

## Trabajo Fin de Grado

Detector de cadencia para embarcación de remo  
basada en GPS y acelerómetro

Cadence detector for rowing boat based on GPS  
and accelerometer

Adrián Rosales Serrano

Director/es

José Luis Villarroel Salcedo



Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJO DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D<sup>a</sup>. Adrián Rosales Serrano

con nº de DNI 25194082-C en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

\_\_\_\_\_ (Título del Trabajo)

Detector de cadencia para embarcación de  
veno basada en GPS y Acelerómetro

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de Junio de 2017

Fdo: \_\_\_\_\_

## Resumen.

En este trabajo fin de grado se diseña, desarrolla e implementa un prototipo detector de cadencia para una embarcación de remo basado en tecnología GPS y acelerómetro para su uso en el mundo amateur. Se ha realizado una identificación de los problemas que existen en los clubs deportivos a la hora de adquirir este tipo de dispositivos.

La elección de estas tecnologías ha sido determinada por la necesidad de que el dispositivo fuese intercambiable entre distintas embarcaciones, y para acercar este tipo de dispositivos al mundo de los disminuidos físicos que realizan este deporte, adaptándolo a su modalidad de remo.

Para la detección de cadencia se ha realizado un estudio en profundidad del filtrado digital de señales discretas y una selección de entre 3 algoritmos funcionales que lograban el objetivo.

Se ha realizado un estudio de la influencia de la simplificación del posicionamiento mediante la tecnología GPS suponiendo la Tierra como una esfera de radio constante.

Finalmente se ha implementado un prototipo que integra las distintas partes elaboradas en el proyecto.

## Lista de símbolos y acrónimos.

PWM: Modulación por ancho de pulsos.

LCD: Pantalla de cristal líquido.

ADC: Conversor analógico-digital.

GPS: Sistema de posicionamiento Global.

UART: Transmisor-receptor asíncrono universal.

VCC: Tensión de alimentación.

GND: Toma tierra.

Rx: Recepción de información.

Tx: Transmisión de información.

Dutty: Proporción de tiempo en alto de una señal.

CLK: Reloj.

VLSB: Tensión del bit menos significativo en un ADC.

sps: Muestras por segundo.

Vref: Tensión de referencia para ADC.

Datasheet: Hoja de características.

Ppm: Paladas por minuto.

GNSS: Sistema global de navegación por satélite.

## Tabla de contenido

Resumen .....	2
Lista de símbolos y acrónimos .....	3
1 Introducción .....	5
1.1 Descripción del problema .....	7
1.2 Objetivo y Alcance .....	10
2 Análisis de requerimientos y diseño arquitectural.....	11
3 Selección de Hardware.....	12
3.1 Sensor de aceleración.....	12
3.2 Alimentación.....	12
3.3 Unidad lógica. ....	12
3.4 GNNS.....	13
3.5 Elección de interfaz de comunicación con el usuario.....	13
3.5.1 Salida de información. ....	13
3.5.2 Entrada de información. ....	14
4 Diseño detallado.....	15
4.1 Sensor de Aceleración. ....	15
4.1.1 Características.....	15
4.1.2 Experimentación previa .....	16
4.1.3 Toma de datos .....	18
4.1.4 Tratamiento de datos. ....	21
4.1.5 Elaboración de algoritmos de detección de cadencia. ....	24
4.2 GPS.....	29
4.2.1 Configuración.....	29
4.2.2 Experimentación previa .....	31
4.2.3 Elaboración del algoritmo.....	32
4.3 Pantalla.....	35
4.4 Botones.....	37
5 Diseño de la Arduino “protoboard” .....	38
5.1 Esquemático .....	38
5.2 Resultado .....	40
5.3 Estudio de consumo. ....	42
6 Presupuesto.....	43
7 Bibliografía. ....	44
Anexo técnico.	
Anexo de código.	
Anexo de planos.	

## 1 Introducción

El **remo en carro móvil** es un deporte que tiene presencia olímpica. En Zaragoza, un número de personas moderado lo practican. A pesar de que hay gente que compite a nivel tanto nacional como internacional, el grueso de estos deportistas lo hacen como hobby y de un modo no profesional.

En este segmento es en el que se quiere introducir el contexto del desarrollo del dispositivo, pero primero se describirá en la figura (1) cómo es una embarcación.

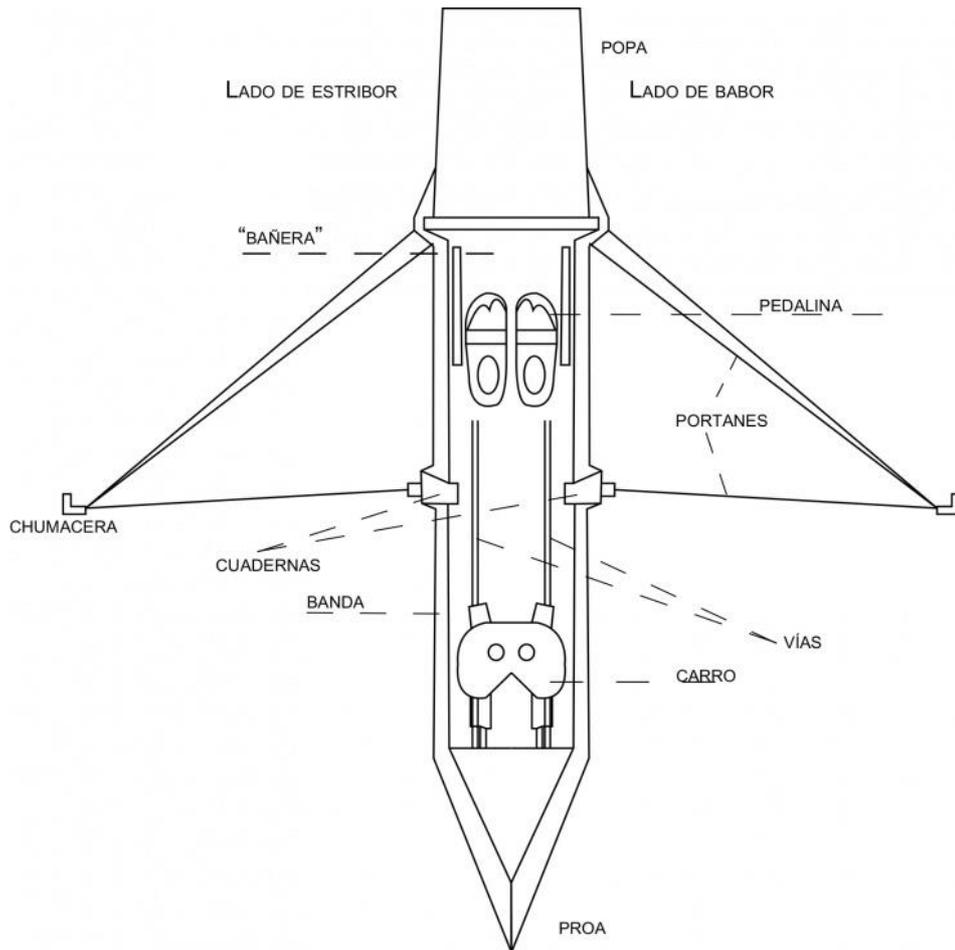


Figura (1) Esquema Explicativo de las partes de una embarcación. Macarena Allendes, Estudio sobre los tipos de embarcaciones, Construcción 4º DO 2015

El movimiento se realiza, como en todas las embarcaciones, hacia proa; por lo que el deportista se encuentra de espaldas al movimiento, es decir, va mirando hacia atrás.

Va sentado en el carro y tiene los pies atados a las pedalinas, que suelen incluir unas zapatillas en las que introduce los pies.

Los remos se apoyan en el extremo más lejano de los portantes y se anclan mediante la chumacera, que evita que el remo se salga de esa posición.

A continuación, en la figura (2) se ven las fases por las que pasa el deportista de forma cíclica para realizar una palada completa.

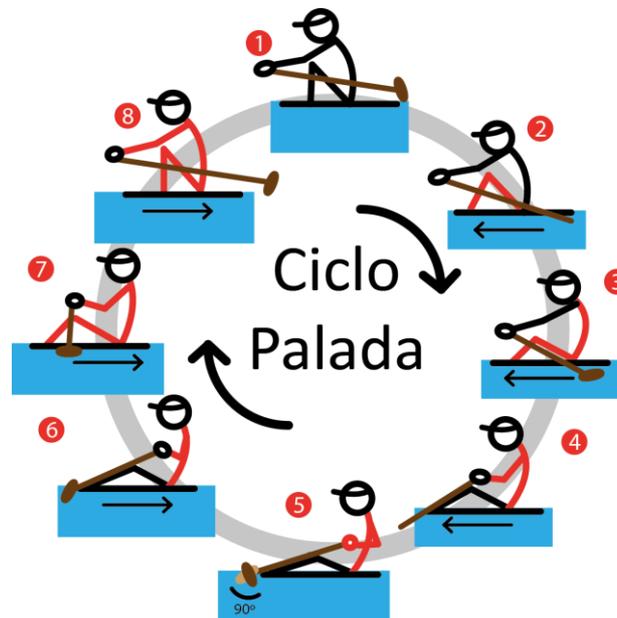


Figura (2) Esquema del ciclo de una palada.

- En el primer dibujo se ve la fase de “ataque”, en la que la pala del remo entra en el agua y la principal prioridad es conseguir que la embarcación no pierda demasiada velocidad por lo que el movimiento ha de ser muy rápido para que el remo no actúe de freno.
- En los dibujos 2, 3 y 4 se ve la “pasada” que corresponde al recorrido del remo dentro del agua. La fuerza se imprime en primer lugar con las piernas y posteriormente con los brazos. Durante esta etapa el remo está bajo el agua, pero pegado a la superficie.
- En el dibujo 5, la “salida”, es la etapa en la que el remo sale del agua. Este movimiento es rápido, enérgico y limpio para evitar perder la velocidad lograda en la pasada. Tiene lugar inmediatamente después del último impulso realizado con los brazos en la fase anterior. A la vez, tiene lugar el “rapaleo”, entre la pasada y la salida existe un pequeño pero muy importante movimiento para la consecución de un movimiento natural que consiste en girar los remos 90 grados en torno a su eje longitudinal de forma que en el aire los remos vayan paralelos al agua y en caso de que la toquen, deslicen sobre ésta.
- En los dibujos 6, 7 y 8 tiene lugar la “preparación”. Al término de la última palada el deportista debe prepararse para la próxima, se trata de alejar los remos del pecho y volver a encoger las piernas a la vez que el carro se desplaza hacia la popa de la embarcación para volver a repetir el ciclo.

Se dice que la dinámica del remo es bastante compleja y hay muchos factores que determinan la velocidad y la aceleración de la embarcación.

Puede profundizarse en el conocimiento de la dinámica de una embarcación en [\[1\]](#):

*“Although the motion of rowing boats appears quite simple, it is, in fact, somewhat complicated. Not only does the motion of the rowers affect the speed of the boat, but also the river conditions and the way the stroke is taken. It is suggested that for shallow rivers skin drag and viscous effects will have a*

*significant contribution. However, in most cases the major contribution is due to the inertial drag of the boat. Similarly, boat length must be carefully considered to avoid resonant losses to wave drag. Coincidentally, it has been shown that a boat at race-pace minimises the wave drag. However, further research into changing wave drag conditions and also the effects of aerodynamic drag would be useful. Headwinds and crosswinds cause complex turbulence effects which may have a significant effect upon the boat speed."*

Pero para el desarrollo del prototipo se ha simplificado el problema considerablemente y se ha supuesto que la embarcación, se mueve en una única dirección debido a una fuerza ( $F_b$ ) que se aplica en su centro de masa ( $m$ ), como se puede ver en la figura (3) sin entrar en detalle de dónde viene dicha aceleración.

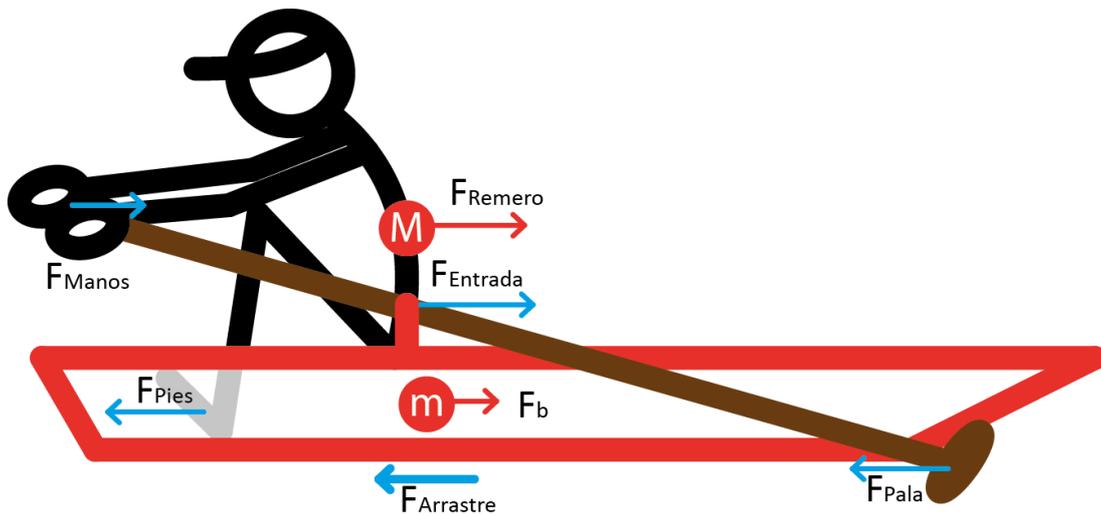


Figura (3) Principales fuerzas que intervienen en una embarcación de remo.

## 1.1 Descripción del problema

Este proyecto se ha realizado en colaboración con el centro de natación HELIOS (reconocido centro deportivo en el que se realizan diversas actividades acuáticas), en concreto con la Escuela de Remo de Zaragoza.

El contacto con esta asociación deportiva y la iniciación en este deporte, ha permitido percatarse del problema económico que supone la monitorización en tiempo real de los entrenamientos.

En conversaciones con el entrenador Alfonso Muñiesa, se planteó la idea con él y confirmó que realmente era un problema real cuyo principal factor era el económico y que el desarrollo de un dispositivo de estas características sería muy positivo para el mundo del remo amateur.

En el deporte de remo con carro móvil, existen distintas variables que se tienen en cuenta a la hora de realizar las competiciones y los entrenamientos, que normalmente hacen imprescindible para el deportista tanto para conocer su capacidad física como para mantener un ritmo apropiado.

Dichas variables son:

- **Tiempo de entrenamiento:** El tiempo transcurrido desde el inicio de la prueba/entrenamiento. Su forma de representación es: **hh:mm:ss**.
- **Distancia recorrida:** La distancia total recorrida desde el inicio de la prueba/entrenamiento. Su forma de representación es en metros.

- **Tiempo a los 500 metros:** El tiempo que tarda el deportista en recorrer 500 metros sobre el agua. Se puede calcular teniendo en cuenta la distancia total recorrida y el tiempo total y también se puede ir calculando un valor instantáneo. Ambos son útiles para el deportista porque de esta forma conoce su valor en toda la carrera y puede conocer en tiempo real su rendimiento. Su forma de presentación es: **mm:ss**.
- **Paladas por minuto:** Corresponde al número de paladas completas que realiza el deportista en un minuto (esta medida se va calculando en tiempo real). Su forma de representación es un número entero.
- **Fuerza de palada:** Corresponde a una representación que muestra la fuerza en función del tiempo en las paladas que da. Es una gráfica en la que en el eje X se muestra el tiempo de palada y en el eje Y la fuerza instantánea en libras.
- **Fuerza máxima de palada:** Corresponde al valor máximo de la gráfica de fuerza de palada.

Teniendo en cuenta estas variables y con el consejo directo de los deportistas tanto profesionales como amateurs de HELIOS, se han determinado aquellas que son necesarias para el cumplimiento del objetivo del proyecto.

- **Tiempo de entrenamiento.**
- **Distancia recorrida.**
- **Tiempo a los 500 metros.**
- **Paladas por minuto.**

La principal problemática de los dispositivos disponibles en el mercado:

**De alta gama** es que, si no requieren instalación en la embarcación, su tecnología principal es GPS y acelerómetro, que sí permiten la visualización de variables como “distancia recorrida” y “tiempo de entrenamiento”.

Si por el contrario, requieren instalación en la embarcación, la principal tecnología empleada es anemómetro, en los dos casos el precio de estos dispositivos es muy elevado.

Del mismo modo estos dispositivos suelen incorporar comunicación inalámbrica con algún tipo de aplicación móvil o guardan la información del entrenamiento para su posterior visualización, pero en el mundo no profesional, aparte de no ser relevantes, encarecen el producto.

**De gama baja** basados en relé Ritz como se ve en la figura (4) (haciendo indispensable la instalación en la embarcación), que basan su funcionamiento en el movimiento oscilante que lleva el deportista mientras rema, poniendo un imán que activa el relé en el punto medio del recorrido del carro móvil y las vías. Esto genera el problema de que si el carro no se mueve, es decir, no se realiza el movimiento de palada completo, al no detectar el imán el método de detección de cadencia, no funciona. Además no permiten la visualización de variables como “distancia recorrida” y “tiempo de entrenamiento”.

Existe una modalidad de remo de carro fijo para personas con hemiplejía en miembros inferiores y al utilizar este tipo de dispositivos no hay manera de determinar la cadencia de la embarcación.

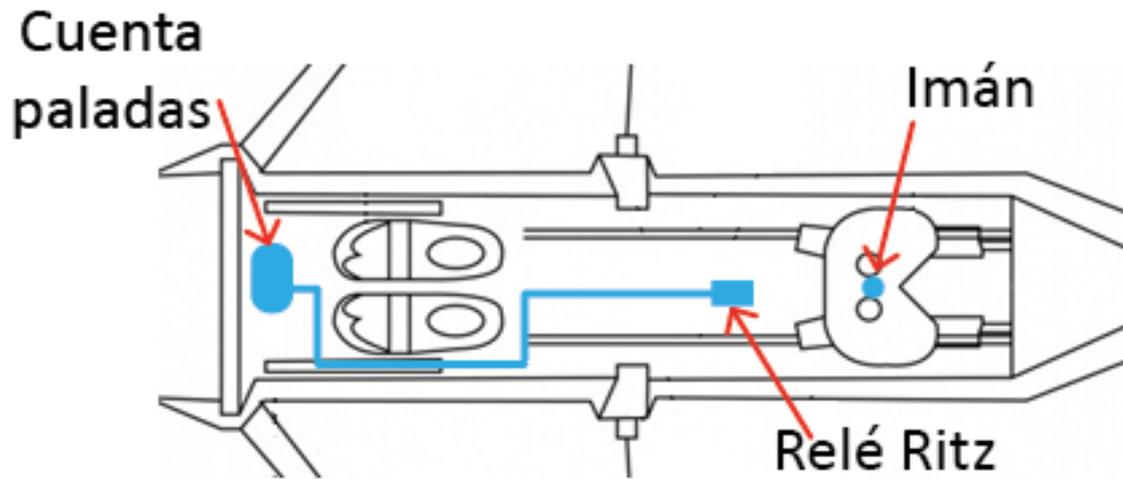


Figura (4) Esquema de funcionamiento de cuentapaladas basado en relé Ritz.

A pesar de que existen dispositivos que sí muestran estas variables, su precio es excesivamente alto y puesto que en el mundo amateur la gente no suele disponer de su propia embarcación, tampoco dispone de su propio detector de cadencia.

Al hacerse cargo de la adquisición de estos dispositivos los clubs, el coste limita el número de unidades que pueden permitirse adquirir.

## 1.2 Objetivo y Alcance

En el mundo del remo, basándome en el estudio de mercado realizado, se puede afirmar que los detectores de cadencia, al tratarse de unos productos con un segmento de mercado muy pequeño hacen que los precios de los dispositivos sean demasiado altos.

El propósito en este proyecto consiste en comprobar la viabilidad tecnológica y económica de un dispositivo:

- Autónomo.
- Intercambiable entre distintas embarcaciones.
- Que muestre información en tiempo real al usuario.
- Que facilite la puesta a punto y calibración del dispositivo por el usuario.
- Que detecte la cadencia en remo de banco móvil.
- Que detecte la cadencia en remo de banco fijo.
- Que contabilice el tiempo de entrenamiento.
- Que muestre el tiempo a los 500 metros.

De este modo aumentará la accesibilidad a este tipo de productos a los deportistas que compiten en modalidades de banco fijo; sin tener que hacer un gran desembolso económico para tener un producto que se amolde a la actividad deportiva que se realiza.

## 2 Análisis de requerimientos y diseño arquitectural.

Dado el alcance del proyecto, se ha determinado que el dispositivo a desarrollar, ha de tener un diagrama de bloques como el de la figura (5). En él se identificarán los bloques de los que consta el dispositivo, sin entrar en detalle de los componentes que se emplearán en cada uno de ellos.

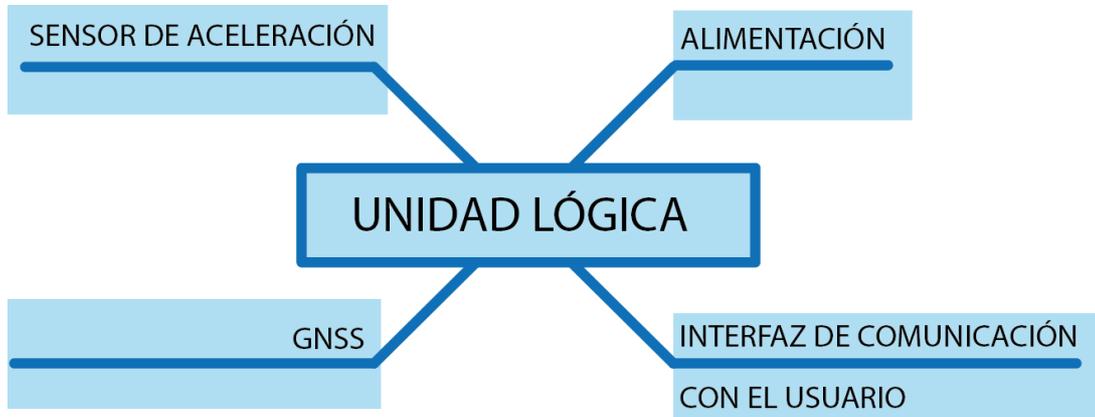


Figura (5) Diagrama arquitectural del dispositivo a desarrollar.

- **Sensor de aceleración:** se necesita conocer la aceleración a la que está sometida la embarcación para conocer la cadencia de palada que tendrá un valor máximo de 40 paladas por minuto (0.6Hz), que permita muestrear a una velocidad variable. Además de que sea fácil la integración en placa de montaje rápido.
- **Alimentación:** se utilizará la necesaria que requiera el proyecto.
- **Unidad lógica:** se necesitará un microcontrolador que responda al compromiso de: ser el mínimo necesario y que facilite al máximo el desarrollo software del proyecto.
- **GNSS:** se necesita conocer la velocidad y el desplazamiento de la embarcación sin disponer de ningún punto de referencia. Además de que sea fácil la integración en placa de montaje rápido.
- **Interfaz de comunicación con el usuario:** se necesitará un medio para mostrar en tiempo real el valor de las variables necesarias del [apartado 1.1](#) de bajo consumo y que sea visible sin luz solar. También se necesitará que el deportista pueda reiniciar y pausar el entrenamiento de forma fácil.

### 3 Selección de Hardware.

Para la elección de los componentes del proyecto se han tenido en cuenta los siguientes factores:

- Adaptación a las especificaciones requeridas del proyecto.
- Capacidad de trabajar con cada uno de los componentes en placa blanca.
- Valores de consumo de los distintos componentes.
- Disponibilidad de los componentes en el entorno.
- Conectividad entre los componentes seleccionados para su correcta comunicación y funcionamiento.

#### 3.1 Sensor de aceleración

Tras la comparativa de la tabla (1) se ha elegido el módulo acelerómetro MMA7361. Por:

- Mostrar una tensión proporcional a la aceleración.
- Disponer de un rango de aceleración óptimo para el proyecto.
- Disponer de un filtro de orden 1 con frecuencia de corte de 1,5Khz para filtrar el ruido de CLK.
- Medir en los 3 ejes espaciales.
- Modo de bajo consumo.
- Poder utilizarse en placa de montaje rápido.

<i>Acelerómetro</i>	<i>tecnología</i>	<i>adaptabilidad</i>	<i>modularidad</i>	<i>precio</i>	<i>Valoración general</i>
<i>ADXL202</i>	Capacitiva	Requiere hardware	Necesita adaptador	😊	😞
<i>ADXL345</i>	Capacitiva	Buena	Viene en modulo	😊	😊
<i>MMA7361</i>	capacitiva	Buena	Viene en módulo	😊	😊

- Tabla (1) Comparativa de posibles Acelerómetros.

Para más información consúltese el Anexo Técnico.

#### 3.2 Alimentación.

Al tratarse de un prototipo, se utilizará el cable de conexión USB de la placa del microcontrolador para alimentar todas las partes.

#### 3.3 Unidad lógica.

Tras la comparativa de la tabla (2) se ha elegido el microcontrolador **atmega328p** por:

- Ser un micro que se puede alimentar a 5V que dada la modularidad es muy conveniente en el proyecto.
- Disponer de patillas con *ADC* que permiten convertir los valores de tensión que muestra el acelerómetro.
- Tener suficientes puertos digitales para controlar los botones y el display que mostrará las variables necesarias para el entrenamiento.
- Disponer de patillas de interrupción digital para pausar y reiniciar el entrenamiento.
- Tener un *UART* que se utilizará para leer las tramas del módulo *GPS*.

<b>Micro</b>	<b>VCC</b>	<b>Nº patillas</b>	<b>Conv. A-D</b>	<b>Encapsulado</b>	<b>Valoración general</b>
<i>Atmega328p</i>	<b>4.5-5.5V</b>	<b>28</b>	<b>10bits</b>	<b>PDIP</b>	😊
<i>68HCS08</i>	<b>1.8-3.3V</b>	<b>16</b>	<b>10bits</b>	<b>16PDIP</b>	😐
<i>MC9S08SV</i>	<b>2.7-5.5</b>	<b>32</b>	<b>12bits</b>	<b>SDIP</b>	😐

Tabla (2) Comparativa de microcontroladores.

Para más información consúltese el Anexo Técnico.

### 3.4 GNNS.

Se ha elegido el módulo GPS NEO-6M-000-1 por:

- Ser un módulo que dispone de 4 patillas: *VCC*, *GND* Rx y Tx.
- Su consumo es sólo de 50 mA.
- Ser económico.
- Para su conexión al ordenador únicamente se necesita un cable de TTL *UART 5V*.
  - Permite descargar desde su página web un programa llamado u-centre que permite la configuración del módulo mediante una interfaz visual y permite seleccionar todos los parámetros necesarios como, por ejemplo:
    - Las tramas *GPS* que envía.
    - El tipo de arranque que usa el *GPS*.
    - La frecuencia de las tramas.
    - El modo de funcionamiento.

Para más información consultar Anexo Técnico.

### 3.5 Elección de interfaz de comunicación con el usuario.

Para desarrollar un práctico modo de uso, se han mantenido conversaciones con deportistas y entrenadores que han aportado algunas nociones de cómo tiene que ser el modo de uso del dispositivo.

Se han identificado las siguientes necesidades, el deportista tiene que:

- Ver el tiempo de entrenamiento.
- Ver las paladas por minuto en tiempo real.
- Ver el tiempo a los 500 metros en tiempo real.
- Ver la distancia recorrida en el entrenamiento.
- Indicar el momento de inicio del entrenamiento
- Pausar el entrenamiento.

#### 3.5.1 Salida de información.

Para la salida de información, habitualmente se utilizan pantallas ad hoc con displays de 7 segmentos. Éstas vienen diseñadas con espacios ya asignados. No se usarán debido al alto coste que tienen si no se serializa la producción. Por esto se utilizará una pantalla de propósito general.

Se utilizará un display *LCD* de dos líneas de dieciséis caracteres por:

## Detector de cadencia para embarcación de remo basada en GPS y acelerómetro.

- Permitir su correcta lectura a la luz del sol y disponer de retroiluminación en caso de que se entrene sin luz solar.
- Tener un consumo reducido de forma que se alarga la vida del dispositivo.
- Ser económica

### 3.5.2 Entrada de información.

Para la entrada de información se van a utilizar pulsadores que:

- Permitan iniciar y pausar el entrenamiento.
- Reiniciar el entrenamiento.

Los dispositivos de alta gama que hay en el mercado permiten seleccionar las paladas que se tienen en cuenta para determinar la cadencia, pero en este caso se fijarán a 3 ya que éste es el número más frecuente en los entrenamientos de deportistas amateur.

También permiten hacer lo mismo para la determinación de la velocidad. Del mismo modo se establecerá la velocidad teniendo en cuenta el instante anterior.

## 4 Diseño detallado.

En este apartado se desarrollará todo lo relacionado con la adquisición de datos de los distintos bloques del proyecto. Se abordarán:

- Decisiones de diseño que tienen que ver con el acelerómetro, así como la toma y tratado de los datos obtenidos. [2]
- La interpretación de las tramas del módulo GPS. [3]
- La interfaz de comunicación con el usuario y calibración del dispositivo.
- Placa Arduino UNO [4]

### 4.1 Sensor de Aceleración.

En este apartado se hablará de la primera toma de contacto con el acelerómetro, así como de las características del módulo y en la Figura (6) cómo se ha adaptado a su cometido en este proyecto.

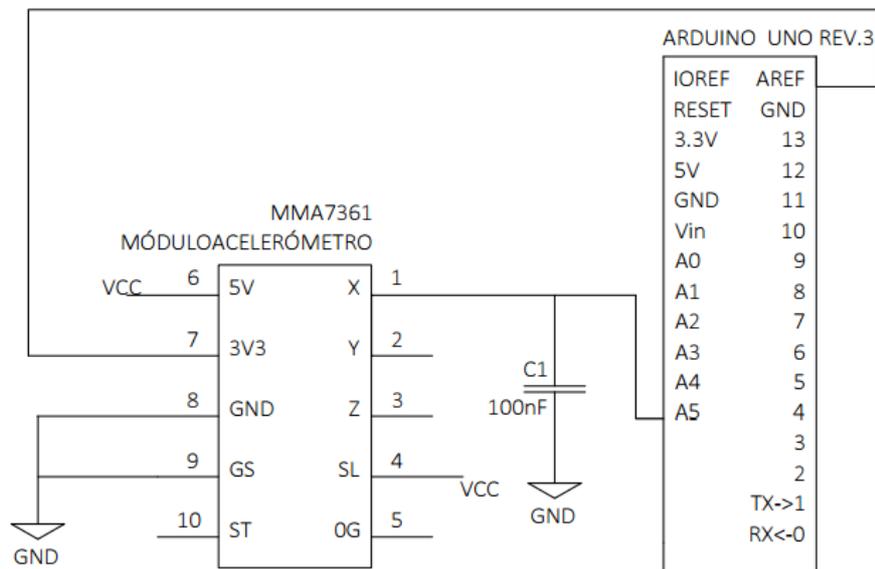


Figura (6) Esquemático del módulo acelerómetro.

#### 4.1.1 Características

El módulo acelerómetro MMA7361 integra el acelerómetro MMA7361L de montaje superficial, se alimenta a 3,3V que le vienen suministrados a través de un integrado RT9161 que tiene una precisión de tensión del 2%, la tensión máxima de entrada del integrado es de 12 voltios y da una intensidad de hasta 900 mA.

La impedancia de salida de del acelerómetro en sus tres patillas X Y y Z es de 32kΩ y tiene un ancho de banda de 400Hz en sus salidas X e Y y 300Hz en la Z. Externamente al circuito integrado, pero dentro del módulo, lleva en cada patilla de salida un condensador de 3,3nF que es el mínimo recomendado para filtrar el ruido del reloj que puedan llevar el resto de componentes del circuito donde se monte. El circuito RC resultante de la impedancia interna y dicho condensador establece un filtro de primer orden con una frecuencia de corte de 1500Hz

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot 3,3 \cdot 10^{-9}} = 1507,15 \text{ Hz}$$

## Detector de cadencia para embarcación de remo basada en GPS y acelerómetro.

La sensibilidad del acelerómetro se regula mediante un pin a  $\pm 1,5g$  o  $\pm 6g$  dependiendo del valor alto o bajo del pin "sense select", que se ha establecido para tener el rango de  $\pm 1,5g$  debido a la naturaleza de la señal a medir.

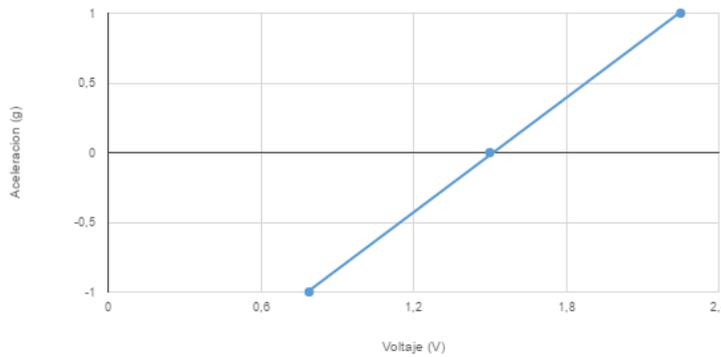
El valor típico de tensión para  $0g$  es  $1,65V$ ; acotado a  $[1,485,1.85]V$ . Experimentalmente se ha calculado el valor de  $0g$  obteniendo un valor de  $1,5V$ , el de  $1g$  dando  $2,25V$  y el de  $-1g$  dando como resultado  $0,74V$ .

El valor de sensibilidad típico de este acelerómetro es de  $800mV/g$  acotado por estos valores  $[740,860] mV/g$

$$2,25 - 1,5 = 0,75$$

$$1.5 - 0.74 = 0.76$$

Como se ve en la figura (7), los valores mostrados en el "datasheet" son válidos y se obtiene la siguiente ecuación que relaciona el voltaje de salida con la aceleración.



$$A = 1,37.V - 2.07$$

Figura(7) Aproximación lineal de los valores de tensión que proporciona el acelerómetro en función de la aceleración.

Los valores de tensión que saca el acelerómetro están acotados teóricamente (en el peor caso posible) a  $[0.195,3.105]V$  y experimentalmente se obtienen  $[0.375,2.625]V$  por lo que se ha decidido aprovechar la propia etapa de alimentación del acelerómetro como referencia analógica de tensión para el ADC del microcontrolador.

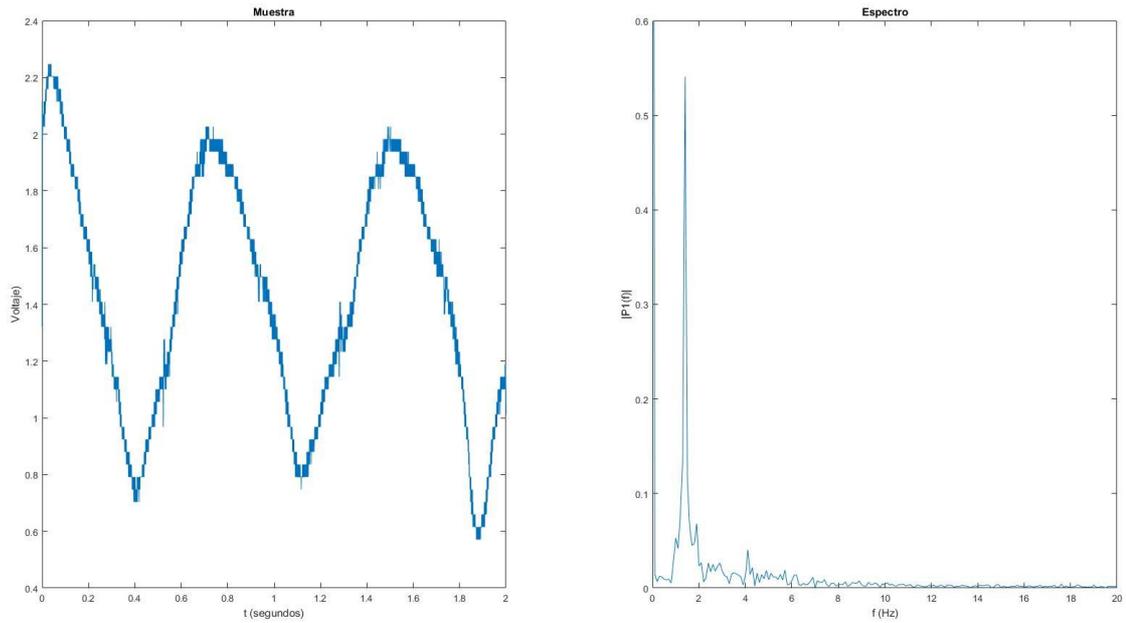
Esto presenta una resolución de muestreo que abarca 698 de los 1024 valores diferenciables con una  $V_{LSB}=3.2mV$  que corresponde a una resolución máxima de aceleración de  $0.04m/s^2$

### 4.1.2 Experimentación previa

En un primer contacto con el acelerómetro, se realizó un experimento en el cual se aplicaba un movimiento a mano alzada todo lo sinusoidal posible a una frecuencia aproximada de  $1Hz$ .

Para la toma de datos se ha utilizado un osciloscopio picoScope debido a que permitía un muestreo muchísimo más rápido que el que se puede realizar con el microcontrolador, de este modo se ha elegido un periodo de muestreo de  $10\mu s$  para ver lo mas fielmente posible las cualidades y limitaciones del acelerómetro. Además, con esta frecuencia de muestreo quedan anulados sobradamente los efectos de aliasing debido a este filtro. [4]

En la figura (8) se muestra la representación en el tiempo de la señal tomada y su análisis espectral.



Figura(8) Muestra obtenida del acelerómetro y su espectro.

Para la mejor visualización del ruido, la escala utilizada se ha establecido de forma que los componentes armónicos relevantes se viesen mejor, llamando armónicos relevantes a aquellos que tienen una potencia espectral superior al 5% del que tiene el armónico fundamental. A priori parece que la señal es muy limpia, y de hecho así es, pero como se puede ver en la figura (9), ajustando la escala del análisis espectral a la frecuencia de corte del filtro RC que integra el propio módulo (1500Hz) y amplificando lo suficiente como para apreciar el ruido.

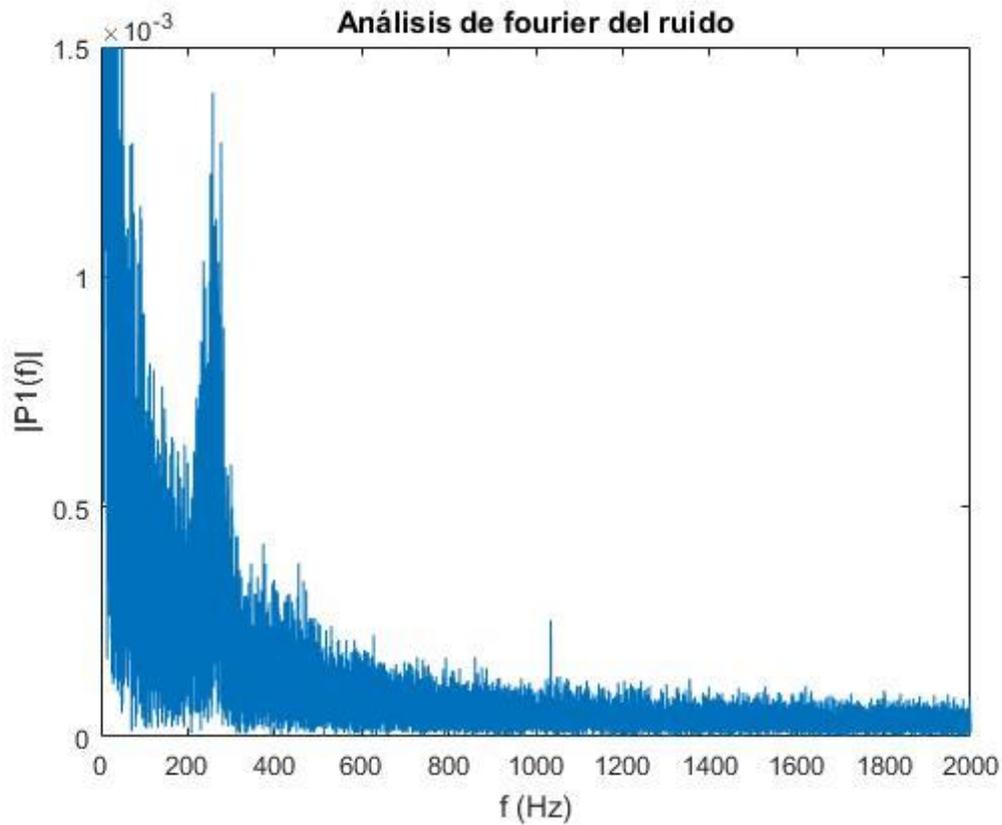


Figura (9) Análisis del espectro ampliado del ruido del acelerómetro.

Se puede suponer que el ruido inferior a los 400Hz es el propio del acelerómetro debido a que su ancho de banda de diseño es ese valor y el ruido restante es completamente extrínseco al acelerómetro, es decir, es debido a interferencias, efectos del osciloscopio etc. Comparando la potencia espectral de este ruido con el armónico fundamental, se ve que es del orden de 300 veces inferior, de forma que la mayor componente de alta frecuencia es inferior al 0,3% respecto a la fundamental.

#### 4.1.3 Toma de datos

Como se ha visto en el apartado anterior el filtro paso-bajo del que dispone el módulo tiene una frecuencia de corte de 1500Hz, por lo que para cumplir con los requerimientos del muestreo tendría que muestrear a 3KHz por lo que se va a añadir un condensador mayor que establezca la frecuencia de corte en aproximadamente 50Hz.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \Rightarrow 50 = \frac{1}{2\pi \cdot 32 \cdot 10^3 \cdot (3,3 \cdot 10^{-9} + C')} \Rightarrow C' = 100nF \text{ para } f_c \approx 48Hz$$

Según esta nueva frecuencia de corte, la frecuencia de muestreo quedaría establecida a aproximadamente 100sps, pero para no tener limitaciones en el diseño de los algoritmos de tratamiento por falta de muestras y poder realizar análisis frecuenciales, la señal será muestreada a 200sps.

Bien es cierto que con esta frecuencia de muestro bastaría con un filtro de 100Hz de frecuencia de corte, pero dado la naturaleza de la señal de la que estamos hablando, cuyo periodo nunca es inferior a 1 segundo es evidente ya desde un primer momento bastaría con un número significativamente inferior de muestras por segundo.

## Detector de cadencia para embarcación de remo basada en GPS y acelerómetro.

Por tanto, es seguro que más adelante se tendrá que desechar una gran cantidad de muestras que serán irrelevantes.

Aunque la principal limitación para determinar la velocidad de muestreo ha venido dada por la velocidad del medio utilizado, que en este caso es una tarjeta SD.

Para más información sobre la toma de datos, consultar Anexo técnico.

Como puede apreciarse en la figura (10), el dispositivo se ideó como una “Shield” para Arduino, de forma que se utilizaba la propia tarjeta de Arduino junto con la “Arduino Ethernet Shield” para el uso de la tarjeta SD. Encima de ésta se añadió otra placa con el siguiente esquema de conexión.

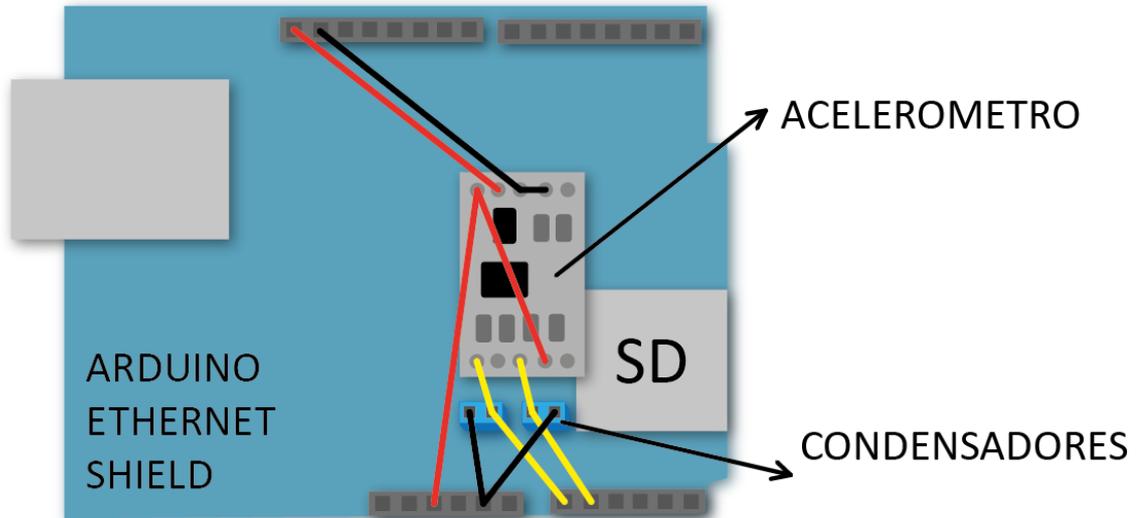


Figura (10) Ilustración del “shield” para Arduino realizado para la toma de muestras.

La muestra se tomó en Zaragoza, dando una vuelta completa haciendo los principales ejercicios que suelen realizarse en un entrenamiento en la que se sale del embarcadero hasta el Azud del Ebro y se sube río arriba hasta el Puente de Hierro. Después se vuelve al Azud. Figura (11).

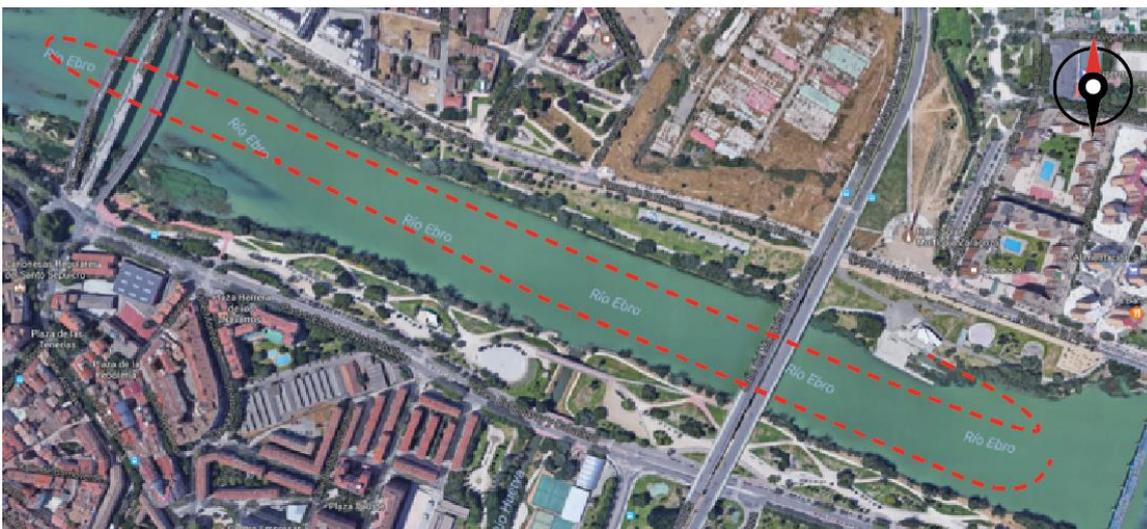


Figura (11) Mapa del recorrido realizado en una vuelta de entrenamiento.

En el entrenamiento se realizó una fase en la que sólo se rema con los brazos, sin hacer uso del carro. Este ejercicio se realizó para que pueda ser utilizado por las modalidades de remo en las que no hay carro móvil. Como podemos ver en la figura (12).

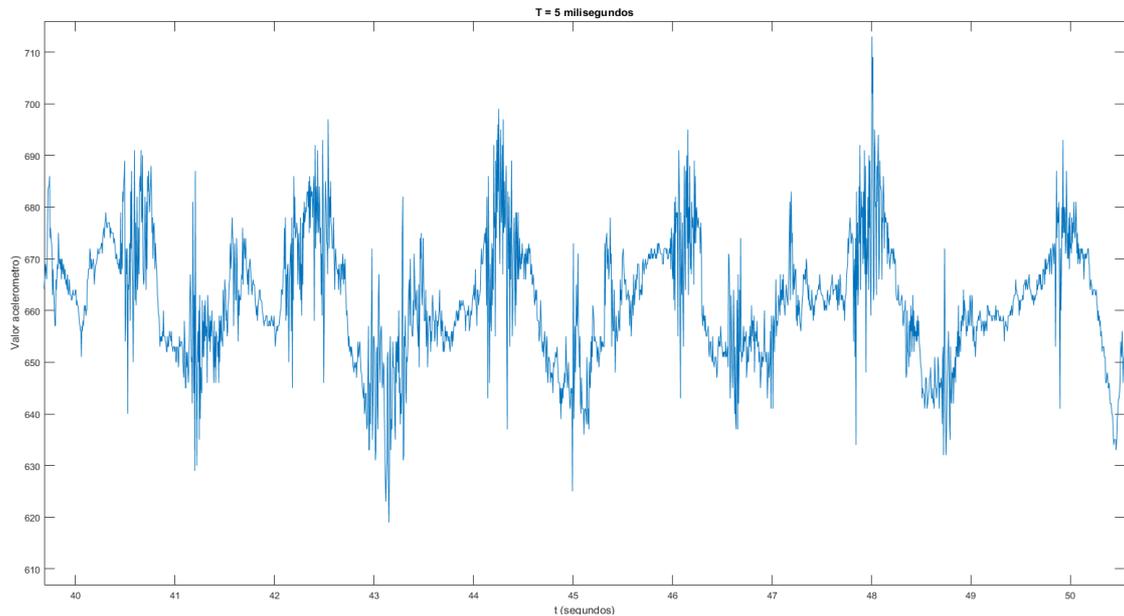


Figura (12) Muestra de aceleración de la embarcación en ejercicio de "solo brazos".

También se tomaron muestras de "salidas" que consisten en empezar el movimiento partiendo del reposo de la mejor manera posible. En este tipo de entrenamiento es donde se dan las cadencias de palada más elevadas. Como podemos ver en la figura (13).

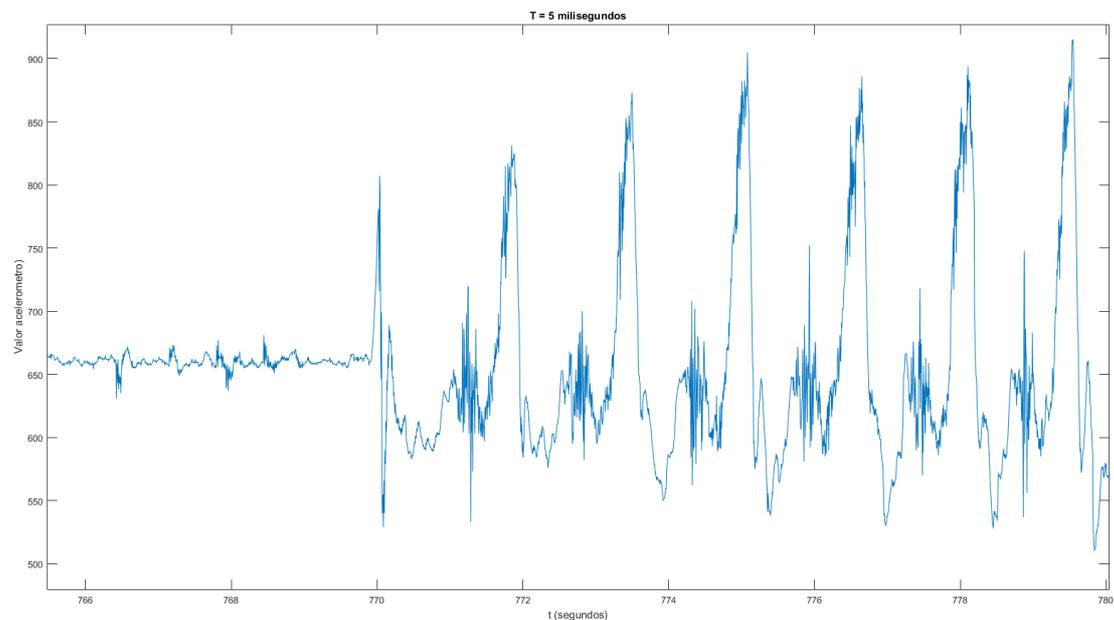


Figura (13) Muestra de la aceleración de la embarcación en "Salida".

#### 4.1.4 Tratamiento de datos.

Nada más decodificar los datos, se observó que el Eje Z no proporcionaba información relevante por la colocación del acelerómetro por lo que se utilizó el eje X.

Una vez hecho esto, se realizó un análisis frecuencial de la muestra completa, para determinar el ruido que tienen los datos y la relevancia de los componentes de alta frecuencia.

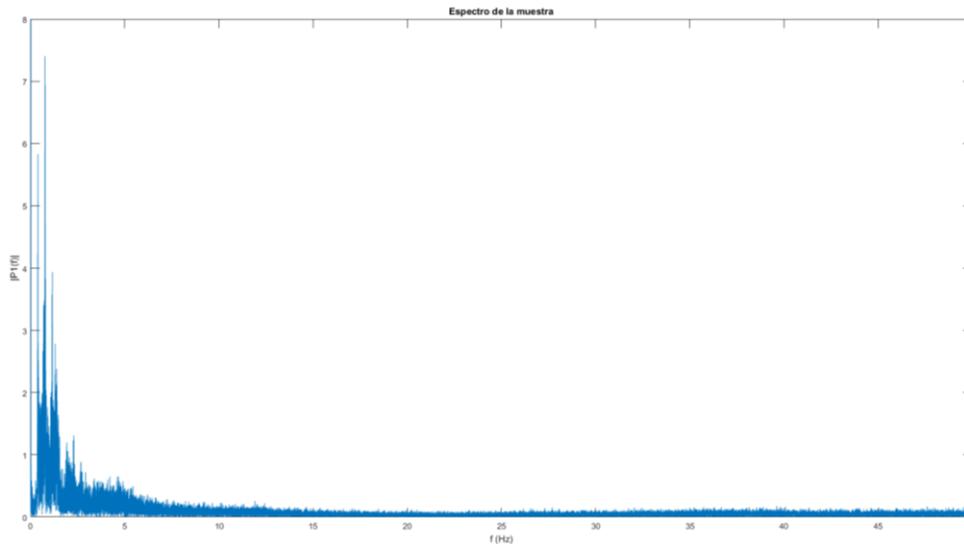


Figura (14) Espectro de la muestra tomada

Una vez hecho esto, se comenzó a aplicar distintos **filtros paso bajo** a la muestra, de forma que quede una señal con menos componentes armónicas de alta frecuencia y teniendo en cuenta que la frecuencia de corte tenía que estar muy ajustada a 0.6 Hz, por lo que se puede observar en la figura (14), más allá de esa frecuencia, es todo ruido.

Puesto que las señales importantes, es decir la cadencia de palada, en ningún caso es superior a 40 paladas por minuto (0.6Hz) y en los casos en los que se acerca a dicha frecuencia, la amplitud de la señal aumenta irremediablemente, se puede permitir el uso un **filtro paso bajo** que tenga una frecuencia de corte todavía más ajustado. De otra forma, no quedaría otra opción que utilizar un filtro de orden superior.

Así, cuando el deportista aumente su ritmo hasta el límite, el excesivo ajuste de la frecuencia de corte, será compensado con el aumento de la amplitud de la señal. Además, puesto que la señal fue muestreada utilizando el máximo rango posible ajustando la  $V_{REF}$  del microcontrolador, se permiten este tipo de prácticas.

Para más información respecto a los filtros consultar anexo técnico.

Se han aplicado dos filtros:

- Un filtro de primer orden de  $f_c=0.3\text{Hz}$ .
- Un filtro de media móvil  $M=100$ .

Usando el **filtro paso bajo** de  $f_c=0.3\text{Hz}$ , se obtuvo una función de transferencia discreta:

$$G(z) = \frac{0.2}{z - 0.98}$$

De la que se despejó el siguiente algoritmo:

$$Y_k = 0.02X_{k-1} + 0.98Y_{k-1}$$

Ha dado como resultado:

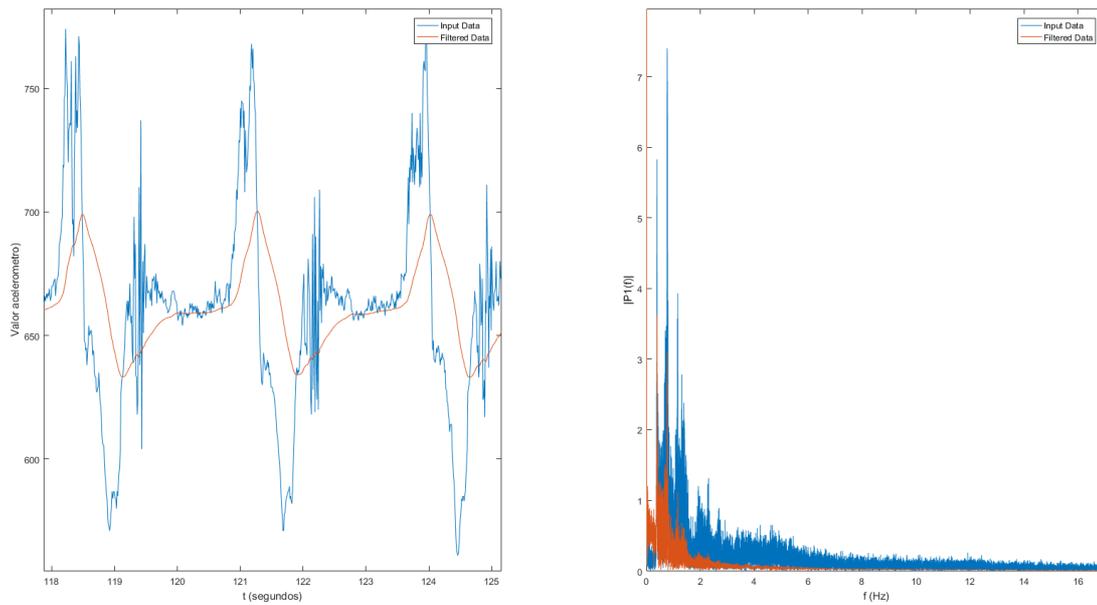


Figura (15) Comparación de señal original y señal filtrada con filtro  $f_c=0.3\text{Hz}$ .

Como se puede observar en la figura (15) la señal queda prácticamente sin ruido y a pesar de su disminución en amplitud, sigue conservando la forma de la señal original.

Usando el **filtro de media móvil**  $M=100$ , se buscó su función de transferencia discreta [4]:

$$H[f] = \frac{\sin(\pi f M)}{M \sin(\pi f)} \text{ siendo } M \text{ el número de muestras que se ponderan.}$$

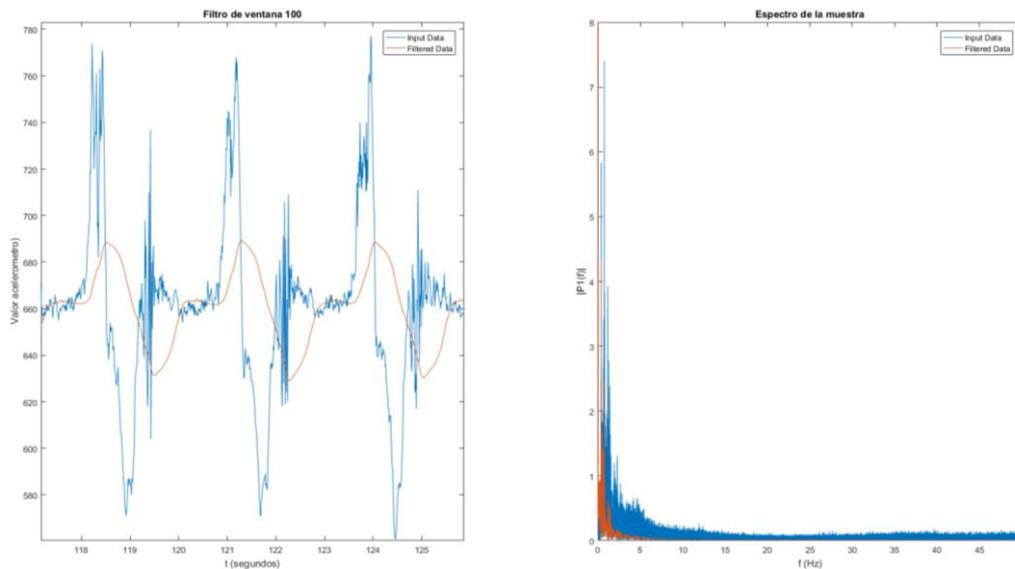


Figura (16) Comparación de señal original y señal filtrada con filtro de media móvil  $M=100$

Como se puede observar en la figura (16), la señal queda prácticamente igual que con el **filtro paso bajo**. Ahora se entenderá el porqué.

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} = \frac{TFDiscreta\{y[n]\}}{TFDiscreta\{x[n]\}}$$

Al tratarse de un sistema digital, para trabajar con frecuencias analógicas (Hz) con la función de transferencia  $H[f]$  se debe transformar la variable independiente (f) conociendo la frecuencia de muestreo, se podrán transformar los ciclos por muestra en ciclos por segundo:

$$F = f \cdot F_m$$

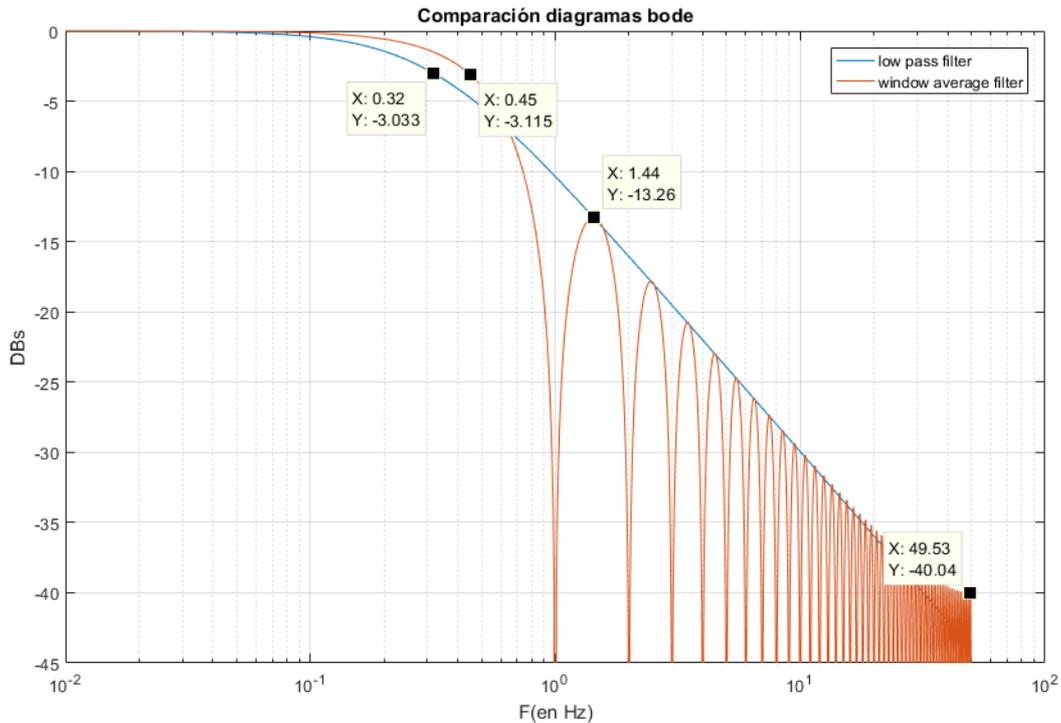


Figura (17) Gráfica comparativa de los diagramas de Bode de los dos filtros utilizados.

Viendo los filtros superpuestos en la figura (17), resulta obvio que, dada la naturaleza de nuestro problema, **el filtro de media móvil**, se comporta:

- En el rango de las frecuencias en las que está la cadencia, de forma óptima:
  - o Respuesta más plana en la banda de paso.
  - o Caída en la banda de transición más abrupta.
- En el rango de las frecuencias en las que no está la cadencia, la envolvente de los lóbulos coincide con la respuesta en módulo de la banda eliminada del **filtro paso bajo** de primer orden. Con la característica de que al tratarse de una estructura lobular el filtrado pese a ser selectivo, es más efectivo que una estructura plana en la banda eliminada.
- En cuanto al tiempo de cómputo:
  - o Cada iteración realiza una suma y una resta de enteros y desplaza una coma 2 posiciones para dividir por 100, frente a las dos multiplicaciones y la suma que hace el filtro paso bajo.

Por esto, **el filtro de media móvil** ha sido el elegido.

#### 4.1.5 Elaboración de algoritmos de detección de cadencia.

En este apartado en el que se tiene la señal ya filtrada se va a plantear una serie de algoritmos con el fin de detectar cuando se ha dado una palada. Sabiendo esto, y guardando cuando se han dado las paladas anteriores, se determinará la cadencia de la embarcación.

Para elegir los posibles algoritmos que servirían, se determinó que:

- Puesto que es una señal “lenta”, y de frecuencia variable, se trabajaría mejor en el dominio del tiempo.
- Se descartó trabajar en dominio frecuencial, ya que era de suma importancia detectar en qué instante se ha realizado una palada, puesto que una de las variables a mostrar es el número de paladas.
- Como a simple vista, se ve claramente la periodicidad de la señal, habría que jugar con los valores máximos y mínimos de la misma.
- Los algoritmos empleados, se harán a partir de la muestra obtenida, evitando añadir filtrados o componentes analógicos que cambiasen la estructura del hardware empleado en el muestreo.
- Los máximos de la señal corresponden con la fase acuática, en la que se le da aceleración a la embarcación.
- Los mínimos de la señal corresponden con la fase de recuperación o aérea, en la que el deportista se prepara para dar otra palada.

Bajo estas premisas iniciales, se plantearon los siguientes algoritmos:

- Algoritmo de detección de máximos y mínimos.
- Algoritmo integrador.
- Algoritmo inspirado en detector de máximos y descarga de un condensador.

##### 4.1.5.1 Algoritmo de detección de máximos y mínimos.

El primer algoritmo planteado, viene de que, mirando la señal filtrada, a simple vista, podemos identificar picos pronunciados tanto por arriba como por abajo que coinciden temporalmente con las dos fases de la palada.

De esta forma, sabiendo cuando se ha detectado el máximo o el mínimo y comparándolo con los anteriores, se sabrá la cadencia de la embarcación.

Para ello, el primer paso que se dio, fue realizar un diezmado, de forma que se conservara la forma de la señal para toda la muestra, pero de forma que el algoritmo a implementar se ejecutase cada más tiempo. De esta forma, se mejoraría el tiempo de cómputo del algoritmo. Para ello, lo que se hacía era tomar una de cada 20 muestras. De forma que cada muestra, estaba separada temporalmente de la siguiente 200 ms.

Inicialmente, se estableció como máximo, un punto cuyos puntos colindantes son inferiores y análogamente para los mínimos. Pero definiéndolo de esta forma, daba muchos falsos máximos. Finalmente hubo que tener en cuenta las siguientes condiciones para que funcionara:

- Sólo se detecta un máximo después de detectar un mínimo y viceversa.
- Los montículos planos también son máximos.
- Si inmediatamente después de un máximo la señal tiene un valor mayor, evidentemente no es un máximo y viceversa para los mínimos.
- Cuando la señal es plana, es decir no se están dando paladas, había oscilaciones interpretadas como máximos. Por lo tanto, la distancia entre un máximo y el mínimo anterior debía ser mayor a un valor.

Después de estas condiciones, los máximos y mínimos de la señal quedaban establecidos como puede observarse en la figura (18).

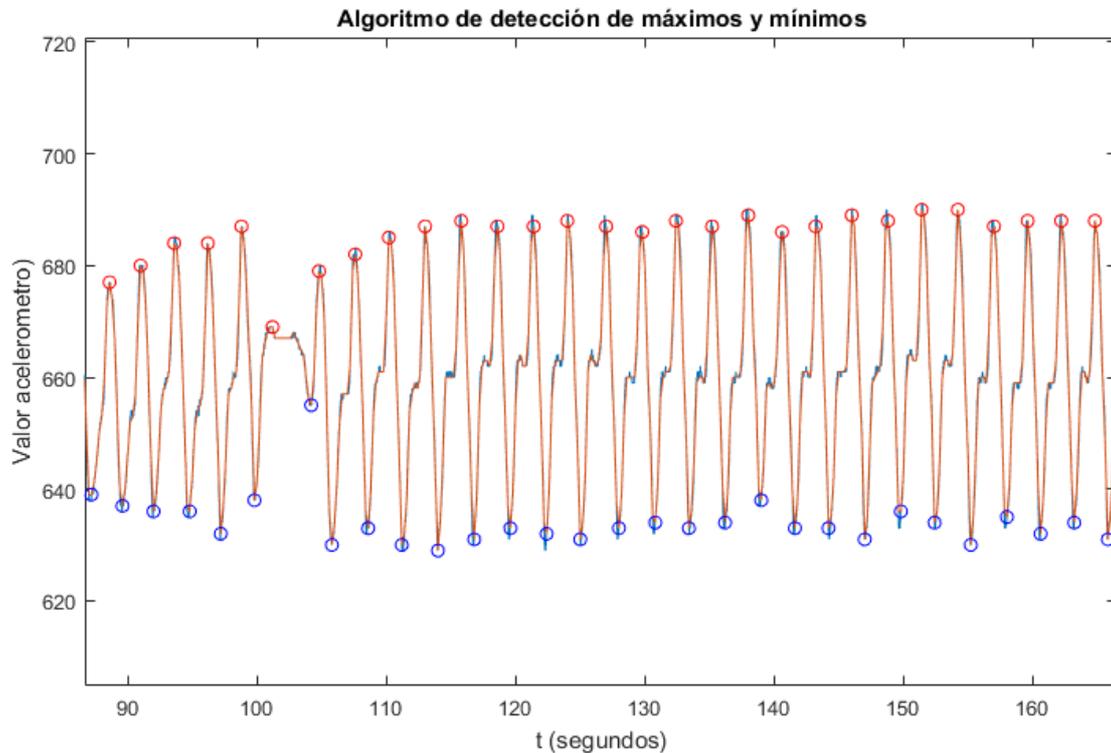


Figura (18) Algoritmo de detección de máximos y mínimos.

El problema de este algoritmo es que la señal consta de una pequeña oscilación cuando pasa por cero debido a la parada brusca del deportista con el final del recorrido del carro. Esto hace que, aunque la señal este filtrada, siga habiendo un falso máximo algo difícil de discernir de lo que se consideró máximo. Como anotación, se estimó que no sería posible filtrar más debido a la frecuencia y amplitud variables de la onda.

Por este motivo, este algoritmo, a pesar de funcionar, es poco fiable.

#### 4.1.5.2 Algoritmo integrador.

El segundo algoritmo implementado, ha sido el algoritmo integrador. Este algoritmo, parte de la idea de que, al tratarse de una señal periódica, eliminando la componente continua de la muestra e integrando, se obtienen montículos correspondientes con cada una de las paladas. De esta forma se detecta el montículo mediante su máximo.

Para eliminar la componente continua, en Matlab, se ha restado a cada valor de la muestra el valor medio de ésta. De esta forma ya se tienen valores positivos y negativos.

Puesto que se trata de un algoritmo en tiempo real, para quitar la componente continua se podría haber derivado la muestra y posteriormente integrarla. Pero dado que requería hacer muchas operaciones, primero se quería ver cómo funcionaba el algoritmo sin entrar en ello.

Diezmando la señal igual que en el apartado anterior y haciendo su integral se observó que sí había montículos, pero al igual que con el algoritmo anterior, había muchos falsos máximos.

Puesto que en el apartado anterior no se podía permitir reducir más el número de muestras, y de esta forma evitando añadir la larga lista de condicionantes que establecen qué

es máximo y qué no, se redujo el tiempo entre muestras hasta que únicamente se detectase lo que se entendía por máximo y el resultado se observa en la figura (19).

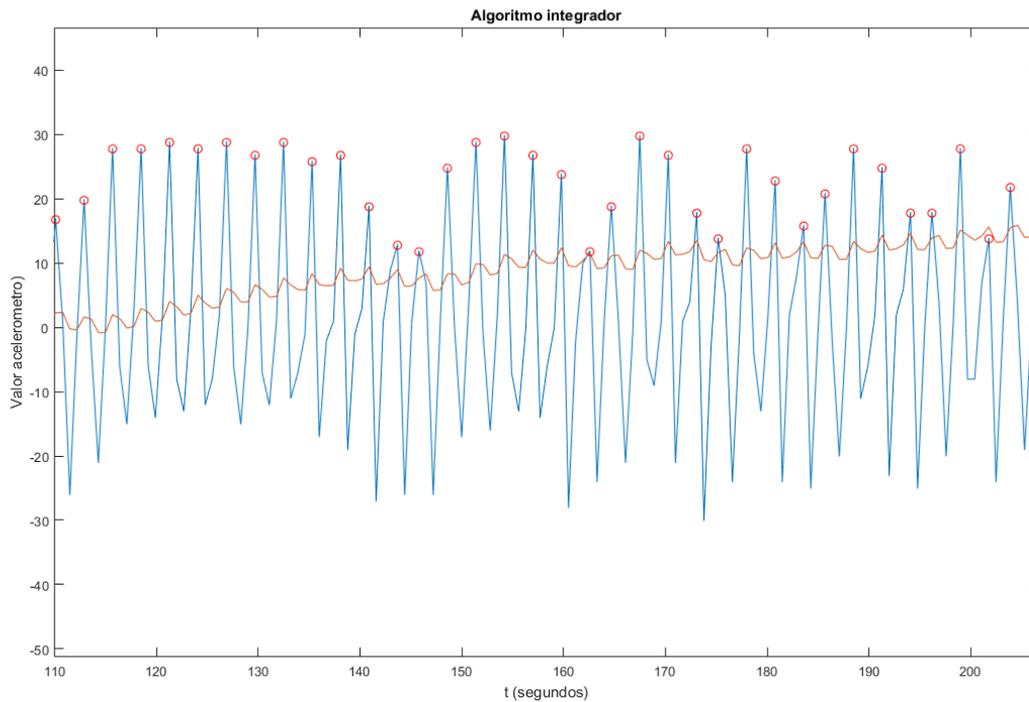


Figura (19) Algoritmo integrador.

La problemática de este algoritmo, es que, si mantenemos el periodo de muestreo, se detectan muchos falsos máximos que no interesan. Por el contrario, si se aumenta el periodo de muestreo, la detección de máximos es buena, pero, se pierde la resolución del tiempo que impide mostrar una cadencia de palada como se exigía.

Por tanto, este algoritmo serviría si se consiguiese eliminar el ruido del que se ha hablado en el apartado anterior.

#### 4.1.5.3 Algoritmo inspirado en detector de máximos y descarga de un condensador.

El tercer y último algoritmo, está inspirado en un detector de máximos analógico mezclado con la descarga de un condensador.

Este algoritmo parte de la idea de que los problemas que se estaban encontrando en la señal, son en la fase aérea de la palada en la que la única fuerza que interviene es la de arrastre con el agua y genera falsos máximos difíciles de filtrar.

Por ello se pensó que usando una variable que cuando tiene un valor inferior a la señal, la sigue y cuando es al revés, se descarga como un condensador (simulando la señal de rizado de una onda rectificadas), hasta que vuelve a ser su valor inferior a la señal, si se es capaz de detectar cuándo se había dejado de seguir a la señal, se sabría inequívocamente la cadencia de la embarcación.

El primer paso fue diezmar la señal que, en este caso, se estableció un periodo de muestreo de 150ms, de esta forma, ya no había que acortar más el periodo para evitar el falso máximo tan recurrente en este apartado.

En el algoritmo implementado, para cada iteración, el valor de la variable valcomp (valor comparador) si se encuentra por debajo del valor de la señal, se le asigna éste. Si se encuentra

por encima del valor de la señal, decrece en 1 unidad y en el caso de que lo realice durante 4 iteraciones, que corresponden a 600ms de caída, entonces significa que cuando ha “perdido” a la señal, se trata de una nueva palada.

En la figura (20) se ve de forma gráfica.

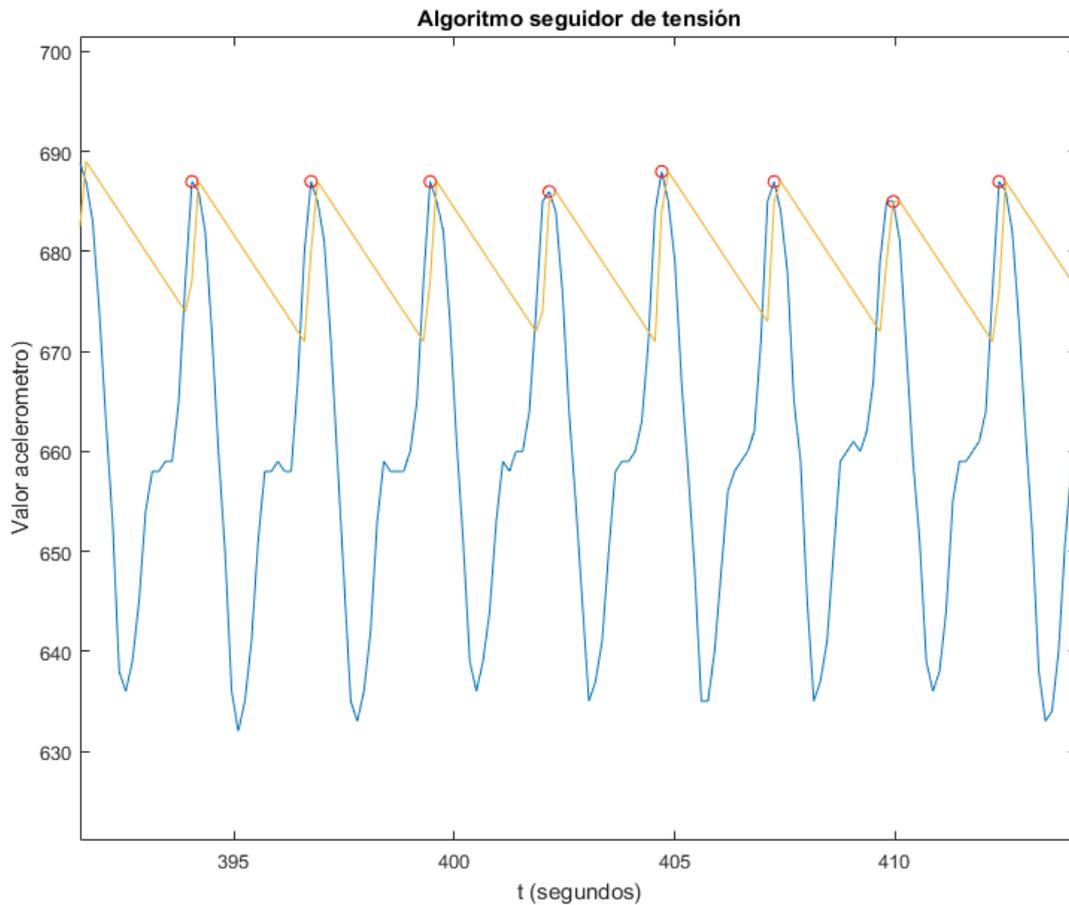


Figura (20) Algoritmo seguidor de tensión.

Sin nada más que esta simple lógica, el algoritmo funciona perfectamente a lo largo de toda la muestra, sin añadir ningún tipo de condición y sin falsear ninguna palada.

Desde este punto, se implementará la lógica para transformar la detección de cadencia en mostrar el valor de paladas por minuto. Para ello se tendrán en cuenta las tres paladas anteriores como puede observarse en la Figura (21).

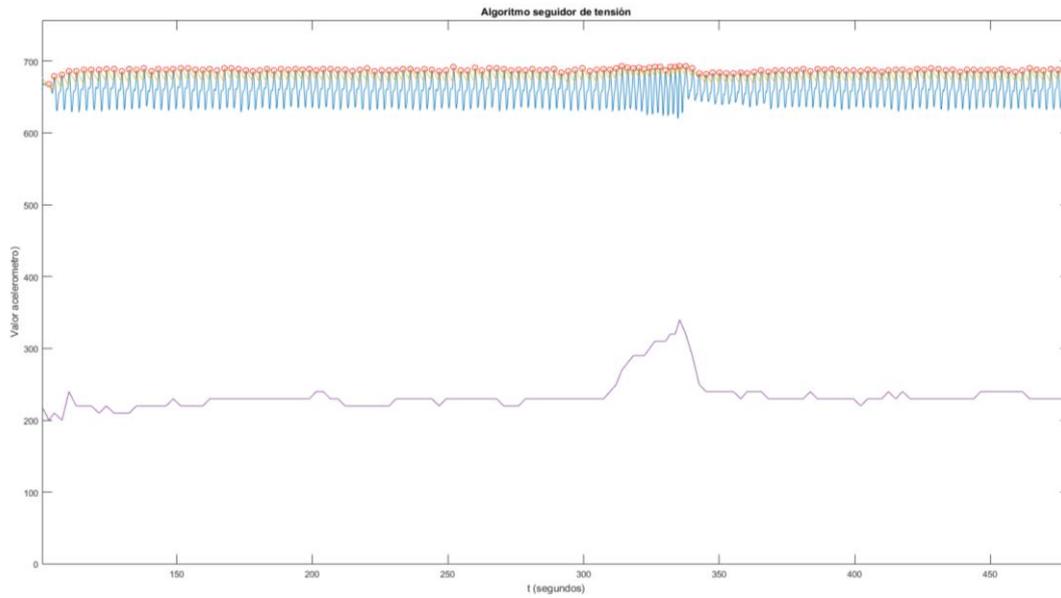


Figura (21) Algoritmo seguidor de tensión con cálculo de cadencia.

En la tabla (3) se ha establecido una métrica mediante la cual realizar una comparativa de los tres algoritmos empleados, de forma que se pueda elegir el óptimo.

	<b>Algoritmo Máximos y Mínimos</b>	<b>Algoritmo Integrador</b>	<b>Algoritmo Seguidor de tensión.</b>
<i>Resolución</i>	1 ppm	2 ppm	0.5 ppm
<i>T ejecución en Matlab</i>	79 ms	121 ms	28 ms
<i>Falsos positivos (sobre 402)</i>	27	16	0

Tabla (3) Comparativa de los tres algoritmos empleados.

## 4.2 GPS

El módulo GPS Neo 6M de UBlox, nos muestra en su “datasheet” las siguientes características:

- Alimentación a 3,3V, al tratarse de un módulo, permite 5V.
- Tiempo de enganche en cold start 32 segundos.
- Precisión de posición horizontal 2,5m.
- Precisión de velocidad 0.1 m/s.
- Límite de operación dinámico 4g.

En la figura (22) se observa el esquema de conexión que se ha utilizado para su integración en el proyecto.

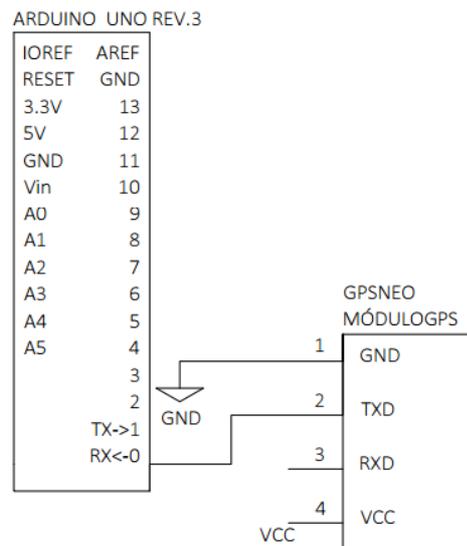


Figura (22) Esquemático del módulo GPS.

### 4.2.1 Configuración

Para su rápida configuración, se ha instalado el programa recomendado por el fabricante “u-center” en su versión 8.23 [5].

Como puede verse en la figura (23), para su conexión al ordenador se ha utilizado un Cable FTDI - 5V con el cual se puede alimentar directamente el módulo GPS a la vez que se ven las tramas NMEA que envía por su patilla TX.

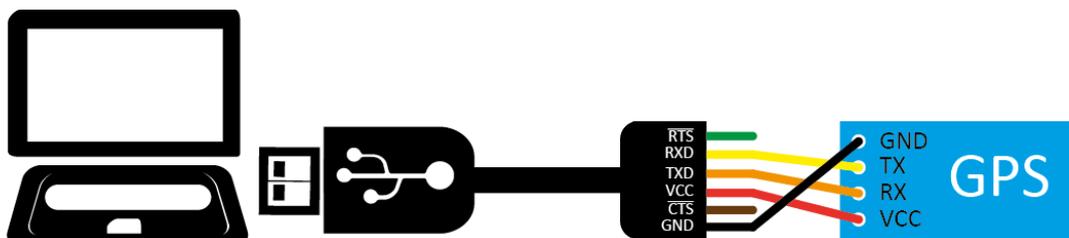


Figura (23) Esquema de conexión del GPS al ordenador.

La ventaja de este programa es que ha permitido la configuración mediante un sistema de ventanas y opciones, en el que se muestran en tiempo real las variables de una forma amigable.

La primera decisión fue elegir una de las muchas tramas que enviaba, ya que la aplicación requería conocer el desplazamiento y la velocidad de la embarcación.

**NMEA** tiene su propia versión de trama *GPS* básico pvt (posición, velocidad, tiempo) su nombre es RMC, (The Recommended Minimum), se puede ver detalladamente en la tabla (4), que tiene una forma similar a:

`$GPRMC,123519,A,4807.038,N,01131.000,E,022.4,084.4,230394,003.1,W*6A`

**<TRAMA NMEA \$GPRMC**

RMC	Recommended Minimum sentence C
123519	Fix taken at 12:35:19 UTC
A	Status A=active or V=Void.
4807.038,N	Latitude 48 deg 07.038' N
01131.000,E	Longitude 11 deg 31.000' E
022.4	Speed over the ground in knots
084.4	Track angle in degrees True
230394	Date - 23rd of March 1994
003.1,W	Magnetic Variation
*6A	The checksum data, always begins with *

Tabla (4) Explicación de la trama \$GPRMC

Para seleccionar las tramas que se quiere que envíe el módulo, se accede a:

- **View > Messages View > NMEA.** Figura (24).

Y se hace doble click en el nombre de las tramas que salgan en **negrita** de forma que solo quede en **negrita** la que se quiere mostrar, en este caso la GPRMC.

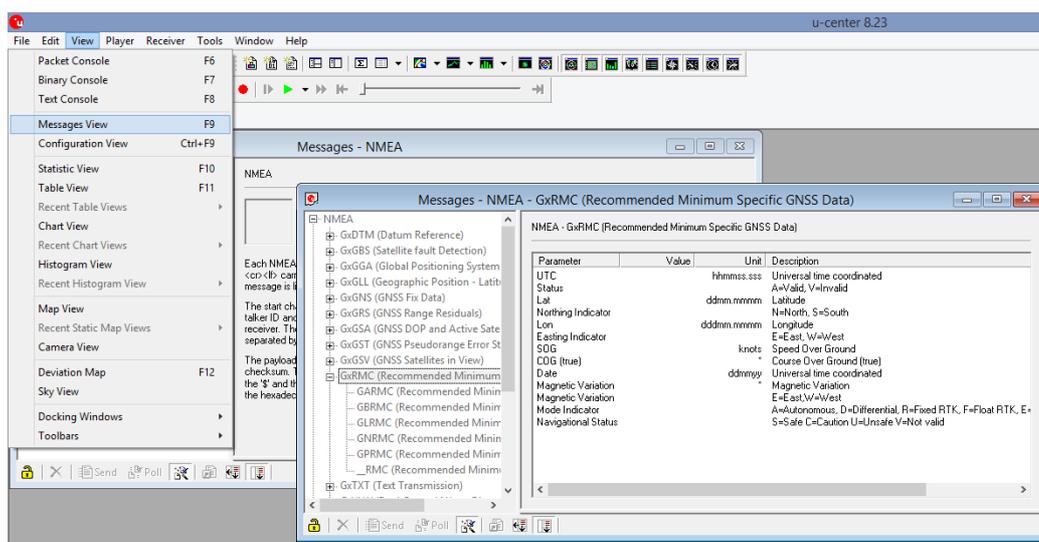


Figura (24) Explicación de la configuración para seleccionar la trama a mostrar.

Para configurar el modo de arranque, puesto que en los entrenamientos el punto de partida es siempre el mismo, es decir, siempre se sale del embarcadero, se quería que el *GPS* guardase los satélites y la posición en la que el *GPS* había sido desconectado. Por ello el modo de arranque que se estableció fue el hotstart, para ello accedemos a:

- **View > Configuration View > RST (Reset) > Startup Option.** Figura (25).]

Seleccionamos la opción “Hotstart”.

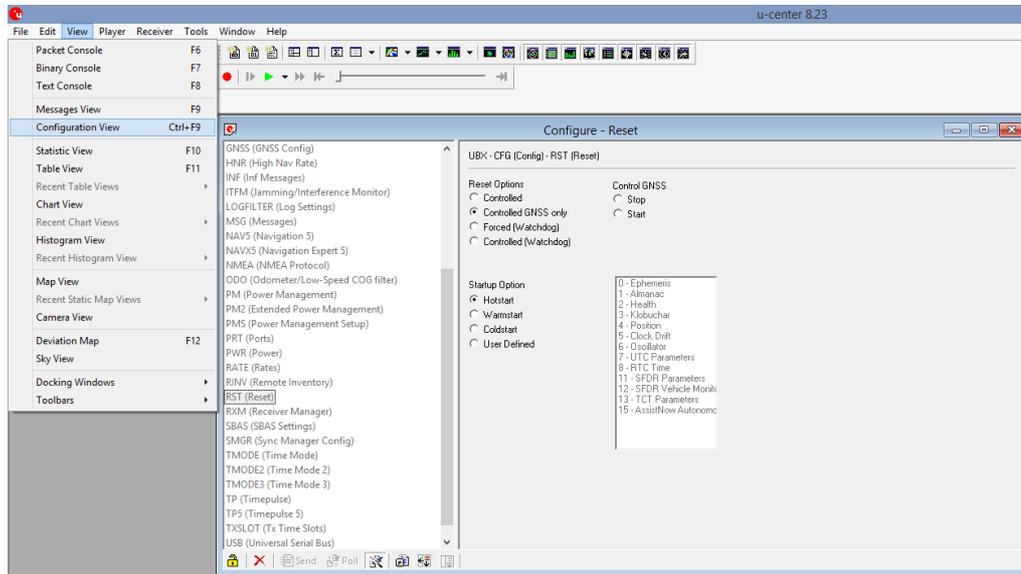


Figura (25) Explicación de la configuración del modo de arranque.

#### 4.2.2 Experimentación previa

Una vez configurado el *GPS*, se ha tomado la decisión de que para extraer los valores de las variables que interesaban, a través del microcontrolador, se realizaría la tarea en lugar de usar una librería. Debido a que nunca se había hecho uso de un *GPS* y al desconocer su funcionamiento se decidió implementar dicha tarea.

Se trata de un proceso cíclico que se dispara cada segundo. Para más información consúltese el Anexo Técnico.

#### 4.2.3 Elaboración del algoritmo.

Para el cálculo de la distancia recorrida del algoritmo, se han realizado distintas pruebas para determinar qué método era el óptimo tanto para calcular la distancia, como para calcular la influencia de la variación del radio de la Tierra en dicha tarea.

Para ello, se utilizaron los métodos más comunes para calcular distancias entre dos coordenadas terrestres y se compararon entre sí.

Con el método elegido como óptimo, se simularon los casos más desfavorables a la hora del cálculo de la distancia, que son, una distancia en el Ecuador y una distancia en el círculo Polar.

Los modelos más fieles a la realidad, son los modelos que suponen que la Tierra es una elipse perfecta o el modelo de geoide, que representa la Tierra tal y como es. El problema de estos métodos, es que requieren una complejidad de operaciones, que no se ajustan con el medio empleado para la obtención de los datos. Es decir, se ha utilizado un GPS de bajo coste con unos errores de posicionamiento que a pesar de no ser excesivamente alarmantes (+- 2,5m) y dadas las distancias que vamos a medir (máximo 2 km) resultaría contradictorio elegir los modelos de cálculo señalados. Estos modelos, son empleados en el cálculo de largas distancias en el globo terrestre e incluso para el trazado de planes de vuelo de compañías aéreas.

Por esto, el punto de partida será la utilización de modelos que suponen la Tierra como una esfera de radio constante. Siendo conscientes de que la Tierra es un elipsoide con un Radio Ecuatorial  $a=6378.137\text{Km}$  y un Radio Polar  $b=6356.752\text{Km}$ . Por tanto, utilizaremos el Radio medio para el elipsoide WGS84 en el que [6]:

$$R = \frac{1}{3}(2a + b) = 6371\text{Km}$$

De los distintos métodos encontrados, el calificado como más preciso es el que utiliza la fórmula trigonométrica del **Harverseno**:

$$hav(a) = \text{seno}^2\left(\frac{a}{2}\right)$$

De la que se puede obtener esta fórmula de distancia:

$$d = 2r * \arcseno\left(\sqrt{\text{seno}^2\left(\frac{Lat2 - Lat1}{2}\right) + \cos(lat1) * \cos(lat2) * \text{seno}^2\left(\frac{lon2 - lon1}{2}\right)}\right)$$

También se encontraron otros métodos como:

- **Ley esférica de Cosenos:** Del que se puede calcular la distancia como:

$$d = r \arccos(\text{seno}(Lat1)\text{seno}(Lat2) + \cos(Lat1) \cos(Lat2) \cos(Lon2 - Lon1))$$

- **Aproximación equirectangular:** Del que se puede calcular la distancia como:

$$d = r \sqrt{((Lon2 - Lon1)\cos\left(\frac{Lat1 + Lat2}{2}\right))^2 + (Lat2 - Lat1)^2}$$

- **Teorema de Pitágoras:** Del que se puede calcular la distancia como:

$$d = r\sqrt{(Lat2 - Lat1)^2 + (Lon2 - Lon1)^2}$$

Siendo en todas las fórmulas  $r$  el radio de la tierra y Latitudes y Longitudes en radianes. [6]

En la tabla (5) se han comparado los distintos métodos dando como exacta la aproximación obtenida por el método del Harverseno, se establecieron coordenadas que distaban entre sí X metros para calcular los Errores relativos de cada uno de ellos.

<b>Distancia Harversine</b>	<b>Err. Cosenos</b>	<b>Err. Aprox. Rectangular</b>	<b>Err. Pitágoras</b>
3,08m	0.021%	0.000%	0.000%
1412,89m	0.000%	0.000%	0.000%
14142,13m	0.000%	0.000%	0.000%
7293887,11m	0.000%	2.792%	7.234%

Tabla (5) Comparativa de errores relativos de cálculo de una distancia en función del método utilizado.

Como podemos observar, los errores cometidos en los rangos de desplazamiento a los que se está refiriendo este proyecto, son del todo insignificantes, por lo que el método empleado para el algoritmo será el más simple: **Pitágoras**.

El mayor error cometido en el cálculo de la distancia, no tendrá que ver con el método seleccionado, sino que vendrá dado por la simplificación de tomar la Tierra como una esfera, debido a la diferencia de radios Ecuatorial y Polar.

Para cuantificar este error, en la tabla (6) se calcularon los errores máximos debidos a la forma elipsoidal de la Tierra, que serán máximos en el punto de mayor y menor radio. Dando como válido el radio medio calculado anteriormente, se comprobará su eficacia en los casos extremos para una distancia equivalente al trazado de Zaragoza.

	<b>Radio Polar</b>	<b>Radio Ecuatorial</b>	<b>Radio Medio</b>
<i>Kilómetros</i>	6356Km	6378Km	6371Km
<i>Distancia(m)</i>	1409.57m	1414.45m	1412.90m
<i>Error Absoluto</i>	3.3m	1.55m	
<i>Error Relativo</i>	0.24%	0.11%	

Tabla (6) Errores de cálculo al asumir el modelo esférico terrestre.

Una vez conocidos los Errores Relativos máximos, para una mejor comprensión, en la tabla (7) se compara, dada una distancia recorrida, el Error Absoluto que se cometería al realizar la aproximación de la Tierra Esférica.

<b>Distancia (m)</b>	<b>Error Polar (m)</b>	<b>Error Ecuatorial (m)</b>
1m	0.00m	0.00m
100m	0.24m	0.11m
1000m	2.36m	1.10m
2000m	4.72m	2.20m
5000m	11.80m	5.49m
10000m	23.60m	10.98m

Tabla (7) Errores absolutos Polar y Ecuatorial.

Para el cálculo del tiempo a los 500 metros del algoritmo, se ha empleado el dato más preciso del se dispone, puesto que la trama GPS RMC empleada en este apartado, dispone de una variable de velocidad en nudos.

Sabiendo que:

$$\text{nudos} * 0.51444 = \frac{m}{s} \quad \left(\frac{m}{s}\right)^{-1} = \left(\frac{s}{m}\right), \quad \left(\frac{s}{m}\right) * 500 = \frac{s}{500m}$$

Se obtiene simplificando las operaciones para que se ejecuten más eficientemente:

$$\frac{s}{500m} = \frac{971.93}{\text{nudos}}$$

Que realizando esta operación se obtendrá el valor de la variable deseada en las unidades deseadas.

### 4.3 Pantalla.

En este apartado se hablará del primer contacto con la pantalla y el patillaje utilizado en su uso. Además del modo de representación de los datos.

En la figura (26) se puede observar el esquemático de cómo se ha realizado la conexión de la pantalla en el que se ha incluido el potenciómetro recomendado por el fabricante, así como la resistencia para limitar la corriente de la iluminación.

Para su comunicación con el microcontrolador se ha optado por usar solamente 4 patillas de datos, y su tensión de alimentación es 5V, como en el resto del proyecto.

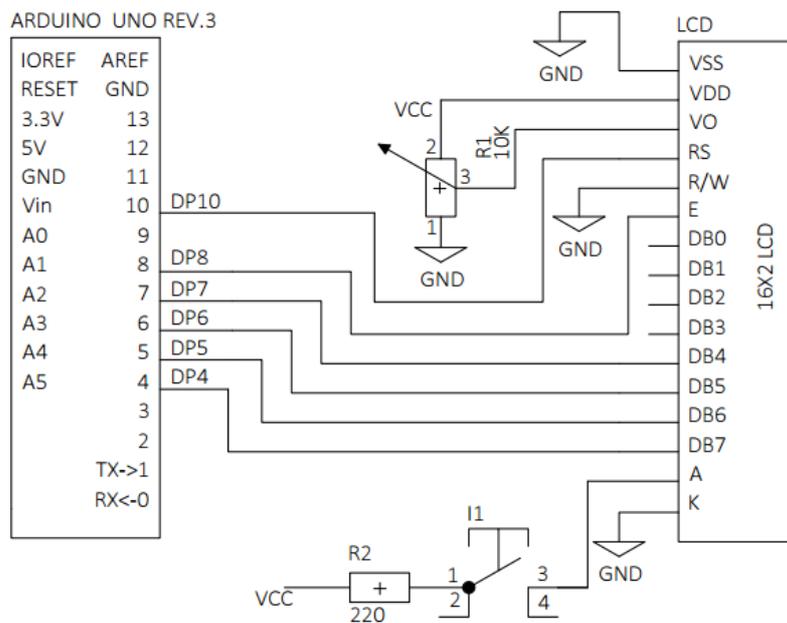


Figura (26) Esquemático de la conexión de la pantalla LCD.

En su estructura de representación de datos se quiere que se muestren las siguientes variables relevantes para el deportista:

- Tiempo de entrenamiento.
- Paladas por minuto.
- Tiempo a los quinientos metros.
- Distancia recorrida.

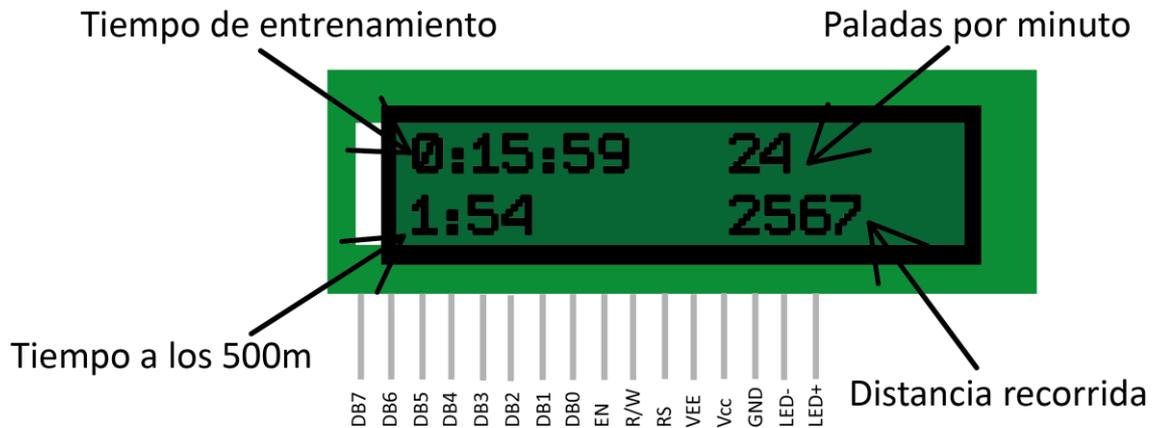


Figura (27) Estructura de representación de datos en la pantalla.

Como se puede observar, el nombre de las variables no aparece en la pantalla, ya que se supone que vendrían serigrafados en la carcasa del dispositivo. Por este motivo se han incluido en la figura (27), para una fácil comprensión.

El formato de representación de las distintas variables será el siguiente.

- **Tiempo de entrenamiento:** será mostrado como "hh:mm:ss". Es decir, tendrá un rango de representación desde 0 minutos y 0 segundos hasta 23 horas, 59 minutos y 59 segundos. Si se alcanzase ese valor, la variable se reiniciaría al valor inicial.
- **Paladas por minuto:** será mostrada como un número entero y tomará valores entre 15 y 45. Debido a que cualquier valor fuera de ese rango no corresponde con ningún ritmo empleado en este deporte.
- **Tiempo a los quinientos metros:** será mostrado como "m:ss". Tendrá un rango de representación desde 1 minuto y 0 segundos hasta 9 minutos y 59 segundos. Debido a que cualquier valor fuera de ese rango no corresponde con ningún ritmo empleado en este deporte.
- **Distancia recorrida:** será mostrada como "dddd". Tendrá un rango de representación desde 0 hasta 65535 metros. Si se superase ese valor, la variable se reiniciaría a su valor inicial.

## 4.4 Botones

En este apartado se hablará de cómo interactúa el deportista con el dispositivo.

Para el encendido y apagado del dispositivo, en un futuro dispositivo, se usaría un interruptor que le diese alimentación a todo el circuito, pero al tratarse de un prototipo montado en shields de Arduino, el control on/off vendrá dado por la conexión o no del Arduino mediante el cable USB

La posible iluminación de la pantalla, vendrá dada por el uso de un **interruptor** de forma que se pueda encender fácilmente antes de cada entrenamiento.

Dispondrá también de un **pulsador** que reinicie el entrenamiento, es decir, que lleve las variables:

- Tiempo de entrenamiento.
- Distancia recorrida.

A su valor inicial, 0.

Tendrá otro **pulsador** que permitirá al deportista pausar el entrenamiento y reanudarlo, es decir, pausará y reanudará la actualización de los datos de las variables:

- Tiempo de entrenamiento.
- Distancia recorrida.

Respecto a los interruptores, no se tomará ninguna medida adicional aparte del funcionamiento explicado en este punto, pero para los pulsadores se implementará un filtrado anti rebotes vía software de forma que no sea necesario usar un circuito RC como se puede observar en la figura (28).

Para la interpretación de los pulsadores por parte del microcontrolador se utilizarán los pines digitales del microcontrolador que permiten interrupciones Hardware. De esta forma, se configurarán mediante el método `attachInterrupt()` que permitirá realizar las acciones necesarias cuando se dispare la interrupción por flanco.

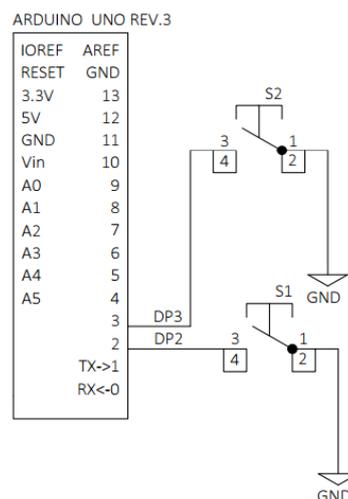


Figura (28) Esquemático de los pulsadores.

## 5 Diseño de la Arduino “protoboard”.

Para simplificar la realización del prototipo, la forma empleada para ello ha sido mediante la superposición de dos “protoboards” para Arduino, de forma que se pudiese realizar en un tiempo mínimo y quedase lo más parecido posible al hipotético dispositivo final.

El esquema de montaje que se llevó a cabo fue mediante placas preparadas para colocar componentes fácilmente sin tener que hacer el ruteado de las pistas, de forma que las pistas se implementaban con cables directamente. Se determinó que se usarían dos alturas:

- La primera, en la que se colocarían El módulo Acelerómetro y el módulo *GPS*
- La segunda, en la que se colocaría la interfaz de comunicación con el usuario.

De esta forma, en el nivel inferior se han colocado las partes del proyecto que no requieren que el usuario perciba su presencia, y en el nivel superior se han alojado las partes que formaban parte de la interfaz de comunicación con el usuario.

### 5.1 Esquemático

Los módulos de acelerómetro y *GPS*, se conectaron como puede verse en la figura (29), se dispusieron en una protoboard encajada a la tarjeta de Arduino.

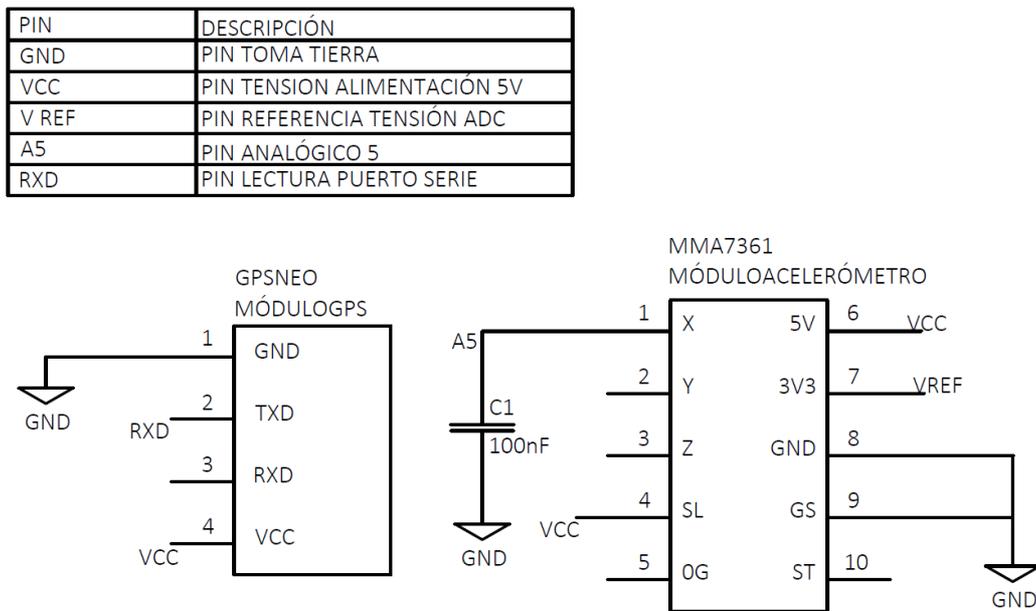


Figura (29) Esquema de conexión de la protoboard del nivel 1.

Los pulsadores y la pantalla, se colocaron en la segunda protoboard como puede verse en la figura (30) de forma que quedasen al alcance del deportista. Esta protoboard está colocada encima de la anterior.

Detector de cadencia para embarcación de remo basada en GPS y acelerómetro.

PIN	DESCRIPCIÓN
VCC	PIN TENSION ALIMENTACIÓN 5V
GND	PIN TOMA TIERRA
DP2	PIN DIGITAL 2
DP3	PIN DIGITAL 3
DP4	PIN DIGITAL 4
DP5	PIN DIGITAL 5
DP6	PIN DIGITAL 6
DP7	PIN DIGITAL 7
DP8	PIN DIGITAL 8
DP10	PIN DIGITAL 10

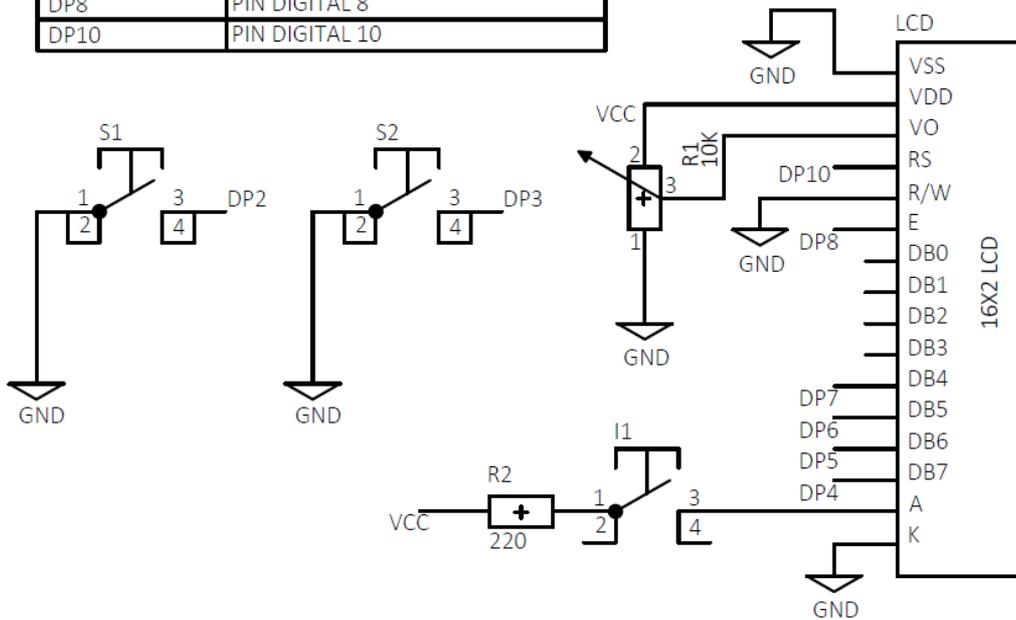


Figura (30) Esquema de conexión de la protoboard del nivel 2.

## 5.2 Resultado

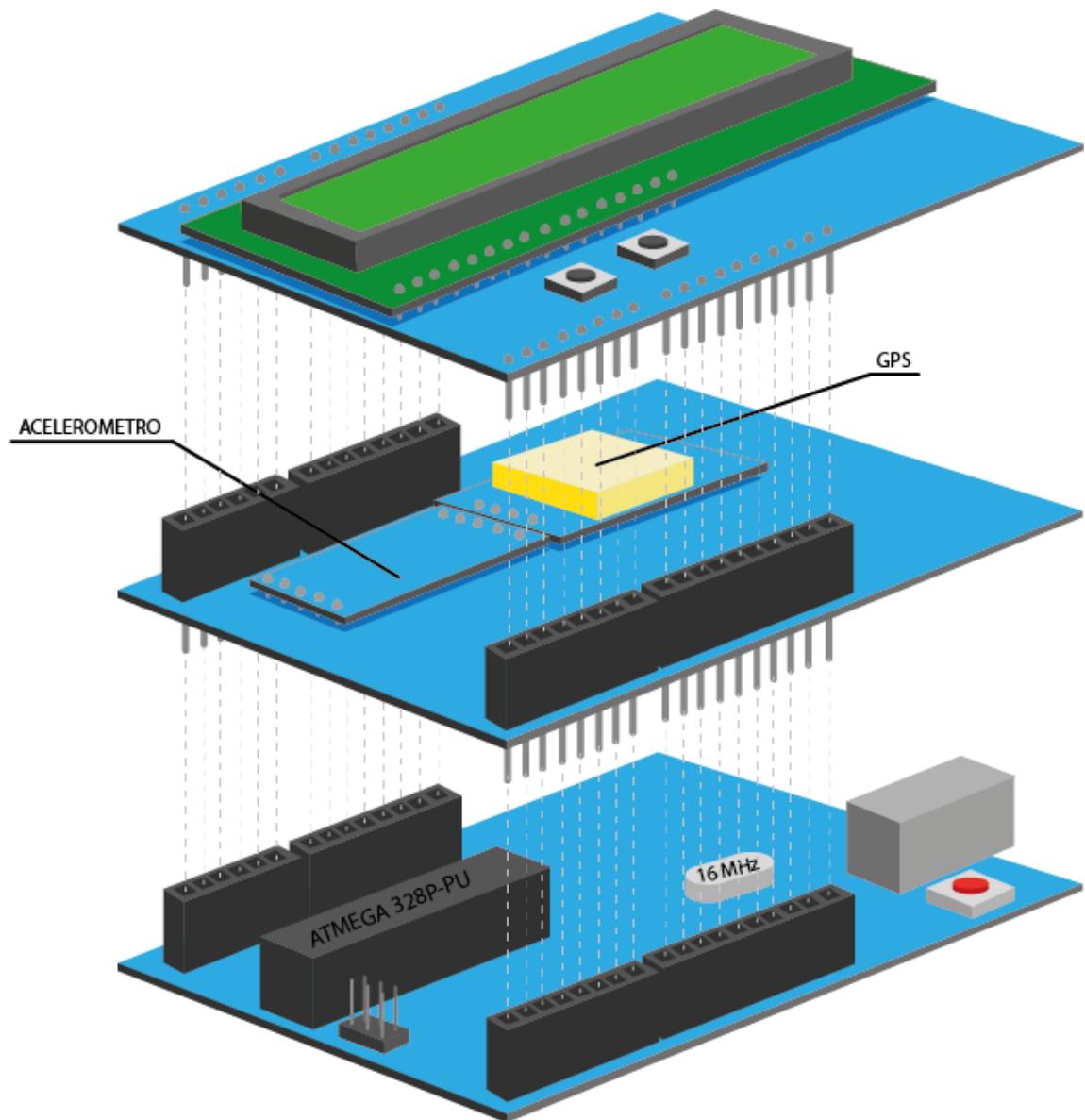


Figura (31) Vista descriptiva isométrica del prototipo.

Detector de cadencia para embarcación de remo basada en GPS y acelerómetro.



*Figura (31) Foto del prototipo.*

### 5.3 Estudio de consumo.

El consumo del dispositivo realizado es de 100mA a una tensión de 5V. Sin tener en cuenta de que se trata de un prototipo, y en un posible dispositivo, las partes no serían modulares, las tensiones de alimentación serían a 3,3V y se podría realizar un estudio más avanzado para poner todas las partes del proyecto en modo de bajo consumo cuando no se están utilizando.

Por esto, el caso a estudio, corresponde a un escenario muy pesimista en cuanto a la duración de las baterías del dispositivo.

Partiendo de los datos observados del consumo, cabría la posibilidad de alimentar el dispositivo con:

- Una pila de 9V recargable de 600mAh. De forma que la vida del dispositivo sería de 6 horas.
- Cuatro pilas AA de 1,5V recargables de 2800mAh. De forma que la vida del dispositivo sería de 28 horas.

En los dos casos, al tratarse de una alimentación conectada a una placa de Arduino, se haría uso del regulador de tensión que incluye la placa, cuyo límite de amperaje es 1 A, e incluye los condensadores de filtrado para estabilizar dicha tensión.

En el caso de un dispositivo final, se barajaría el uso de una batería de ion litio.

## 6 Presupuesto

	<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio (€)</b>
<b>1</b>	Placa Arduino UNO REV 3	1	20,95	20,95
<b>2</b>	Módulo de acelerómetro MMA7361	1	3,75	3,75
<b>3</b>	Módulo GPS NEO-6M	1	14,99	14,99
<b>4</b>	ARDUINO PROTO PCB SHIELD REV3	2	4,44	8,88
<b>5</b>	Pulsador DIP P4	2	0,04	0,08
<b>6</b>	Condensador cerámico 100nF	1	0,05	0,05
<b>7</b>	Potenciómetro 10k	1	2,17	2,17
<b>8</b>	Pines macho hembra de 10 vías	4	0,54	2,16
<b>9</b>	<b>Coste del Hardware:</b>			53,03
<b>10</b>	<b>Horas de desarrollo:</b>	300	0	0

## 7 Bibliografía.

- [1] Chris Pulman, "The Physics of Rowing", Gonville & Caius College, University of Cambridge, 2017.
- [2] Mathworks, "Matlab reference, Data Import and Analysis", 2017.
- [3] Arduino, "Arduino Uno Rev3 schematic", 2010.
- [4] Steven W. Smith, "The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing",
- [5] U-centre, "GNSS evaluation software for Windows", 2015.
- [6] Juan de Sanjose Blasco, J., Martinez Garcia, E. y López Gonzalez M., "Topografía para estudios de grado. Geodesia, cartografía, fotogrametría y seguridad del topógrafo.", 2009