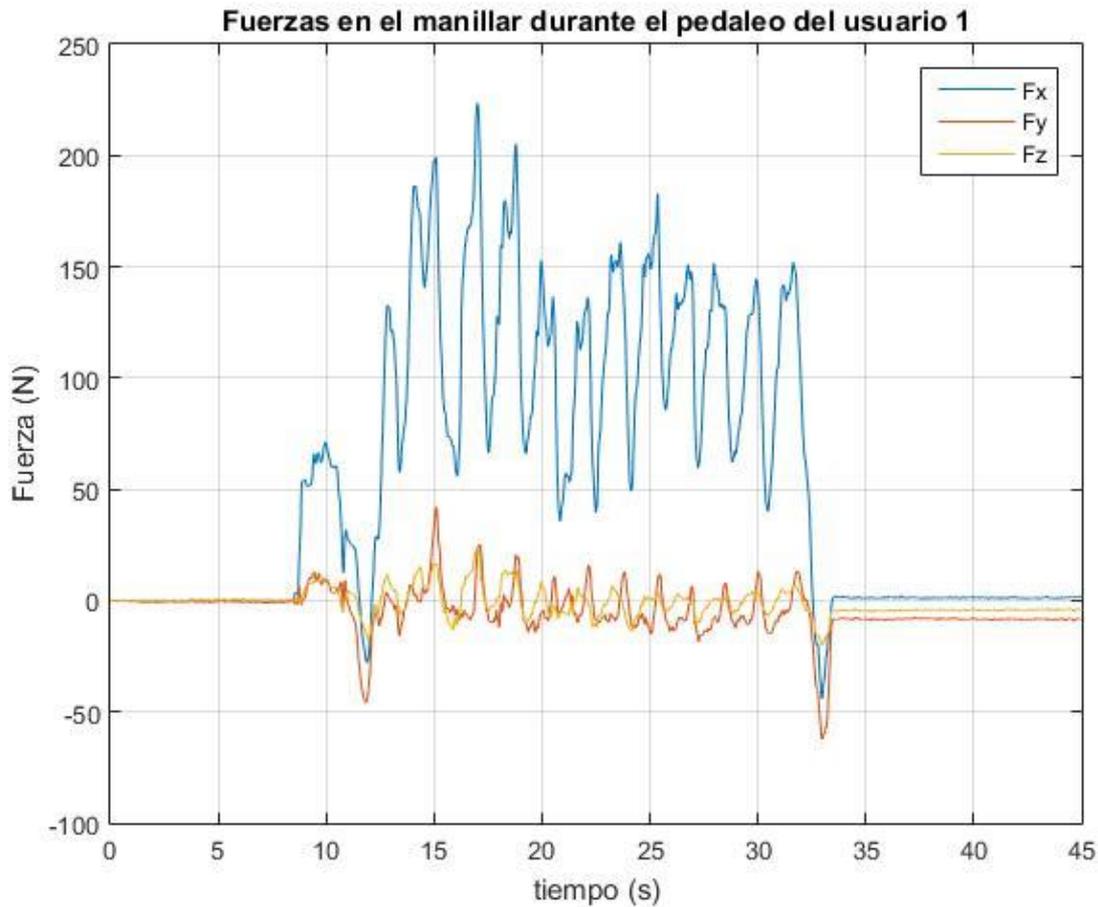


Figura 31. Fuerza en el manillar durante el pedaleo en las 3 direcciones.

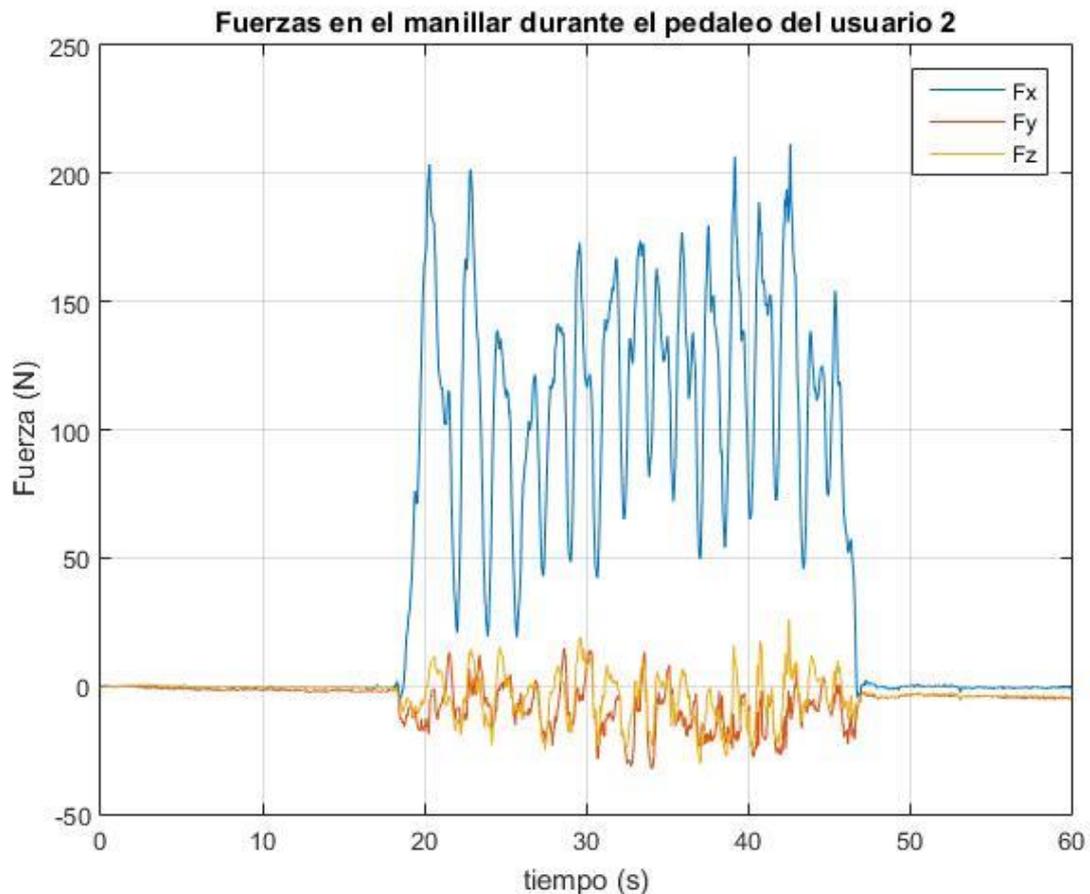


Figura 32. Fuerza en el manillar durante el pedaleo en las 3 direcciones.

3.4 Discusión de resultados.

De estas pruebas se pueden sacar varias conclusiones interesantes sobre el comportamiento dinámico del dispositivo.

En primer lugar, se puede observar como en la prueba de pedaleo sentado, ambos usuarios han obtenido un valor medio de fuerza en el eje X muy similar. Esto es consecuencia de que, al estar sentado, la mayor parte del peso se lo lleva el sillín y por lo tanto a pesar de la diferencia de peso entre los usuarios, el resultado es muy similar.

Mientras que en la prueba de pedaleo de pié, el valor de la fuerza en el eje X del usuario 1 está en torno a 100N y la del usuario 2 en encuentra alrededor de los 120N. Parte de esta diferencia puede ser consecuencia de que en esta disposición, el peso se apoya entre el manillar y los pedales.

Por otro lado, la diferencia entre las componentes de la fuerza entre ambas pruebas para cada usuario es considerable. La componente Y se observa como en la prueba de pedaleo sentado tiene un valor considerable, mientras que para la prueba de pedaleo de pié, esta componente está en torno al cero. Esto es debido a que en la disposición de pedaleo sentado, los brazos se encuentran inclinados hacia delante, por lo que genera una fuerza en el eje Y. Sin embargo, cuando se pedalea de pié el brazo adquiere una posición vertical, lo que hace que las componentes en el eje Y y Z sean prácticamente nulas.

Una vez realizado un análisis cualitativo del comportamiento del dispositivo durante el uso normal de la bicicleta, se puede concluir que tiene un comportamiento conforme a lo que se le suponía a priori y por lo tanto tiene un comportamiento lógico.

4 CONCLUSIONES

Resumiendo todo lo visto a lo largo del trabajo, se puede realizar una serie de conclusiones. En primer lugar, la matriz promedio obtenida es adecuada. Dicha matriz es la que mejor comportamiento tiene en el rango de masas utilizadas y en las diferentes direcciones.

Por otro lado, se obtiene una gran precisión en los ejes vertical (eje X) y de avance de la bicicleta (eje Y), cometándose siempre un error inferior al 5% de la fuerza aplicada.

En cuanto a la precisión de la dirección lateral (eje Z) obtenida es notablemente peor que la de los otros ejes, en donde los errores cometidos se encontraban en torno al 10% de la fuerza aplicada. Estos errores eran consecuencia directa de la dificultad en la colocación de la masa.

Por último se va a comentar el comportamiento de las galgas a lo largo del pedaleo de un usuario estándar. En las pruebas de usuario, hemos comprobado que el comportamiento de las galgas, cualitativamente hablando, es un comportamiento totalmente lógico, donde las fuerzas varían según el posicionamiento del cuerpo del usuario sobre la bicicleta.

4.1 Posibles mejoras.

Concluyendo con este trabajo, y después de observar la precisión obtenida con el dispositivo, se van a exponer varios puntos de mejora futura para el dispositivo. Estas mejoras van a atacar el mayor problema que se ha tenido durante la realización de este proyecto, la calibración. Para poder obtener un dispositivo de mayor calidad se proponen las siguientes mejoras:

- Realización de un utillaje para la colocación de la masa:

Durante la calibración se ha tenido un especial problema para la colocación de la carga en la dirección de carga que se pretendía. En el eje X e Y no se tuvieron grandes problemas. Sin embargo, para el eje Z se hacía imposible colocar las cargas en el mismo punto. Además la dirección no era exclusivamente la del eje Z sino que en la mayoría de las mediciones se tenían componentes en el eje Y.

- Dispositivos para la ayuda en la colocación de la carga:

Otra posible mejora que sería interesante es la de un sistema que ayude a la colocación de la galga, de tal manera que se pueda colocar en el punto exacto que se obtuvo en el estudio teórico.

- Realización de una calibración en función de la componente a calibrar:

Como se han visto en las pruebas, las componentes de los esfuerzos en el eje Y y Z eran mucho menores que las fuerzas obtenidas en el eje X. Por lo que se propone calibrar dichos ejes con otras masas distintas a las que se calibra el eje X.

- Sistema de cableado apantallado:

Durante la implementación del dispositivo se tuvieron varios problemas con los cables y las interferencias que se generaban entre estos y la bicicleta. Para paliar estos problemas se propone un sistema de cableado apantallado fijado a la bicicleta de manera que no se generen tensiones extras de los cables sobre el sistema de galgas.

- Estudio del fenómeno antena del manillar:

Como se ha comentado previamente, durante la instrumentación del manillar se obtuvieron ciertos problemas. Uno de ellos fue la interacción del manillar con los diferentes campos eléctricos que se encontraban a su alrededor. Sería interesante realizar un estudio en profundidad para determinar a que se debían dichas interacciones que sufrían las mediciones de las galgas con el cambio de posición del personal del laboratorio.

REFERENCIAS

- [1] P. D. Soden and B. A. Adeyefa. “ Forces Applied to a Bicycle During Normal Cycling”, J. Biomechanics Vol.12, pp 527-541, 1979.
- [2] O. V. Casas, R. Dalazen and A. Balbinot. “3D Load Cell for Measure Force in a Bicycle Crank”, Measurement 93 (2016), pp 189-201.
- [3] J. Vanwalleghe, F. Mortiera, I. De Baerea, M. Locufierb and W. Van Paepegema. “Design of an instrumented bicycle for the evaluation of bicycle dynamics and its relation with the cyclist’s comfort”, 9th Conference of the International Sports Engineering Association (ISEA) (2012).
- [4] J. Vanwalleghe, I. De Baerea, M. Locufierb and W. Van Paepegema. “Dynamic calibration of a strain gauge based handlebar force sensor for cycling purposes”, Procedia Engineering 112 (2015) 219 – 224.
- [5] J. M. Drouet and Y. Champoux. “Development of a three-load component instrumented stem for road cycling”, Procedia Engineering 34 (2012) 502 – 507.
- [6] E.K.J. Chadwick and A.C. Nicol. “A novel force transducer for the measurement of grip force”, Journal of Biomechanics 34 (2001) 125 - 128.
- [7] K. Hoffman. “An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges”.
- [8] J. M. Drouet and Y. Champoux. “Designing a Strain Gauge Transducer for Dynamic Load Measurement in Cycling using numerical simulation”, Procedia Engineering 72 (2014) 304 – 309.

