

Estimación del esfuerzo de pedaleo en una bicicleta a partir de una Unidad de Medida Inercial

Nicolás Felipe Barrantes Rodriguez
Carlos Alberto Serrano Urquijo

DIRECTORA

Ing. Martha Lucia Cano Morales, MSc.

CO-DIRECTOR

Ing. Magín Flórez, PhD.

Pontificia Universidad Javeriana

Ingeniería Electrónica

Bogotá D.C

Junio 2017

Índice general

1	Introducción	7
2	Marco Teórico	9
2.1	Unidad de medida inercial	9
2.2	Acelerómetro	9
2.3	Giroscopio	10
2.4	Magnetómetro	10
2.5	Bicicleta eléctrica	10
3	Desarrollo	11
3.1	Dinámica de la bicicleta	11
3.1.1	Momento de inercia en modelo simplificado	12
3.1.2	Velocidad lineal de la rueda	16
3.2	Desarrollo de sistema embebido para la medición y envío de parámetros de una IMU	19
3.2.1	Especificaciones generales del sistema embebido	19
3.2.2	Diseño del circuito de adquisición y transmisión de datos	20
3.2.2.1	Fubarino SD	20
3.2.2.2	IMU LS9DS0	21
3.2.2.3	Comunicación IMU – Fubarino SD	21
3.2.2.4	Comunicación Fubarino SD – PC	23
3.2.2.5	Análisis de tiempos de comunicación.	23
3.2.2.6	Diagrama en bloques y circuito esquemático	24
3.2.3	Diseño del programa de adquisición y transmisión de datos	25
3.2.4	Descripción del programa	26
3.3	Desarrollo de algoritmos de estimación de esfuerzo	30
3.3.1	Obtención de datos en tiempo real	30
3.3.2	Tratamiento de datos	30
4	Protocolo de pruebas y análisis de resultados	32
4.1	Protocolo de pruebas de campo	32
4.1.1	Instrumento de medición	33

4.1.2	Protocolo de pruebas software de adquisición y módulo de procesamiento	33
4.2	Implementación de protocolo de pruebas de campo	45
5	Conclusiones	54
	Bibliografía	55
A	Anexo 1	56

Índice de figuras

3.1	<i>Ubicaciones del plato y del piñón.</i>	11
3.2	<i>Sistema de poleas de una bicicleta.</i>	12
3.3	<i>Momento de giro en el plato y piñón.</i>	13
3.4	<i>Velocidad angular de la rueda trasera.</i>	13
3.5	<i>Fuerza de rozamiento.</i>	14
3.6	<i>Sistema dinámico plato, piñón y rueda.</i>	14
3.7	<i>Conjunto plato biela.</i>	15
3.8	<i>angulo de inclinacion</i>	16
3.9	<i>Fubarino SD</i>	20
3.10	<i>IMU LS9DS0</i>	21
3.11	<i>Relación de pines</i>	22
3.12	<i>Diagrama de tiempos.</i>	23
3.13	<i>Diagrama en bloques.</i>	24
3.14	<i>Circuito esquemático.</i>	25
3.15	<i>Diagrama de flujo del Software de adquisición.</i>	29
3.16	<i>Diagrama de flujo tratamiento de datos.</i>	31
4.1	<i>PocketLab.</i>	33
4.2	<i>Sistema embebido prototipo.</i>	34
4.3	<i>Ubicación del sistema.</i>	35
4.4	<i>Resultados obtenidos.</i>	35
4.5	<i>Resultados medidos vs Resultados obtenidos</i>	37
4.6	<i>Resultados acelerómetro ax.</i>	39
4.7	<i>Modelo masa - resorte del acelerómetro ubicado en la biela.</i>	39
4.8	<i>Aceleración centrípeta y centrífuga.</i>	40
4.9	<i>Resultados acelerómetro ay.</i>	41
4.10	<i>Escenario de prueba.</i>	42
4.11	<i>Velocidad angular en el eje z.</i>	42
4.12	<i>Velocidad angular en el eje z.</i>	43
4.13	<i>Derivada de la prueba disminuyendo cambios.</i>	43
4.14	<i>Derivada de la prueba aumentando cambios.</i>	44

4.15	<i>Detección de cambios descendentes.</i>	44
4.16	Detección de cambios ascendentes.	45
4.17	<i>Aceleración biela.</i>	46
4.18	<i>Velocidad angular biela.</i>	46
4.19	<i>Aceleración biela. Tres pruebas.</i>	47
4.20	<i>Velocidad angular. Tres pruebas.</i>	47
4.21	<i>Velocidad angular eje z. Prueba 1.</i>	48
4.22	Velocidad angular eje z. Prueba 2.	48
4.23	<i>Potencia calculada por el sensor. Prueba 1.</i>	49
4.24	Potencia calculada por el sensor. Prueba 2.	49
4.25	<i>Potencia calculada por el sensor. Prueba 3.</i>	50
4.26	<i>Potencia instantánea. Prueba 1.</i>	50
4.28	<i>Potencia instantánea. Prueba 3.</i>	51
4.27	<i>Potencia instantánea. Prueba 2.</i>	51

Índice de tablas

3.1	<i>Número de dientes en los platos y los piñones.</i>	12
3.2	<i>Especificaciones generales del sistema embebido.</i>	19
3.3	<i>Nombres y direcciones de los registros encargados de guardar datos [17].</i>	26
3.4	<i>Rangos de prueba de Self – Test</i>	27
4.1	<i>Resultados acelerómetro</i>	33
4.2	<i>Sensor de acelerometro</i>	34
4.3	<i>Sensor de giroscopio</i>	36
4.4	<i>Resultados teóricos.</i>	37
4.5	<i>Resultados giroscopio.</i>	37
4.6	<i>Porcentaje de error</i>	38
4.7	<i>Resultados acelerómetro ax.</i>	38
4.8	<i>Resultados acelerómetro ay.</i>	40
4.9	<i>Promedio PowerTap vs Promedio Sistema Embebido.</i>	52

Agradecimientos

Queremos agradecerle al profesor Fredy Enrique Rojas Tazona por su amable colaboración y gran aporte para el desarrollo de este trabajo de grado.

A las personas encargadas del laboratorio de ingeniería de la universidad Sergio Arboleda por prestarnos sus instalaciones y brindarnos el espacio para realizar pruebas.

A nuestros directores por su gran apoyo durante el desarrollo del trabajo, por su tiempo y dedicación en asesorarnos y por haber puesto su confianza en nosotros para llevar a cabo este trabajo.

Capítulo 1

Introducción

En la última década se ha presentado un aumento significativo del uso de la bicicleta como medio de transporte alternativo. Muchas de las personas que han tomado la opción de usarlas han optado por usar las bicicletas eléctricas para disminuir el esfuerzo que deben realizar, manteniendo una buena velocidad de desplazamiento.

En el mercado existen varios modelos de bicicletas eléctricas que permiten al usuario aumentar la potencia del motor mediante un acelerador, esto representa un riesgo en la movilidad de los demás ciclistas y peatones que transitan por las ciclorrutas o zonas peatonales, dado que estas bicicletas pueden alcanzar velocidades mayores a los 25 Km/h. Para mitigar dicho riesgo, en Colombia, el ministerio de transporte emitió la resolución 160 de 2017, reglamentando la circulación de vehículos eléctricos.

Debido a las problemáticas en la circulación, y para ajustarse a las leyes ya impuestas por los gobiernos, los fabricantes han optado por integrar sistemas de pedaleo asistido a sus bicicletas eléctricas, ya que estos vehículos no están sometidos a la regulación de circulación y pueden transitar por las ciclorrutas, siempre que cumplan ciertas condiciones estipuladas por la ley. En la resolución 160 de 2017 se define la bicicleta con pedaleo asistido como:

“Bicicleta equipada con un motor auxiliar con potencia nominal continua no superior a 0,35 kW, que actúa como apoyo al esfuerzo muscular del conductor. Dicha potencia deberá disminuir progresivamente conforme se aumente la velocidad del vehículo y se suspenderá cuando el conductor deje de pedalear o el vehículo alcance una velocidad de 25 km/h, el peso nominal de una bicicleta asistida no deberá superar los 35 kg”

Para implementar el sistema de pedaleo asistido es necesario medir el esfuerzo del ciclista para regular la potencia del motor. Entre las soluciones más usadas para la medición de este esfuerzo se encuentran, la instalación de un sensor de torque en el cala-pie o el uso de celdas de carga que permiten medir la deflexión en el marco de la bicicleta. Estos métodos entregan medidas bastante fiables, pero tienen un costo elevado, el cual oscila entre los 70 y 1200 dólares, lo que los hace poco asequibles y limita su masificación. En diferentes laboratorios y grupos de investigación alrededor del mundo se están buscando otras alternativas para solucionar el problema de medición de esfuerzo con sensores que tengan un costo menor.

En la universidad Sergio Arboleda se está desarrollando un proyecto llamado *"Desarrollo de un prototipo de sistema de transporte público con bicicletas eléctricas compartidas para la ciudad de Bogotá D.C."*, financiado por Colciencias. Uno de los objetivos de este proyecto es desarrollar un prototipo de bicicleta eléctrica adaptado a las necesidades de Bogotá, que incluya un sistema de medición de esfuerzo confiable y de bajo costo. En el presente trabajo de grado se realizó un estudio para determinar la efectividad de la medición de esfuerzo mediante una Unidad de Medida Inercial (IMU por sus siglas en inglés), la cual presenta ventajas para esta aplicación: tamaño reducido, alta disponibilidad en el mercado y bajo costo, entre 1 y 7 dólares.

Para llevar a cabo el estudio se analizaron las ecuaciones de la dinámica de una bicicleta, con el fin de seleccionar aquellas que permitieran estimar el esfuerzo a partir de las variables físicas medidas por la IMU. Se desarrolló un sistema embebido para ser instalado en una bicicleta, el cual permite recolectar los datos adquiridos por la IMU y transmitirlos a un computador. Se desarrollaron algoritmos de estimación de esfuerzo en Matlab R2015a, usando las ecuaciones seleccionadas. Finalmente se realizaron pruebas con un sistema comercial que embebe sensores inerciales y con el sistema embebido desarrollado en este trabajo de grado, para comparar los resultados obtenidos contra valores medidos con un sensor de torque de alto costo.

En este informe se presentan las ecuaciones de la dinámica de la bicicleta usadas en la solución del problema, el diseño e implementación del sistema embebido, el desarrollo de los algoritmos de estimación de esfuerzo, el protocolo de pruebas implementado y el análisis de resultados con las respectivas conclusiones.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se presentan los conceptos teóricos básicos que enmarcan el trabajo de grado desarrollado.

2.1 Unidad de medida inercial

Una IMU es un dispositivo electrónico que mide la aceleración, rotación y fuerzas gravitacionales de un aparato de manera autónoma. Son mayormente utilizadas en los sistemas de navegación inercial de aviones, naves espaciales, barcos, entre otros, para informar acerca de la velocidad a la que viajan, saber su posición actual desde el punto de origen, y ubicar su posición geográficamente si estuviera trabajando conjuntamente con un sistema computarizado de mapas.

Está compuesta por un conjunto de acelerómetros, giroscopios y magnetómetros que obtienen datos en los ejes coordenados X, Y y Z, enviándolos a algún sistema computarizado que realiza los cálculos necesarios para informar sobre las medidas inerciales.

2.2 Acelerómetro

Es un dispositivo que mide la aceleración de movimiento de una estructura. Existen diferentes tipos de acelerómetros que se clasifican por la tecnología que usan: mecánicos y capacitivos. Los acelerómetros mecánicos están compuestos por un armazón que contiene una masa sostenida por un resorte fijado en uno de los topes del armazón. Al aplicar una fuerza para desplazar el armazón, la masa contenida en él se desplaza, estirando el resorte proporcionalmente a la distancia que ha sido desplazado el armazón, provocando una aceleración en la masa proporcional a la constante del resorte multiplicada por la distancia que este se estiró.

Los acelerómetros capacitivos cuentan con tres placas, dos de ellas son fijas y se encuentran en los extremos del dispositivo, mientras que la otra es una placa móvil que se encuentra en el medio de las otras dos placas. Al moverse la placa del centro, se cambia la capacitancia que se crea entre la placa del centro con las de los extremos, y de esta manera se obtienen variaciones en señales eléctricas proporcionales a la fuerza aplicada al dispositivo, que a su vez es proporcional a la distancia que se mueve la placa del centro.

2.3 Giroscopio

Es un dispositivo que mide la velocidad de giro de un objeto. Consiste en dos brazos o ejes piezoeléctricos que se encuentran en constante vibración, y un brazo que se encuentra estático y que es capaz de medir la presión ejercida a los brazos que están vibrando cuando todo el conjunto es sometido a un giro. La presión censada es interpretada en señales eléctricas proporcionales a la velocidad con la que fue girado el conjunto. Tanto los brazos vibratorios como el brazo estático se encuentran fijos a un eje que impide que se muevan de su sitio cuando el conjunto gira.

2.4 Magnetómetro

Es un dispositivo que sirve para medir en fuerza (escalares), o dirección o ambas (vectoriales) el campo magnético al que está siendo sometido. Su funcionamiento se basa en una masa ferromagnética que altera el campo magnético terrestre, y por el cambio de intensidad que se presenta, dicha masa puede ser encontrada. Pueden ser usados como detector de metales, brújulas o de uso militar para encontrar submarinos o vehículos.

2.5 Bicicleta eléctrica

Una bicicleta eléctrica es una bicicleta que ha sido adaptada para incorporar un motor eléctrico, manteniendo las características de una bicicleta normal. El motor eléctrico ayuda al ciclista a ir más rápido sin que este tenga que esforzarse más de la cuenta. Existen dos tipos de bicicletas eléctricas principalmente, que difieren entre ellas en la manera en la que se maneja el motor: las de acelerador y las de pedaleo asistido; Las bicicletas eléctricas que tienen un acelerador, cuentan con un botón en el manillar con el cual se prende o apaga el motor y se puede variar su potencia. Con este tipo de bicicleta, el ciclista no tiene la necesidad de pedalear en ningún momento si así él lo quiere. En muchos países estas bicicletas están prohibidas.

Las de pedaleo asistido carecen de acelerador, de esta manera el ciclista no controla directamente le motor, sino que, por medio de diferentes sensores o factores, el sistema censa la potencia que está siendo aplicada por el ciclista, y de acuerdo a eso el motor asiste o no al ejercicio. A diferencia de las bicicletas que tienen acelerador, las de pedaleo asistido requieren que el ciclista este pedaleando en todo momento. Para medir el nivel de esfuerzo que está realizando el ciclista se cuentan con métodos como por ejemplo la inclusión de un sensor de torque que mide la potencia que se le está aplicando a los pedales, y dependiendo de esa medida ayudará en mayor o menor medida al ciclista. También existe un sensor que mide la cadencia de pedaleo, y dependiendo de esa medida el sistema proveerá o no ayuda. Comparado con el sensor de torque, el sensor de cadencia no varía el nivel de asistencia entregado

Capítulo 3

Desarrollo

En este capítulo se describen las ecuaciones de la dinámica de la bicicleta que fueron usadas para la estimación de esfuerzo, luego se describe la concepción, diseño e implementación del sistema embebido que permite adquirir y transmitir los valores censados por la IMU y finalmente se presenta el desarrollo de los algoritmos de estimación de esfuerzo.

3.1 Dinámica de la bicicleta

Una bicicleta cuenta con dos piezas fundamentales para su funcionamiento: el plato y el piñón como se ilustra en la *figura 3.1*.



Figura 3.1: *Ubicaciones del plato y del piñón.*

La mayoría de bicicletas hoy en día vienen equipadas con un sistema de cambios que consiste en cambiar entre una serie de platos y piñones que tienen diferentes radios. Lo más común es que en el plato haya tres radios y en el piñón haya siete. Para este estudio fueron muy importantes estos diferentes radios porque dependiendo de la relación que existe entre ellos es diferente el esfuerzo que realiza el ciclista. En la *tabla 3.1* se observan los números de dientes comunes.

	PLATO	PIÑÓN
#1	48	28
#2	38	24
#3	28	22
#4	NA	20
#5	NA	18
#6	NA	16
#7	NA	14

Tabla 3.1: *Número de dientes en los platos y los piñones.*

Los casos más críticos de la relación son: el plato más grande con el piñón más pequeño en donde se requiere el mínimo esfuerzo para avanzar; el plato más pequeño con el piñón más grande en donde se requiere el máximo esfuerzo para avanzar. Para las pruebas realizadas se tomó un radio en el plato fijo y tres diferentes radios en el piñón, más concretamente el 7, 6 y 5 ya que la bicicleta instrumentada que se encuentra en la universidad Sergio Arboleda cuenta con estas características.

El avance de la bicicleta es el resultado de un conjunto de fuerzas que provienen de la acción de pedalear. Algunas de estas fuerzas se oponen al avance como la fricción con el aire, fricción con el suelo, peso del sistema, etc. La fuerza que logra vencer la suma de estas fuerzas es la de pedaleo. Esta fuerza se puede traducir en el esfuerzo que realiza la persona, y puede ser expresada en términos de potencia.

Esta potencia se puede calcular a partir de las fuerzas existentes en el conjunto de poleas de la bicicleta o a partir de la velocidad lineal de la rueda trasera. En el primer caso, el problema se aborda desde el punto de vista del momento de inercia, en el segundo caso se aborda desde el punto de vista de velocidades lineales. A continuación, se explica cada uno de estos enfoques y cómo se puede determinar el esfuerzo a partir de ellos.

3.1.1 Momento de inercia en modelo simplificado

El conjunto plato -piñón se puede modelar como un sistema de poleas básico, como el que se presenta en la *figura 3.2*

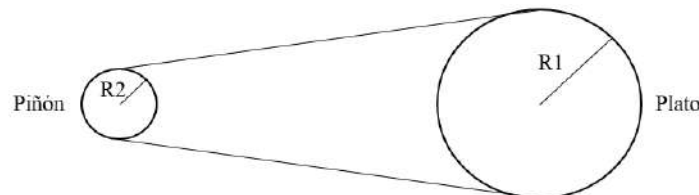


Figura 3.2: *Sistema de poleas de una bicicleta.*

Este sistema consiste en dos poleas situadas a cierta distancia y que están unidas por una correa. La principal característica de este sistema es que una de las poleas está sujeta a un eje que gira por el efecto de una fuerza externa, mientras que la otra polea está sujeta al eje que se quiere mover. El elemento que permite transmitir la energía de una polea a otra es la correa por medio de la fricción existente entre esta y las poleas.

En el caso de una bicicleta, el plato es la polea que está sujeta al eje que gira por la fuerza aplicada por el ciclista a través de la biela, y el piñón es la polea que está sujeta al eje que está girando por efecto de la transmisión de energía en la cadena. Cuando el plato es sometido a la fuerza externa, aparece una velocidad angular que describe su movimiento (ω_{R2}), a su vez aparece una tensión en la cadena debido a la fricción (F_{cad}), la cual hace girar el piñón de la rueda trasera con una velocidad angular asociada (ω_{R1}). En la *Figura 3.3* se muestran estas velocidades y la fuerza en la cadena.

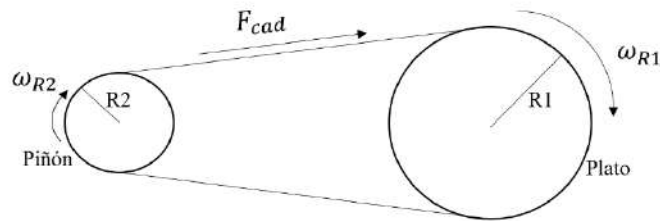


Figura 3.3: *Momento de giro en el plato y piñón.*

Para hallar la velocidad angular asociada al piñón, basta con saber la relación de dientes existente entre el plato y el piñón, y multiplicarla por la velocidad angular del plato. La *ecuación (3.1)* muestra esta relación.

$$\omega_{R2} = N \cdot \omega_{R1} \quad (3.1)$$

Donde N es la relación de dientes.

Como la unión entre el piñón y la rueda trasera de la bicicleta es rígida, la velocidad angular del piñón es la misma velocidad angular de la rueda trasera de la bicicleta. La *Figura 3.4* muestra ilustra el conjunto piñón-rueda trasera, y la *ecuación 3.2* describe esta relación.

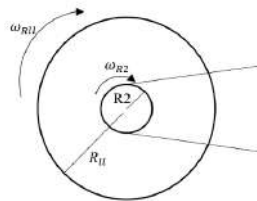


Figura 3.4: *Velocidad angular de la rueda trasera.*

$$\omega_{R11} = \omega_{R2} \quad (3.2)$$

Cuando la rueda gira ejerce una fuerza al suelo, a su vez el suelo ejerce una fuerza contraria que corresponde a una fuerza de rozamiento. Para el enfoque de momento de inercia en un modelo simplificado, la fuerza que ejerce la rueda se supone igual a la fuerza de rozamiento (F_r). En el modelo, esta fuerza se verá como una fuerza tangencial en el punto de contacto de la rueda y el suelo. En la *Figura 3.5* se ilustra esta fuerza.

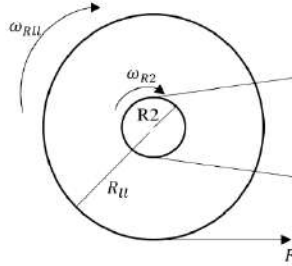


Figura 3.5: *Fuerza de rozamiento.*

Para que exista un desplazamiento se debe vencer el momento de inercia de la rueda. Tomando el conjunto rueda-piñón como un cilindro sólido con hueco en la mitad, su momento de inercia se expresa por la *ecuación 3.3*, según [1]

$$I = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R_2^2 + R_u^2) \quad (3.3)$$

Para efectos prácticos, se supone que la masa total del sistema se concentra en la rueda trasera, por lo tanto, M será la masa total del conjunto bicicleta - ciclista.

El torque que experimentará el eje de la rueda (piñón) está expresado por la *ecuación 3.4*.

$$\tau = I \cdot \alpha_u \quad (3.4)$$

Donde α_u es la aceleración angular de la rueda.

En la *Figura 3.6* se puede ver el sistema descrito hasta el momento.

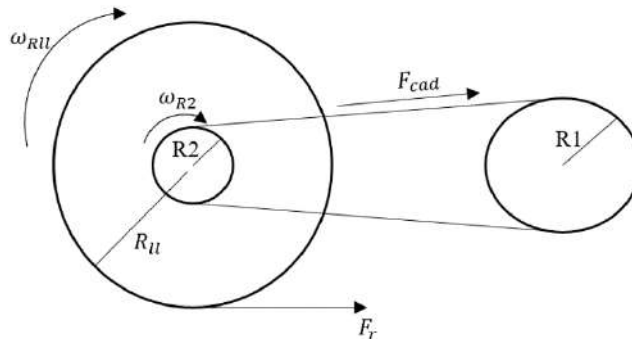


Figura 3.6: *Sistema dinámico plato, piñón y rueda.*

La *ecuación 3.5* describe el sistema por completo. este es el resultado de la acción de tener mas de una fuerza aplicada en la rueda y que se traduce en el movimiento rotacional de la misma .

$$F_{cad} \cdot R_2 - (F_r \cdot R_{ll}) = \frac{1}{2} \cdot M(R_2^2 + R_{ll}^2)\alpha_{ll} \quad (3.5)$$

De la *ecuación 3.5* se puede despejar la fuerza en la cadena, obteniendo la *ecuación 3.6*.

$$F_{cad} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M \cdot (R_2^2 + R_{ll}^2) \cdot \alpha_{ll} + F_r \cdot R_{ll}}{R_2} \quad (3.6)$$

La fuerza en la cadena se produce debido a la fuerza aplicada por el ciclista en el cala-pie, el cual se encuentra ubicado en el extremo de la biela. La *figura ??* muestra el conjunto plato-biela y sus fuerzas.

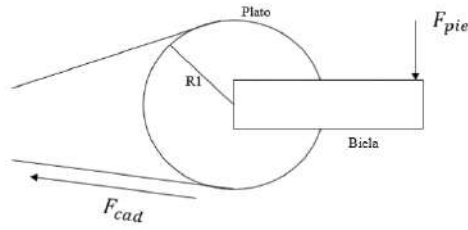


Figura 3.7: *Conjunto plato biela.*

Igualando los momentos de fuerza del plato y de la biela se tiene la *ecuación 3.7*, en donde se puede despejar la fuerza aplicada por el pie (F_{pie}) en función de la fuerza en la cadena, de acuerdo a la *ecuación 3.8* .

$$F_{pie} \cdot l_{biela} = F_{cad} \cdot R_1 \quad (3.7)$$

$$F_{pie} = \frac{(F_{cad} \cdot R_1)}{l_{biela}} \quad (3.8)$$

Como se quiere conocer el esfuerzo del ciclista en términos de potencia, se utiliza la *ecuación 3.9*, en la cual se relaciona el torque realizado por el pie (τ_{pie}) y la velocidad angular de la biela (ω_{r1}) [2].

$$P_{pie} = \tau_{pie} \cdot \omega_{r1} \quad (3.9)$$

El torque por el pie viene dado por la *ecuación 3.10*.

$$\tau_{pie} = F_{pie} \cdot l_{biela} \cdot \cos(\theta) \quad (3.10)$$

Donde θ es el ángulo de inclinación de la biela respecto a los ejes coordenados de la bicicleta como se muestra en la *figura 3.8a* y *figura 3.8b*.

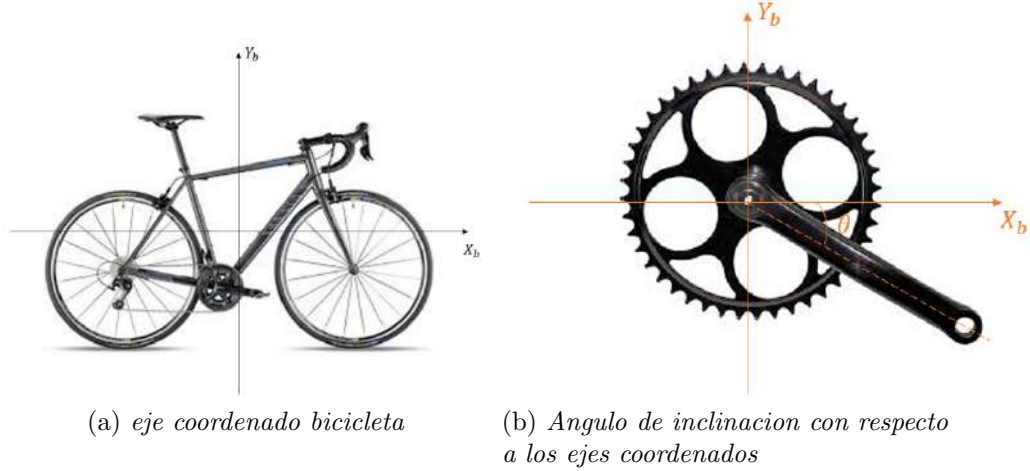


Figura 3.8: *angulo de inclinacion*

Reemplazando la *ecuación 3.10* en la *ecuación 3.9*, se obtiene la *ecuación 3.11*.

$$P_{pie} = F_{pie} \cdot l_{biela} \cdot \cos(\theta) \cdot \omega_{R1} \quad (3.11)$$

Reemplazando las *ecuaciones 3.6* y *3.8* en la *ecuación 3.11*, se obtiene el esfuerzo del ciclista en función del ángulo entre la biela y el eje coordenado de la bicicleta (θ), de la velocidad angular de la biela (W_{r1}) y de la aceleración angular de la rueda (α_{ll}), como se expresa en la *ecuación 3.12*.

$$P_{pie} = \frac{\frac{1}{2} \cdot M \cdot (R_2^2 + R_{ll}^2) \cdot \alpha_{ll} + F_r \cdot R_{ll}}{R_2} \cdot R_1 \cdot l_{biela} \cdot \cos(\theta) \cdot \omega_{R1} \quad (3.12)$$

La velocidad angular W_{R1} y el ángulo θ se pueden hallar colocando la IMU en la biela. Para el ángulo se observa en que momentos la aceleración. Para la velocidad angular se observa la componente Z de la IMU ya que es el eje que está girando sobre sí mismo. Finalmente, la aceleración angular se aplica la *ecuación 3.1* y se deriva el resultado.

3.1.2 Velocidad lineal de la rueda

El enfoque por momento de inercia, presentado en la sección anterior, no da cuenta de las pérdidas de energía dependientes de la velocidad de la bicicleta como: la resistencia del viento y la resistencia de los rodamientos. A continuación, se presenta un modelo que tiene en cuenta estas pérdidas, el cual fue desarrollado por Martins et Al [3].

Según el equilibrio entre la potencia provista por el ciclista y la potencia de resistencia a este esfuerzo está dado por la *ecuación 3.13*.

$$P_{ped} = \frac{P_{res}}{\eta} \quad (3.13)$$

Donde η es un factor de eficiencia mecánica que según puede ser tomado como 0.975.

Al calcular (P_{res}) es posible definir la potencia empleada por el ciclista para el desplazamiento. (P_{res}) es la potencia de resistencia al esfuerzo. Según, esta potencia es la suma de la potencia resultante de las fuerzas que se oponen al avance. La ecuación 3.14 presenta las potencias que aportan a la potencia de resistencia.

$$(P_{res} = P_{air} + P_{roll} + P_{bearing} + P_{pe} + P_{ke}) \quad (3.14)$$

P_{air} es la potencia del aire o la potencia ejercida por la resistencia aerodinámica [4] y viene dada por la ecuación 3.15.

$$P_{air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot V_a^2 \cdot V_G \quad (3.15)$$

Donde:

- ρ es la densidad del aire.
- C_D es un coeficiente de arrastre. Su valor depende de la posición del ciclista, típicamente es 1.0 [4]
- A es el área frontal del conjunto ciclista – bicicleta. Un valor típico para una persona promedio es de 0.504. [4]
- V_a es la velocidad del viento.
- V_g es la velocidad de la bicicleta.

P_{roll} es la potencia ejercida por la fuerza de rozamiento y viene dada por la ecuación [3] 3.16.

$$P_{roll} = V_G \cdot \cos(\varphi) \cdot C_{RR} \cdot mt \cdot g \quad (3.16)$$

Donde:

- φ es el ángulo de inclinación del suelo.
- mt es la masa total del conjunto ciclista – bicicleta.
- C_{RR} es el coeficiente de rozamiento. Según tiene un valor típico de 0.004 [5], y propone que es $0.0031 + (0.75/mt)$ [4]. mt debe estar en libras.
- g es la aceleración de la gravedad.

$P_{bearing}$ es la potencia debida a las perdidas en los neumáticos y viene dada por la ecuación [3] 3.17.

$$P_{bearing} = \beta_0 \cdot V_G + \beta_1 \cdot V_G^2 \quad (3.17)$$

Donde β_0 y β_1 son coeficientes obtenidos experimentalmente. Tienen un valor típico de 0.091 y 0.0087 respectivamente, según [6].

P_{pe} es la potencia debida a los cambios en la energía potencial y viene dada por la ecuación [3] 3.18.

$$P_{pe} = V_G \cdot mt \cdot g \cdot \sin(\beta) \quad (3.18)$$

P_{ke} es la potencia debida a los cambios en la energía cinética [12] y viene dada por la ecuación [4] 3.19.

$$P_{ke} = \frac{1}{2} \cdot (mt + \frac{I}{r^2})a^2 \Delta t \quad (3.19)$$

Donde:

- **I** es el momento de inercia de las ruedas de la bicicleta. Un valor típico es de $0.14 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.
- **r** es el radio de la rueda.
- **a** es la aceleración lineal de la bicicleta.
- Δt es el periodo de tiempo donde se mide la potencia.

Cabe resaltar que cuando la aceleración lineal de la bicicleta (**a**) es negativa, P_{ke} se toma como cero ya que físicamente significa que esta potencia no aporta ni al avance ni a la detención de la bicicleta. En las ecuaciones 3.13 a 3.17, se ve que para poder estimar P_{res} es necesario medir:

- Velocidad lineal de la bicicleta (V_g)
- Aceleración lineal de la bicicleta (a)
- Angulo de inclinación de la bicicleta con respecto al suelo (φ)

El cálculo de la velocidad lineal de la bicicleta se puede realizar colocando la IMU tanto en la rueda trasera como en la biela por medio de la *ecuación 3.20*. La aceleración lineal se obtiene integrando el resultado obtenido en la *ecuación 3.20*. El ángulo de inclinación del suelo es cero ya que las pruebas se realizaron siempre en terrenos planos.

Para este análisis se retomará desde la *ecuación 3.1*.

La velocidad tangencial sobre un punto de la rueda en el momento en el que está girando es igual a la distancia de ubicación del punto respecto al eje de rotación multiplicada por la velocidad angular []. Para este análisis el punto de interés son los bordes del neumático. En la *ecuación 3.20* se ilustra la velocidad tangencial de la rueda [1].

$$V_u = \omega_u \cdot R_u \quad (3.20)$$

Partiendo de la *ecuación 3.7*, se puede calcular el esfuerzo con base en estudios enfocados en este tema y que han tenido resultados favorables.

3.2 Desarrollo de sistema embebido para la medición y envío de parámetros de una IMU

En esta sección se hablará sobre el diseño y la implementación del sistema de computador embebido, desarrollado para la adquisición de las señales de una IMU, el cual ubicará en diferentes posiciones en la bicicleta (biela, marco, manillar). Se requiere que este sistema sea pequeño y poco intrusivo para integrarlo con los demás sistemas con los que ya cuenta una bicicleta de pedaleo asistido. Además, una IMU necesita de otros elementos para poder adquirir sus resultados, por eso, se añaden un microcontrolador y un módulo bluetooth para complementar su funcionamiento.

3.2.1 Especificaciones generales del sistema embebido

Se diseñó un sistema embebido que entrega medidas de aceleración, giro y campo magnético a través de un módulo Bluetooth, a un sistema de procesamiento que estima el esfuerzo realizado por un ciclista a la hora de pedalear.

En la siguiente *tabla 3.2* se muestran las especificaciones generales del sistema.

CONSUMO	Fubarino SD	112.55 mA
	LS9DS0	6.45 mA
	HC - 06	71 mA
TAMAÑO	SISTEMA EMBEBIDO	14.5 cm X 7.8 cm X 3.3 cm
	PCB	12.05 cm X 4.36 cm
DISTANCIA DE CONEXIÓN	BLUETOOTH	70 m
FUENTE DE PODER	POWERBANK	5 V

Tabla 3.2: Especificaciones generales del sistema embebido.

Con la *ecuación 3.21* se calcula el tiempo estimado que durará la batería durante un uso constante del sistema.

$$Tiempodedescarga = \frac{Capacidadnominaldelabatería}{Consumoeléctricodeldispositivo} \quad (3.21)$$

Con un consumo de 190 mA y una capacidad nominal de la batería de 2500 mAh se tiene un tiempo estimado de descarga de 13.15 horas. Cabe recalcar que la descarga de una batería no tiene un comportamiento lineal. Por lo tanto, no se asegura al 100 % el resultado de la ecuación 3.21.

3.2.2 Diseño del circuito de adquisición y transmisión de datos

Para dar inicio a la presentación del sistema, primero se hablará sobre los elementos que lo componen.

3.2.2.1 Fubarino SD

Es una tarjeta de desarrollo que incorpora un microcontrolador PIC32MX795F512H y una ranura para tarjetas microSD. Cuenta con 56 pines de entrada/salida, de los cuales tiene unos reservados para comunicación Serial, I2C y SPI (Serial Peripheral Interface por sus siglas en inglés). En la figura 3.9 se observa la tarjeta y la distribución de sus pines.

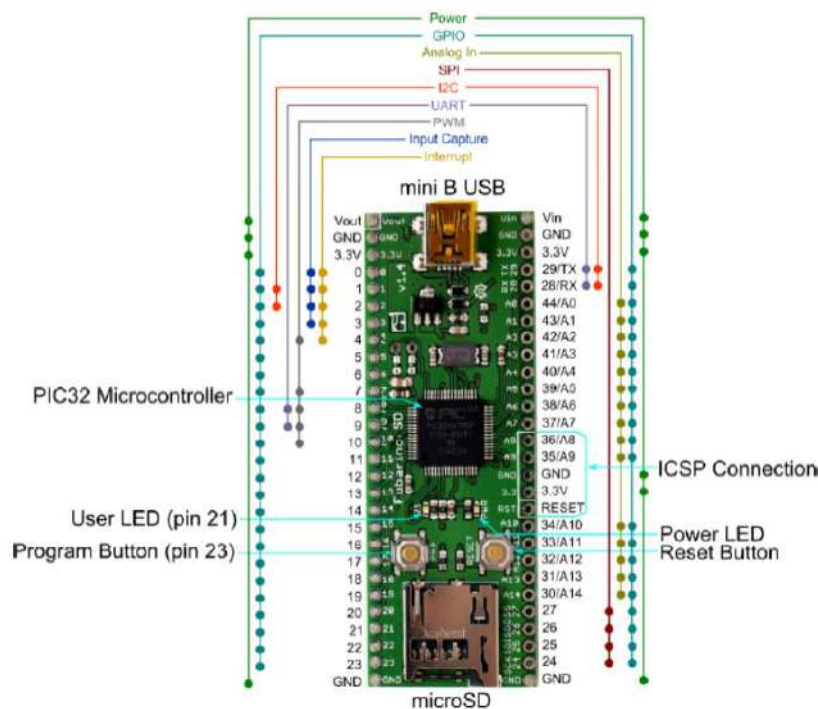


Figura 3.9: *Fubarino SD*

Gracias a su puerto USB, se puede tanto encender como programar por esa vía. Sin embargo, la tarjeta cuenta con otros métodos para ser encendida. A continuación, se explican esos métodos:

- **Vin:** Este pin está diseñado para ser conectado a una fuente de alimentación DC que este comprendida entre los 2.8 y 13.2 V.
- **3.3 V:** Hay dos pines de 3.3 V que pueden ser usados tanto de salida como, de entrada. Si son usados como entrada, hay que ser cuidadoso de no exceder 3.6 V o el microcontrolador se dañará.

Cabe recalcar que, si la entrada USB y el pin Vin están siendo usados al mismo tiempo, la tarjeta elegirá el voltaje más alto entre ambos pines, en este trabajo se usó un PowerBank de 5 V conectado al pin Vin para el funcionamiento de la tarjeta.

3.2.2.2 IMU LS9DS0

Es un sistema integrado que incorpora sensores de aceleración, campo magnético y giro en los tres ejes coordenados.

El sensor de aceleración cuenta con escalas de ± 2 , ± 4 , ± 6 , ± 8 , ± 16 g (gravidades); el sensor de campo magnético cuenta con escalas de ± 2 , ± 4 , ± 8 , ± 12 gauss; el sensor de movimiento angular cuenta con escalas de ± 245 , ± 500 , ± 2000 dps (grados por segundo por sus siglas en ingles).

El chip también integra dos interfaces de comunicación que son I2C y SPI.

Para el desarrollo del sistema embebido se usa la tarjeta LSM9DS0 fabricado por Adafruit, el cual ya cuenta con la adaptación que el chip necesita para funcionar con otras tarjetas, como lo son las resistencias de pull – up que impiden la circulación de corrientes excesivas en las entradas del chip, condensadores de desacople en los pines de alimentación, y reguladores en los pines de alimentación para valores de entrada entre 3 y 5 V. Así mismo cuenta con dos conectores para regletas de 9 y 5 posiciones respectivamente, los cuales facilitan su conexión en Protoboards y circuitos impresos. En la *figura 3.10* se observa la tarjeta y la distribución de sus pines.

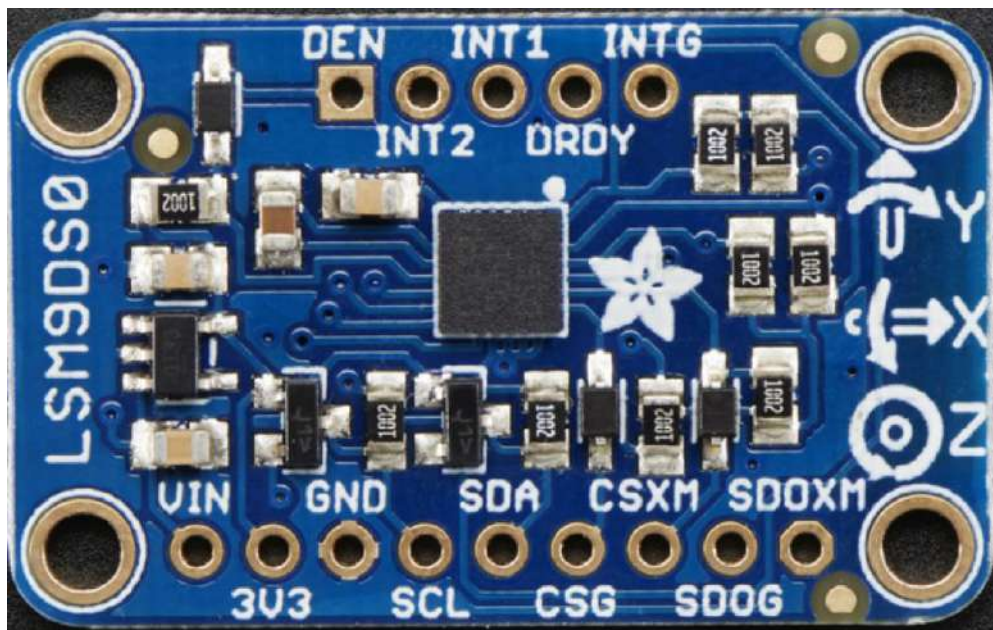


Figura 3.10: IMU LS9DS0

3.2.2.3 Comunicación IMU – Fubarino SD

Para entablar la comunicación entre el microcontrolador y la IMU se utiliza la comunicación SPI, ya que es veloz y cuenta con un sencillo protocolo. Para poder cumplir con el protocolo se debe tener un Master y uno o varios Slave. El Fubarino juega el rol de Master ya que es el dispositivo que dirige la comunicación, y los sensores de la IMU juegan el rol de Slaves ya que son los dispositivos que obedecen las órdenes del Master.

En el Fubarino, la comunicación SPI se realiza a través de los pines 24, 25, 26, 27 y 12 que corresponden a SCK, SDI, SDO, SS1y SS2 respectivamente, que son las señales que conforman el protocolo SPI.

- SCK: Corresponde al pin que genera la señal de reloj necesaria para el protocolo.
- SDI: Corresponde a la entrada de datos.
- SDO: Corresponde a la salida de datos.
- SS1(2): Es la señal que habilita la salida de datos de los Slave.

Así mismo para la IMU se tienen los pines SCL, SDA, CSG, CSXM, SDOG y SDOXM.

- SCL: Es el pin correspondiente a recibir la señal de reloj enviada por el Master.
- SDA: Es el pin que recibe la señal de datos enviados por el Master.
- CSG: Es el pin que recibe la señal enviada por el Master para activar el giroscopio.
- CSXM: Es el pin que recibe la señal enviada por el Master para activar el acelerómetro/magnetómetro.
- SDOG: Es el pin de salida de datos del giroscopio.
- SDOXM: Es el pin de salida de datos del acelerómetro/magnetómetro.

Según lo anteriormente dicho, los pines de ambas tarjetas se relacionan de la siguiente manera:

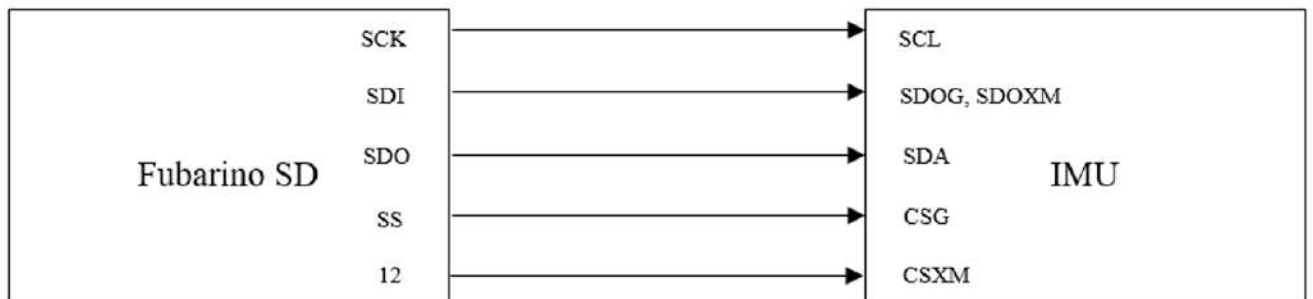


Figura 3.11: Relación de pines

- SCK SCL
- SDI SDOG, SDOXM
- SDO SDA
- SS CSG
- 12 CSXM

3.2.2.4 Comunicación Fubarino SD – PC

Para establecer la comunicación entre el Fubarino y un computador, se escogió el protocolo Bluetooth. El módulo usado es el HC – 06. Se utilizaron los pines 28 y 29 del Fubarino de comunicación Serial que corresponden a Rx y Tx respectivamente. A través de su módulo Serial, el HC – 06 se puede configurar por medio de comandos AT, los cuales son unos comandos de atención que sirven para verificar las características y el funcionamiento del módulo, y para configurar algunos parámetros del mismo. Se intentó modificar la velocidad de transmisión de datos por medio de los comandos AT, pero debido a que en el computador la velocidad de recepción es fija se presentaron problemas en la adquisición de datos. Por lo tanto, se dejó la velocidad estándar de 9600 baudios.

El módulo tiene un pin de entrada de alimentación que recibe voltajes DC de 2.3 V y 6 V, así que para su alimentación se utilizó el pin de salida de voltaje DC del Fubarino que corresponde a una señal lógica de 5 V.

Fueron considerados módulos Xbee para realizar la comunicación, pero no se vio como una solución viable debido a su elevado precio y a su tamaño en comparación con un módulo Bluetooth. Además, pensando en un futuro es más cómodo usar comunicación Bluetooth debido a su versatilidad en el mundo de hoy.

3.2.2.5 Análisis de tiempos de comunicación.

Este análisis fue hecho para saber si era necesario obtener un arreglo de tiempo para cada sensor de la IMU o era suficiente con uno solo para los tres. En la *figura 3.12* se aprecia el diagrama de tiempos donde se describen los momentos presentes en el Fubarino durante el proceso de comunicación con la IMU y con el PC.

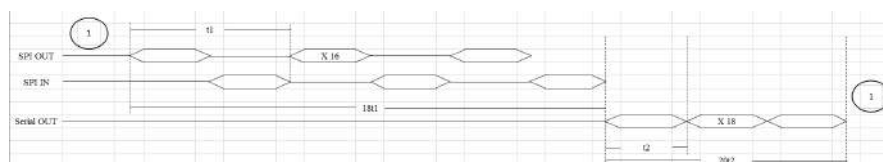


Figura 3.12: Diagrama de tiempos.

Las señales SPI OUT y SPI IN corresponden a los pines de entrada y salida fijados en el Fubarino para el protocolo SPI. Serial OUT corresponde al pin TX del Serial1 del Fubarino para comunicación Serial. El número uno que aparece al inicio y al final del diagrama indica que en el momento que se acaba la señal Serial OUT inicia la señal SPI OUT. El tiempo t_1 corresponde al tiempo que toma el Fubarino interrogando a la IMU y está en responderle al Fubarino. Este tiempo es de alrededor $64 \mu s$.

Se tomó el caso crítico en el cual se va a la máxima velocidad posible que es 25 km/h.

$$25 \frac{K_m}{h} \approx 6.94 \frac{m}{s}$$

Expresada en microsegundos es

$$6.94 \times 10^{-6} \frac{m}{\mu s}$$

Para saber la distancia que recorrió la llanta trasera en ese tiempo a esa velocidad, se multiplican ambas cantidades

$$6.94 \times 10^{-6} \frac{m}{\mu s} \cdot 64 \mu s = 0.000444 m$$

$$0.000444 m \approx 0.44 mm$$

Para cuando se hayan recibido todos los datos en un instante de tiempo, $1818 \cdot t_1$, se ha desplazado alrededor de 7.92 mm. Para una llanta de aproximadamente 22" ≈ 1755.5 mm, el desplazamiento es menor al 1%, por lo tanto, no se considera necesario tomar un arreglo de tiempo por cada sensor.

El tiempo t_1 es el tiempo que se tarda la primera tanda de 8 bits en ser recibida por el computador destino. En total son 20 tandas de 8 bits, donde seis corresponden a acelerómetro, seis a giroscopio, seis a magnetómetro y dos de tiempo de tomada de datos.

3.2.2.6 Diagrama en bloques y circuito esquemático

- - Diagrama en bloques:

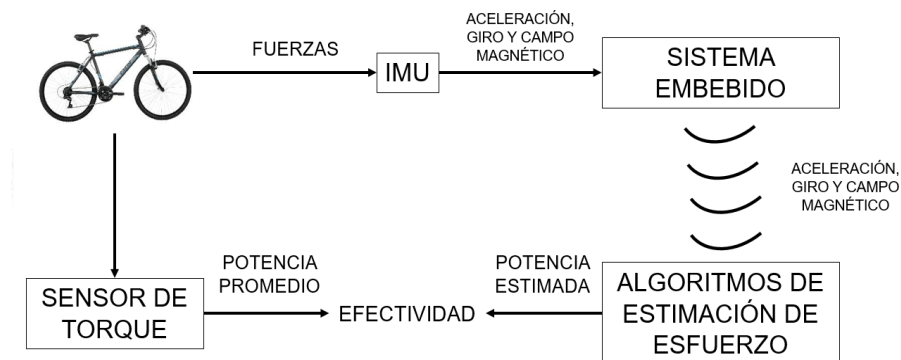


Figura 3.13: *Diagrama en bloques.*

En el diagrama en bloques de la *figura 3.13* se encuentra la IMU que en este caso es el chip LS9DS0, el microcontrolador que es el PIC32MX795F512H, el software de adquisición desarrollado tanto en el software MPIDE (Multi Platform Integrated Development Environment por sus siglas en inglés) como en Matlab, y por último el módulo de procesamiento desarrollado en Matlab R2015a.

- - Circuito esquemático:

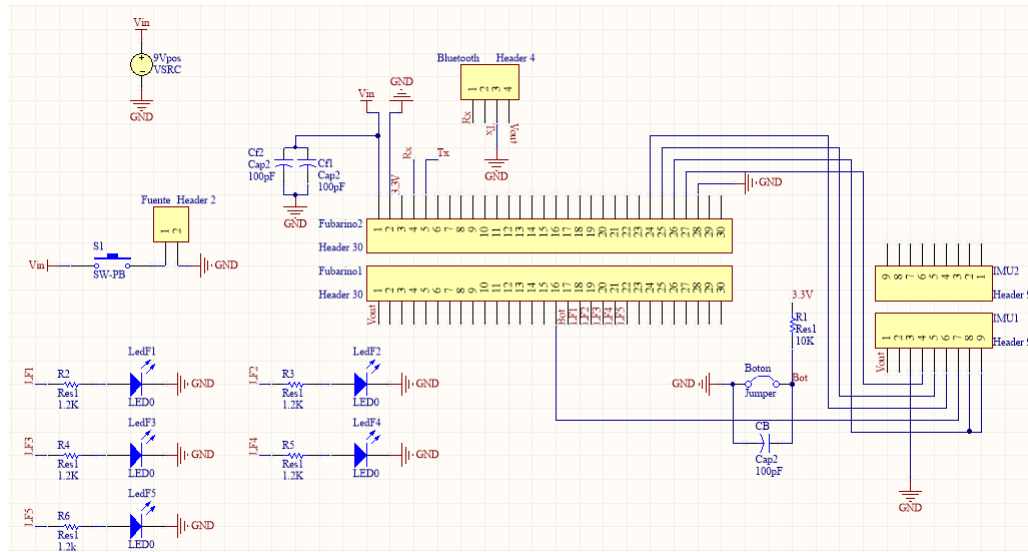


Figura 3.14: Circuito esquemático.

En el circuito esquemático se pueden observar las conexiones entre IMU - Microcontrolador y Microcontrolador - Bluetooth. También se observan los componentes que terminan de conformar el sistema, como lo son el botón que controla los filtros a seleccionar en la IMU y los Leds que indican el filtro que se está usando.

3.2.3 Diseño del programa de adquisición y transmisión de datos

Para lograr la comunicación entre la IMU y el Fubarino, se desarrolló un programa en el software MPIDE, el cual es un software inspirado en Arduino, que funciona con el PIC32MX795F512H integrado en el Fubarino. Antes de comenzar con la descripción del programa, se explicará la manera en la que funciona la IMU.

El chip LS9DS0 cuenta con una serie de registros de lectura y lectura/escritura, donde cada uno tiene asignada una dirección de 7 bits y tienen una capacidad de almacenar 8 bits. Estos registros contienen los datos tomados por la IMU, configuraciones a las que el usuario puede acceder, banderas de indicación para el usuario, y registros reservados que son recomendados no tocar para garantizar el correcto funcionamiento del chip.

En cuanto a los registros que contienen los datos tomados por la IMU, son seis registros por cada sensor, dos para cada eje coordenado. En esos dos registros se guardan los 8 bits bajos y 8 bits altos respectivamente, que conforman un dato el cual es descrito por una trama de 16 bits en total. A la hora de concatenar esos dos registros se obtienen 16 bits expresados en complemento a 2, que posteriormente habrá que procesarlos para obtener una trama binaria.

GIROSCOPIO	
REGISTRO	DIRECCIÓN
OUT_X.L.G	010 1000
OUT_X.H.G	010 1001
OUT_Y.L.G	010 1010
OUT_Y.H.G	010 1011
OUT_Z.L.G	010 1100
OUT_Z.H.G	010 1101
ACELERÓMETRO	
REGISTRO	DIRECCIÓN
OUT_X.L.A	010 1000
OUT_X.H.A	010 1001
OUT_Y.L.A	010 1010
OUT_Y.H.A	010 1011
OUT_Z.L.A	010 1100
OUT_Z.H.A	010 1101
MAGNETÓMETRO	
REGISTRO	DIRECCIÓN
OUT_X.L.XM	000 1000
OUT_X.H.XM	000 1001
OUT_Y.L.XM	000 1010
OUT_Y.H.XM	000 1011
OUT_Z.L.XM	000 1100
OUT_Z.H.XM	000 1101

Tabla 3.3: *Nombres y direcciones de los registros encargados de guardar datos [17].*

Los registros que contienen las configuraciones de la IMU son muy variados. Se tienen registros para configurar las escalas de los sensores, para habilitar o no las salidas de datos, para usar o no filtros que modifican la transmisión de los datos, para configurar la tasa de salida datos, o también para hacer que la IMU entre en un modo de prueba llamado Self – Test el cual se explicará más adelante.

3.2.4 Descripción del programa

El programa cuenta con las configuraciones para la comunicación SPI, con la lectura y escritura de los registros de la IMU a través de sus direcciones, y con la transmisión de datos a través del puerto Serial conectado al módulo Bluetooth. Para la obtención de datos de los sensores de la IMU se tiene que cumplir con ciertos requerimientos en la comunicación que son expresados en la hoja de especificaciones del chip LS9DS0. Estos requerimientos son:

- La señal de reloj en la comunicación SPI no puede exceder los 10 MHz.
- Para acceder a los registros de los Slaves, primero se debe enviar un comando con la dirección del registro precedida por un bit que indicará si el comando es de lectura (0) o de escritura (1).

- Una vez se envía el comando de lectura o escritura, el Slave transmite el valor del registro en el caso de una lectura, o el Master transmite el valor a escribir, en el caso de una escritura.
- El bit más significativo de las direcciones de los registros corresponde a un cero, si este es cambiado a un uno la IMU aumentará la dirección del registro automáticamente sin necesidad de que el Master tenga que enviar un nuevo comando de lectura o escritura.

Adicionalmente la IMU cuenta con un modo llamado Self – Test, el cual sirve para verificar el correcto funcionamiento de sus sensores. Este modo consiste en unas fuerzas de actuación que son aplicadas, sin mover la IMU, a los sensores de acelerómetro y giroscopio específicamente. Estas fuerzas simulan un movimiento real del chip. Al activar este modo las señales de salida corresponden a la suma de la aceleración o giro que esté experimentando el chip más la fuerza electrostática de prueba aplicada. Los valores de esas señales deben estar en un rango definido, que está dado en la hoja de especificaciones, y que le dirán al usuario si el chip está funcionando como debe ser o no. En la siguiente tabla se muestran los rangos especificados.

ACELERÓMETRO		
±2 g	MIN (mg)	MAX (mg)
	60	1700
GIROSCOPIO		
245 dps	MIN	MAX
	20	250
500 dps	MIN	MAX
	70	400
2000 dps	MIN	MAX
	150	1000

Tabla 3.4: Rangos de prueba de Self – Test .

A continuación, se explicará el funcionamiento del programa para un solo dato del acelerómetro, pero hay que resaltar que el procedimiento es realizado para cada uno de los datos de los sensores en los tres ejes coordenados

El programa tiene al principio la inicialización de variables, la configuración de la comunicación SPI, el envío de los comandos necesarios para hacer entrar a la IMU al modo Self – Test, también se eligen las escalas de cada sensor, y se accede a los registros donde están guardados los datos de giroscopio, acelerómetro y magnetómetro. El microcontrolador obtiene los 8 bits que se están guardando tanto en el registro LOW como en el registro HIGH del acelerómetro para después realizar el proceso de concatenación entre ellos. Una vez se tienen los 16 bits en complemento a 2 se realiza un proceso para obtener los 16 bits en binario, el cual consiste primero en intercambiar los unos por ceros y los ceros por unos, después se realiza una suma binaria entre los bits obtenidos con un uno binario. El resultado es pasado a número decimal y finalmente es convertido al valor real de la variable física medida.

Para realizar la conversión al valor real de la variable física, primero hay que saber cuál es el máximo número que se puede expresar en 16 bits. Este número es 65535, pero en estos sensores se pueden tener tanto números positivos como negativos, el número se reduce a 32767, positivo y negativo, y el cero. Para saber si el resultado que se obtuvo de convertir a decimal la trama de 16 bits binaria es positivo o negativo, basta con mirar el bit más significativo de los 16 bits que se obtuvieron cuando se concatenaron los 8 bits adquiridos de la IMU. Si este bit es 1 el número es negativo y si es 0 el número es positivo.

Ahora que se sabe el valor máximo que se puede tener, el signo que acompaña al número, y la relación entre el valor entregado por la IMU y el valor de la variable física, la cual es una relación lineal que tiene una pendiente expresada por la ecuación (), se puede obtener el verdadero número que está arrojando la IMU.

$$\text{Valordelavariablenúmericareal} = \frac{(\text{Número decimal} \cdot \text{Escalasensor})}{32767} \quad (3.22)$$

Este proceso es realizado para poder interpretar los datos que se obtienen del modo Self – Test y así hacer la verificación del correcto funcionamiento de los sensores del chip. Si los datos obtenidos están dentro del rango que se expuso anteriormente, ya se sale de este modo y se procede a utilizar la IMU para el propósito del trabajo; sino se cumple, se encenderán unos Leds de manera intermitente indicando que hay un error con la IMU.

En el caso de que no haya ningún problema, se entra en un loop infinito. Mediante los registros de configuración se eligen ciertos filtros y ciertas velocidades de salida de datos para realizar un pre procesamiento antes de transmitir los datos. Para elegir los filtros y las velocidades de salida se acondicionó un pulsador al sistema, el cual al ser oprimido se cambia de filtro, y para saber qué filtro se está usando, el sistema cuenta con unos Leds, cinco en total, que representan el filtro. Seguido a esto se procede a adquirir los datos de la IMU, pero a diferencia del procedimiento realizado con el Self – Test, los 8 bits bajos y altos se envían directamente a través del módulo Bluetooth junto con una toma de tiempo correspondiente al momento en que fueron adquiridos los datos.

No se realiza el proceso de conversión de los datos debido a la limitación del protocolo de comunicación Serial, el cual tiene paquetes de 8 bits. En el diagrama de flujo de la *figura 3.15* se explica mejor la descripción anteriormente hecha.

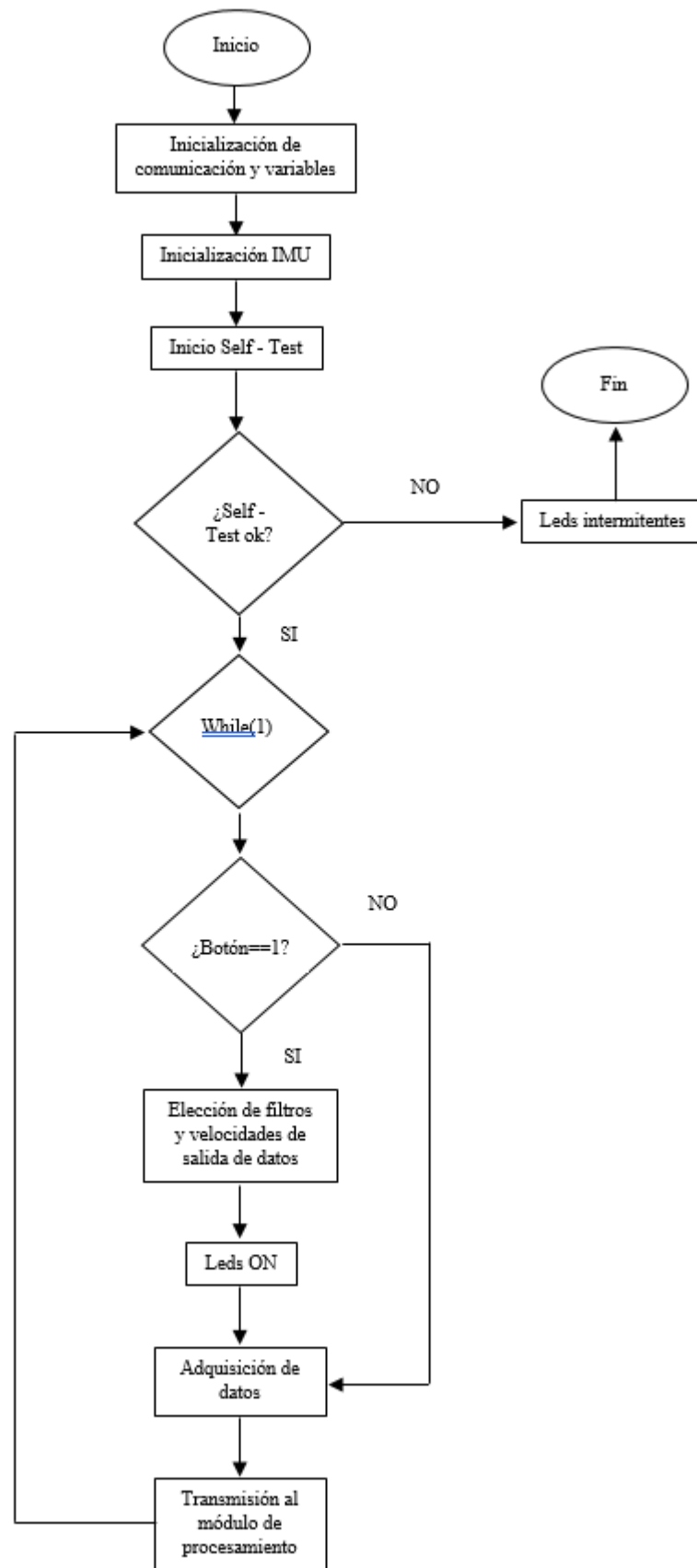


Figura 3.15: Diagrama de flujo del Software de adquisición.

3.3 Desarrollo de algoritmos de estimación de esfuerzo

En esta sección se explica el contenido del módulo de procesamiento. En él, se encuentran los comandos necesarios para recibir los datos en tiempo real, el tratamiento necesario en los datos para poder calcular esfuerzo y las ecuaciones necesarias para calcular esfuerzo junto con las constantes que se expusieron en el capítulo 3.

3.3.1 Obtención de datos en tiempo real

Para la obtención de datos en tiempo real se utilizó el software Matlab R2015a. Como se explicó anteriormente, en el momento en que los datos son adquiridos en el microprocesador, estos son enviados vía Bluetooth al módulo de procesamiento donde se realiza la concatenación del byte alto con el byte bajo, y la conversión a la escala y a las unidades de la medida correspondiente. A medida que los datos son capturados y convertidos, estos son guardados en vectores junto con el tiempo de adquisición que también se está enviando.

3.3.2 Tratamiento de datos

Una vez que los datos ya estaban organizados en arreglos, se graficaban para observar el comportamiento de las señales. Se observó que en ocasiones las gráficas presentaban picos que estaban por fuera del rango esperado de los valores de los sensores. Estos picos podían deberse a movimientos involuntarios durante las pruebas, y que a la larga no iban a aportar nada en el análisis, pero si iban a complicar el mismo. Por lo tanto, se decidió definir unos umbrales de detección de estos picos para quitarlos del arreglo y así mejorar la resolución de los resultados y facilitar el futuro análisis. Así mismo, había datos que pertenecían al inicio y al final de la toma de datos, los cuales eran innecesarios para el análisis ya que correspondían al tiempo que había entre el inicio de la toma de datos y al inicio de la prueba en sí, y entre el tiempo en que finalizaba la prueba y el tiempo en que terminaba la toma de datos. Así que se estableció un umbral que detecta el momento en que la persona empezó a pedalear, y otro umbral que detecta cuando la persona deja de pedalear.

Una vez que se tienen los datos de interés para el análisis, se adaptó el vector de tiempo a los nuevos arreglos obtenidos del tratamiento anteriormente descrito. Esto se hizo con el fin de tener coherencia en el tiempo real de duración de la prueba.

A los arreglos obtenidos del tratamiento anterior, se les aplicó una corrección de Offset que está presente en los sensores de la IMU cuando están quietos sobre una superficie lo más plana posible. En el capítulo 4 se explica cómo se obtuvieron esos niveles de Offset.

Para finalizar con el tratamiento, se realizó una conversión de escalas para manejar los datos dentro del Sistema Internacional de Medidas. En la figura 3.16 se presenta el diagrama de flujo que describe el tratamiento descrito.

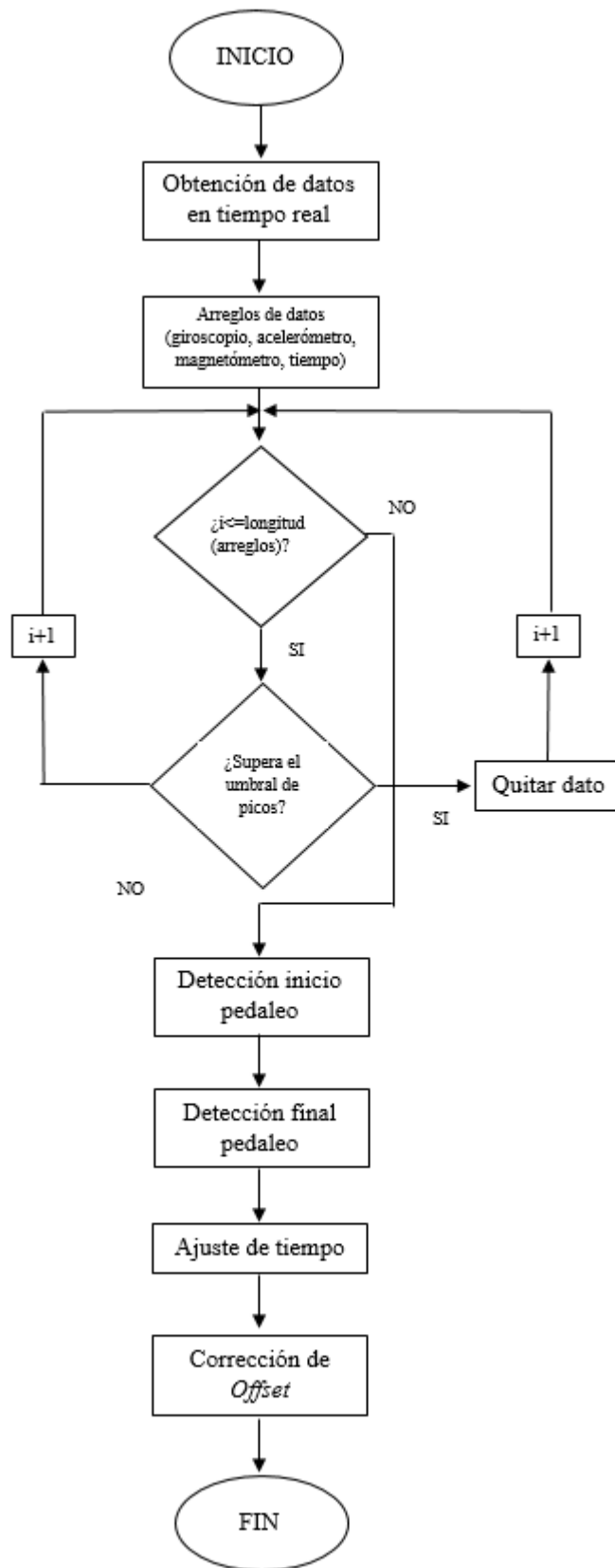


Figura 3.16: Diagrama de flujo tratamiento de datos.

Capítulo 4

Protocolo de pruebas y análisis de resultados

En ese capítulo se presentarán las pruebas que se hicieron para verificar el funcionamiento de los programas que se realizaron durante el desarrollo del trabajo. Adicionalmente se mostrarán los resultados obtenidos de dichas pruebas, el proceso de concepción, diseño e implementación del sistema que se llevó a cabo para la realización de los sistemas y los códigos necesarios para cumplir con el objetivo del trabajo de grado. Adicionalmente, se presentan una serie de pruebas donde se demuestra el funcionamiento del sistema embebido construido.

4.1 Protocolo de pruebas de campo

Para empezar a realizar pruebas de campo, se propuso un protocolo de pruebas para definir las condiciones por las cuales se iban a regir estas. Estas condiciones son:

- Cada vez que se inicie la prueba, si el dispositivo está ubicado en la biela, esta debe empezar totalmente perpendicular al suelo; si está ubicado en el marco o en el manillar, no debe presentar ninguna inclinación respecto al suelo. Se hace de esta manera para evitar tener medidas que compliquen el análisis de los resultados y mejorar el cálculo de esfuerzo a partir de los datos obtenidos.
- El terreno en el que se realice la prueba debe estar libre de huecos o montañas, para así evitar medidas que estén fuera del contexto de la prueba y no generar confusión entre datos que de verdad pueden representar un cambio en la prueba.
- El recorrido siempre debe ser en línea recta y no debe superar los 100 m para tener un mayor control sobre la prueba y así poder identificar momentos diferenciales en los datos.
- A menos de que la prueba lo especifique, la relación plato – piñón debe permanecer igual a lo largo del recorrido.
- Al final de la prueba, si el dispositivo está colocado en la biela, esta debe terminar en la misma posición en la que comenzó. Así se puede saber en los datos en que momento exacto terminó la prueba y poder desechar los datos que generen ruido en los resultados de los análisis que se hagan posteriormente.

4.1.1 Instrumento de medición

Para tomar las primeras medidas y familiarizarse con las señales que se obtendrán de una IMU, se escogió un dispositivo llamado PocketLab. Este dispositivo permite medir diferentes variables físicas como: aceleración, giro, campo magnético, presión y temperatura. El PocketLab puede conectarse a varios dispositivos a través de Bluetooth, y así enviar hasta seis medidas de sus sensores integrados. Estas medidas pueden ser vistas en el dispositivo al que esté conectado por medio de la aplicación del fabricante, además se pueden almacenar y descargar en un archivo .CSV para su posterior análisis en el software Microsoft Excel. Este archivo está compuesto por un arreglo de datos de tiempo y 3 arreglos donde cada uno contiene los datos de los tres ejes coordenados. En la *figura 4.1* se muestra el dispositivo descrito



Figura 4.1: PocketLab.

4.1.2 Protocolo de pruebas software de adquisición y módulo de procesamiento

- Calibración y funcionamiento de sensores.

Para comprobar el funcionamiento del software de adquisición, se sometió el conjunto Fubarino – IMU y Fubarino - PC a una serie de pruebas. Estas consistían en alinear los ejes de la IMU con el eje de la gravedad, de esta manera, si el valor que arrojaba el módulo de procesamiento era cercano a 1 en cada uno de los tres ejes se comprobaba el correcto funcionamiento del acelerómetro. en la tabla 4.1 se contemplan los resultados

aceleración	promedio
eje x	0.927
eje y	1.022
eje z	0.9757

Tabla 4.1: *Resultados acelerómetro*

Adicionalmente se calibró el acelerómetro con los niveles cero de cada eje. Estos niveles se hallaron colocando la IMU en una superficie lo más recta posible, y durante 1 minuto se registraron datos. Se obtuvo un promedio de los ejes que marcaran datos aproximados a cero para obtener ese nivel. Para realizar la calibración, cada vez que se realicen pruebas de campo con el sistema embebido, en el módulo de procesamiento se restarán los niveles cero a cada arreglo de datos del acelerómetro.

aceleracion	Promedio (g)
eje X	-0.0304
eje Y	-0.0647
eje Z	-0.1867

Tabla 4.2: *Sensor de acelerometro*

Para comprobar tanto el funcionamiento giroscopio, se hicieron pruebas en el laboratorio de la universidad Sergio Arboleda con la bicicleta instrumentada que se tiene equipada allá. El sistema fue instalado en la biela de la bicicleta. La prueba consistía en pedalear a una velocidad constante, alrededor de 60 rpm, durante un tiempo aproximado de tres minutos. Con una aplicación móvil se controlaba la velocidad de pedaleo y además al final de la prueba se obtenía un promedio. Con los datos obtenidos del giroscopio se realizó un cálculo para obtener las rpm y así poderlas comparar con el promedio que se obtuvo de la aplicación. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:



Figura 4.2: Sistema embebido prototipo.



Figura 4.3: Ubicación del sistema.

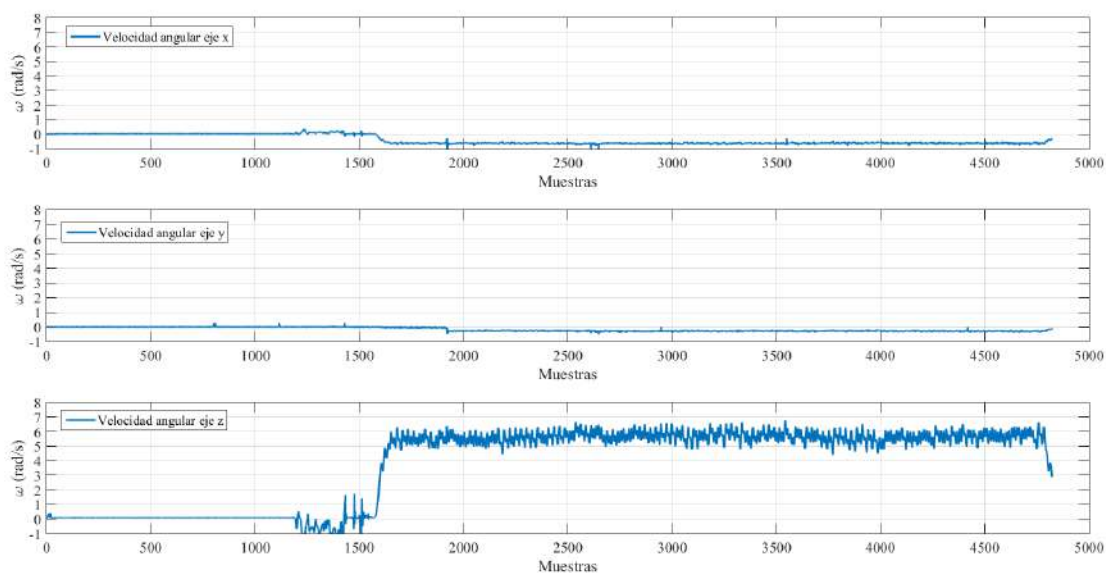


Figura 4.4: Resultados obtenidos.

El promedio de la velocidad angular es de 6 rad/s. Se procede a expresarla en rpm

$$6 \cdot \frac{rad}{s} \cdot \frac{60_s}{\pi} = 57.2rpm \quad (4.1)$$

Se observa que la velocidad angular promedio expresada en rpm presenta un error del 4.66 % respecto a la medida esperada, lo cual es bastante fiable.

También se realizó el proceso de calibración en el giroscopio de la misma manera que se explicó en el acelerómetro.

giroscopio	Promedio ($\frac{^\circ}{s}$)
eje x	1.6352
eje y	0.0802
eje z	-7.0115

Tabla 4.3: *Sensor de giroscopio*

- Validación de precisión de los sensores

Estas pruebas se realizaron con el fin de medir la precisión tanto del giroscopio como del acelerómetro. Las pruebas consisten en utilizar la bicicleta instrumentada de la universidad Sergio Arboleda, que cuenta con un motor que automatiza el proceso de pedalear simulando el ejercicio de una persona. El sistema embebido es ubicado en la biela de la bicicleta.

El procedimiento establecido para realizar la prueba es el siguiente:

1. Se ajusta la velocidad del motor para obtener un valor fijo de frecuencia de pedaleo f_{ped}
2. Se registran datos del sistema embebido durante 10 segundos. Los primeros 5 segundos se desechan y los siguientes 5 serán los datos a analizar.
3. Se reinicia el sistema embebido para realizar una nueva toma de datos a la misma frecuencia de pedaleo f_{ped} . Las pruebas se realizan tres veces.
4. Se reinician todos los sistemas para realizar una nueva toma de datos con una frecuencia de pedaleo f_{ped} diferente.

Las condiciones que se tienen en cuenta para realizar la prueba son:

- El sistema embebido estará ubicado en la biela de la bicicleta, y debe estar lo más alineado posible con la biela.
- A la hora de registrar datos del sistema, la frecuencia de pedaleo ya tiene que estar fija para evitar datos erróneos durante la prueba.
- La bicicleta debe estar controlada única y exclusivamente por el motor.

Para controlar la frecuencia a la que la biela está girando, se ajustó un rango de 30 a 90 rpm en pasos de a 10 rpm. Las rpm se midieron con la ayuda de un osciloscopio y un reed switch de cuatro polos. El reed switch está compuesto por un toroide que cuenta con cuatro imanes puestos cada 90° y un bloque que tiene un solo imán. Cuando se enfrentan el toroide y el bloque y se somete el toroide a un giro, cada vez que los imanes del toroide y el imán del bloque se encuentran se genera un pulso que representa la existencia o no de un campo magnético entre los imanes. En ese orden de ideas, cada cuatro pulsos del reed switch equivalían a 1 rpm. Se logró ver la frecuencia de la señal generada por el reed switch en un osciloscopio. En la tabla 5 se muestran los parámetros medidos, y en la tabla 6 se muestran los resultados obtenidos del giroscopio del sistema embebido.

RPM	°/s	rad/s	Hz	Hz*4	Hz medidos	rad/s medidos
30	180	3.142	0.5	2	2.05	3.220
40	240	4.189	0.667	2.667	2.667	4.189
50	300	5.236	0.833	3.333	3.356	5.272
60	360	6.283	1	4	4.044	6.352
70	420	7.330	1.167	4.667	4.667	7.331
80	480	8.378	1.333	5.333	5.23	8.215
90	540	9.425	1.5	6	5.945	9.338

Tabla 4.4: *Resultados teóricos.*

Frecuencia medida	Promedio		
	°/s	rad/s	RPM
2.05 Hz	165.33	2.885	27.55
2.667 Hz	213.52	3.726	35.58
3.356 Hz	267.2	4.663	44.53
4.044 Hz	324.3	5.66	54.05
4.667 Hz	370.4	6.464	61.73
5.33 Hz	414.07	7.227	69.01
6 Hz	471.405	8.2275	78.56

Tabla 4.5: *Resultados giroscopio.*

En la *figura 4.5* se ilustran gráficamente los resultados de la *tabla 4.5*.

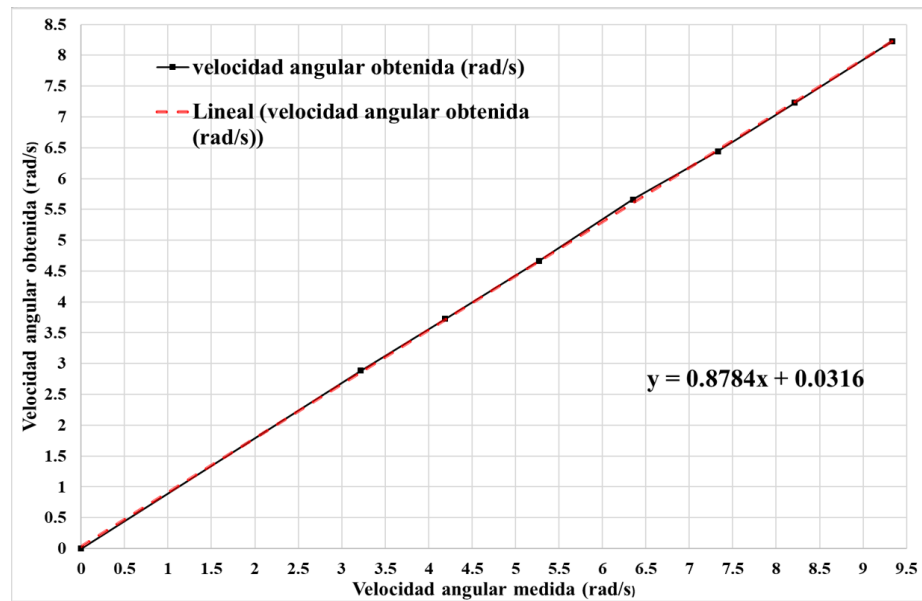


Figura 4.5: *Resultados medidos vs Resultados obtenidos*

Con estos resultados se puede hallar un factor de corrección para mejorar los resultados obtenidos en pruebas con el sistema embebido. El factor de corrección FR será la pendiente

de la tendencia lineal de los resultados.

$$FR = 0.8784$$

En la ecuación 4.2 se muestra como se uso el factor de corrección FR en las pruebas posteriores.

$$\omega_{est} = \frac{\omega_z}{FR} \quad (4.2)$$

En la tabla 4.6 se muestra el porcentaje de error de los resultados obtenidos.

rad/s medidos	rad/s obtenidos	% error
3.2201	2.885	10.40650911
4.1893	3.726	11.05912682
5.2715	4.663	11.54320402
6.3523	5.66	10.89841475
7.3309	6.44	12.15266884
8.2152	7.227	12.028922
9.3383	8.227	11.90045297

Tabla 4.6: *Porcentaje de error*

En la tabla 4.7 se ven los resultados para el acelerómetro en el eje x.

Frecuencia medida	Pomedio
	ax (m/s ²)
2.05 Hz	0.218
2.667 Hz	0.892
3.356 Hz	1.907
4.044 Hz	3.178
4.667 Hz	4.448
5.33 Hz	5.603
6 Hz	7.346

Tabla 4.7: *Resultados acelerómetro ax.*

En la figura 4.6 se ilustran gráficamente los resultados de la tabla 4.7.

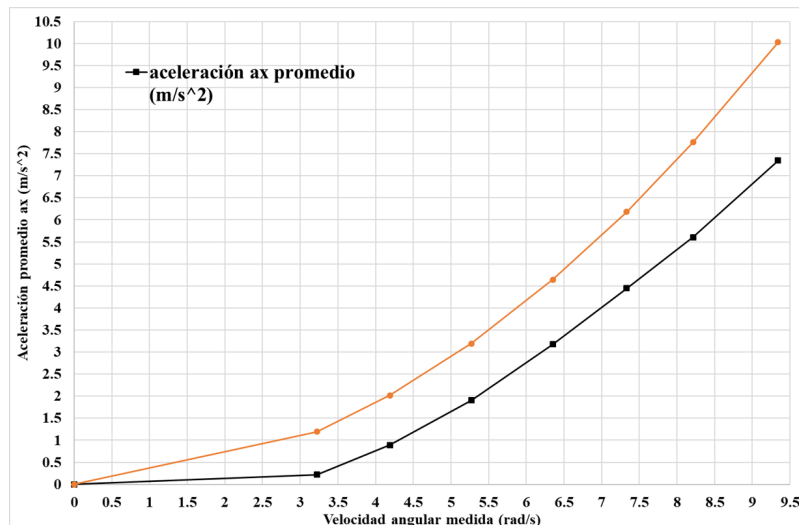


Figura 4.6: Resultados acelerómetro ax.

Al hallar el promedio de los datos del eje que está alineado con la biela, se puede observar un comportamiento cuadrático que se explica por la existencia de una aceleración centrípeta en el eje que está rotando.

Para explicar la aparición de esta aceleración, se modeló el acelerómetro como un conjunto masa – resorte en cada uno de sus ejes. En la figura 4.7 se ilustra el modelo.

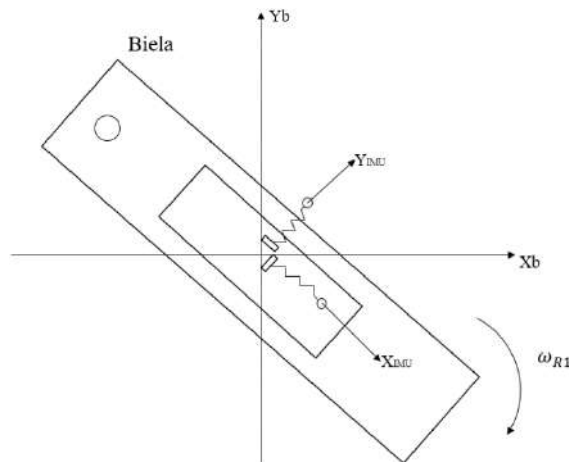


Figura 4.7: Modelo masa - resorte del acelerómetro ubicado en la biela.

A la hora de someter la biela a un giro, la masa del eje XIMU siente una fuerza (perpendicular al sentido de giro), que tiende a traerla hacia el eje de rotación. Esta fuerza trae consigo la aceleración centrípeta a_{ct} . Como consecuencia de la tercera Ley de Newton, a cada acción siempre se opone una reacción, en el momento en que aparece dicha aceleración centrípeta a su vez aparece una aceleración centrífuga a_{cf} de igual magnitud, pero en dirección contraria. En la figura 4.8 se aprecia este fenómeno.

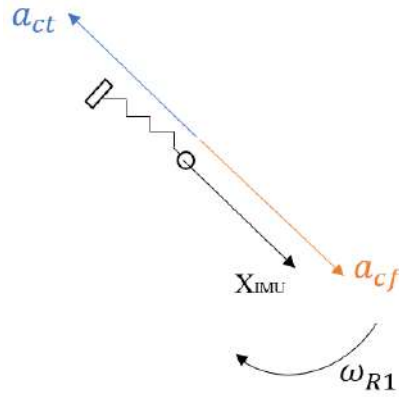


Figura 4.8: *Aceleración centrípeta y centrífuga.*

La aceleración centrípeta se describe mediante la ecuación 4.3

$$a_{ct} = -R\omega^2 \quad (4.3)$$

Donde R es la distancia a la que se encuentra la IMU del eje de la biela, y ω a la velocidad angular de la biela. En la ecuación 4.4 se presenta la aceleración centrífuga.

$$a_{cf} = -a_{ct} \quad (4.4)$$

La tendencia que se obtuvo del promedio de los datos de la aceleración en el eje X_{IMU} en función de la velocidad angular ω_{R1} concuerdan con el modelo físico presentado en la ecuación 4.3. Ahora, en la tabla 8 se presentan los resultados del eje Y_{IMU} .

Ahora, en la tabla 4.8 se presentan los resultados del eje Y_{IMU} .

Frecuencia medida	Promedio
	ay (m/s ²)
2.05 Hz	0.0313
2.667 Hz	0.0396
3.356 Hz	0.146
4.044 Hz	0.323
4.667 Hz	0.373
5.33 Hz	0.504
6 Hz	0.653

Tabla 4.8: *Resultados acelerómetro ay.*

En la figura 4.9 se ilustran gráficamente los resultados de la tabla 4.8.

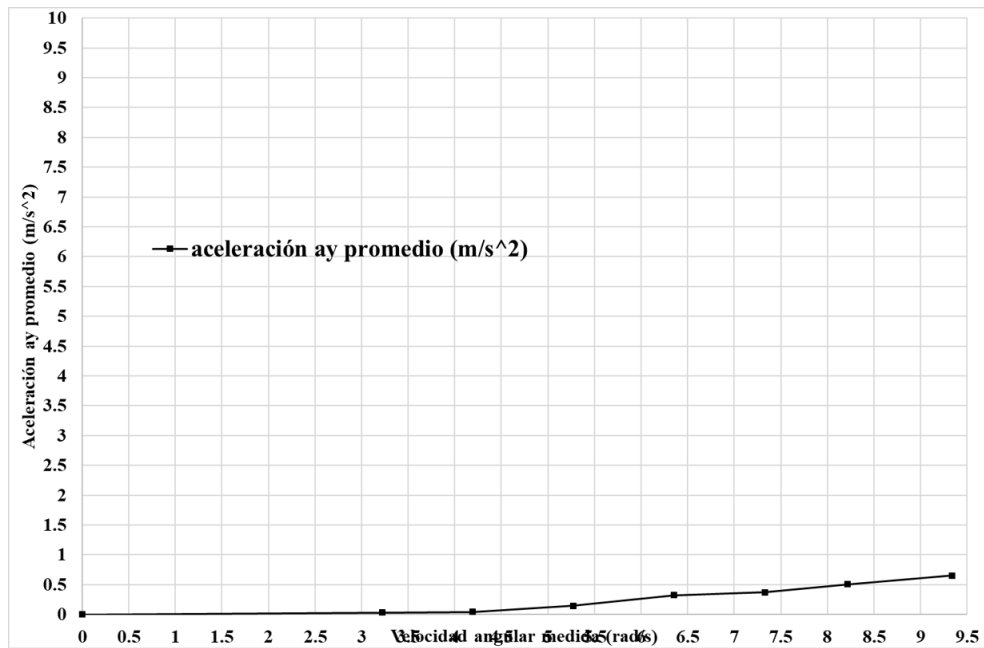


Figura 4.9: Resultados acelerómetro ay.

Se observa que en el eje Y_{IMU} no se tienen los efectos de la aceleración centrípeta, ya que este eje está perpendicular al sentido de giro.

Para las soluciones propuestas del cálculo de esfuerzo se descartó el uso del acelerómetro porque la existencia de la aceleración centrípeta en el dispositivo generaba errores acumulativos en los resultados. En la siguiente sección se mostrará un ejemplo de esto.

Se contempló colocar el sistema embebido en el marco de la bicicleta para no tener el efecto de la aceleración centrípeta, pero se perdía información importante respecto a las acciones que realiza el ciclista que es fundamental para el cálculo de esfuerzo.

- Umbrales de detección de cambios en el piñón

Estas pruebas se realizaron con el fin de detectar los valores típicos en la velocidad angular en los cuales el giroscopio de la IMU alcanza a sentir un cambio en el radio del piñón de la bicicleta y así poder saber si se realizó o no un cambio. Para estas pruebas se escogió un terreno plano de aproximadamente 120 m. En la figura 4.10 se muestra el recorrido realizado.

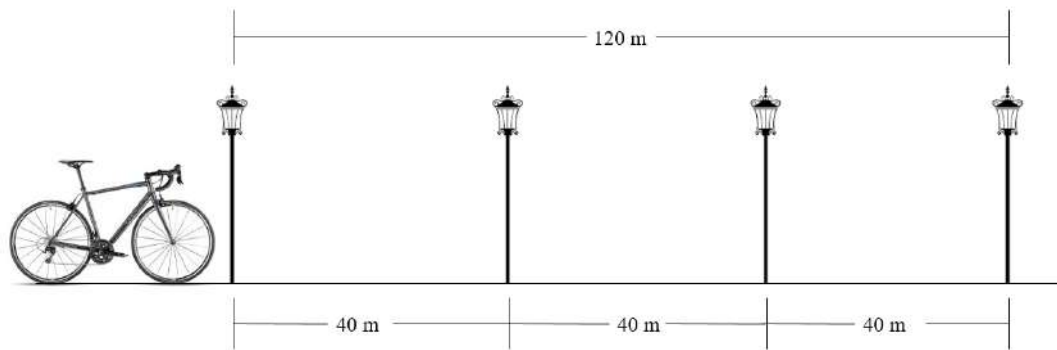


Figura 4.10: *Escenario de prueba.*

La prueba consistió en aumentar o disminuir un cambio en cada poste, pedaleando a un ritmo un poco elevado. Las pruebas se realizaron tres veces cada una. El sistema embebido estaba colocado en la biela.

Los mejores resultados se ilustran en las figuras 4.11 y 4.12

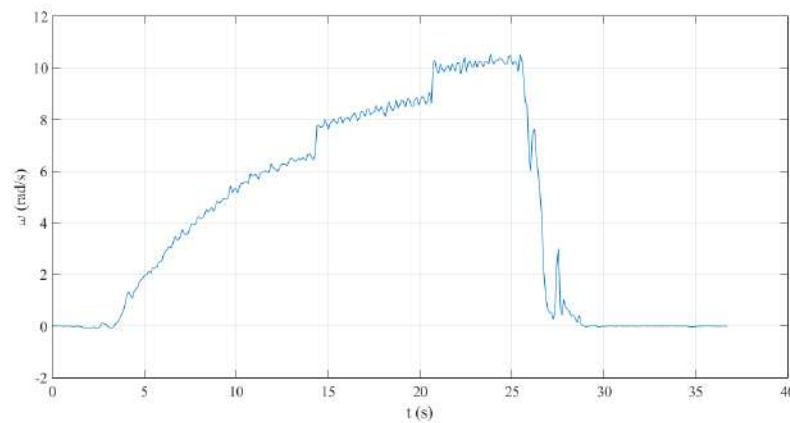


Figura 4.11: *Velocidad angular en el eje z.*

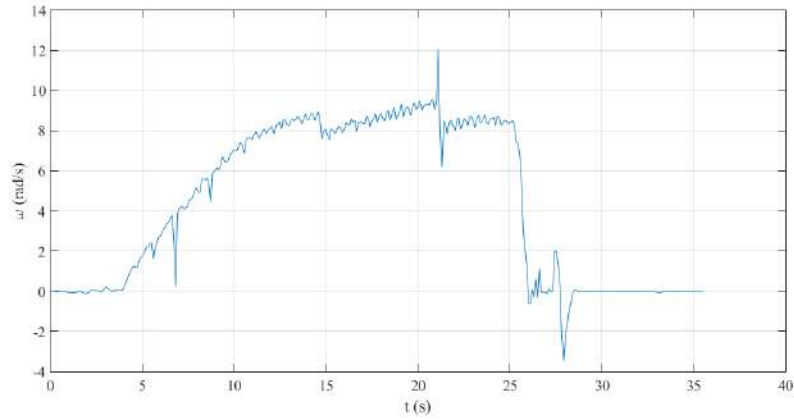


Figura 4.12: *Velocidad angular en el eje z.*

Se desarrolló un algoritmo que detectaba los cambios a partir de la derivada de la velocidad angular. Como se observa en los resultados cuando se realizaba un cambio la velocidad angular cambiaba significativamente. A la hora de derivar se podían apreciar esas diferencias como una razón de cambio más alta de lo normal. En las figuras 4.13 y 4.14 se aprecian dichos cambios.

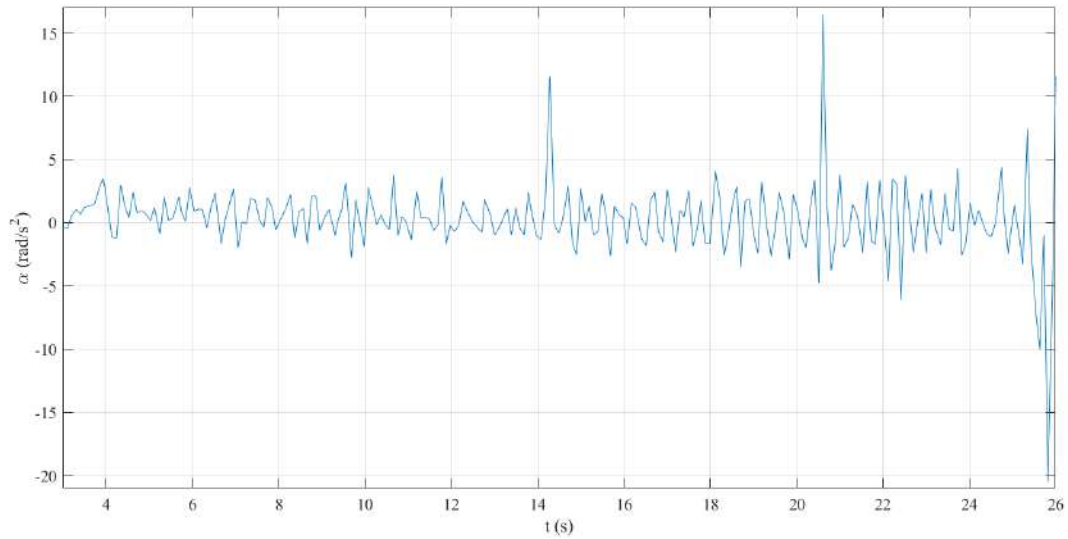


Figura 4.13: *Derivada de la prueba disminuyendo cambios.*

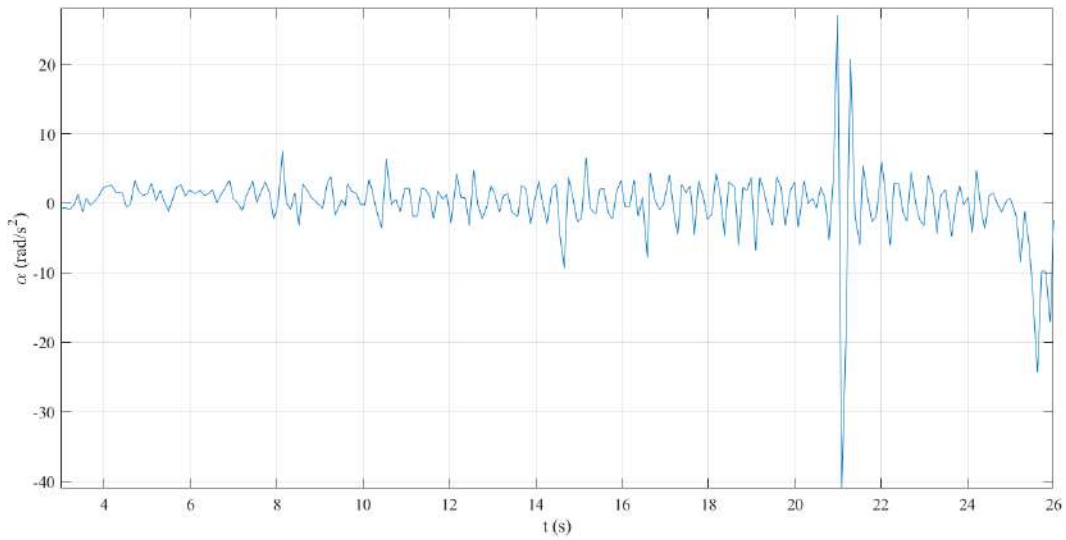


Figura 4.14: *Derivada de la prueba aumentando cambios.*

Con base en los resultados obtenidos en las derivadas de las velocidades angulares, se pudo establecer un umbral por el cual se decidiera si hubo o no un cambio. Los puntos de los picos que sobrepasaran este umbral eran entendidos como cambios.

Los resultados se muestran en las figuras 4.15 y 4.16

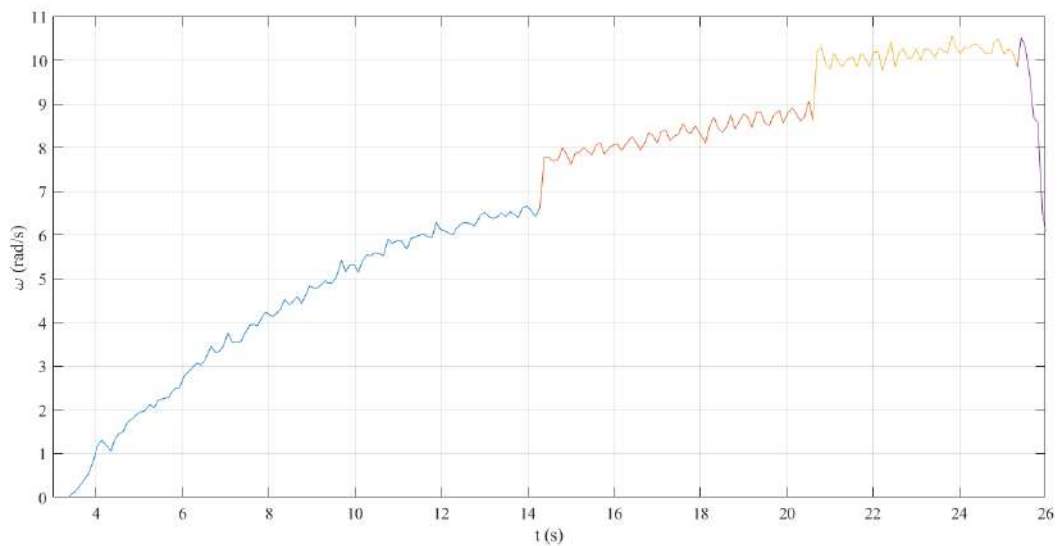


Figura 4.15: *Detección de cambios descendentes.*

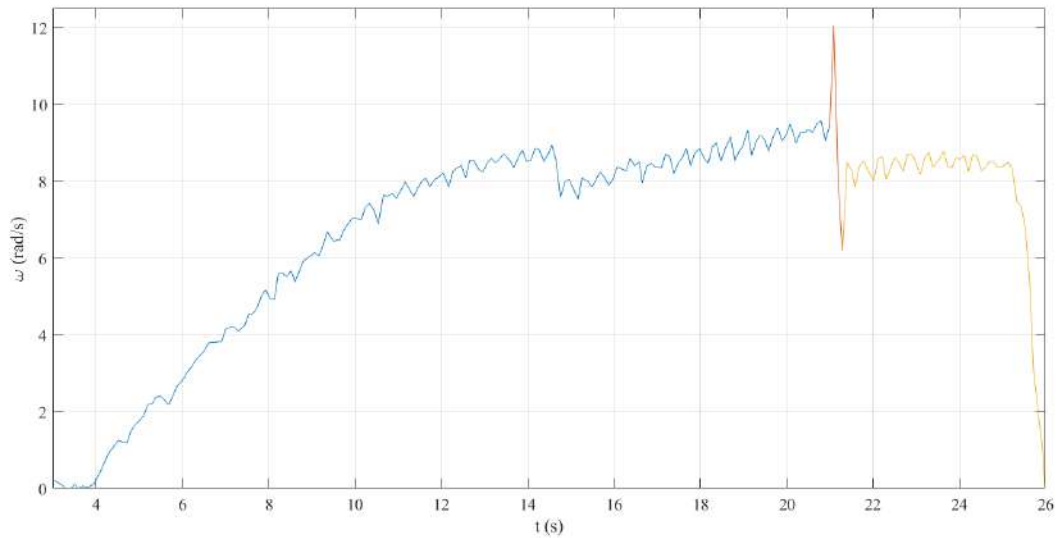


Figura 4.16: Detección de cambios ascendentes.

4.2 Implementación de protocolo de pruebas de campo

Se mostrarán resultados obtenidos con el PocketLab, el sistema embebido y el sistema con el cual se compararán las medidas de potencia. También se mostrarán algunos resultados obtenidos en posiciones donde se plantearon colocar el sistema pero que fueron descartadas por falta de información necesaria para el análisis de esfuerzo.

Las figuras 4.17 a 4.20 muestran los resultados obtenidos por el PocketLab en pruebas hechas al inicio del desarrollo del trabajo. Estas pruebas fueron hechas para conocer mejor el comportamiento de este tipo de dispositivos y tener una idea de las señales esperadas del sistema diseñado. Estas pruebas se realizaron tres veces, y en ellas se colocó el PocketLab tanto en la biela como en el marco de la bicicleta. Las figuras 4.17 a 4.20 muestran los resultados en biela, y las figuras de a muestran los resultados en marco.

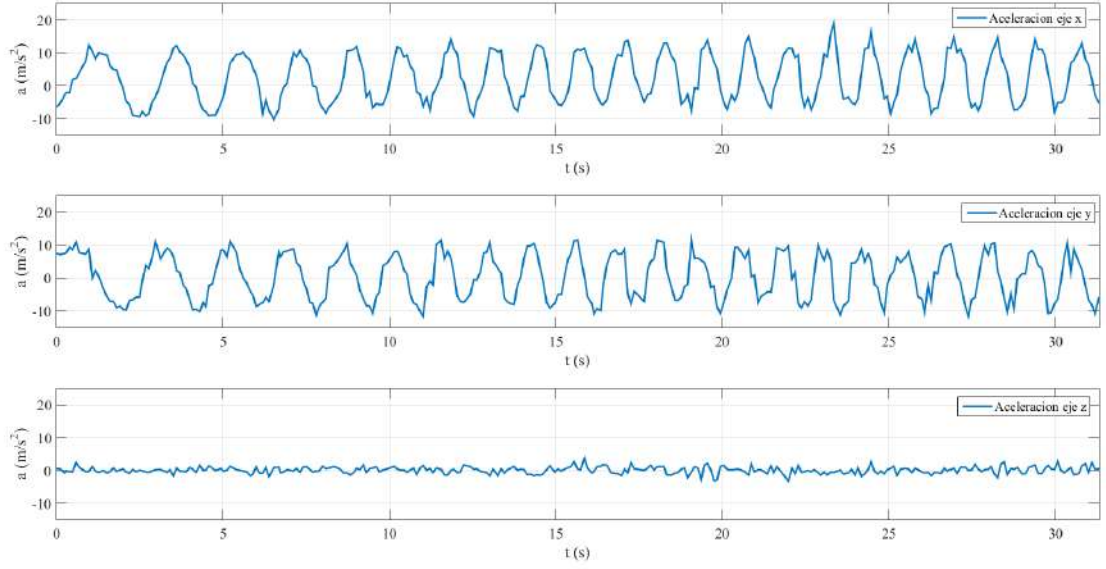


Figura 4.17: *Aceleración biela.*

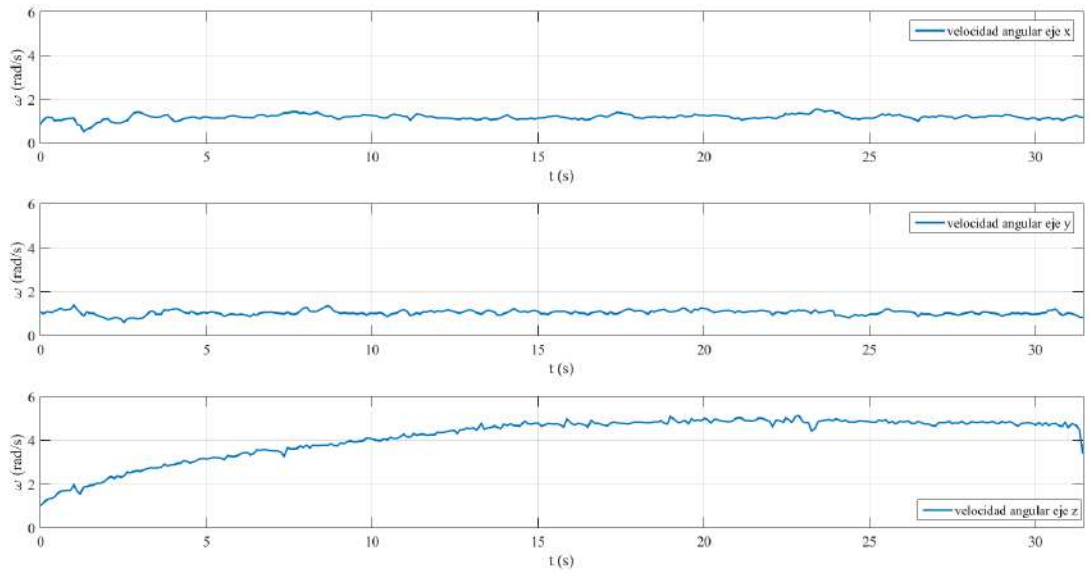


Figura 4.18: *Velocidad angular biela.*

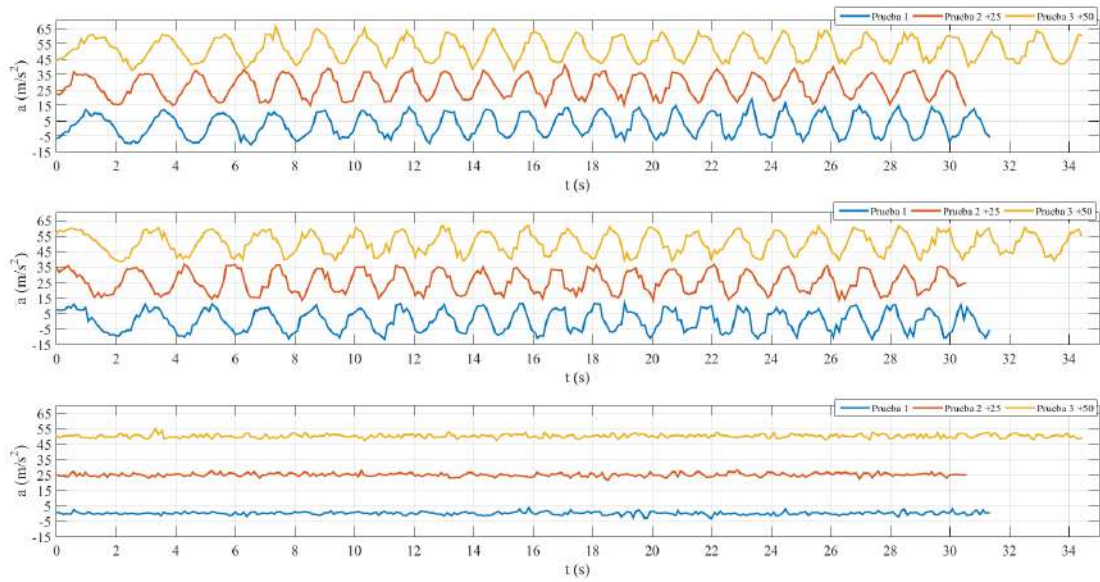


Figura 4.19: *Aceleración biela. Tres pruebas.*

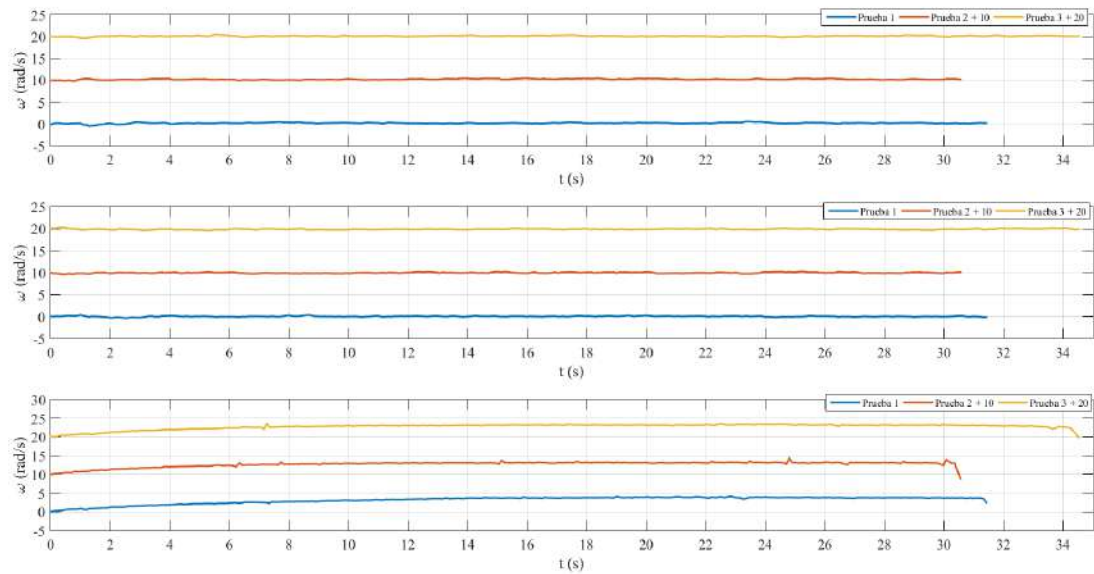


Figura 4.20: *Velocidad angular. Tres pruebas.*

En estas figuras se puede observar el comportamiento que se evidenció en la aceleración del eje alineado con la biela. En este caso, el eje X del PocketLab presenta un aumento en la amplitud pico a pico a medida que avanza el tiempo.

Las figuras 4.21a 4.22 muestran los resultados obtenidos por el sistema embebido. En estas pruebas se colocó el sistema en la biela de la bicicleta.

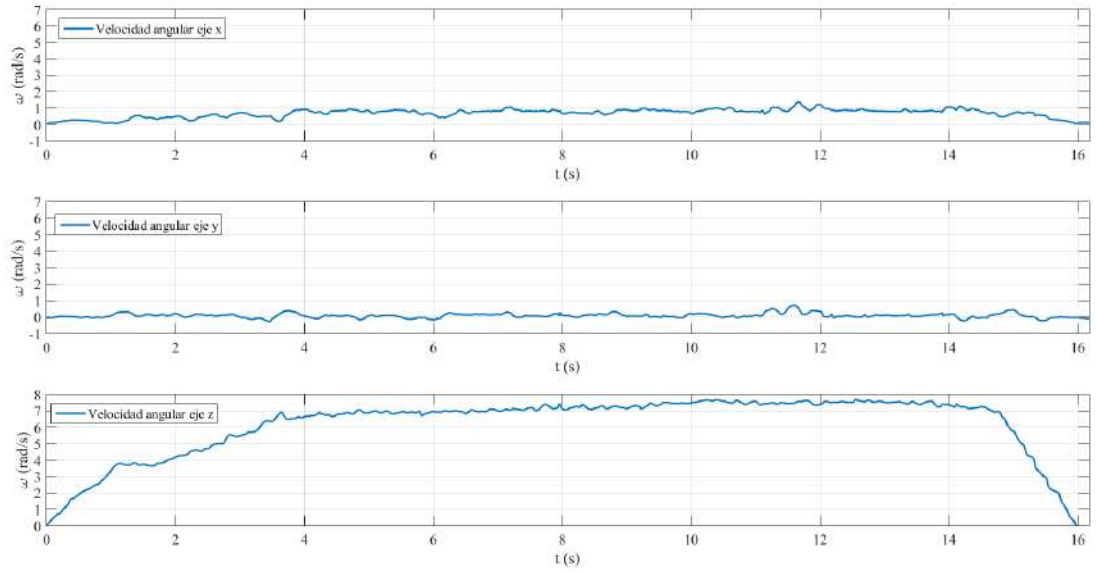


Figura 4.21: Velocidad angular eje z. Prueba 1.

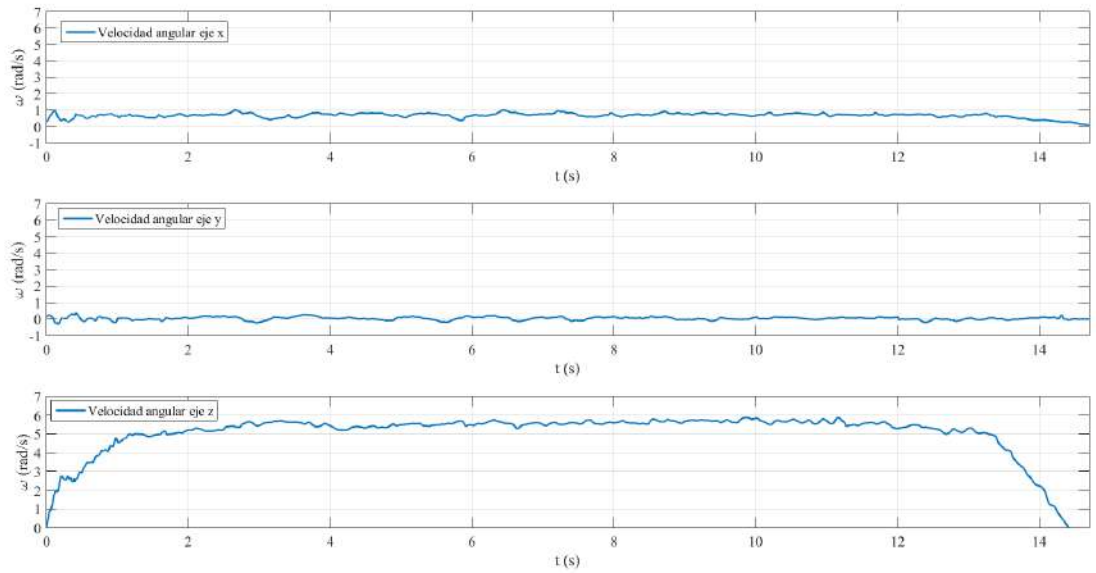


Figura 4.22: Velocidad angular eje z. Prueba 2.

Se puede verificar un comportamiento bastante fiel a los obtenidos en las pruebas con el PocketLab.

A continuación se muestran los resultados del cálculo de esfuerzo en función de la potencia. Para calcular la potencia se tomo en cuenta el método que se basa en la velocidad lineal de la bicicleta, ya que es el método que más variables físicas tiene en cuenta.

Para comparar y validar los resultados obtenidos por el sistema embebido, se utilizó un sensor de torque llamado PowerTap, el cual es un pedal que puede ser instalado en la bicicleta y calcula potencia promedio.

En las pruebas hechas se registraron potencia promedio y cadencia promedio durante recorrido. Las figura 4.23 a 4.25 muestran el comportamiento de la potencia calculada por el sensor.

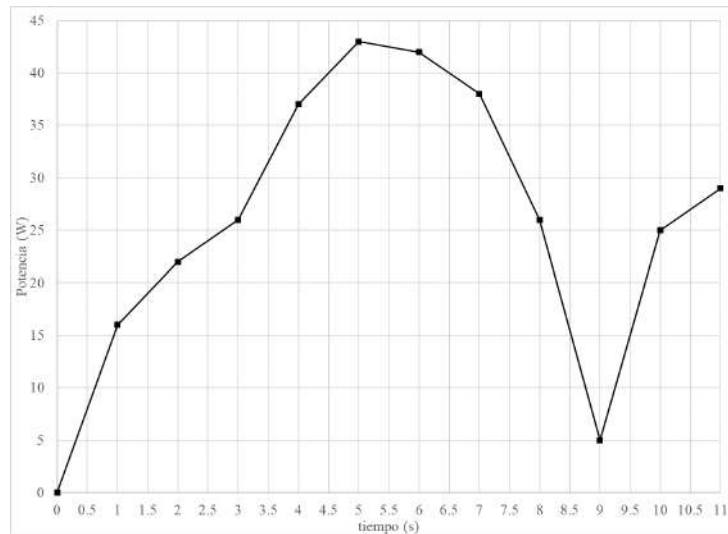


Figura 4.23: Potencia calculada por el sensor. Prueba 1.

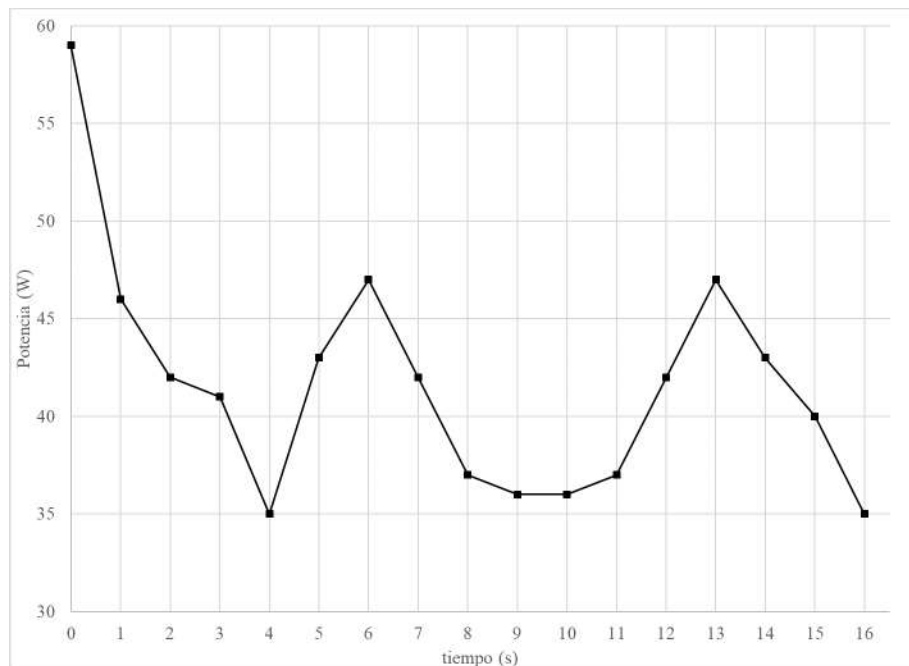


Figura 4.24: Potencia calculada por el sensor. Prueba 2.

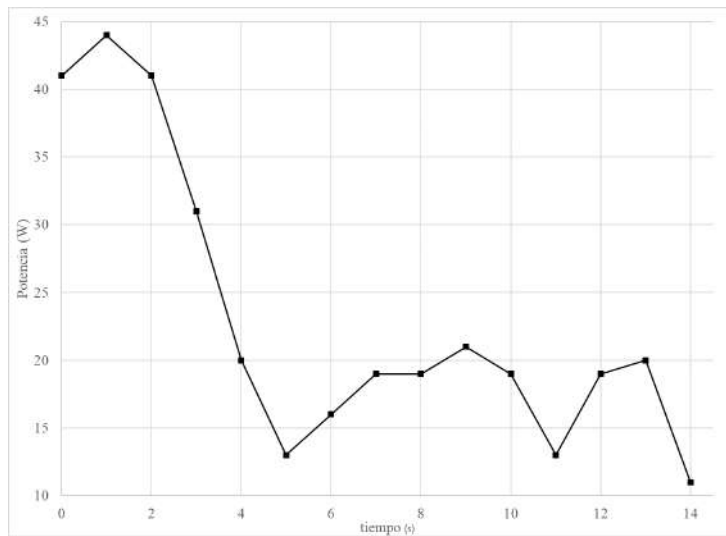


Figura 4.25: *Potencia calculada por el sensor. Prueba 3.*

Los resultados obtenidos mediante el cálculo de potencia con los datos obtenidos por el sistema embebido se muestran en las figuras 4.26 a 4.28.

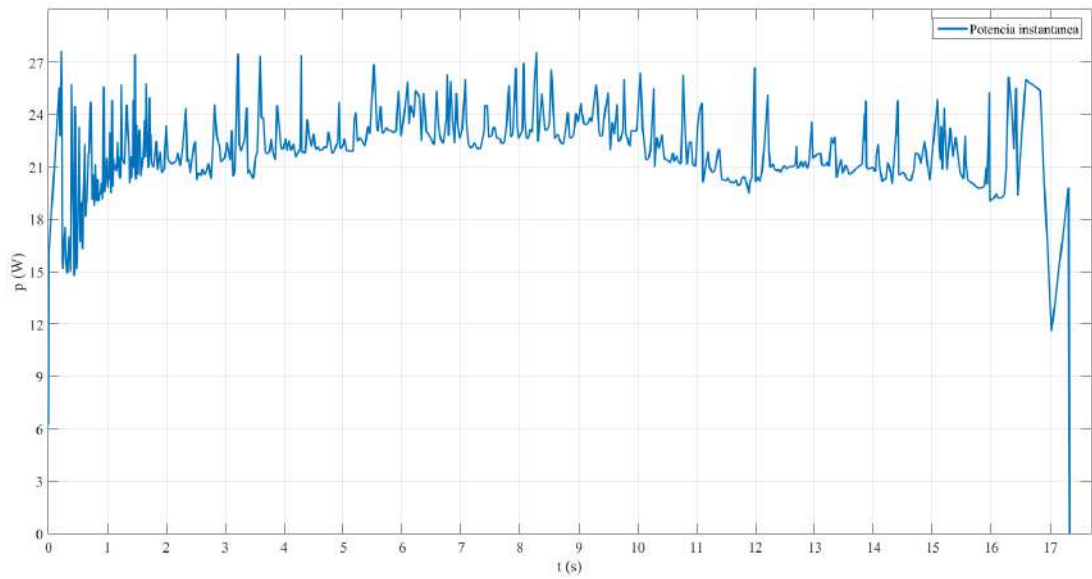


Figura 4.26: *Potencia instantánea. Prueba 1.*

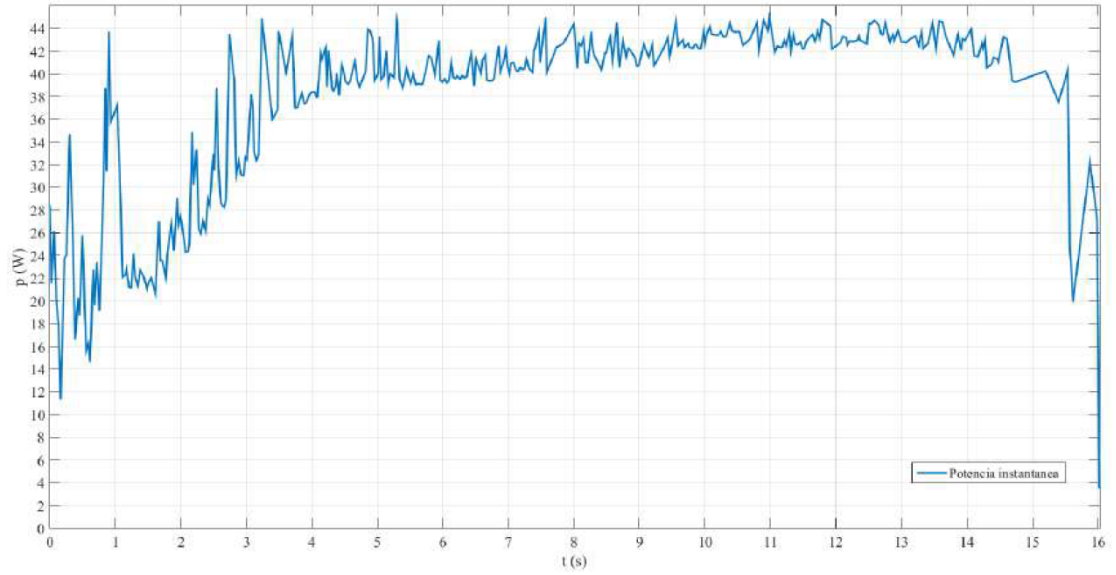


Figura 4.27: *Potencia instantánea. Prueba 2.*

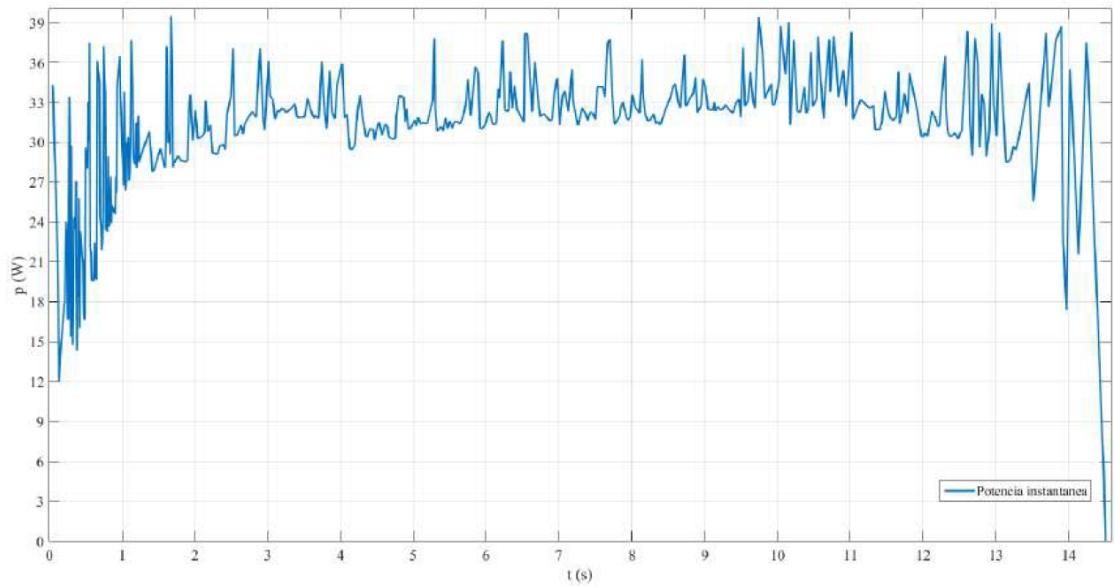


Figura 4.28: *Potencia instantánea. Prueba 3.*

En la tabla 4.9 se presentan los datos promedios de ambos sistemas.

	PowerTap		Sistema embebido	
	Cadencia promedio (RPM)	Potencia promedio (W)	Cadencia promedio (RPM)	Potencia promedio (W)
Prueba 1	73.3	25.75	71.62	22.6
Prueba2	35.36	41.64	36.29	42.3
Prueba 3	56.42	23.13	52.52	33.4

Tabla 4.9: Promedio PowerTap vs Promedio Sistema Embebido.

Con base en los datos promedio obtenidos se puede observar que la potencia promedio calculada se acerca bastante a la medida. Esto se podría arreglar con un análisis más aproximado al que utilizan los sistemas de pedaleo asistido actuales.

En términos generales, con una aproximación más lograda en el sistema dinámico de la bicicleta y con más consideraciones sobre las variables físicas que afectan o impiden el avance de la cicla, se puede lograr un cálculo más robusto, y a largo plazo un sistema de pedaleo asistido comandado por una IMU. Adicionalmente, el uso de otra IMU es recomendable para medir exclusivamente la aceleración de la bicicleta para obtener cálculos más exactos de variables físicas que directamente no se pueden obtener.

Capítulo 5

Conclusiones

Se busca estimar el esfuerzo que un ciclista hace midiendo la potencia de pedaleo. A partir de las medidas de aceleración, giro y campo magnético, obtenido por medio de un sistema embebido diseñado y el uso de una IMU, y modelando la bicicleta como un sistema dinámico simplificado, se obtiene la potencia en cada instante de tiempo. Conociendo estos datos, y la frecuencia a la cual se toman, se puede hallar la potencia promedio de pedaleo. Estos resultados se comparan con los medidos por un dispositivo especializado llamado POWER TAP, el cual, mide directamente la potencia que el ciclista aplica y arroja su promedio en pequeños instantes de tiempo.

Después de ejecutar las pruebas y analizar los resultados, se concluye que si es viable estimar la potencia de pedaleo a partir de una IMU según los siguientes criterios:

1. Los costos de producción del sistema embebido diseñado son menores que los de un sistema comercial de pedaleo asistido.
2. El error entre las potencias promedio, calculado entre el sistema embebido y el Power-Tap, es menor al 15 % y decrece hasta el 4 % según la prueba desarrollada.
3. El error entre la cadencia de pedaleo (la frecuencia a la que se pedaleo) es menor al 5 %.

Por último, Si se desea alcanzar porcentajes de error más bajos, se recomienda la implementación de un algoritmo para el tratamiento de datos más robusto, al igual que hacerlo en tiempo real.

Bibliografía

- [1] R. S. J. Jewett, *Física para ciencias e ingeniería*. Cengage Learning, 2008.
- [2] H. O. J. Markert, *Physics for engineers and scientist*. Norton & Company, 2007.
- [3] J. M. D. M. J. C. K. M. R. Coggan, “Validation of a mathematical model for road cycling power.” *Journal of Applied Biomechanics*, vol. 14(3), p. 276 291, 1998.
- [4] W. M. H. O. Wiley-Interscience, “Electric bicycles: A guide to design and use,” *IEEE Press Series on Electronics Technology*, 2006.
- [5] T. D. R. B. D. S. M. R. S. Mantler, “Validation of a model and a simulator for road cycling on real tracks,” *Sports Engineering*, vol. 14(2), p. 95 110, 2011.
- [6] K. D. L. M. J. P. C. Jenkins, “Frictional resistance in bicycle wheel bearings.” *Cycling Science*, vol. 2(1), p. 9 13, 1991.

Apéndice A

Anexo 1

Los archivos correspondientes a la elaboración de este trabajo de grado lo pueden encontrar en el siguiente link: <https://www.dropbox.com/s/kprlwqnc78q7s5s/anexos.rar?dl=0>