



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TREBALL FINAL DE GRAU

**TÍTOL DEL TFG: Automatització d'un canvi electrònic de bicicleta**

**TITULACIÓ: Grau en Enginyeria d'Aeronavegació**

**AUTOR: David Márquez Abellán**

**DIRECTOR: Francisco López Berbel**

**DATA: 14 de Juliol del 2016**

**Título:** Automatización de un cambio electrónico de bicicleta

**Autor:** David Márquez Abellán

**Director:** Francisco López Berbel

**Fecha:** 14 de Julio del 2016

## Resumen

Esta memoria explica el procedimiento llevado a cabo para conseguir que una bicicleta cambie de marchas de forma automática. Para ello se ha hecho una investigación previa de los sistemas que se utilizan actualmente en esta disciplina.

Se ha explicado la evolución que ha vivido la bicicleta, para comparar los sistemas antiguos de cambio de marcha con los actuales que son completamente electrónicos.

El objetivo era conseguir modificar uno de estos cambios electrónicos para que funcionase de forma automática. Pero el precio y la complejidad de estos dispositivos llevaron a descartar esta opción. Por lo que se decidió modificar un cambio de marchas clásico (por cable) para conseguir la automatización del cambio.

Para que la bicicleta cambie de marchas automáticamente ha sido necesario utilizar sensores, un microcontrolador y un motor capaz de regular la tensión del cable del cambio de marchas, es decir un motor que cambie de marchas.

Se han utilizado tres sensores para tomar medidas de velocidad, fuerza de pedaleo y cadencia. Con estos sensores se han hecho pruebas con la bicicleta para analizar los resultados. De los cuales se dedujo que en subidas hay que dar muchas pedaladas, mientras que en llano es tan importante dar muchas pedaladas como una velocidad adecuada que permita mantener la inercia. En bajadas no ha sido necesario hacer el estudio ya que solo se utiliza la octava velocidad.

Con estos resultados se ha programado el microcontrolador para que decida en que marcha hay que circular para mantener la máxima eficiencia. La placa que se utilizó es Arduino Mega 2560 ya que se necesitaba una placa con muchas memoria y puertos.

Las decisiones tomadas por el controlador se transfieren a dos motores servo que se encargan de regular la posición del cambio de marchas. Estos motores se programan para que giren un cierto ángulo. De modo que dependiendo de la marcha que se quiere utilizar giraran los grados que el microcontrolador tenga programados.

El caso teórico fue resuelto con éxito mientras que en la práctica, los sensores han demostrado que acumulan errores. Sin embargo, el mayor de los problemas han sido los motores servo ya que no están preparados para levantar peso por lo que su funcionamiento no llega a ser aceptable.

Finalmente, se ha conseguido montar un prototipo en una bicicleta que realiza tanto las medidas como el procesado de datos pero que obliga a realizar el cambio manualmente ya que los motores servo han demostrado no se útiles para esta función.

**Title:** Automation of an electronic bike change

**Author:** David Márquez Abellán

**Director:** Francisco López Berbel

**Date:** July 14<sup>th</sup> 2016

## Overview

This report explains the process carried out to use an automatic gear change applied to a bicycle. To do this, a preliminary investigation of the nowadays used systems in this discipline has been done.

It is explained the evolution that the bicycle has lived to compare the old gearshift systems with the nowadays systems, which are completely electronic.

The objective was to modify one of these electronic changes to make it work automatically. But the price and the complexity of these devices led to rule out this option. So it was decided to modify a classic change gear (by cable) to get an automatic change.

To achieve the bicycle change gears automatically, it has been necessary to use sensors, a microcontroller and a motor capable of regulating the tension of the cable of the gear change, that is to say that the motor change gears.

Three sensors have been used to take measurements of speed, pedalling strength and pedalling rate. These sensors have been employed to make different test to analyse the results. Taking into account these results, it was deduced that must be given many pedalling in rises. Meanwhile, in a flat terrain, is important the number of pedalling but also the rate to maintain the inertia. The study has not been done downgrades because only an eighth speed set was used.

The microcontroller has been programmed taking into account these results. It chose the gear in order to obtain the maximum efficiency. Arduino Mega 2560 has been used, because a great storage and a great number of ports have been required.

Two servomotors get the information from the microcontroller in order to regulate the position of the gear changes. These engines have been programed to turn a specific degree. Depend on the gear that you want to use, engines will turn the grades that the microcontroller have programed.

The theoretical case has also been solved successfully. The prototype has demonstrated that sensors accumulate a lot of errors. However, servo engines

support the worst and bad effect, because they are not prepared to hold weight. As a result, its operation is not effective.

Finally, the prototype has been installed on a bicycle that makes measurements and process data in an accurate way in spite of the gear changes have to be done manually, due to the servo engines are not prepared for this function.

Agradecimientos:

Me gustaría agradecer a Francisco López la confianza que ha depositado en mí, la ayuda y las ideas aportadas.

A mis padres que siempre me han apoyado en los buenos y malos momentos y que me han enseñado que nunca hay que rendirse.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍA ALCANZADA EN LA BICICLETA.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Principales innovaciones .....</b>	<b>2</b>
1.1.1 Cuadros de fibra de carbono .....	2
1.1.2 Frenos de disco.....	6
1.1.3 Monoplato.....	7
1.1.4 El cambio electrónico .....	9
<b>1.2 Evolución al cambio electrónico .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 Cambio por cable.....	10
1.2.2 Cambio electrónico.....	11
<b>1.3 El cambio automático .....</b>	<b>13</b>
1.3.1 Versiones desarrolladas.....	13
<b>CAPÍTULO 2. CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DEL PRODUCTO ...</b>	<b>15</b>
<b>2.1 Cadencia .....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 Fuerza de pedaleo.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Velocidad .....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO 3. ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1 Prototipo deseado.....</b>	<b>18</b>
<b>3.2 Prototipo desarrollado .....</b>	<b>20</b>
3.2.1 Equipamiento.....	20
3.2.2 Peso .....	22
3.2.3 Precio.....	23
3.2.4 Error.....	23
3.2.5 Autonomía.....	24
3.2.6 Desarrollo y montaje del circuito .....	25
<b>CAPÍTULO 4. PROGRAMACIÓN.....</b>	<b>39</b>
<b>4.1 Librerías.....</b>	<b>39</b>
<b>4.2 Reloj interno .....</b>	<b>41</b>
<b>CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y PROCESADO DE DATOS.....</b>	<b>42</b>
<b>5.1 Ascenso .....</b>	<b>42</b>
<b>5.2 Llano .....</b>	<b>45</b>

5.3 Descenso .....	47
5.4 Resultados .....	47
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.....</b>	<b>48</b>
6.1 Conclusiones.....	48
6.2 Trabajo futuro.....	49
<b>Bibliografía.....</b>	<b>50</b>
<b>ANEXO A. MEDICIONES ADICIONALES .....</b>	<b>52</b>
<b>ANEXO B. CÓDIGO .....</b>	<b>54</b>
B.1 Calibración del sensor.....	54
B.2 Ejecución del sistema .....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Cuadro de aluminio.....	3
Fig. 1.2 Cuadro de fibra de carbono.....	3
Fig. 1.3 Límite elástico aluminio.....	4
Fig. 1.4 Carga rotura aluminio.....	5
Fig. 1.5 Tensión-deformación carbono.....	5
Fig. 1.6 Tensión-deformación aluminio.....	5
Fig. 1.7 Comparativa peso y rigidez.....	6
Fig. 1.8 Transmisión bicicleta: plato y piñones.....	8
Fig. 1.9 Desviador trasero.....	10
Fig. 1.10 E-tube Project Software.....	12
Fig. 1.11 Esquema básico cambio automático.....	13
Fig. 2.1 Sensor de potencia.....	16
Fig. 3.1 Sensor de potencia y cadencia Zone DPMX.....	19
Fig. 3.2 Relé reed.....	20
Fig. 3.3 Célula de carga TAS606.....	21
Fig. 3.4 Arduino Mega 2560.....	21
Fig. 3.5 Autonomía actual.....	25
Fig. 3.6 Batería adecuada.....	25
Fig. 3.7 Circuito del prototipo .....	25
Fig. 3.8 Medida longitud de la rueda.....	27
Fig. 3.9 Velocidad por vuelta.....	27
Fig. 3.10 Cadencia.....	27
Fig. 3.11 Montaje sensor de cadencia.....	29
Fig. 3.12 Potencia de pedalada.....	29
Fig. 3.13 Factor de calibración o de galga.....	30
Fig. 3.14 Montaje sensor de fuerza.....	31
Fig. 3.15 Ley de Hooke.....	33
Fig. 3.16 Constante elástica del muelle de la bicicleta.....	34
Fig. 3.17 Par motor de un sólido de rotación.....	34
Fig. 3.18 Velocidad angular (rpm) .....	34
Fig. 3.19 Velocidad angular (rad/s) .....	34
Fig. 3.20 Aceleración angular.....	35
Fig. 3.21 Momento de inercia.....	35
Fig. 3.22 Par motor servo.....	35
Fig. 3.23 Par motor en (kg*cm) .....	35
Fig. 3.24 Servo S8218.....	36
Fig. 3.25 Instalación de los motores servo.....	37
Fig. 4.1 Ciclo de trabajo de un pulso PWM.....	39
Fig. 5.1 Cadencia de pedaleo en subida.....	42
Fig. 5.2 Peso aplicado en subida.....	43
Fig. 5.3 Potencia máxima en subida.....	43
Fig. 5.4 Cadencia de pedaleo en llano.....	44

<b>Fig. 5.5</b> Peso aplicado en llano.....	46
<b>Fig. 5.6</b> Potencia máxima en llano.....	46

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.1</b>	Freno de disco vs freno de pastilla.....	7
<b>Tabla 1.2</b>	Desarrollo monoplato 28, 30, 32 y 34 dientes.....	9
<b>Tabla 1.3</b>	Cambio electrónico vs mecánico.....	12
<b>Tabla 3.1</b>	Peso del equipo.....	22
<b>Tabla 3.2</b>	Precio del equipo.....	23
<b>Tabla 3.3</b>	Consumo del equipo.....	24
<b>Tabla 3.4</b>	Comparativa de imanes utilizados.....	28
<b>Tabla 3.5</b>	Comparativa de servos utilizados.....	37
<b>Tabla 5.1</b>	Esquema de velocidades.....	46

# INTRODUCCIÓN

El proyecto surgió de la necesidad de encontrar una bicicleta que se adapte al ciclista y no al contrario como sucede actualmente. En un principio este trabajo iba a ser un proyecto conjunto de dos estudiantes apasionados del ciclismo en el cual se diseñaría una transmisión nueva de bicicleta, pero la complejidad que tiene trabajar con engranajes para dos estudiantes de aeronáutica hicieron descartar esta idea. Por lo que se decidió realizar algo similar que no requiriese únicamente trabajo mecánico.

El objetivo principal de este trabajo es conseguir una bicicleta inteligente que sea respetuosa con el medio ambiente y que permita mejorar la eficiencia del ciclista. Los usuarios de este medio de transporte se basan en la comodidad a la hora de escoger la marcha adecuada, sin embargo, en este proyecto se intenta demostrar que no siempre la comodidad garantiza la eficiencia sobre la bicicleta.

Este trabajo se compone por dos partes, una primera parte de investigación y una segunda donde se explica el procedimiento llevado a cabo para diseñar el prototipo que se ha montado sobre una bicicleta Orbea Hydro Sport 2009.

En el primer capítulo se ha investigado sobre la situación actual del mundo del ciclismo. Se explican los materiales con los que se trabaja actualmente, los nuevos dispositivos que se han incorporado así como la evolución de algunas partes de la bicicleta como pueden ser los frenos. Además, se hace una amplia explicación del cambio de marchas ya que es el principal dispositivo sobre el cual se ha trabajado para diseñar el prototipo.

A parte del trabajo mecánico que hay que realizar para adaptar el prototipo se tiene que trabajar con sensores para realizar la toma de datos. Por lo que en el segundo capítulo se explica con detalle los parámetros que se miden como la cadencia, la velocidad y la fuerza de pedaleo.

En el siguiente capítulo se entra en la parte de desarrollo donde se empieza explicando el prototipo que se desarrollaría si dispusiésemos de un presupuesto muy elevado. Seguidamente se explica cada una de las partes del prototipo desarrollado. Se explica paso a paso su montaje, así como los problemas y las soluciones que se han dado. Además se detallan las especificaciones.

Se han utilizado algunas funciones básicas que permiten obtener el mejor rendimiento de los microcontroladores. Características como las librerías o la memoria de la placa Arduino se explican en el cuarto capítulo.

Por último se explican los resultados obtenidos de las mediciones realizadas con los sensores. Estos resultados se explican como ejemplo ya que este prototipo está pensado para adaptarse a cada persona. De modo que no hay solo un resultado válido sino que cada ciclista tendrá su estudio propio.

# **CAPÍTULO 1. TECNOLOGÍA ALCANZADA EN LA BICICLETA**

Muchos progresos han sido llevados a cabo a fin de mejorar aspectos como la comodidad, la seguridad o la eficiencia de un medio de transporte tan simple como es una bicicleta.

No obstante, el hecho de que sea un medio sencillo y alcanzable por todos conlleva a que el perfil de los usuarios sea muy dispar. Es por ello que se han desarrollado y se siguen desarrollando modelos que se adaptan al perfil de cada consumidor.

A gran escala podemos identificar dos tipos de consumidores. Aquellas personas que utilizan la bicicleta como alternativa a otros medios de transporte o simplemente para disfrutar de un paseo. Este tipo de personas generalmente cumplen con un mismo perfil, quienes buscan una bicicleta cómoda, segura y sencilla, que se adapte a su bolsillo y cumpla con las necesidades mínimas.

También están aquellas personas que, estas si, quieren sacar el máximo rendimiento de su bicicleta, aquellos que ven la bicicleta como un deporte. Para ello es necesario buscar un equilibrio entre comodidad, seguridad y eficiencia, a fin de rendir al máximo.

En este caso el factor económico es el principal determinante ya que actualmente el ciclismo es un deporte de moda y en el que los fabricantes ofrecen múltiples variedades e innovaciones. Tales innovaciones son los que marcan la diferencia a la hora de competir, es por ello que sus precios son tan elevados.

## **1.1 Principales innovaciones**

Durante los últimos años se han ido desarrollando nuevas tecnologías que mejoran y facilitan la utilización de la bicicleta tanto en la alta competición como en el uso diario. Este tipo de modificaciones pueden afectar a cualquier componente de este medio de transporte como puede ser la propia estructura de la bicicleta o la incorporación de nuevos elementos los cuales sustituyen modelos anteriores o que anteriormente no existían.

### **1.1.1 Cuadros de fibra de carbono**

Se conoce la fibra de carbono como uno de los materiales de moda que cada vez mas se utiliza en la fabricación de nuevos productos gracias a sus propiedades, destacando por encima de todas, el peso y la rigidez.

El aluminio es un material experimentado en la fabricación de bicicletas y es el mayor competidor de la fibra de carbono en este sector. El hecho de que la fibra de carbono proporcione unas propiedades tan interesantes puede llevar a pensar que los cuadros de fibra de carbono son de mayor calidad que los de aluminio pero esto no es del todo cierto.

Los cuadros de fibra de carbono ofrecen mayor rigidez, ya que en su elaboración se pueden reforzar aquellos puntos que vayan a soportar un mayor esfuerzo, mientras que el resto de zonas se elaboran tan ligeras como sea posible.

Sin embargo, el aluminio ofrece la ventaja de tener una mayor flexibilidad antes de que aparezca la rotura y la posibilidad de ser reparado cuando aparecen grietas, cosa muy difícil de solucionar en los cuadros de fibra de carbono, los cuales se fabrican en moldes en su mayoría.



**Fig. 1.1** Cuadro de aluminio



**Fig. 1.2** Cuadro de fibra de carbono

Hay que destacar que dentro de cada grupo de materiales hay muchas variedades. Cada una ofrece distintas calidades, lo cual indica que no siempre un cuadro de fibra de carbono será mejor a uno de aluminio.

En el caso de los cuadros de carbono, se clasifican según el número de filamentos utilizados en su fabricación, 3k representa que se han utilizado 3000

filamentos y así sucesivamente con 6k, 12k... Cuanto mayor sea este valor, mayor será la densidad del material. [1]

Hay dos clases de fibras de este material. Por un lado tenemos las fibras de alto módulo (HM) que se caracterizan por su elasticidad, por el contrario tenemos las de alta resistencia (HR) caracterizadas por su resistencia a la rotura. Para la fabricación de cuadros se suelen utilizar las que mayor elasticidad ofrecen (3k HM).

Al igual que el carbono, el aluminio también se puede clasificar, ya que es un metal muy blando que por si solo no se puede utilizar para fabricar cuadros de bicicleta. Por lo que se utilizan aleaciones compuestas, principalmente, por magnesio y silicio.

Serie 5xxx, 6xxx y 7xxx son algunos de los estándares mas representativos de este tipo de aleaciones, que además se pueden combinar con otros elementos como cobre o titanio para mejorar sus propiedades.

El primer número de cada serie representa el tipo de aleación de acuerdo al elemento aleante principal. 5xxx representa el magnesio y se utiliza en fabricaciones marinas y en camiones. 6xxx representa el magnesio y el silicio y se utiliza en estructuras en general. Por último, la serie 7xxx representa el zinc, magnesio y cobre y se utiliza en estructuras de aviones.

Una buena forma de evaluar la calidad de un material es conociendo sus límites, concretamente analizando el límite elástico, el cual representa el punto a partir del cual si seguimos aumentando la carga sobre el material la deformación que este sufrirá será permanente y no podrá volver al estado original. Por otro lado, el punto de rotura es un dato importante a la hora de fabricar cuadros, el cual aparece tras un periodo de deformación plástica (permanente) del material. [2]

En las siguientes figuras aparece representado el límite elástico por el cual el material sufre una deformación del 0,2%, así como la carga de rotura. Datos de demuestran que la serie 7xxx es la aleación que mejores prestaciones ofrece.

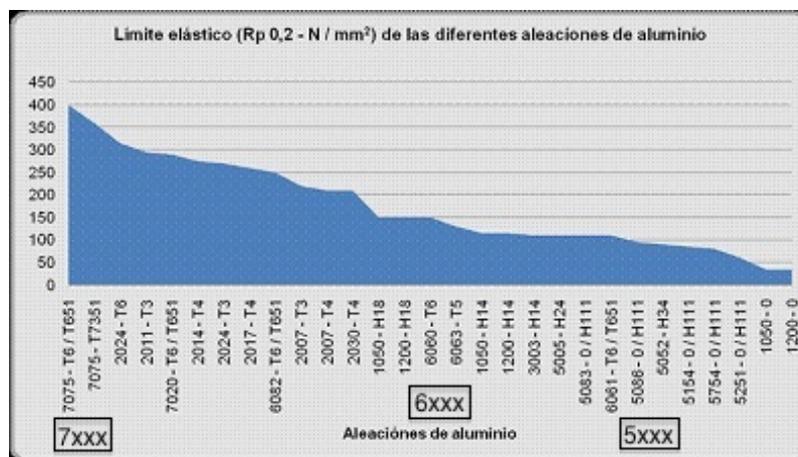


Fig.1.3 Límite elástico aluminio

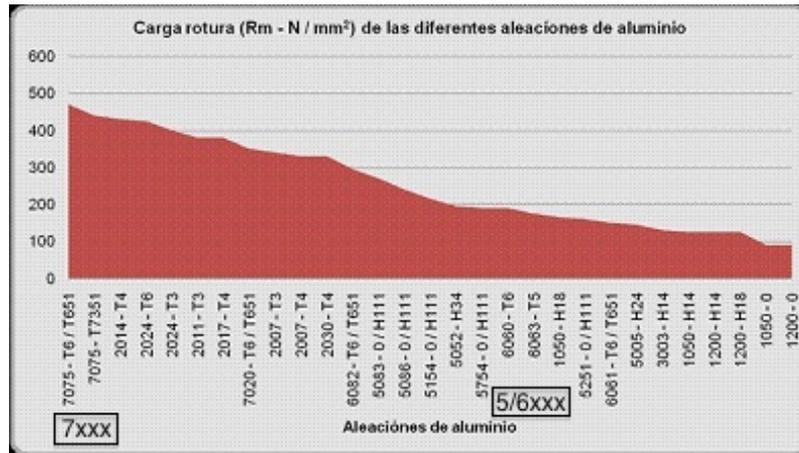


Fig.1.4 Carga rotura aluminio

En función de los datos graficados es posible obtener una amplia información sobre el material en cuestión. Es por ello que todos estos datos se representan comúnmente en un solo gráfico que muestra la deformación resultante tras la aplicación de una carga, así como las zonas elásticas (recuperación de la forma original tras ser sometido a una carga), plástica (deformación permanente) y el punto de rotura.

A continuación se muestran como ejemplo de materiales una aleación de aluminio y un carbono que describen visualmente el comportamiento de estos materiales. El carbono es un material muy resistente, sin embargo, cuando llega a su límite elástico rápidamente se rompe. Por el contrario el aluminio no es tan resistente pero soporta mucho mejor las deformaciones antes de romperse.

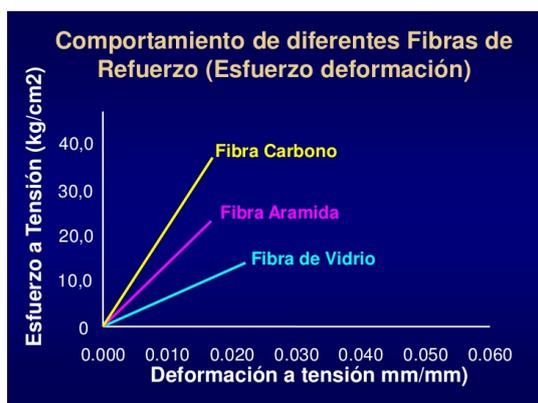


Fig. 1.5 Tensión-deformación Carbono [3]

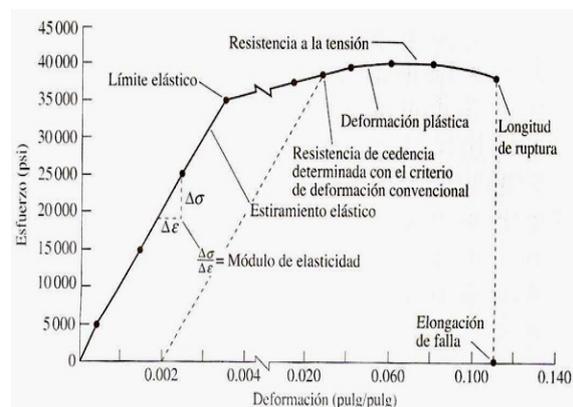
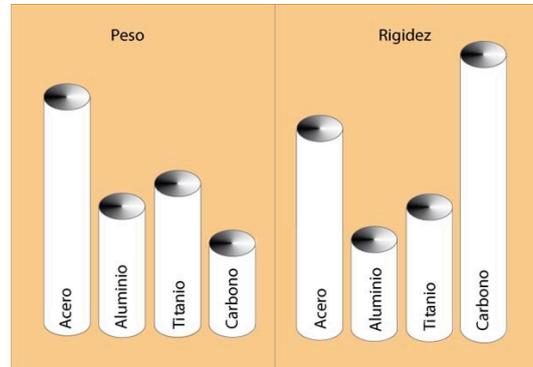


Fig. 1.6 Tensión-deformación aluminio

Carbono y aluminio no son los únicos materiales utilizados en esta disciplina, los cuadros de titanio y acero destacan por ser prácticamente irrompibles pero la complejidad para fabricarlos y el peso, respectivamente, penalizan fuertemente a estos dos materiales.



**Fig. 1.7** Comparativa peso y rigidez

### 1.1.2 Frenos de disco

Al igual que las motocicletas o los automóviles, las bicicletas han evolucionado de los frenos de pastilla a los frenos de disco. Aunque, hay varios motivos que influyen a la hora de decidir que sistema de frenado es mejor. [4]

Las clásicas pastillas de freno ofrecen un mecanismo muy sencillo que se traduce en ligereza, con el inconveniente de que sobrecalienta las llantas llegando a provocar reventones de rueda.

Por el contrario, los discos de freno soportan mucho mejor las altas temperaturas, de modo que no pierden eficacia en condiciones extremas, ya sea por barro o agua o por temperatura. Sin embargo, el peso penaliza a este dispositivo ya que es un sistema mucho más elaborado. [5]

Al margen de la complejidad de cada mecanismo, el dato más relevante es saber cuál de ellos frena más, al fin y al cabo, esta es su función.

Previamente, hay que entender la diferencia entre potencia de frenado y modulación. La potencia de frenado hace referencia a la capacidad del freno para bloquear la rueda, mientras que la modulación es la capacidad de control para detener la bicicleta.

Los frenos de disco no tienen ningún inconveniente con la potencia de frenado, gracias a la superficie rugosa de los discos y al sistema hidráulico que permiten hacer mucha más presión. No obstante, tener tanta potencia no es del todo bueno ya que puede provocar que la rueda se bloquee fácilmente.

Es por ello que se utilizan líquidos de freno de distinta viscosidad y pastillas de distintos materiales para encontrar un equilibrio entre potencia y modulación.

En cuanto a las pastillas de freno convencionales, la modulación no es ningún problema ya que el radio de acción es muy amplio ( llantas de dos metros de longitud ). Por el contrario, la potencia puede ser escasa aunque en los últimos años se han desarrollado diseños mas avanzados ( introducción del sistema hidráulico) de este sistema que aumenta considerablemente la potencia de frenado.

En la siguiente tabla aparecen los resultados tras someter bicicletas idénticas, con freno de pastilla y de disco, a un descenso de un puerto de montaña donde la temperatura y la presión hacen de los frenos de pastilla un dispositivo peligroso.

**Tabla 1.1** Freno de disco vs freno de pastilla [6]

<i>Shimano Adrenaline</i>	Freno llanta	Freno disco
<b>Inicio prueba (1537 m)</b>		
Temperatura llanta	16,7 °C	16,2 °C
Presión neumático	8,3 kg/m <sup>3</sup>	8,2 kg/m <sup>3</sup>
<b>Final prueba (694 m)</b>		
Temperatura llanta	40 °C	17,1 °C
Presión neumático	9,2 kg/m <sup>3</sup>	8,3 kg/m <sup>3</sup>
Velocidad máxima	78,2 km/h	81,4 km/h
Deceleración máxima	0,36 G	0,46 G

Lamentablemente los frenos de disco han tenido que ser retirados de la competición (en carretera) ya que los ciclistas estaban expuestos a un gran peligro en caso de caída, ya que son discos muy afilados a alta temperatura.

Pese a este inconveniente, las bicicletas se siguen fabricando con este dispositivo, además, a nivel competitivo sigue estando permitido en bicis de montaña, donde las velocidades no son tan elevadas y el disco está mejor protegido.

### 1.1.3 Monoplato

Apostar por utilizar un solo plato ha sido una decisión difícil en esta industria pese a que utilizar un monoplato simplifica mucho las cosas.

Uno solo soluciona varios problemas como puede ser la incertidumbre al seleccionarlo adecuado a la marcha, el cableado extra y el peso del cual nos liberamos. [7]

Es evidente que un solo plato no ofrece la misma posibilidad de desarrollo que el de una bici equipada con dos o tres, pero la penalización es muy pequeña comparada con los beneficios anteriormente mencionados. Además de que el

hecho de no tener que cambiar de plato permite utilizar dientes mas grandes que impiden que la cadena se salga.



**Fig. 1.8** Transmisión bicicleta: plato y piñones [8]

La penalización que ofrece el monoplato se cobra de dos formas, o bien exigiendo un mayor esfuerzo físico, o por el contrario perdiendo velocidad en bajada, depende de la relación de piñones y plato que se escoja.

En cuanto a los piñones, suelen estar en el rango de los 11 dientes hasta los 44 dientes, dependiendo de cada fabricante.

Si escogemos un plato de 30 piñones se podrán asumir grandes cuestas mientras que en bajadas la relación de marchas no será suficiente y el ciclista pedaleará en vacío.

Por ello se utilizan platos de 32 dientes que no castigan tanto en bajadas pero que si exigen mayor esfuerzo físico en subidas acusadas. [9]

A nivel competitivo el monoplato no puede ser un limitante para poder rendir al máximo, así que se utilizan platos de 34 dientes que requieren una buena preparación física pero que permite pedalea en todo momento.

El desarrollo se puede explicar como las vueltas que da la rueda trasera por pedalada, por lo que interesa que el desarrollo no ni bajo ni demasiado elevado ya que exigiría mucho esfuerzo físico. [10]

**Tabla 1.2** Desarrollo monoplato 28, 30, 32 y 34 dientes

Dientes piñón	Dientes monoplato				
	28	30	32	34	
11	2,545	2,727	2,909	3,091	muy suave
13	2,154	2,308	2,462	2,615	
15	1,867	2,000	2,133	2,267	suave
19	1,474	1,579	1,684	1,789	
21	1,333	1,429	1,524	1,619	intermedio
24	1,167	1,250	1,333	1,417	
28	1,000	1,071	1,143	1,214	medio/duro
32	0,875	0,938	1,000	1,063	
36	0,778	0,833	0,889	0,944	duro
40	0,700	0,750	0,800	0,850	
44	0,636	0,682	0,727	0,773	muy duro

Por ejemplo, si se utiliza un plato de 28 dientes y un piñón de 40, la rueda trasera dará poco más de media vuelta por pedalada. Se avanzará muy poco pero ofrece el beneficio de necesitar poca fuerza.

No existe una medida exacta que caracterice el desarrollo como suave o duro ya que todo depende de la persona que lo ponga en práctica. Por este motivo el margen que se muestra en la Tabla 1.2 es bastante amplio, además de que estos datos aportan una información más bien orientativa.

### 1.1.4 El cambio electrónico

El cambio electrónico es el tema principal, el cual se desarrollará a lo largo de todo el documento. Se trata de un tema actual, sobre el cual ha habido muchas innovaciones en los últimos años y que se explican con más detalle a continuación.

## 1.2 Evolución al cambio electrónico

Hasta el momento se han mencionado algunos de los nuevos sistemas y mecanismos que se han incorporado al mundo del ciclismo. Sin embargo, se debe de hacer una distinción entre la tecnología utilizada en estos sistemas y la tecnología que incorporan los actuales cambios de marcha.

Esta distinción es la electrónica que primero revolucionó esta industria con la incorporación de bicicletas con motor y nuevamente lo vuelve a hacer con el cambio de marchas electrónico introducido en los últimos años.

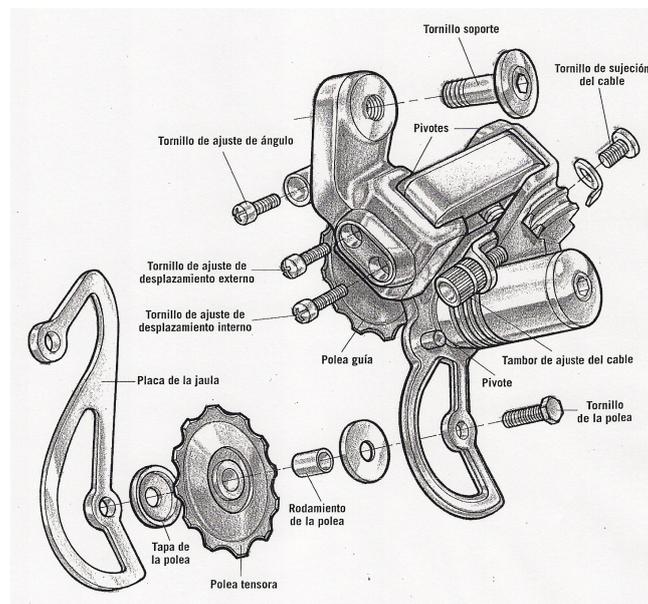
### 1.2.1 Cambio por cable

A pesar de la introducción del cambio electrónico, el cambio clásico (por cable) se sigue utilizando ya que los modelos más avanzados ofrecen tal nivel de suavidad y precisión que hace difícil creer que el mecanismo funcione a través de un cable.

Para entender como funciona el cambio de una bicicleta, primero de todo hay que identificar cada una de sus partes y la función que desempeñan.

Este tipo de cambios se pueden fragmentar en tres partes/piezas. En primer lugar, tenemos la maneta de cambio o pulsador que es un sistema muy sencillo ya que viene configurado por el fabricante y donde únicamente se debe considerar que el número de cambios corresponde al número de marchas. En segundo lugar, el cableado, que se sitúa sobre el cuadro (o integrado en este), debe estar adecuadamente tensado, de modo que no ofrezca ninguna holgura en su colocación. Y por último, la pieza más importante, el desviador.

El desviador de una bicicleta se compone por varias piezas, las cuales interactúan entre sí, de modo que cuando una se mueve el resto también lo hace.



**Fig. 1.9** Desviador trasero [11]

El principio de funcionamiento es muy sencillo ya que consta de dos fuerzas que interactúan. Una de ellas es el cableado que es el encargado de tensar el desviador y comprimir el muelle que se encuentra entre los pivotes y la otra es el propio muelle que es el que ejerce la fuerza en la dirección opuesta. De este modo, regulando la tensión del cable, podemos bajar y subir de piñón respectivamente, es decir hacer un cambio de marcha. [12]

En medio de este dispositivo se encuentra el juego de poleas las cuales se encargan de mantener la cadena situada con precisión en el piñón deseado y al mismo tiempo permite que la cadena siempre este tensada. Para que el cambio sea preciso es necesario realizar la calibración mediante los tornillos de ajuste externo e interno (ver figura 1.9), que limitan el rango de operación del cambio, y el tambor de ajuste de cable que regula la distancia entre el casete de piñones y el desviador, de modo que cuanto menor sea la distancia más preciso es el cambio.

### **1.2.2 Cambio electrónico**

El primer cambio electrónico incorporado en una bicicleta fue en 1992. Este cambió el cableado por dos pulsadores que transmiten en tiempo real la información a un microprocesador que a su vez transfiere la información a un motor encargado de regular la tensión del muelle del desviador.

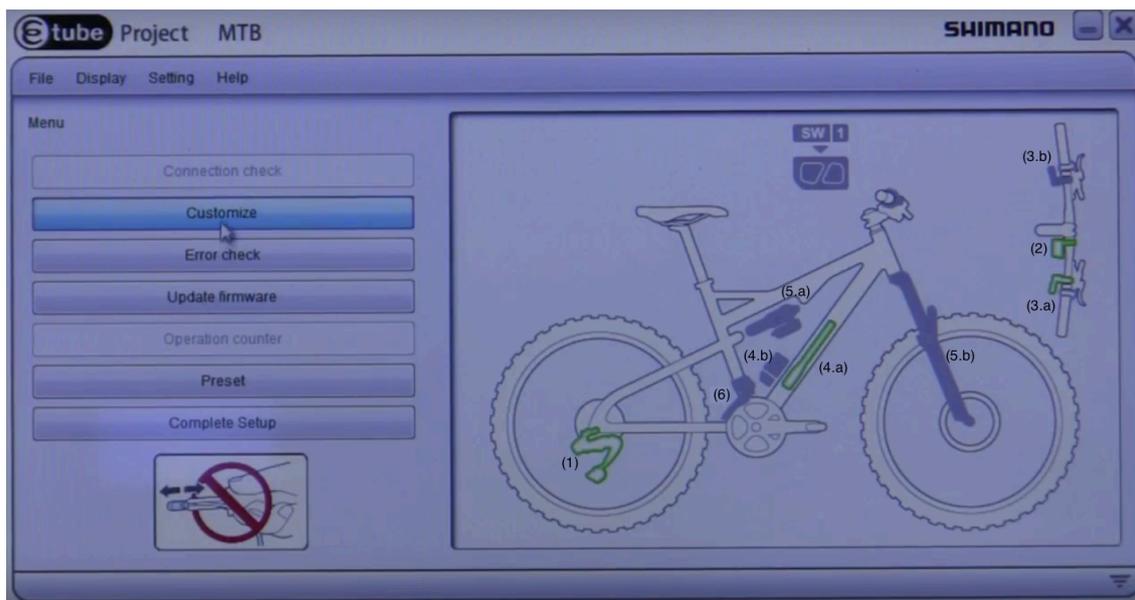
Aunque no sería hasta 1999, cuando apareciese el primer cambio electrónico sin cables mecánicos en ninguno de sus componentes que es el que se utiliza en la actualidad. Un avance que reduce las labores de mantenimiento de los cambios de bicicleta ya que desaparece el problema de la calibración y tensión de los cables. [13]

Y es que el cambio electrónico ofrece la gran ventaja de que una vez realizada la instalación, ya nunca mas será necesario hacer ningún ajuste, debido a que cambio y el desviador tienen un rango de actuación y no cambia con el paso del tiempo. [14]

Además de la electrónica que se encarga de mantener el desviador siempre bien calibrado, el cambio electrónico ofrece varias cualidades. En primer lugar, la principal característica que presenta el desviador es la incorporación de un motor, encargado de regular la tensión del muelle según el piñón escogido. Este motor puede ser peligroso para los engranajes en caso de caída o golpe, por lo que incorpora un sistema antibloqueo que en caso de golpeo al desviador el motor suelta los engranajes para no dañar el cambio.

En segundo lugar, la posibilidad de hacer todos los cambios con un solo pulsador en aquellos equipos que disponen de mas de un plato. Ya que configurando la relación de platos y piñones en el procesador, a gusto del usuario, el desviador delantero escogerá el plato adecuado al piñón que se encuentre engranado.

Existen muchos mas detalles, todos ellos interesantes por igual, no obstante la introducción de un software personal para el usuario, marca la diferencia aun más, respecto al cambio mecánico.



**Fig. 1.10** E-tube Project Software

Se trata de un software que se adapta al equipamiento de cada bicicleta. De modo que al inicio de la sesión realiza un chequeo de los dispositivos que están siendo utilizados en la bicicleta (iconos en verde), como puede ser, desviador trasero(1), monitor(2), palanca de cambio trasera(3.a), palanca de cambio delantera(3.b), batería interna(4.a), batería externa(4.b), regulador de suspensión trasera(5.a), regulador de suspensión delantera(5.b), desviador delantero(6).

Una vez reconocido el equipamiento, se pueden hacer otras labores como actualizaciones, calibración y ajustes de la velocidad del cambio entre otros.

El peso, el precio y la autonomía son los principales puntos flacos del cambio electrónico. Sin embargo, comparando ambos equipos de la misma gama, se puede observar que el peso no es determinante, mientras que el precio hace que sea un dispositivo al alcance de muy pocos.

**Tabla 1.3** Cambio electrónico vs mecánico [15]

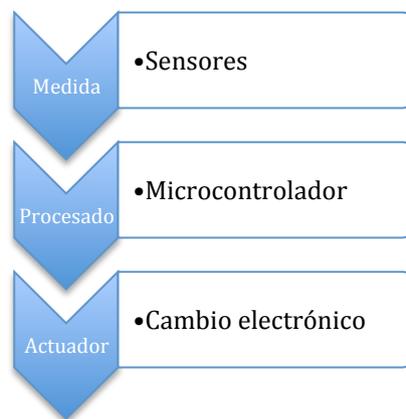
	<b>XTR Di2 (electrónico)</b>	<b>XTR (mecánico)</b>
Palancas de cambio	129g	200g
Desviador trasero	290g	221g
Desviador delantero	140g	135g
Batería	51g	-
Pantalla	30g	-
<b>Total</b>	<b>640g</b>	<b>556g</b>
<b>Precio (aprox.)</b>	<b>2000€</b>	<b>1000€</b>
<b>Autonomía</b>	<b>300-2000km</b>	-

Respecto a la autonomía de la batería, no se puede precisar cual es su valor exacto, ya que depende del tipo de terreno en el que se utilice, el número de cambios que se realice y la temperatura en la que se encuentre.

### 1.3 El cambio automático

Cambio electrónico y cambio automático son prácticamente sinónimos, ya que la función que desempeña el mecanismo de un cambio electrónico es automática, a excepción de los botones que emiten la orden de cambio de marcha.

Por lo tanto, para obtener un cambio que funcione de forma completamente automática, es necesario introducir un medidor y un procesador que transfieran la información al actuador para realizar el cambio de marchas de forma autónoma.



**Fig. 1.11** Esquema básico cambio automático

Cuando se trata de diseñar algo nuevo, la forma mas sencilla de hacerlo suele ser modificar o adaptar algo ya existente, por ello la Figura 1.11 representa el esquema mas sencillo para lograr un cambio automático. Sin embargo, existen algunas versiones desarrolladas que alteran este esquema.

#### 1.3.1 Versiones desarrolladas

El cambio automático de bicicleta es algo que ya existe, pero que cada desarrollador lo ha diseñado a su parecer, de modo que cada diseño tiene unas características únicas que no comparten con el resto.

Son cuantiosos los modelos desarrollados, pero en su mayoría, ofrecen cambios de dos o tres marchas que dotan a estas bicicletas de poca utilidad. Sin embargo, hay otros modelos que resultan interesantes y que se comentan a continuación.

La bicicleta de cambio automático de Mercedes de 2005, es una primeras versiones desarrolladas y comercializadas. Se trata de un modelo de 8 velocidades que mide los parámetros velocidad, cadencia de pedaleo y posición de la suspensión. Sin embargo, la velocidad es el único parámetro utilizado para seleccionar la marcha adecuada, lo que hace que no sea un sistema muy sofisticado. Además, no utiliza el casete de piñones, sino un buje de marchas. [16]

Autobike ofrece un modelo muy distinto pero que también apuesta por la utilización de un sistema de engranajes, conocido como NuVinci, que difiere del clásico casete de piñones. Se caracteriza por la medición de la cadencia de pedaleo para determinar la relación de velocidad correcta. Sin embargo, al no utilizar piñones, no realiza cambios de marcha propiamente dichos, por lo que se aleja de la definición de cambio automático planteada. [17] [18]

Parece ser que todas las marcas comerciales apuestan por este sistema, sustituyendo el casete de piñones por un buje. Sin embargo, todos los prototipos desarrollados por estudiantes y jóvenes ingenieros utilizan el sistema de cambios tradicional (como en este proyecto). Es el caso de unos estudiantes de la Universidad de Carnegie Mellon, que desarrollaron un modelo utilizando como único parámetro de entrada la cadencia de pedaleo. Así mismo, se utilizó un servo para el control de las marchas. Tal proyecto demostró, en su justa medida, su funcionamiento en el laboratorio, sin embargo, no tuvo mayor proyección. [19]

En la actualidad no se comercializa ningún sistema de cambio electrónico que se adapte a la definición realizada, e incluso no existe ningún prototipo que se haya hecho público. Por lo que el desarrollo de nuevas ideas no deja de ser interesante.

## **CAPÍTULO 2. CONSIDERACIONES PARA EL DESARROLLO DEL PRODUCTO**

Como se ha mencionado anteriormente, este modelo de cambio automático se basa en la modificación de un cambio ya existente de bicicleta para lograr su completa autonomía. Para tal fin, será necesario introducir nuevos elementos, como pueden ser sensores.

Hay una gran variedad de parámetros que se pueden medir con sensores en una bicicleta, como, por ejemplo, ritmo cardiaco, presión sobre el neumático, inclinación del terreno... no obstante, han sido otros tres parámetros los que se han considerado de mayor relevancia para la toma de datos que se explican a continuación.

### **2.1 Cadencia**

La cadencia de pedaleo es el número de vueltas completadas por el pedal en un minuto.

El valor óptimo se suele encontrar entre las 70 y las 100 pedaleadas por minuto, lo que ofrece un rango muy amplio. Esto se debe a que la cadencia de pedaleo óptima depende de cada persona. [20]

A la hora de dar pedaladas, se somete a un gran esfuerzo tanto a las piernas como al organismo. De modo que aquel que se encuentre mejor preparado muscularmente, podrá ejercer más fuerza sobre los pedales y por lo tanto su cadencia óptima será baja, mientras que aquel que no pueda ejercer tanta fuerza le compensará dar más pedaladas, sacrificando el consumo de oxígeno.

Aun así, esta información no es lo suficientemente relevante para escoger una cadencia exacta por lo que, además, se tiene que tener en cuenta otros parámetros.

El sistema nervioso es un condicionante, ya que neurológicamente, cada persona tiene desarrolladas sus capacidades y cualidades de forma distinta, al igual que la mentalidad de cada uno, ya que no todo el mundo se exige por igual. Por otro lado, la cadencia de pedaleo no debe de ser la misma para bajada, llano y subida, estos valores deben diferir en unas 10 pedaladas por minuto, siendo menor la cadencia en subidas. Además, hay que tener en cuenta que no todas las bicicletas ofrecen el mismo desarrollo, ya que cada fabricante puede montar una relación de marchas distinta. [21]

La mejor forma de averiguar cuál es la cadencia de pedaleo idónea, es subirse a la bicicleta y realizar varios test para averiguar que cadencia es más cómoda

e ir tomando nota de la potencia consumida en relación a la distancia recorrida. De este modo se podrá obtener la cadencia óptima.

## 2.2 Fuerza de pedaleo

Como cualquier otro medio de transporte, la bicicleta necesita un motor, en este caso las piernas del ciclista. De modo que, es importante conocer la fuerza que se ejerce sobre el pedal a fin de conocer la potencia desarrollada.

En los últimos dos años se han ido desarrollando modelos muy distintos. Por un lado, se encuentran los modelos menos eficientes, pero que permiten obtener una medida aproximada de la energía desarrollada. Se trata de la utilización de pulsómetros que analizan el esfuerzo en base al estudio del ritmo cardiaco.

En cambio, existen modelos mucho mas sofisticados que ofrecen una medida precisa de la energía aplicada. Se trata de la utilización de galgas extensiométricas que se sitúan entre el pedal y la biela. Mediante el cálculo de la deformación de la galga se puede obtener el valor de la energía aplicada.



**Fig. 2.1** Sensor de potencia [22]

Hay varios modelos, algunos de ellos realizan el calculo sobre un pedal solo, mientras que otros mas precisos realizan la medida sobre ambos pedales. En mayo de este año ha salido al mercado un modelo que, por primera vez, el sensor va sujeto al ciclista (en las calas) en lugar de ir sujeto a la bicicleta.

Estos datos se utilizan para analizar el rendimiento del ciclista sobre la bicicleta a fin de perfeccionar la eficiencia. Sin embargo, son dispositivos que superan los 250€ y llegan hasta los 3000€, y que no realizan ninguna función mas que aportar información al usuario, por lo que solo se utiliza en la alta competición.

Por lo tanto, medir la fuerza ejercida por el ciclista se convierte en una tarea fundamental si lo que se quiere es analizar con precisión el rendimiento sobre la bicicleta. Ya que de nada sirve ejercer mucha fuerza si el rendimiento es muy bajo.

## 2.3 Velocidad

La velocidad es un parámetro básico pero fundamental a la hora de analizar el comportamiento sobre la bicicleta. Debido a que la manera de afrontar pocos kilómetros no será igual a la de recorrer largas distancias. Es por ello que mediante un velocímetro se puede utilizar las medidas de distancia y tiempo para realizar cualquier medida de interés.

## CAPÍTULO 3. ELABORACIÓN DE UN PROTOTIPO

En base a todos los conceptos adquiridos y comentados sobre el mecanismo de funcionamiento de la bicicleta, la tecnología utilizada y la necesidad de los ciclistas por conocer su comportamiento sobre la bicicleta para ofrecer el máximo rendimiento, se plantea realizar un prototipo.

El objetivo de la construcción del prototipo es, en primer lugar, aprender a trabajar con esta tecnología al igual que la realización del montaje sobre una estructura tan limitada como es una bicicleta. En segundo lugar, realizar la toma de datos así como el procesado para obtener unos resultados. De modo que con estos resultados se podrá valorar el comportamiento del ciclista y en consecuencia tomar una decisión sobre cual es el la relación de marchas que garantiza el máximo rendimiento al usuario.

Se trata de realizar una primera versión del modelo que cumpla con los requisitos mínimos y que funcione. El tiempo y la falta de experiencia son dos condicionantes que hacen que el prototipo desarrollado difiera del deseado, no obstante, igualmente válido para el estudio.

### 3.1 Prototipo deseado

Conseguir un prototipo que equipe toda la tecnología puntera favorecería al desarrollo de tal experimento. Ya que estos dispositivos a penas ofrecen errores de medida, además de que el montaje resulta mucho mas cómodo y discreto. El cableado es muy discreto y estos dispositivos están diseñados para adaptase al ciclista, incomodando lo mínimo a la hora de dar pedaleadas. Sin embargo, tratar de diseñar un dispositivo de tal calidad puede incrementar el coste de producción en miles de euros. Por lo que no sería muy inteligente realizar una apuesta tan arriesgada teniendo en cuenta que se trata de un primer prototipo.

La clase de bicicleta idónea para realizar el estudio es irrelevante, ya que se trata de un sistema útil para ciclistas de montaña, carretera e incluso triatletas. No obstante, la fibra de carbono es el líder en todas las categorías, por lo que un cuadro de fibra de carbono con cableado interno parece la estructura idónea.

Actualmente existen dos dispositivos comúnmente conocidos para el cálculo de la cadencia, por un lado están los cuentaquilómetros que incorporan sensor de cadencia que utilizan un procesador de datos común y muestran la información por pantalla. Por otro lado está la tecnología punta de los potenciómetros que miden la energía empleado en la pedalada y que a su vez miden la cadencia.

Este sería el dispositivo óptimo para el montaje, en concreto los potenciómetros que se instalan sobre la cala de la bicicleta de modo que no es necesario modificar la estética ni estructura de la bicicleta.



**Fig. 3.1** Sensor de potencia y cadencia Zone DPMX

Tal y como se ha comentado, el objetivo es medir tanto cadencia como fuerza de pedaleo y el Zone DPMX agrupa estas dos funciones en un solo dispositivo. No obstante, es un producto con poco tiempo en desarrollo que mejorará en los próximos años, ya que actualmente ofrece un error en potencia de  $\pm 2\%$  y  $\pm 0.5$  rpm en cadencia, cuyo rango de operación se encuentra entre 25 y 180 rpm. Además, es necesario utilizar los zapatos, las calas (fijaciones), los pedales y el controlador especial que ofrece la marca para que funcione según las especificaciones.

Por lo tanto, dos de los tres parámetros a medir ya se encuentran controlados, lo único que falta es medir la velocidad. Para ello existen múltiples modelos con años de experiencia en su desarrollo. Algunos modelos permiten medir las pulsaciones, posición GPS, pendiente y una infinidad de parámetros que ayudarían a mejorar el estudio.

Una vez obtenidos todos estos datos sobre el ciclista hay que procesarlos. Actualmente estos sistemas permiten transferir los datos a un PC de modo que se pueden analizar todo los datos en un ordenador de manera muy sencilla.

Una vez analizados los datos ya podemos saber cual es la cadencia óptima para cada momento y consecuentemente, la marcha en la que debe ir la bicicleta. Por lo tanto mediante esta información se controlará el cambio electrónico para que en todo momento escoja la marcha adecuada de forma autónoma.

A la hora de escoger el cambio de marchas electrónico, Shimano es el principal candidato. Ofrece modelos para bicicletas de carretera (Dura-ace Di2 y Ultegra Di2) y montaña (XTR Di2) con el mismo funcionamiento, en cuanto a software. De modo que una vez desarrollado el producto para bicicletas de montaña la adaptación a bicicletas de carretera es inmediata y viceversa.

## 3.2 Prototipo desarrollado

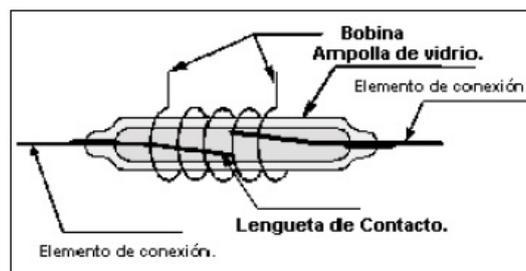
Al igual que con cualquier producto, cuando se trata de diseñar algo siempre suele existir una primera versión, como mínimo, que se desarrolla como prototipo y que al menos cumple con el objetivo.

En este caso se ha trabajado sobre una bicicleta, la cual ha ido evolucionando y ha sido sometida a varias modificaciones, por lo que podemos decir que se han desarrollado varias versiones hasta conseguir el prototipo final.

El equipo montado en la bicicleta se puede fragmentar en varias partes. En primer lugar, los sensores de cadencia y velocidad que han sido desarrollados de forma simultánea y que se basan en el mismo principio de funcionamiento. En segundo lugar, el sensor de fuerza que es dependiente de los dos anteriores por lo que su montaje fue posterior. En tercer lugar se incluyó todo el cableado, batería... así como el microcontrolador en la bicicleta para poder utilizarla en el exterior y comprobar que los sensores funcionan y toman medidas correctamente. Por último se incluyeron los motores servo, los cuales se encargan de realizar el cambio de marchas, tarea costosa ya que este tipo de motor no está diseñado para realizar esta función.

### 3.2.1 Equipamiento

Para el montaje de los sensores de cadencia y de pedaleo se ha utilizado relés reed en miniatura, relés reed conmutados, módulos relé de 5 y 10 voltios y imanes de distintos tamaños y formas.



**Fig. 3.2** Relé reed

Los relé reed tienen un funcionamiento muy sencillo, ya que se trata de un solo hilo conductor fragmentado que cierra el circuito cuando un campo magnético (un imán) actúa sobre él. Hay dos modalidades de este tipo de dispositivos, los simples de una sola salida y los conmutados que tienen dos salidas.

Por otro lado, para realizar la medición de la fuerza de pedaleo ha sido necesario una célula de carga que pudiese soportar el peso de una persona

adulta, por lo que se utiliza una celda de botón capaz de soportar 200kg (TAS606) que deja un amplio margen para no forzarla al máximo.

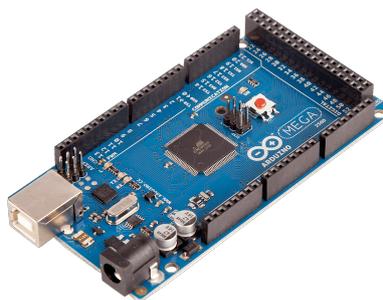


**Fig. 3.3** Célula de carga TAS606 [23]

Esta célula de carga genera un voltaje de salida del orden de milivoltios por lo que se utiliza una placa amplificadora (HX711), ofrecida por el fabricante de la célula, para obtener un rango de valores en voltios con los cuales poder trabajar.

Los motores encargados de realizar el cambio de marchas son dos motores servo con una torque máximo de 40kg cada uno. Se trata de motores de engranaje metálico utilizados en dispositivos de radiocontrol, normalmente en la dirección de los coches teledirigidos. Por lo que la función que desempeñan en este proyecto es muy distinta para la cual están diseñados. El modelo es el CYS-S8218, no obstante se ha intentado montar el mecanismo con otros motores con menor par, pero no resultó exitoso.

Todos los datos recibidos por los sensores y las ordenes llevadas a cabo por los motores se procesan en un mismo microcontrolador. A lo largo del proyecto se han utilizado las placas Arduino Uno y Arduino Mega. El motivo por el cual se han utilizado las dos placas es porque Arduino Mega tiene mayor número de puertos digitales que en ocasiones se han requerido, además la memoria es de mayor capacidad. Sin embargo, Arduino Uno es una placa mas sencilla y pequeña suficiente para hacer funcionar el prototipo.



**Fig. 3.4** Arduino Mega 2560

La placa Arduino necesita 5 voltios para funcionar correctamente, sin embargo, es necesario alimentarla con un poco más de voltaje para evitar pérdidas de tensión que puedan ocasionar un mal funcionamiento. Además dispone de un regulador que permite una alimentación superior a 9 voltios sin que esta se quemé. La batería utilizada es de tipo Li-Po de 7,4 voltios, la cual ofrece 2800 miliamperios por hora de capacidad, más que suficiente para hacer funcionar todos los dispositivos.

Adicionalmente, para mejorar el diseño, se han utilizado tiras termorretráctiles para la instalación del cableado, ya que la bicicleta utilizada no ofrece la posibilidad de integrar el cableado por dentro de la estructura. Otros materiales como poleas, soportes e incluso el propio bidón del ciclista han ayudado a instalar algunos componentes, así como disimular su apariencia.

### 3.2.2 Peso

Como se ha mencionado al principio de la memoria, el peso es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de escoger una bicicleta. Por lo tanto, de nada sirve desarrollar un producto que aumenta la eficiencia del ciclista si hay que aumentar el peso de la bicicleta considerablemente.

Por este motivo, algunos de los dispositivos instalados son bastante primitivos, a fin de reducir el aumento de peso al mínimo.

**Tabla 3.1** Peso del equipo

Producto	Peso unidad (kg)	Cantidad	Peso (kg)
Relé reed	0,001	2	0,002
Relé	0,012	2	0,024
Célula de carga	0,046	1	0,046
Servo	0,164	2	0,328
Arduino Mega	0,055	1	0,055
Protoboard mini	0,110	1	0,110
Amplificador HX711	0,003	1	0,003
Polea	0,008	2	0,016
Cableado	0,045	1	0,045
Batería	0,141	1	0,141
Soportes madera	0,060	1	0,060
Botellín	0,060	1	0,060
<b>TOTAL</b>			<b>0,890</b>

Podemos ver que el aumento de peso está por encima del deseado, ya que si utilizamos este equipo en una bicicleta de unos 12kg estaremos aumentando su peso en un 7,5%, lejos del 1% de aumento de peso que generan los actuales cambios electrónicos. No obstante, cabe recordar que se trata de un

diseño de bajo coste por lo que 890g de peso pueden ser considerados admisibles para un prototipo.

### 3.2.3 Precio

Puede ser que haya quien dude de que el aumento de peso sea admisible. Por lo que para acabar de convencerse no hay mas que mirar el precio por el que se puede conseguir la automatización del cambio electrónico.

**Tabla 3.2** Precio del equipo

Producto	Precio unidad (€)	Cantidad	Precio (€)
Relé reed	0,55	2	1,10
Relé	9,90	2	19,80
Célula de carga	53,91	1	53,91
Servo	30,43	2	60,86
Arduino Mega	10,19	1	10,19
Protoboard mini	1,92	1	1,92
Amplificador HX711	9,42	1	9,42
Polea	0,10	2	0,20
Cableado	8,99	1	8,99
Batería	17,99	1	17,99
Soportes madera	3,90	1	3,90
Botellín	3,50	1	3,50
<b>TOTAL</b>			<b>191,78</b>

Lograr un prototipo con una inversión inferior a los 200€, teniendo en cuenta el potencial que tiene, es mas que aceptable. Lejos de los 2000€ que cuesta un cambio electrónico.

### 3.2.4 Error

Una vez se ha conseguido montar el prototipo el siguiente paso es comprobar que no comete errores en la toma de datos, con el fin de que procese la información correctamente.

Los sensores utilizados no son del todo precisos y comúnmente cometen errores, además el microcontrolador Arduino es tan famoso por sus múltiples cualidades como por lo impredecibles que son al cometer errores. Es por ello que no se puede dar una medida exacta del error que comete al realizar medidas, ya que se han hecho varias pruebas y el error en las medidas a variado de forma aleatoria.

Ha habido muestras con un error del 3% y algunas pocas que rondan el 30%. El promedio de error en base a las muestras obtenidas se sitúa en el 10% pero como ya se ha comentado, no es del todo fiable.

Por lo tanto para reducir este error tanto como sea posible lo que se hace es que todas las medidas sean dependientes, es decir, cadencia, potencia y velocidad están relacionados, por lo que aquellas muestras que no sean coherentes se descartan. Por ejemplo, si se obtiene una cadencia y fuerza de pedaleo muy baja y al mismo tiempo se obtiene un valor de velocidad excesivamente elevado, este valor se descarta. Además, el número de muestras que se realizan es bastante elevado lo que minimiza la importancia de las muestras erróneas que puedan pasar desapercibidas.

De este modo, se consigue minimizar el error, al mismo tiempo que se estabiliza, pudiendo suceder que como máximo un 5% de las muestras aceptadas sean erróneas.

### 3.2.5 Autonomía

Como sucede en la mayoría de los dispositivos electrónicos, la batería es un limitante, ya que es el único componente que necesita ser recargado o reemplazado con frecuencia. El microcontrolador consume muy poco al igual que los sensores, lo cual facilita mucho las cosas. Sin embargo, mover un motor con un torque de 40kg/cm se paga caro.

**Tabla 3.3** Consumo del equipo

Dispositivo	Consumo aproximado (mA)	Cantidad	Consumo total (mA)
Arduino Mega	50	1	50
Rele	46 (electroimán conectado)	2	92
Servo (quieto)	20	2	120 (95% quieto - 5% activo)
Servo (activo)	800		
Amplificador	1,5	1	1,5
Célula de carga	Menospreciable	1	-
<b>TOTAL</b>			<b>263,5</b>

Todos los dispositivos electrónicos tienen un consumo por pequeño que sea, pero, en cuanto al consumo son los servos los que tienen una mayor importancia. Esto se debe a que el consumo para accionar un servo es muy elevado, de modo que cuantos más cambios de marcha se hagan mayor autonomía de la batería se requerirá.

El tiempo que se circula realizando cambios de marcha en comparación a los que no se cambia de marcha es muy pequeño (un 5% aproximado) por lo que el consumo no es demasiado elevado. Sin embargo, si la bicicleta se utiliza por rutas de montaña con numerosos cambios de pendiente, el motor estará más tiempo en marcha y por lo tanto aumentará el consumo.

La batería utilizada es de 2800mAh, mas que suficiente para ofrecer autonomía durante horas. Se escogió esta batería porque se desconocía cual sería el consumo total. El problema de utilizar una batería tan grande es el peso, ya que es el segundo elemento mas pesado de todo el equipo y se podría substituir por otra más pequeña.

$$\frac{2800 \text{ mAh}}{263,5 \text{ mA}} = 10,6 \text{ horas}$$

**Fig. 3.5** Autonomía actual

Mas de diez horas de autonomía permiten despreocuparse de la recarga de la batería, pero teniendo en cuenta que el peso es un tema preocupante y que se debe mejorar, con 4 horas sería suficiente.

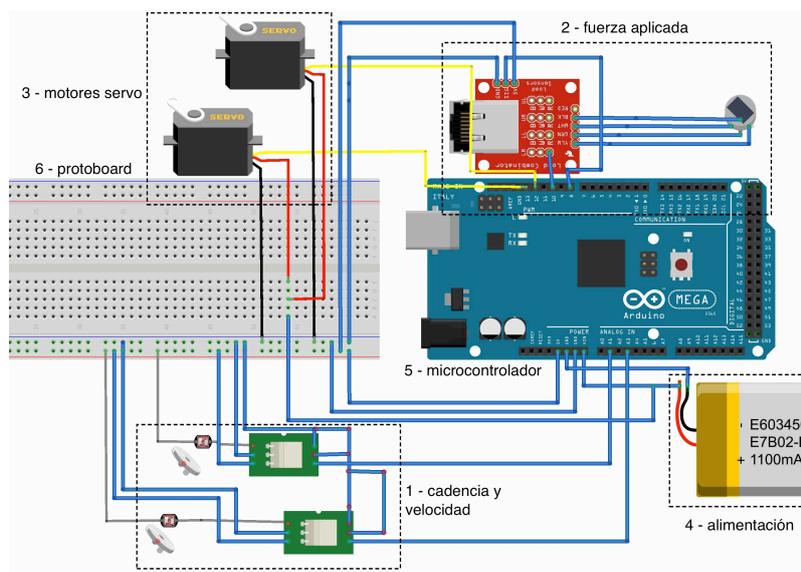
$$4 \text{ horas} \times 263,5 \text{ mA} = 1054 \text{ mAh}$$

**Fig. 3.6** Batería adecuada

Una batería Li-Po de 7,4 voltios y 1100 mAh tiene un peso aproximado de 50 gramos, lo que permite reducir el peso del equipo en un 11% ofreciendo una muy buena autonomía. Además tiene un tamaño mucho mas reducido que permite que se pueda ocultar mejor sobre la bicicleta.

### 3.2.6 Desarrollo y montaje del circuito

A continuación se muestra esquemáticamente el circuito elaborado. Se trata del circuito utilizado en el prototipo, pero no es el primer circuito que se desarrolló, por lo que se explica con detalle cada una de las versiones realizadas.



**Fig. 3.7** Circuito del prototipo

Para realizar el montaje del prototipo, en primer lugar se llevó a cabo el montaje del sensor de cadencia, así como el de velocidad. Ambos se realizaron de forma simultánea, ya que funcionan bajo el mismo principio.

El motivo por el que se empezó por esta parte es porque se trata de la parte más sencilla y a la vez imprescindible para que el prototipo funcione.

Partiendo de la idea de cómo funciona un cuentakilómetros, lo que se ha intentado es elaborar algo similar pero más sencillo. Los cuentakilómetros convencionales cuentan con un microprocesador que ejecuta órdenes cuando un imán cierra un circuito.

El circuito de velocidad se compone por un imán (situado en el radio de la rueda), un relé reed y un relé convencional. El relé se encuentra conectado a la alimentación, al relé reed, así como al puerto analógico del microcontrolador. Si no actúa ninguna corriente el circuito se encuentra abierto y no circula corriente.

El relé reed se sitúa en la horquilla delantera de la bicicleta de modo que cuando el imán situado en la rueda pasa por delante de este el relé reed, cierra el circuito y permite que el relé convencional se active (circuito cerrado). Cuando este se activa, circula un voltaje que se sitúa entre los 0,5 y 3 voltios hacia el pin analógico del microcontrolador.

El valor del voltaje de entrada al pin es mayor o menor dependiendo del tiempo de contacto, cuanto más tiempo este cerrado el circuito mayor será su valor. No obstante, si el circuito se encuentra cerrado menos de medio segundo difícilmente registrará una lectura superior a 1 voltio. De todos modos el valor del voltaje es indiferente, ya que lo único que interesa es saber si el circuito está cerrado o abierto.

Cada vez que el circuito se cierra, se registra el tiempo en el que esto sucedió. Conociendo el tiempo en el que se cerró por penúltima y última vez, se puede conocer el tiempo empleado en dar una vuelta completa la rueda. Esto es posible gracias al reloj interno que ofrece el microcontrolador.

Como lo que se quiere calcular es la velocidad, el único valor que falta es la distancia que recorre la rueda en una vuelta completa. Para realizar este cálculo se puede hacer directamente mirando en la propia rueda la cual indica sus medidas. Sin embargo, no estaríamos realizando bien la medida ya que la rueda se deforma cuando el ciclista se sitúa sobre la bicicleta. Por lo que la forma correcta de hacerlo es posicionarse sobre la bicicleta y medir en línea recta con un metro la distancia que recorre la rueda en una vuelta completa.



**Fig. 3.8** Medida longitud de la rueda

Es un procedimiento un tanto rudimentario pero es el que utilizan hasta los cuentaquilómetros mas sofisticados. Ya que el peso de la persona, así como la presión de la rueda hacen que esta medida sea distinta en cada bicicleta.

Para la bicicleta que se ha utilizado, la longitud por vuelta es de 2,04 metros, calculado mediante este procedimiento, mientras que la medida que ofrece el fabricante es de 2,00 metros. Las medidas no difieren mucho ya que se utiliza una alta presión de neumático.

Por lo tanto, cada vez que el circuito se cierre el tiempo que tarda la rueda en realizar una vuelta se actualizará y en consecuencia la velocidad.

$$Velocidad = \frac{longitud\ rueda\ (km)}{tiempo\ actual - tiempo\ anterior\ (h)}$$

**Fig. 3.9** Velocidad por vuelta

El procedimiento para el montaje del sensor de cadencia es idéntico al anterior, pero en lugar de situar el imán sobre la rueda se sitúa sobre el pedal y el relé reed va sujeto al lateral del cuadro de la bicicleta. El funcionamiento es idéntico, ya que al fin y al cabo se trata de calcular el tiempo que tarda el pedal en dar una vuelta completa.

$$Cadencia = \frac{60\ (s)}{tiempo\ actual - tiempo\ anterior\ (s)}$$

**Fig 3.10** Cadencia

Como se ha mencionado anteriormente, se han desarrollado varias versiones anteriores hasta conseguir el diseño final.

En un principio se intento realizar el circuito sin la utilización de relés convencionales, es decir, utilizando solo relés reed conectados directamente al Arduino. El problema que surgió es que como el circuito no tenia ninguna conexión a tierra los valores que se registraban en el microcontrolador no tenían ningún sentido, eran aleatorios por completo. Esto se solucionó introduciendo los relés convencionales , que permiten que el circuito esté referenciado a tierra y los valores de lectura sean correctos.

Otro de los problemas que planteaba una de las primeras versiones era el tamaño de los imanes, así como la potencia. En primer lugar se opto por imitar a los cuentaquilómetros tradicionales, por lo que se utilizaron los propios imanes de estos. El problema que ofrecían es que son imanes pequeños que a penas ofrecen tiempo de contacto cuando la rueda gira muy rápido, además el alcance del campo magnético es muy pequeño y se tenían que situar los relés reed muy próximos.

Por lo que se opto por la utilización de imanes un poco mas grandes y que además tuviesen mayor potencia como son los imanes de neodimio. Pero estos imanes tienen una fuerza excesiva que como consecuencia desgasta y desmagnetiza los relés dejándolos inservibles.

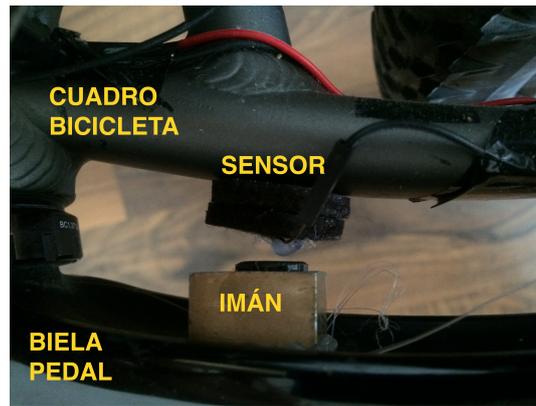
Finalmente se utilizaron imanes de ferrita de mayor tamaño para que el tiempo de contacto fuese mayor pero que no desgastasen tanto el sensor.

**Tabla 3.4** Comparativa de imanes utilizados

	Imán bicicleta	Neodimio	Ferrita
Dimensiones (mm)	10 $\emptyset$	15 x 15 x 8	45 x 20 x 10
Fuerza sujeción (kg)	0,5	7,6	2,5

Respecto al contador de pedaladas se diseño un primer modelo en el que en lugar de utilizar un solo relé reed se utilizaban dos. El motivo por el que se tomó esta decisión fue para que el sensor no contabilizara mas vueltas de las que realmente estaba dando el pedal, ya que si el pedal se detenía delante del sensor el número de vueltas que podía contar por minuto podía ser infinito.

Este sistema funcionaba correctamente ya que requería que los sensores se fuesen activando alternadamente para contabilizar una vuelta. Sin embargo, es un sistema que acumula fallos y el hecho de utilizar dos sensores implica duplicar el error. Por lo que se decidió utilizar un solo sensor controlando mediante software la suma de vueltas infinitas.



**Fig. 3.11** Montaje sensor de cadencia

Para ello se calcula el tiempo en el que se realizó la última muestra. De modo que si el tiempo entre muestras es demasiado corto, significa que no se están dando pedaladas ya que es imposible que el pedal gire tan rápido. Lo que significa que el pedal está quieto delante del sensor. Para ello se considera que como mínimo son necesarios 0,4 segundos para dar una pedalada. Cualquier muestra en un tiempo inferior se descarta.

El siguiente sistema que se implementó fue la célula de carga, la cual va situada en el pedal de la bicicleta para medir los kilogramos de fuerza que se aplican a cada pedalada.

Este sensor permite obtener varios datos. Mide la fuerza máxima que se ejerce sobre el pedal para conocer el esfuerzo que se está realizando a cada pedalada. Esto permite obtener una medida de la potencia de pedalada.

$$Potencia (W) = Fuerza (N) * Velocidad \left(\frac{m}{s}\right)$$

**Fig. 3.12** Potencia de pedalada

Cabe destacar que la fuerza máxima no es el mejor método para calcular la potencia. Ya que si utilizamos este valor, la potencia calculada será mucho mayor debido a que estaremos considerando que el ciclista trabaja a la máxima potencia. No obstante, es útil para realizar una comparativa entre la potencia de pedalada en función de la marcha utilizada.

Para calcular la potencia de forma exacta sería necesario integrar el campo de velocidades que permitiese conocer la potencia en cada instante. Sería un método muy preciso pero ineficiente, ya que de nada sirve tener un resultado tan exacto si el microcontrolador y los sensores no pueden llegar a tal nivel de precisión, teniendo en cuenta que la velocidad se actualiza a cada vuelta que realiza la rueda.

La solución que se ha tomado es medir la fuerza que se ejerce sobre el pedal por vuelta realizada. Con este valor y la velocidad que registre el dispositivo en ese instante podemos tener una medida de la potencia de pedalada del ciclista.

El problema que ofrece instalar este sensor en un pedal es el cableado, ya que el pedal realiza giros de entre  $-60^\circ$  y  $60^\circ$  mientras que la biela realiza giros completos de  $360^\circ$  por cada vuelta. Lo que conlleva que a cada pedalada el cable se vaya enrollando llegando a inmovilizar el pedal.

Se pensó en una solución que consistía en insertar el cable por el eje de la biela hacia el interior del cuadro (como se hace en algunas bicicletas) pero se trata de una bicicleta con el cuadro estanco que no permite esta opción. De modo que la única solución posible para que el cable no interrumpa al ciclista es mantenerlo alejado del eje de la biela para que no se enrolle.

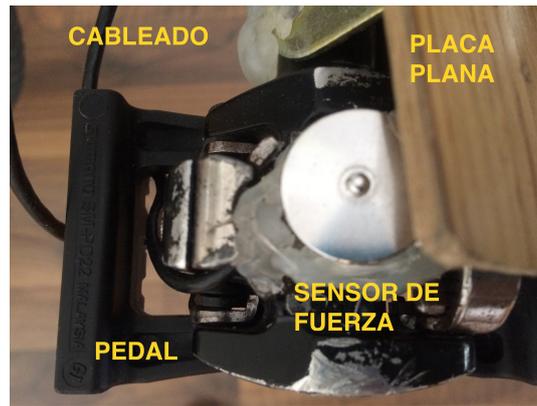
Otro de los problemas es la calibración del sensor. Se trata de un sensor desarrollado expresamente para trabajar en Arduino por lo que la utilización de la librería HX711 del amplificador facilita el trabajo. Solo es necesario establecer el factor de calibración correspondiente a la célula de carga, ya que esta librería se utiliza para células de todo tipo. Por lo que dependiendo de la forma del sensor así como de su capacidad el factor de calibración será uno u otro.

El factor de calibración es la relación entre la variación de una resistencia y la deformación sufrida por un material, así que cada dispositivo tiene un factor distinto.

$$\text{Factor de calibración } \left(\frac{\Omega}{m}\right) = \frac{\delta R}{R \varepsilon}$$

**Fig. 3.13** Factor de calibración o de galga [24]

En un principio se realizó la calibración del sensor cuyo valor rondaba los 7000, pero estas pruebas se realizaron previamente al montaje. Una vez instalado el sensor se tuvo que volver a realizar la calibración cuyo factor había cambiado cuantiosamente.



**Fig. 3.14** Montaje sensor de fuerza

Se trata de un sensor que no mide sobre una superficie sino en un punto, de modo que dependiendo de la dirección en la que se aplique la fuerza registra unos valores u otros. Por lo tanto, se tuvo que insertar una lamina sobre el sensor que garantizase que la fuerza siempre se aplica en el mismo punto. Una vez estabilizado el sensor se calculó de nuevo el factor de calibración correspondiente, en este caso de 16800.

Una vez instalados todos los sensores sobre la bicicleta es necesario que el microcontrolador y la batería estén correctamente situados sobre el cuadro para no sufrir daños.

Las baterías Li-Po son peligrosas si se sobrecalientan, golpean o se mojan por lo que no puede estar expuesta al exterior en la bicicleta. El lugar idóneo es el interior del cuadro donde está protegida. Es por ello que los fabricantes de cambios electrónicos diseñan las baterías con la forma apropiada para poder depositarlas en la tija del sillín. Además favorece tanto aerodinámicamente como estéticamente.

La batería que se ha utilizado está diseñada para coches de radiocontrol por lo que no se puede introducir en el interior del cuadro debido a su forma. La solución mas favorable para mantenerla protegida es utilizar el porta cámaras que se sitúa bajo el sillín.

Respecto al Arduino, en un principio se iba a situar junto al cableado del resto de componentes para reducir el número de cables y que no estuviese a la vista, pero finalmente se sitúa en el manillar de la bicicleta. Esto se debe a que durante las primeras pruebas realizadas con los sensores se conectó una pantalla LCD al microcontrolador para facilitar la lectura de datos.

De no utilizar esta pantalla, la única forma de validar que la lectura de datos es correcta es ir realizando muestras y almacenarlas en la memoria del microcontrolador para más tarde realizar la lectura con el ordenador. Es un procedimiento igualmente válido pero que impide ver los resultados en tiempo real. Por lo que de tener que hacer muchas correcciones (como sucedió en las primeras pruebas) es un método poco eficaz. En cambio, la pantalla LCD

permite la lectura de hasta 16 caracteres en tiempo real. Muy útil para detectar errores y rápido.

Durante las primeras pruebas se utilizó la pantalla como display de las pedaladas que se iban dando, así como con las vueltas que daba la rueda. Se tuvieron que hacer varias modificaciones ya que como se ha comentado anteriormente componentes tan simples como los imanes utilizados afectaban a su funcionamiento.

Al mismo tiempo se mostraba el valor de la velocidad el cual se pudo comprobar, una vez hechas las modificaciones, que funcionaba correctamente en comparación con un cuentakilómetros comercial con un error de  $\pm 1$ km/h. La fuerza de pedaleo y la cadencia también se mostraba, lo cual permitía tener toda la información necesaria en una misma pantalla.

El último componente instalado es el motor, el cual se encarga de regular la tensión del cable del cambio de marchas. Hasta el momento, todos los elementos descritos han sido medidores que aportan información al microcontrolador. Esta información una vez procesada se utiliza para que el actuador (los motores servo) actúen en consecuencia, lo que hace que esta sea la parte más difícil del proyecto.

Si de lo que se trata es de conseguir un sistema preciso y sofisticado, la opción más clara por la que habría que apostar es por un motor que actúe directamente sobre el muelle, lo cual permitiría realizar el cambio de marchas sin utilizar un solo cable. Pero al tratarse de un prototipo de bajo coste esta opción no es válida, además la adaptación de un desviador por cable a uno que carezca de este es prácticamente imposible.

En base a esto, lo que se ha intentado hacer es modificar al mínimo este componente de la bicicleta. Por lo tanto, el cableado se ha seguido utilizando pero en lugar de tener que realizar el cambio manualmente con los mandos del manillar, se ha introducido un motor capaz de generar esta misma fuerza.

En la actualidad los motores servo son conocidos ya que tienen muchas aplicaciones. Desde movimientos de palancas, pequeños ascensores y timones hasta el uso en aviones de radio control, barcos, títeres e incluso robots.

A diferencia de los motores tradicionales, los motores servo son caracterizados por ser motores digitales que permiten tener el control de la posición en la que se encuentra el rotor. Al igual que los motores convencionales, los motores servo se componen por una caja de engranajes rotatorios por lo que el control de la posición del eje se realiza mediante ángulos.

No todos los servo son iguales, esto se debe a que las aplicaciones para las que están destinados son distintas. La principal característica es que algunos de ellos permiten el giro de tan solo  $180^\circ$ , es el caso de los motores utilizados en los coches de radiocontrol, cuya función es regular la dirección de las ruedas, por lo que no es necesario realizar giros completos. En cambio, la

hélice de un barco si que necesita hacer vueltas completas por lo que se utilizan motores que permiten realizar giros completos.

Por otro lado, también hay motores de distintos tamaños. Pudiendo encontrar desde los mas pequeños de 2 x 2 x 1 centímetros de dimensión, hasta los mas grandes de hasta 8 x 5 x 5 centímetros. El motivo por el cual se diseñan de distintos tamaños es debido al tamaño de los engranajes internos utilizados, ya que dependiendo de la fuerza que tengan que desarrollar serán necesarios unos engranajes mas resistentes, que se traduce en engranajes de mayor tamaño.

No obstante el tamaño de estos no es el único condicionante para determinar la fuerza que se puede desarrollar. El material del cual están hechos es muy importante, por lo que para pequeños motores se utilizan engranajes de plástico, mientras que para aplicaciones como, por ejemplo, los coches de radiocontrol que sufren golpes frecuentemente, los motores son más resistentes y se fabrican con engranajes de metal.

Para determinar la fuerza que debe arrastrar nuestro motor es necesario realizar una traducción de las ecuaciones lineales a un sólido de rotación ya que raramente trabajaremos de forma lineal con este tipo de motores.

De modo que en primer lugar se ha realizado un cálculo de la fuerza ejercida por el cable del cambio de marchas. Para tal fin se ha utilizado un dinamómetro el cual traduce la deformación producida en un material elástico en una fuerza. El valor representado por el dinamómetro se encuentra en quilos, por lo que la fuerza dependerá de la aceleración a la que el cable se someta. Tratándose de un cable que realiza pequeños movimientos desde el reposo a pequeñas velocidades la aceleración se ha considerando nula. Por lo que la única aceleración resultante es la propia gravedad.

El valor obtenido del dinamómetro es de 7 kg, aproximadamente, si el vector velocidad del cable es tangente a la posición de este. Sin embargo, si el vector velocidad tiene un ángulo de 45 grados respecto la dirección del cable el peso puede aumentar hasta en 1 kg. Por lo tanto, interesa situar los motores en línea recta con el cableado. En base a estos resultados la resistencia ofrecida por el cable es de 69 Newton lo cual permite pasar a realizar los cálculos sobre el sólido de rotación.

La resistencia ofrecida por el cable no es mas que la fuerza de compresión del muelle que se opone al movimiento de este. Por lo que analizar las propiedades del muelle se convierte en una tarea obligada.

$$Fuerza = k * \Delta x$$

**Fig. 3.15** Ley de Hooke

La fuerza representa el valor anteriormente calculado, mientras que la  $k$  representa la constante elástica del muelle que relaciona fuerza y alargamiento. Cuanto mayor sea su valor más trabajo costará estirar del muelle. El  $\Delta x$  representa la deformación del muelle desde la posición de equilibrio hasta su máxima elongación.

Mediante esta fórmula podemos realizar tanto el análisis del muelle del cambio de marchas como el de cualquier otro muelle, ya pueda ser el dinamómetro. Pero para ello es necesario conocer la deformación que sufre el muelle.

La elongación es muy pequeña ya que a penas se estira 0,5 centímetros cuando se le aplica fuerza. En consecuencia la constante elástica es grande para conseguir una fuerza de 69 Newton.

$$k = \frac{F}{\Delta x} = \frac{69}{0,5} = 138 \text{ N/m}$$

**Fig. 3.16** Constante elástica del muelle de la bicicleta

Para un sólido de rotación, las ecuaciones anteriores deben modificarse para poder trabajar de forma angular. Comúnmente se utiliza el par motor para describir la fuerza. [25]

$$\text{Par} = \text{Inercia} * \text{Aceleración angular}$$

**Fig. 3.17** Par motor de un sólido de rotación

La velocidad angular se extrae de la información proporcionada por el fabricante. Viene representada en grados por segundo, por lo que es necesario traducirlo al sistema internacional.

$$\frac{60^\circ}{0,2 \text{ s}} * \frac{1 \text{ rad}}{360^\circ} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 50 \text{ rpm}$$

**Fig. 3.18** Velocidad angular (rpm)

$$\omega = 50 \text{ rpm} * \frac{2 * \pi}{60} = 5,24 \text{ rad/s}$$

**Fig. 3.19** Velocidad angular (rad/s)

Con esta información es posible saber el tiempo empleado es dar una vuelta completa por el motor. Sin embargo, el motor servo que se utiliza en este

proyecto tiene la función de ejercer una fuerza partiendo del reposo, por lo que interesa conocer cual es el tiempo empleado en alcanzar esta velocidad, lo que se conoce como aceleración angular.

El fabricante no aporta información al respecto y el tiempo de reacción es muy rápido como para realizar una comprobación experimental. Se considera que el motor acelera demasiado rápido como para determinar el valor exacto de aceleración. Se establece un rango en el que podría estar este valor, entre los 0,1 y los 0,3 segundos. Por lo que se utiliza el peor caso para realizar el cálculo numérico.

$$\alpha = \frac{5,24 \text{ rad/s}}{0,3 \text{ s}} = 17,5 \text{ rad/s}^2$$

**Fig. 3.20** Aceleración angular

El momento de inercia es equivalente a la suma de la masa de cada partícula por su distancia al eje. Cuanto mayor sea este radio, mas fuerza habrá que ejercer para hacer rodar el sistema. Así mismo, el tipo de rueda utilizada afecta al resultado final por lo que esta ecuación se multiplica por un coeficiente  $k$ .

$$I = k * m * r^2 = 1 * 0,2 * 1 = 0,2 \text{ Kg/m}^2$$

**Fig. 3.21** Momento de inercia

De este modo, el par motor del servo es:

$$\text{Par motor} = 17,5 * 0,2 = 3,5 \text{ Nm}$$

**Fig. 3.22** Par motor servo

$$\text{Par motor} = 3,5 * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} * \frac{1 \text{ kg}}{9,81 \text{ N}} = 35,7 \text{ kgcm}$$

**Fig. 3.23** Par motor en (kg\*cm)

El par motor se puede medir en Newton por metro, sin embargo, en motores servo, donde se trabaja con poco peso y en espacio reducido utilizar los kilogramos por centímetro es mas útil.

El cable ejerce una fuerza de 7 kg de modo que el servo del cual disponemos podría parecer que es demasiado potente para la fuerza que hay que hacer.

Este fue el planteamiento inicial que se hizo, es decir, si hay que levantar 7 kg, un motor de 10 kg tiene que ser suficiente. Pero esto no es del todo cierto.

Para garantizar que el servo tuviese la suficiente fuerza como para mover un obstáculo de este peso, se escogió un motor con un par de 13 kg/cm. Se trata del modelo MG955. Lo que desde un punto de vista teórico parece suficiente, se pudo comprobar en la práctica que el motor no era capaz de rotar.

Por lo que se optó por un motor más potente con engranajes de mayor tamaño. El modelo BS501 de 20 kg/cm de par motor acabó por confirmar que el problema se encontraba más allá de levantar un peso.

Este modelo consiguió levantar pesos similares en algunos casos de forma muy apurada, hasta que finalmente dejó de funcionar tras doblar todos los engranajes internos del servo. Es aquí donde se encontró el problema.

Los motores servo están diseñados para trabajar en diferentes aplicaciones. Como se ha comentado anteriormente, en radiocontrol y robótica es donde más fácil se pueden encontrar. A pesar de ser campos muy distintos, los servo suelen realizar labores similares como puede ser mover ejes. Aunque se utilicen motores muy potentes la resistencia que tienen que vencer es pequeña. Por ello se diseñan con mucha mayor potencia de la necesaria para que funcionen perfectamente. Para la dirección de un coche de radiocontrol se utiliza un servo de 20 kg/cm mientras que la fuerza que tiene que vencer no superará en ningún caso los 3 kg.

La definición de par motor no es extrapolable, es decir, si un dispositivo esta diseñado para realizar una función concreta, las especificaciones de par motor como otras propiedades no son válidas para cualquier aplicación.



**Fig. 3.24** Servo S8218

Los motores servo no están preparados para levantar peso. Los engranajes se doblan frecuentemente y en algunos casos el motor no gira con la suficiente fuerza. No obstante, una estructura tan complicada como es una bicicleta no permite tener muchas alternativas por lo que se decidió seguir adelante con esta idea. Utilizando dos servo de 40 kg/cm que permiten dividir la fuerza y no forzar tanto los engranajes.



**Fig. 3.25** Instalación de los motores servo

En la figura 3.25 se puede ver el montaje final de los motores servo. Se utilizaron poleas de 1 cm de radio para que los motores tuviesen el máximo par posible. De este modo, conectando los dos motores de 40 kg/cm de par en línea se obtiene fuerza mas que suficiente para tirar de los 7 kg de fuerza que ejerce en cable. Sin embargo, en la práctica no ha funcionado, ya que como se ha comentado anteriormente estos motores no están preparados para tal fin.

Estos servo tienen potencia suficiente para maniobrar pero su configuración les impide arrastras de ningún peso.

**Tabla 3.5** Comparativa de servos utilizados

	MG995	BSD BS501-054	CYS S8218
Dimensiones (mm)	40,7 x 19,7 x 42,9	58 x 28 x 54	60 x 30 x 60
Peso (g)	55	133	164
Par motor (kg/cm)	13	20	40
Voltaje operativo (V)	3-7,2	5-7,2	6-7,2

Los cambios electrónicos de bicicleta comerciales utilizan un motor servo, los cuales están diseñados para tal tarea de modo que funcionan con precisión y seguridad. Estas características no se pueden conseguir con servos de radiocontrol. La calidad se paga y los mas de 1000€ de coste de este tipo de servos hacen que no sea viable utilizarlos para un prototipo.

## CAPÍTULO 4. PROGRAMACIÓN

La programación en Arduino es una tarea sencilla, ya que se trata de un microcontrolador especialmente diseñado para trabajar con sensores, tanto analógicos como digitales.

Durante este proyecto se ha trabajado con los modelos Uno y Mega 2560. Se trata de placas de iniciación de gran tamaño y de fácil uso. Cada modelo ofrece unas prestaciones que suelen ir asociadas al número de puertos, así como el tamaño o la memoria.

Arduino, al igual que el resto de lenguajes, permite organizar el código en funciones. El código es mucho más claro y la detección de errores es más fácil.

Además, este lenguaje permite organizar estas funciones en librerías, las cuales están estandarizadas y no es necesario escribirlas desde el principio. Por tanto, si se quiere calibrar un sensor de presión no es necesario hacer mediciones, calcular la recta de calibración... y una serie de tareas que puede llevar horas. Las librerías se encuentran en la red y simplemente incluyéndolas en el código podemos realizar la calibración de forma inmediata.

### 4.1 Librerías

Las funciones que se han utilizado en este proyecto han sido cuatro. Para calibrar el sensor, así como procesar los datos de medida, se utiliza la librería *HX711*. Contiene las funciones necesarias para la interpretación de las variaciones de la resistencia del sensor de fuerza.

En cuanto a la muestra de datos, como se ha comentado anteriormente, se utiliza una pantalla LCD, la cual utiliza la librería *liquidcrystal* para el control de los pines digitales. Esta librería está preparada para la utilización de pantallas de 16 dígitos de 2 líneas o de 4. Así mismo, se puede trabajar con 4 bits o 8 bits como en este caso.

Si en lugar de hacer un display de los datos mediante la pantalla LCD, se quieren almacenar los datos para procesarlos en un ordenador más tarde, es necesario utilizar la librería EEPROM. El nombre de esta librería hace referencia al nombre de una memoria, que permite que una vez se apague el microcontrolador los datos sigan almacenados y no se borren hasta no ser reescritos. [26]

Otra de las aplicaciones que incluye, es que si se detiene el Arduino mientras realiza alguna tarea y luego se reactiva, se puede hacer memoria de en que punto se detuvo la tarea y continuar con ella.

Cada modelo de placa tiene un tipo de memoria distinta y por lo tanto la capacidad puede variar. Arduino Uno tiene una capacidad de 1 Kb, similar a la mayoría de placas, mientras que Arduino Mega dispone de 4 Kb.

Arduino trabaja por direcciones y byte a byte, tanto para leer como para escribir. La placa Uno tiene 1000 Bytes de memoria, lo que significa que hay desde la dirección 0 a la 999. Cada dirección puede registrar un valor que puede valer entre 0 y 255.

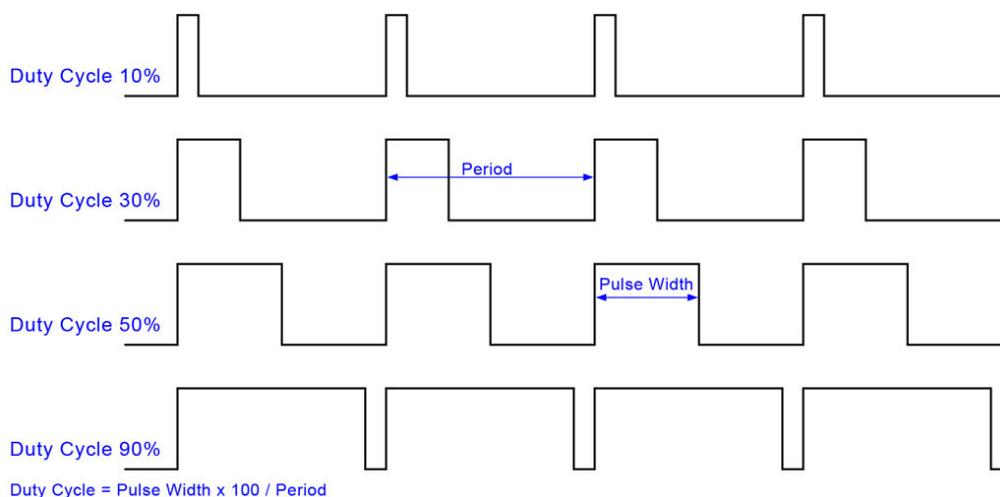
1000 direcciones parecen más que suficientes para almacenar datos. Sin embargo, a cada pedalada, los valores de cadencia, velocidad, fuerza y potencia van ocupando una dirección. Por lo que a las 250 pedaladas ya estará la memoria llena.

Por este motivo se ha decidido utilizar la placa Mega, ya que tiene cuatro veces más memoria, lo cual permite almacenar los datos de hasta 1000 pedaladas.

Además, la memoria EEPROM es una memoria con una vida útil, es decir, cada dirección se puede reescribir una cantidad finita de veces. No existe un valor exacto, aunque aproximadamente son unas 1000 veces.

Por último, la librería servo permite controlar todo tipo de motores de radiocontrol. Muchos de estos motores necesitan ser alimentados por encima de los 5 voltios, valor máximo que puede proporcionar la placa. Por lo que se suelen alimentar a parte. Sin embargo, las conexiones de tierra deben de ser comunes ya que el cable de control sí que va conectado directamente a la placa.

Este cable de datos va conectado a uno de los puertos PWM del microcontrolador. Los pulsos PWM (modulación por ancho de pulsos) permiten controlar la velocidad de giro del servo sin modificar el par motor. El ciclo de trabajo de estos pulsos representa el ancho de la señal respecto a un periodo, es decir, el tanto por ciento que la señal está activa en un ciclo completo.



**Fig. 4.1** Ciclo de trabajo de un pulso PWM [27]

Cuanto mayor sea el valor del ciclo de trabajo, mas girara el servo. Cada fabricante ofrece unas especificaciones para determinar que ancho de pulso corresponde a cada ángulo de giro. No obstante, depende de cada motor y no siempre tiene porque coincidir.

## 4.2 Reloj interno

El reloj interno de la placa tiene un alto protagonismo. Todas las medidas se toman referenciadas a este reloj, por lo que es tan importante realizar bien las mediciones como tener un control del tiempo preciso.

Arduino utiliza un cristal piezoeléctrico como base de tiempos que bate a 16Mhz, es decir genera 16 millones de pulsos por segundo. Esto lo convierte en un reloj con la suficiente precisión para este proyecto ya que el error de este puede alcanzar, como máximo, el medio segundo al día. Además, ofrece un excelente comportamiento ante los cambios de temperatura.

En caso de necesitar un control del tiempo mas amplio existe la posibilidad de utilizar la librería timer del arduino. Pero en este proyecto con las funciones básicas ha sido suficiente.

## CAPÍTULO 5. ANÁLISIS Y PROCESADO DE DATOS

La mayor parte del tiempo se ha invertido en buscar ideas así como soluciones para conseguir un prototipo que partía desde cero. Una vez montado todo el equipo, realizar el análisis de los datos obtenidos ha sido mas sencillo.

Partir de una buena base de conocimientos es fundamental para poder interpretar los resultados. Por este motivo al principio de la memoria se ha comentado con detalle la situación actual de las bicicletas.

A continuación se detallan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales. Se han tomado muestras de cadencia, velocidad y fuerza en distintas pendientes a fin de encontrar la relación de marchas idónea para cada situación.

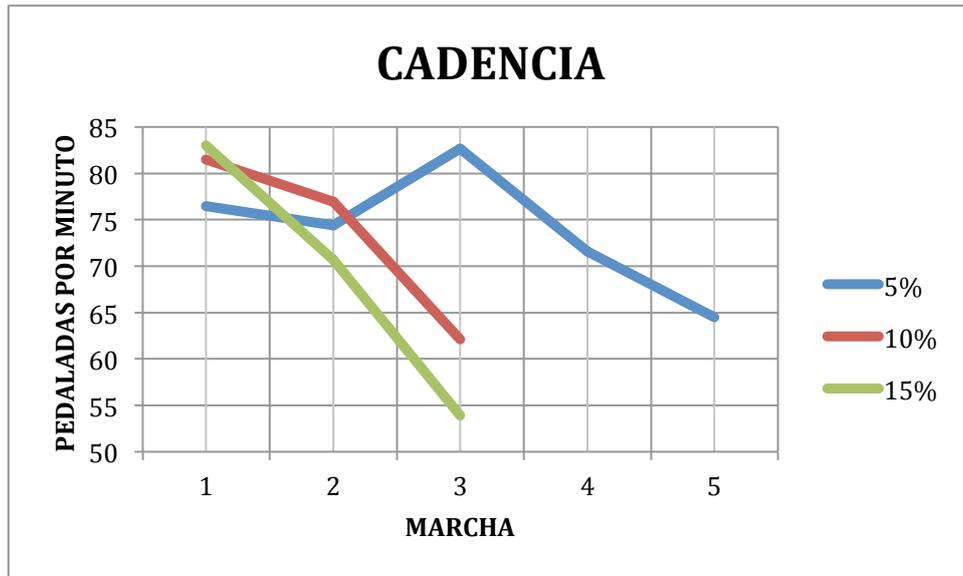
Cuando se habla de relación de marchas idónea, no se esta diciendo que esta sea la mejor combinación de marchas bajo cualquier circunstancia. Ya que el estudio experimental se ha hecho con una persona, cuyos resultados son únicamente validos para esta.

Se trata de un prototipo personalizado que busca la mayor eficiencia. Por lo tanto, cualquier otro individuo que quiere obtener el máximo rendimiento, necesitará realizar, previamente, el estudio experimental.

### 5.1 Ascenso

El estudio del ascenso es la parte mas importante de este análisis. Durante la subida es cuando mayor aporte energético se realiza, por lo tanto, una mayor eficiencia conlleva un alto porcentaje de ahorro de energía. En esta circunstancia lo mejor es utilizar piñones grandes y dar un gran número de pedaladas pero en su justa medida.

Los datos graficados corresponden a la información obtenida tras realizar pruebas en cuestas con una inclinación del 5%, 10% y 15%.



**Fig. 5.1** Cadencia de pedaleo en subida

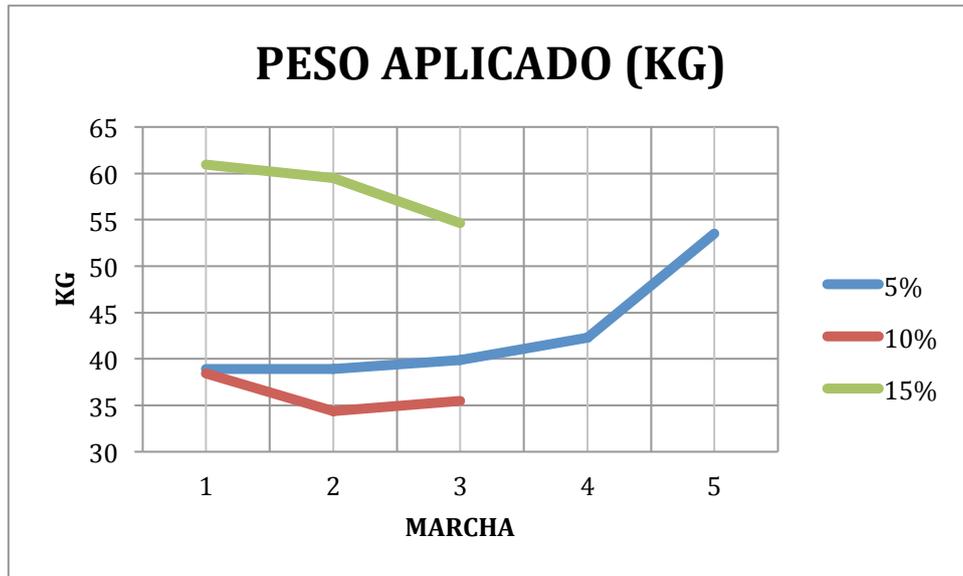
Para estudiar la cadencia se han tomado muestras desde la primera marcha hasta la quinta. Como es lógico, si en una subida aumentamos de velocidad la capacidad de pedalada será menor. Sin embargo, no siempre interesa utilizar las velocidades mas pequeñas. Es el caso del escenario con un 5% de inclinación.

Lo que sucede en este caso es que la primera velocidad genera lo que se conoce como pedaleo al vacío. Situación en la que el ciclista tiene mucha mas potencia que la resistencia que ofrece la bicicleta, lo cual genera una situación incomoda en la que es difícil pedalear.

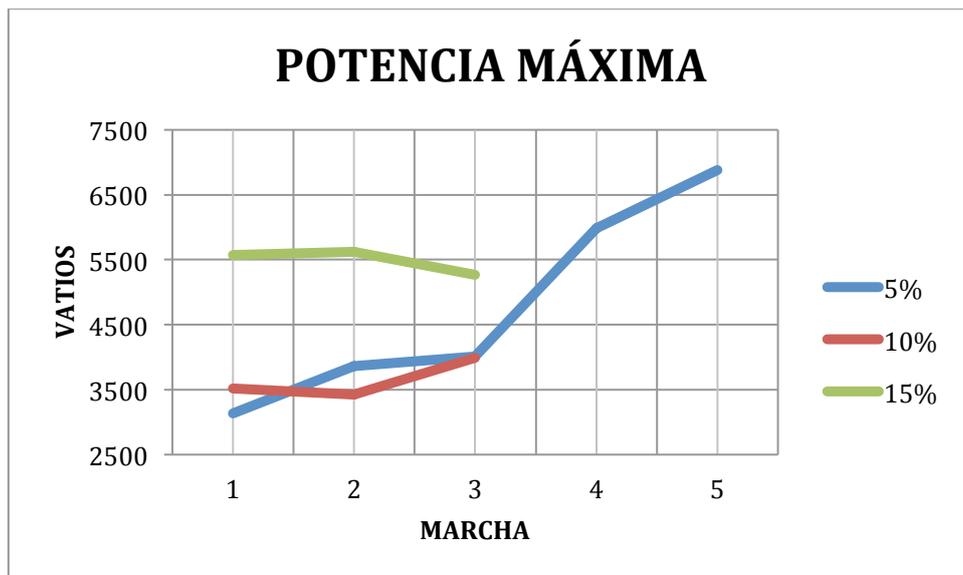
Es por ello que la tercera marcha es mucho mas eficiente, ya que permite generar un gran volumen de pedaladas, lo cual es óptimo en subidas.

A medida que las marchas van aumentando la cadencia se va reduciendo, lo que indica que estamos forzando demasiado.

Para el resto de escenarios (10% y 15%), la primera velocidad es la mas apropiada, aunque otros parámetros como la potencia o el peso aplicado sobre el pedal al pedalear pueden modificar esta decisión.



**Fig. 5.2** Peso aplicado en subida



**Fig. 5.3** Potencia máxima en subida

Una buena forma de agrupar las muestras de fuerza y de velocidad es la representación de la potencia máxima de pedaleo.

Los escenarios son los mismos que los anteriores, de modo que para un 5% de inclinación, queda confirmado que la tercera velocidad es la más apropiada. No requiere un gran aumento del esfuerzo respecto a las primeras marchas, en cambio es mucho más eficiente que la cuarta y la quinta.

Para el escenario con una inclinación de un 10% queda confirmado que la segunda marcha es la idónea ya que permite obtener mayor eficiencia energética reduciendo muy poco la cadencia.

Sin embargo, para cuestas de mayor inclinación, utilizar la primera velocidad es la única opción válida.

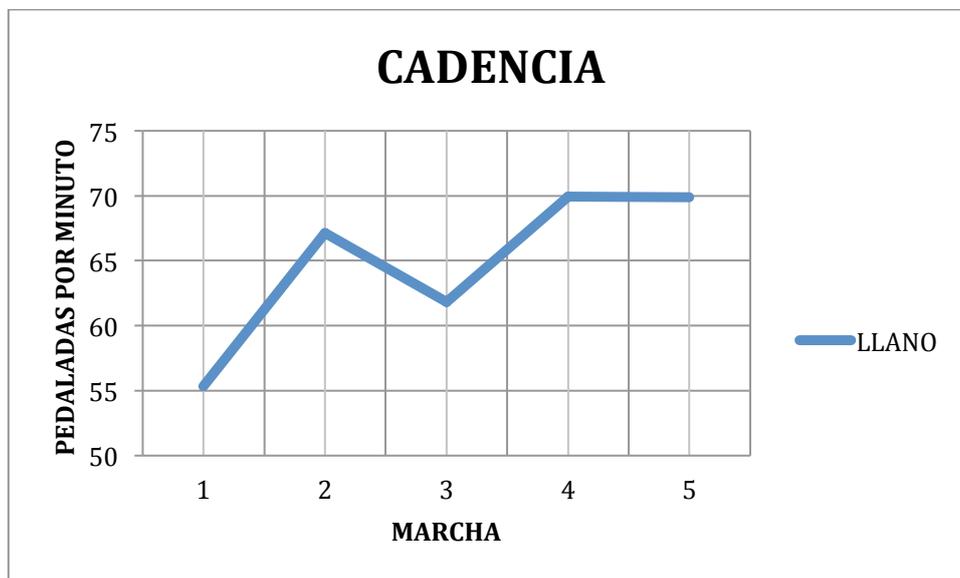
Por lo tanto, en subidas se debe mantener una cadencia de pedaleo por encima de 77. De no ser así el sistema actuará sobre el cambio, reduciendo marchas.

Con una inclinación de un 5%, esta situación es problemática, ya que no siempre que se reducen marchas se aumenta la cadencia. Por lo tanto, si la potencia máxima desarrollada se encuentra por debajo de 3500 Watts el sistema aumentará de marcha. De este modo se soluciona el problema.

## 5.2 Llano

En cuanto al estudio en de este escenario, se ha menospreciado las pequeñas inclinaciones que pueden tener algunas carreteras, de modo que cualquier valor por debajo del 5% de inclinación se considera llano.

Las cuarta, quinta, sexta, séptima y octava velocidad son las mas utilizadas en estas condiciones. Se grafican a continuación los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.



**Fig. 5.4** Cadencia de pedaleo en llano

Al contrario que en el caso ascendente, cuanto mas dura es la velocidad en la que circulamos, mayor será el número de pedaladas que se podrán dar. Si partimos de una velocidad inicial nula, la marcha mas apropiada seguramente será la cuarta o la quinta. Sin embargo, una vez alcanzada una velocidad confortable, la bicicleta tendrá la inercia suficiente para poder ir con marchas

mayores. Dicha inercia no se puede conseguir a bajas velocidades, por lo que interesa circular en la cuarta o quinta marcha.



**Fig. 5.5** Peso aplicado en llano



**Fig. 5.6** Potencia máxima en llano

El consumo de energía determina que la quinta, sexta y séptima velocidad son las más apropiadas. El aumento de la potencia es aproximadamente lineal en este intervalo, lo que indica que el ciclista se encuentra cómodo en esta zona.

En base a los resultados obtenidos de todas las pruebas realizadas la séptima velocidad es la idónea para circular en llano.

### 5.3 Descenso

La bicicleta utilizada para el diseño del prototipo esta equipada con un casete de 8 velocidades. En bajadas no es necesario realizar estudio al respecto, ya que siempre se utilizara la octava velocidad.

Se trata de un prototipo que busca la máxima eficiencia de quien la utiliza. Por este motivo es necesario realizar un estudio personalizado del ciclista en aquellas circunstancias en las que varias marchas puedan ser utilizadas. Por lo que las bajadas se excluyen del análisis.

### 5.4 Resultados

En base a los resultados obtenidos se debe tomar una decisión de que parámetros determinaran en que marcha circular en cada instante.

En primer lugar, hay que identificar en que escenario nos encontramos. La forma utilizada ha sido mediante la potencia máxima, ya que es donde los valores difieren más de un escenario al otro. Por otro lado, si nos encontramos en bajada, la velocidad es suficiente para identificar en que situación nos encontramos.

**Tabla 5.1** Esquema de velocidades

Escenario	Rango de potencia	Marcha seleccionada	velocidad	cadencia	Potencia máxima
Llano	<2000 W	7 <sup>a</sup>	9-15km/h	≈ 70	850 W
5%	>2000 W	3 <sup>a</sup>	≈10 km/h	>77	4000 W
10%	>2000 W	2 <sup>a</sup>	≈10 km/h	>77	3500 W
15%	>2000 W	1 <sup>a</sup>	≈9 km/h	>77	5500 W
Bajada	-	8 <sup>a</sup>	>15 km/h	-	-

De este modo garantizamos que el sistema siempre ofrece la mejor relación de velocidades al ciclista.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

### 6.1 Conclusiones

Durante este proyecto se ha aprendido a trabajar en casos teóricos y prácticos de forma simultánea. La amplia investigación que se ha hecho al principio del trabajo ha servido para aprender que tecnología se utiliza en la actualidad en este ámbito. Además ha servido para aprender como trabajar sobre una bicicleta, ya que sabiendo como se mide la cadencia, la velocidad y la fuerza en los sistemas actuales, ha sido mucho más sencillo diseñar un prototipo.

Después del trabajo de investigación, se han puesto en práctica los conocimientos adquiridos ya sea sobre ciclismo o sobre mecanismos y programación de sensores. Estos sensores han demostrado no ser siempre fiables por lo que el control mediante software ha sido fundamental. Gran parte de los valores que registraban los sensores eran erróneos por lo que ha habido que hacer correcciones.

El sensor de velocidad era el que mayor error ofrecía por ser el que más rápido tenía que actuar. De modo que cuanto más rápido se va con la bicicleta más muestras erróneas registraba. Evaluando la lógica de los resultados se ha aprendido a eliminar errores con el microcontrolador.

No solo se ha aprendido a leer valores de los sensores. Gran parte del trabajo ha sido procesar los datos, lo que ha servido para aprender a trabajar con la memoria del Arduino, así como con las limitaciones que ofrece.

Se ha aprendido a trabajar de forma teórica con sensores, momentos y fuerzas. Esto ha sido fundamental para realizar el caso práctico. En la teoría ha sido todo muy directo y los resultados se han obtenido sin complicación. Teóricamente se ha demostrado que el circuito funciona y que los servo tienen fuerza suficiente para realizar el cambio de marchas ya que se requieren 7kg de fuerza y los motores utilizados son de más de 13kg de fuerza.

Sin embargo, en la práctica no ha sido posible diseñar el prototipo esperado. El objetivo era utilizar un motor para tirar del cable que actuase sobre el desviador, es decir un motor que cambiase de marcha. Como se ha comentado en la memoria se han ido probando varios motores con distintas características, cada cual más potente hasta finalmente utilizar dos servo de 40 kg/cm de par. Ni siquiera con estos motores se ha podido tirar del cable ya que el servo se detiene forzando los engranajes internos, lo que provoca que este se quemara o se doble. De este modo se ha deducido que nunca lo teórico es idéntico a lo práctico, pero sobretodo que en ocasiones lo teórico no se parece a lo práctico.

Ante esta adversidad se buscó una explicación de porque no funcionaba. Como el caso teórico no resultó útil para solucionar este problema se contacto con

gente con experiencia en el sector que pudiese haber tenido el mismo problema. Se contactó con una empresa especialista en aeromodelismo y radiocontrol, se trata de la empresa RCtecnic acostumbrada a trabajar con servos.

Ayudaron a concluir que los motores servo de radiocontrol están especialmente diseñados para su función, por lo que no es posible utilizarlos para el prototipo ya que se fuerzan los engranajes y acaban siempre rompiéndose.

Por lo que para que el prototipo funcione es necesario utilizar un servo de bicicleta de casi 1000€, bastante alejado del presupuesto de este proyecto.

Es por ello que la versión final del prototipo se basa en procesar datos y dar ordenes al usuario para que manualmente realice el cambio.

Analizando los datos se ha comprobado que la cadencia es el dato mas importante a la hora de escoger la marcha adecuada, ya que si mantenemos una cadencia que ronde las 75 pedaladas por minuto es posible ir cómodos en la bicicleta. Sin embargo, la velocidad y la potencia de pedalada han ayudado a ser mas precisos ya que permiten conocer si estamos circulando en bajada, llano o subida. En caso de circular en subidas el número de pedaladas deberá aumentar, mientras que en bajadas será menor.

Con este trabajo se han aprendido muchos conceptos teóricos y prácticos pero sobretodo se ha aprendido a reaccionar ante las adversidades. La combinación de todo lo aprendido ha servido para obtener un prototipo final que aunque difiere del concepto inicial permite obtener una mayor eficiencia sobre la bicicleta.

## 6.2 Trabajo futuro

Cuando se planteó el trabajo parecía una tarea sencilla ya que al estar acostumbrado a trabajar con aviones, un dispositivo tan simple como una bicicleta no debería de ser ningún problema. Pero como se ha comentado ha habido una serie de acontecimientos que han impedido obtener el prototipo que se quería.

Por lo que el objetivo es seguir trabajando para obtener un prototipo que funcione tal y como se planteó al principio. Para ello se seguirá investigando sobre este tema de modo que se intentará buscar la forma de hacer otro diseño, partiendo con la gran ventaja de disponer de todos los conceptos adquiridos con este proyecto.

Otra de las opciones que se baraja es pasar directamente a trabajar con los cambios electrónicos ya existentes pero el factor económico hace que esta opción sea menos probable.

## Bibliografía

- [1] "Propiedades Mecánico-Químicas del aluminio", *Ingemecánica*, tutorial nº 110 (2016)
- [2] Bravo, J., "ingeniería en prevención de riesgos", *Resistencia de materiales*, 32-40 (2014)
- [3] Baca Escobar, W. "Reforzamiento de estructuras con fibras de carbono", *ACI-Perú*, 8 (2011)
- [4] Foss, K. "11 tipos de frenos para la bicicleta", *La biciketa*, (2014)
- [5] Bueno, P, "10 preguntas y repuestas sobre los frenos de disco" <http://www.ciclismoafondo.es/mecanica/Informes/articulo/frenos-disco-versus-zapata>
- [6] Octubre 2014, "Prueba de descenso,disco vs pastilla" <http://www.ciclismoafondo.es/material/Noticias-material/articulo/video-comparativa-frenos-hidraulicos-carretera-frenos-zapata-mm>
- [7] Junio 2015, "Pros y contras de un monoplato" <http://solobici.es/pros-y-contras-de-un-monoplato/>
- [8] Mayo 2010, "La transmisión y el elevado arte del cambio de marchas" <https://nosinmibici.com/2010/05/02/la-transmision-y-el-elevado-arte-del-cambio-de-marchas/>
- [9] Noviembre 2015, "Transmisión monoplato: Cómo elegir el desarrollo ideal" <http://www.todomountainbike.es/art/desarrollo-ideal-transmisiones-monoplato>
- [10] Víctor LV, "monoplato: ventajas, cálculo de desarrollos y opciones", *Raíces y turrón*, (2014)
- [11] Langley, J, "Anatomía específica de la bicicleta", *Guía Maestra del mantenimiento y reparación de la bicicleta de carretera y mountain bike*, 1 (2003)
- [12] Baldo, "Cómo ajustar el cambio de la bici: El desviador trasero", *Mecánica básica de supervivencia ciclista*, (2012)
- [13] Junio 2016, "Historia Mavic" <http://www.mavic.com.es/historia>
- [14] Julio 2015, "La evolución al cambio electrónico", <http://distritobici.com/la-evolucion-del-cambio-electronico/>
- [15] Octubre 2015, "Shimano XTR Di2 M9059 transmission review" <http://www.bikeradar.com/mtb/gear/category/components/groupsets/groupset-mountain/product/review-shimano-xtr-di2-m9050-49849/>
- [16] Abril 2006, "Bicicleta Mercedes-Benz" <http://www.mercedes.es/actualidad/noticias/news3.asp?NoNews=997>
- [17] Junio 2016, "Autobike" <http://evolvethetbike.com/our-bikes/>
- [18] Marzo 2007, "NuVinci Bicycle CVT" <http://www.pixelydixel.com/2007/03/nuvinci-el-cambio-del-cambio-en-las-bicicletas.html>
- [19] López Michelone, M., "Transmisión automática para bicicleta", *Unocero*, (2013)
- [20] Alcalde, Y., "¿Existe una cadencia ideal de pedaleo?", *Bicifácil*, (2013)
- [21] Mayo 2013, "¿Cuál es mi cadencia ciclista correcta?", <http://ciclored.com/cual-es-mi-cadencia-ciclista-correcta/>

- [22] Mayo 2014, “Look y polar, medidor de potencia”, <http://www.ciclismoafondo.es/material/componentes/articulo/look-y-polar-medidor-de-potencia>
- [23] Junio 2016, “Sparkfun, Load cell” <https://www.sparkfun.com/products/13332>
- [24] Universidad tecnológica de Pereira, “Medidores de deformación por resistencia: galgas extensiométricas”, *Scientia et Technia*, No 34 7-8
- [25] Junio 2010, “Dimensiones de un servo motor” <http://www.infoplcn.net/blog4/2010/06/16/dimensionamiento-de-un-servo-motor/>
- [26] Noviembre 2014, “Cómo usar la memoria EEPROM de Arduino” <http://www.educachip.com/como-usar-la-memoria-EEPROM-de-arduino/>
- [27] Junio 2011, “ATmega168A Pulse Width Modulation – PWM”, <http://www.protostack.com/blog/2011/06/atmega168a-pulse-width-modulation-pwm/>



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# ANNEXOS

**TÍTOL DEL TFG: Automatització d'un canvi electrònic de bicicleta**

**TITULACIÓ: Grau en Enginyeria d'Aeronavegació**

**AUTOR: David Márquez Abellán**

**DIRECTOR: Francisco López Berbel**

**DATA: 14 de Juliol del 2016**

## ANEXO A. MEDICIONES ADICIONALES

Además de los gráficos representados en el capítulo 5, se han realizado otros gráficos donde se puede observar entre otros el aumento de error de los sensores con el aumento de velocidad.

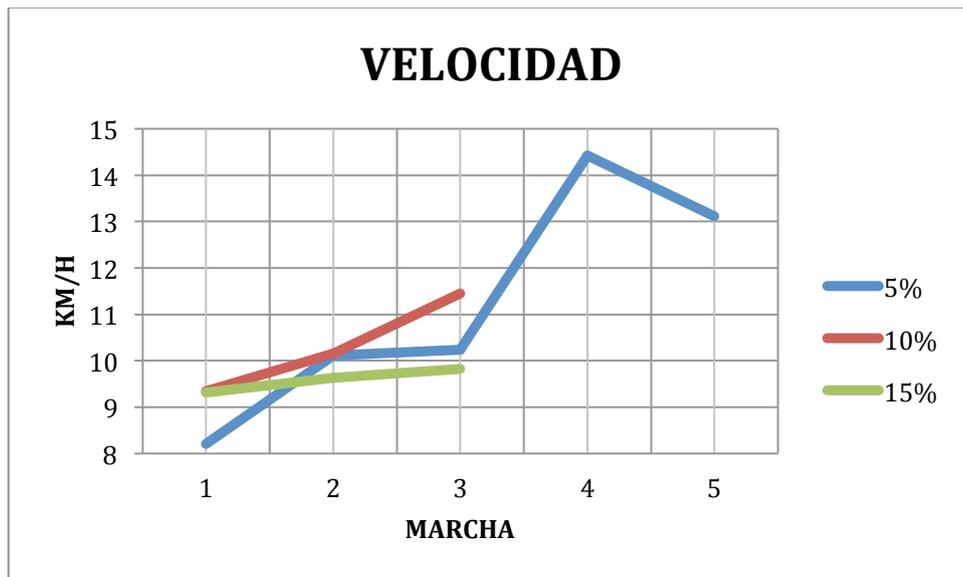
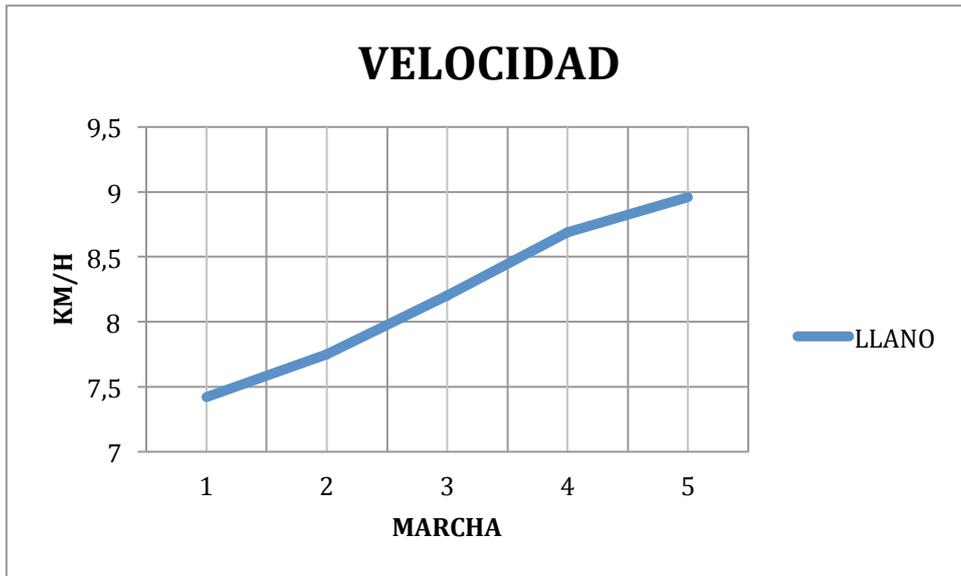


Fig. A.1 Velocidad en ascenso



Fig. A.2 % de muestras eliminadas en ascenso debido al error



**Fig. A.3** Velocidad en llano



**Fig. A.4** % de muestras eliminadas en llano debido al error

## ANEXO B. CÓDIGO

En este anexo se adjuntan dos de los códigos más importantes para el funcionamiento del sistema: La calibración del sensor y el código utilizado para recibir datos mediante la pantalla LCD.

### B.1 Calibración del sensor

```
#include "HX711.h" // librería amplificador sensor de fuerza
#define DOUT 11 // pin digital conectado al amplificador
#define CLK 12 // pin digital conectado al amplificador

//Ajuste de los parámetros del sensor
HX711 scale(DOUT, CLK);

//factor de calibración del sensor
float calibration_factor = 16800;

// Variables
int i=0;

void setup() {

//inicialización del monitor serie
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 calibration sketch");
  Serial.println("Remove all weight from scale");
  Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
  Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
  Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");

//reset de la escala a 0
  scale.set_scale();
  scale.tare();

//lectura de referencia
  long zero_factor = scale.read_average();
  Serial.print("Zero factor: ");
  Serial.println(zero_factor);

}

void loop() {
```

```
//Ajuste del factor de calibración
scale.set_scale(calibration_factor);

//Muestra el factor de calibración
Serial.print("Reading: ");
Serial.print(scale.get_units(), 1);
Serial.print(" Kg");
Serial.print(" calibration_factor: ");
Serial.print(calibration_factor);
Serial.println();

if(Serial.available())
{
  //Aumentar y disminuir el factor de calibración
  char temp = Serial.read();
  if(temp == '+' || temp == 'a')
    calibration_factor += 10;
  else if(temp == '-' || temp == 'z')
    calibration_factor -= 10;
}
}
```

## B.2 Ejecución del sistema

```
#include <HX711.h>
#include <LiquidCrystal.h> //Libreria de la pantalla LCD
#include <EEPROM.h>

#define DOUT 11
#define CLK 12

LiquidCrystal lcd(8, 9, 4, 5, 6, 7); //Pines digitales a los que se conecta la
pantalla LCD

HX711 scale(DOUT, CLK);

float calibration_factor = 7800;
int i=0;

//variables
float valor;
float sumavalores;
float mediavalores;
float valorMF;
int n;
float potenciaW;
```

```
float voltaje2;
int valor_sensor2;
float voltajeR;
float valor_sensorR;
int ss;
int tt;
int a;
int b;
int c;
int d;

//velocidad
const float pi=3.1416;
long tiempoin;
long tiempoout;
float tiempo;
long tiempooutANT;
float horas;
float distancia;
float velocidad;
long suficienteTIME;
long suficienteTIMEpedal;
long tiempoOUTpedal;
long pedaladasXmin;
float velocidadmod;

void setup() {

  Serial.begin(9600);

//SENSOR FUERZA
  Serial.println("HX711 calibration sketch, remove all weight from scale");
  Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");

  scale.set_scale();
  scale.tare();

  long zero_factor = scale.read_average();
  Serial.print("Zero factor: ");
  Serial.println(zero_factor);

//LCD
//numero de columnas y filas de la pantalla LCD
  lcd.begin(16, 2);

//DISTANCIA por vuelta
  distancia=0.00204;
```

```
//VARIABLES
velocidadmod=2;
sumavalores=0;
potenciaW=0;
n=0;
tt=0;
valorMF=0;
ss=0;

a=0;
b=1000;
c=2000;
d=3000;
}

void loop() {

    scale.set_scale(calibration_factor);

//A5 cadencia
//A1 velocidad

    valor_sensor2 = analogRead(A5);
    voltaje2 = valor_sensor2 * (5.0 / 1023.0);
    valor_sensorR = analogRead(A1);
    voltajeR = valor_sensorR * (5.0 / 1023.0);

    valor=scale.get_units();

//Valor máximo de fuerza

    if (valor>=valorMF)
    {
        valorMF=valor;
    }

//VELOCIDAD
//registra el tiempo de entrada
suficienteTIME=millis();

//condiciones para garantizar que la rueda da una vuelta antes de leer otro
valor
if((voltajeR>=0.47)&&(suficienteTIME-tiempoout>=280))
{
    tiempoout=millis();

//cálculo de la velocidad
tiempo=tiempoout-tiempoin;
horas=(tiempo/3600000);
velocidadmod=distancia/horas;
```

```

//cálculo de la potencia
potenciaW=valorMF*9.81*velocidadmod;

//display velocidad en LCD
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print(velocidadmod, 1);

lcd.setCursor(4,0);
lcd.print("Km/h");

//tiempo de salida
tiempoin=tiempoout;
tt=tt+1;
}

//CADENCIA
suficienteTIMEpedal=millis();

if((voltaje2>0.1)&&(suficienteTIMEpedal-tiempoOUTpedal>=400))
{
pedaladasXmin=60000/(suficienteTIMEpedal-tiempoOUTpedal);

//display de cadencia y potencia
lcd.setCursor(0,1);
lcd.print(potenciaW);

lcd.setCursor(5,1);
lcd.print("W");

lcd.setCursor(10,1);
lcd.print(pedaladasXmin);

lcd.setCursor(12,1);
lcd.print("P/min");

//ejecución de las ordenes
//Subidas
if((potenciaW>2000)&&(velocidadmod<10))
{
if(pedaladasXmin>=82)
{
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print("Bajar");
}
if(pedaladasXmin<=72)
{
lcd.setCursor(10,0);
lcd.print("Subir");
}
}
}

```

```
    if((pedaladasXmin>=72)&&(pedaladasXmin<=82))
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("OK");
    }
}
//Llano
if((potenciaW<2000)&&(velocidadmod<15))
{
    if(pedaladasXmin>=75)
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("Bajar");
    }
    if(pedaladasXmin<=65)
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("Subir");
    }
    if((pedaladasXmin>=65)&&(pedaladasXmin<=75))
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("OK");
    }
}
//Bajadas
if((potenciaW<2000)&&(velocidadmod>15))
{
    if(pedaladasXmin>=60)
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("Bajar");
    }
    if(pedaladasXmin<=50)
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("Subir");
    }
    if((pedaladasXmin>=50)&&(pedaladasXmin<=60))
    {
        lcd.setCursor(10,0);
        lcd.print("OK");
    }
}

//almacenamiento de los datos en la memoria
EEPROM.write(a,pedaladasXmin);
EEPROM.write(b,valorMF);
EEPROM.write(c,velocidadmod);
```

```
EEPROM.write(d,mediavalores);

tiempoOUTpedal=millis();
ss=ss+1;
sumavalores=0;
valorMF=0;
n=0;
a=a+1;
b=b+1;
c=c+1;
d=d+1;
}
}
```