



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Dispositivo electrónico para el entrenamiento en
piragüismo

Electronic device for canoeing training

Autor/es

Iván Tomás Mora

Director/es

Bonifacio Martín del Brío

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Electrónica y Automática

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2020



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe entregarse en la Secretaría de la EINA, dentro del plazo de depósito del TFG/TFM para su evaluación).

D./D^a. Iván Tomás Mora , 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)
Grado en Ing. Electrónica y Automática (Título del Trabajo)
Dispositivo electrónico para el entrenamiento en piragüismo

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

Zaragoza, a 12 de septiembre de 2020

Fdo: Iván Tomás Mora

RESUMEN

En este proyecto se ha desarrollado un sistema electrónico para el entrenamiento en piragüismo, basado en la medición de la aceleración de la embarcación y que permite obtener datos sobre el ritmo de paladas o la inclinación de la piragua, así como enviar los datos en tiempo real al entrenador que se encuentra en la orilla.

Tras el estudio de las diferentes alternativas para la obtención de los datos necesarios, se ha construido un prototipo electrónico capaz de registrar durante un entrenamiento posición, velocidad, ritmo de paladas, desplazamiento de la embarcación y nivel de inclinación de la embarcación. Este prototipo cuenta también con un modo de grabación en alta resolución, que permite almacenar los valores de la aceleración a una frecuencia 800 muestras por segundo, para realizar un posterior análisis intensivo de la técnica de palada.

Finalmente, se ha incorporado en el sistema electrónico un subsistema de comunicaciones que hace uso de la banda libre de 433 MHz, consiguiendo transmitir a una distancia de 100 metros hasta 60 datos por segundo, permitiendo al entrenador ver todos los datos en tiempo real. Se pueden alcanzar mayores distancias a costa de reducir la velocidad de comunicación y los datos que se reciben online.

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido	1
1. Introducción	3
1.1. Estado actual	3
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Principio de funcionamiento	4
Planificación de las actividades	8
2. Análisis de las posibles soluciones	9
2.1. Plataforma	9
2.2. Sensores	9
2.2.1. Movimientos de la embarcación	10
2.2.2. Desplazamiento de la embarcación	11
2.3. Gestión de los datos	12
2.3.1. Visualización por el palista	12
2.3.2. Envío al entrenador	13
2.3.3. Almacenamiento	14
3. Diseño del hardware	14
3.1. Plataforma	14
3.2. Acelerómetro	16
3.3. Módulo GPS	16
3.4. Pantalla	17
3.5. Módulo de comunicaciones	17
3.6. Almacenamiento	18
4. Diseño del software	19
4.1. Modo entrenamiento	20
4.1.1. Medición de las aceleraciones	20
4.1.2. Ritmo de paladas	20
4.1.3. Posición y velocidad	23
4.1.4. Inclinación del barco	23
4.1.5. Desplazamiento de la palada	24
4.1.6. Comunicaciones	26
4.1.7. Almacenamiento	26
4.1.8. Pantalla	27
4.1.9. Espera inteligente	27
4.2. Modo técnica	28
4.2.1. Medidas de la aceleración	28

4.2.2.	Comunicaciones	28
4.2.3.	Almacenamiento	29
5.	<i>Prototipo desarrollado</i>	30
5.1.	Módulo principal	30
5.2.	Módulo auxiliar	31
5.3.	Resultados obtenidos	31
5.3.1.	Velocidad y rango de las comunicaciones	31
5.3.2.	Datos obtenidos	32
5.3.3.	Consumo de energía	35
5.4.	Mejoras futuras	36
6.	<i>Conclusiones</i>	36
7.	<i>Bibliografía</i>	38
	<i>Anexo I. Datasheet ATMEGA2560</i>	40
	<i>Anexo II. Datasheet ADXL345</i>	58
	<i>Anexo III. Datasheet HC-12</i>	66
	<i>Anexo IV. Datasheet NEO-6</i>	77
	<i>Anexo V. Datasheet HT1621</i>	95
	<i>Anexo VI. Código implementado</i>	102

1. INTRODUCCIÓN

El piragüismo, al igual que la mayoría de deportes de desplazamiento, se entrena trabajando en diferentes niveles de ritmo pero, a diferencia de otros deportes, estos ritmos son imposibles de estimar utilizando la velocidad de desplazamiento. Esto es debido a que la superficie sobre la que se aplica la fuerza, el agua, también se está desplazando, y además lo hace variando la velocidad en función de la morfología del río. Así pues, es necesario buscar otros métodos para definir el ritmo del entrenamiento.

Existen tablas como la que tienen como objetivo explicar a los palistas a distinguir los diferentes ritmos de entrenamiento (Fig. 1).

RITMO	PULSO	PALADAS/MIN	VEL / RITMO 1000	RITMO SUBJETIVO	OBJETIVO DEL ENTRENAMIENTO
R1	130-150	55-65	HS= 4'50" HC, HV= 5'00" MJ, HI=5'20" MC = 5'40"	Ritmo más alto que se puede mantener por más de una hora de paleo continuo	UMBRAL AEROBICO. Capacidad de regeneración, capacidad aeróbica, volumen cardiaco, aumento de transporte sanguíneo.
R2	160-165	70-75	HS= 4'20" HC, HV= 4'35" MJ, HI=5'10" MC = 5'25"	Ritmo más alto que podemos mantener en 8000-10000mts	UMBRAL ANAERÓBICO. Capacidad de regeneración, sistema cardiovascular y resistencia muscular.
R2+	170-175	80	HS= 4'10" HC, HV= 4'25" MJ, HI=5'00" MC = 5'15"	Ritmo más alto que podemos mantener en 6000mts	UMBRAL ANAERÓBICO2. Capacidad de regeneración, sistema cardiovascular y resistencia muscular. Sistemas tampón, aumento consumo de oxígeno.
R3	180	85-90	HS= 4'00" HC, HV= 4'15" MJ, HI=4'45" MC = 5'00"	Ritmo más alto que podemos mantener en 3000-4000mts	CONSUMO DE OXIGENO. Aumento de la capacidad del consumo de oxígeno en un tiempo. Mejora resistencia láctica. Capacidad aeróbica.
R3+	>180	95-100	HS= 3'50" HC, HV= 4'05" MJ, HI=4'40" MC = 4'50"	Ritmo más alto que podemos mantener en 1500-2000mts	CONSUMO DE OXIGENO MÁXIMO. Aumento del punto máximo de consumo de oxígeno, mejora de resistencia láctica y potencia aeróbica
R4	--	Máximas	Máxima Vel	Ritmo de máxima velocidad soportando fatiga y máximo esfuerzo. 1'30"-4'	CAPACIDAD LACTICA- RESISTENCIA LACTICA. Entrenamiento para aguantar la máxima velocidad y ritmo soportando altos niveles de ácido láctico en el cuerpo (FATIGA).
R5	--	Máximas	Máxima Vel	Ritmo para alcanzar la máxima potencia y velocidad. 30"-1'	POTENCIA LACTICA – PRODUCCION LACTICA. Entrenamiento para la máxima producción de ácido láctico (> energía producida=+ potencia, +velocidad)
R6	--	Maximas	Máxima Vel	Máxima velocidad sobre la máxima frecuencia y amplitud. 5"-20"	CAPACIDAD Y POTENCIA ALACTICA. VELOCIDAD. Desarrollo de máxima frecuencia, amplitud y velocidad sin ácido láctico. Entrenamiento neuromuscular.
R7	--	COMPET.	COMPETICION	RITMO DE COMPETICION	RITMO DE COMPETICIÓN. Entrenamiento de la frecuencia y velocidad de competición. Tiempos de paso, cambios de ritmo.

Fig. 1: Identificación de los ritmos de entrenamiento [1]

1.1. ESTADO ACTUAL

El método actual de cálculo del ritmo del entrenamiento más utilizado es la frecuencia cardíaca, principalmente por la gran cantidad de pulsómetros deportivos que permiten su medición.

Pero este método tiene algunos problemas, entre ellos, el incremento de la frecuencia cardíaca al encontrarse una situación de inestabilidad. Esto hace que, por ejemplo, al ir en formación, las pulsaciones suban mientras que el esfuerzo que se está desarrollando es menor.

Por ello, para los entrenamientos en los que se ha de trabajar a un ritmo constante, se suele utilizar el ritmo de paladas, pero los problemas para su medición hacen que la herramienta más común para mantener el ritmo sea un metrónomo como los utilizados en música, los cuales tienen el problema de que hay que parar en el caso de querer cambiar el ritmo, además de la molestia que supone el tener un pitido permanentemente sonando. Durante el 2019 intentamos utilizar un metrónomo programable que habíamos desarrollado, que nos permitía introducir

diferentes ritmos de paladas para que fuesen cambiando según el entrenamiento, pero la molestia del sonido ha provocado que ahora únicamente sea utilizado para las pruebas de esfuerzo.

En los últimos años han aparecido diferentes aplicaciones para el teléfono móvil que prometen medir el ritmo de paladas. Las primeras estaban orientadas al remo, lo que provocaba que las paladas no se detectasen correctamente, seguramente por la diferencia de magnitudes y los movimientos más irregulares del piragüismo.

La primera aplicación enfocada al piragüismo vino de la mano del principal fabricante de piraguas, Nelo [2], en 2015, pero no fue muy bien acogida debido a que en la mayoría de dispositivos la medición del ritmo era errónea. Actualmente han aparecido otras aplicaciones como [3], pero su uso no está muy extendido debido al riesgo que existe de colocar el móvil tan cerca del agua.

El entrenador tampoco tiene mucha información acerca del entrenamiento que están realizando sus palistas ya que, en la mayoría de las ocasiones, la vegetación presente en las orillas del río dificulta mucho la visión. Esto no es problema para los clubes grandes, ya que tienen una lancha motora en la que el entrenador puede asegurar el correcto desarrollo del entrenamiento, pero en el caso de la mayoría de los equipos se ven muy limitados para realizar estas valoraciones.

Por otro lado, el análisis de la técnica de palada no ha cambiado demasiado en los últimos años, a través del visionado directo del palista, solo que con la popularización de la grabación en cámara lenta se ha conseguido mejorar considerablemente estos análisis. Existen multitud de programas para el análisis de los vídeos de la técnica, pero la herramienta más utilizada es [4], la cual permite seguir puntos concretos para analizar su movimiento a lo largo del gesto del paleo.

Los análisis de aplicación de la fuerza se realizan utilizando galgas extensométricas [5], bien sea colocadas en la pala o en el reposapiés, pero esto se reserva únicamente a los palistas de las selecciones nacionales.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este proyecto es el desarrollo de una herramienta que permita la realización de un análisis de la técnica de paleo basado en la forma de aplicación de la fuerza durante la palada, registrando los movimientos del barco para estudiar su comportamiento e identificando si la técnica se está aplicando correctamente. Además, permitirá la realización de entrenamientos basados en el ritmo de paladas, ofreciendo la información de éste tanto al palista como al entrenador que se encuentra en la orilla.

Para diseñar un dispositivo electrónico que realice estas funciones será necesario elegir los sensores adecuados, realizar un prototipo y desarrollar un algoritmo capaz de comunicarse con los sensores y realizar el análisis de los datos.

1.2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento del dispositivo va a ser la medición de las aceleraciones, y por lo tanto las fuerzas, que sufre la embarcación a lo largo de la palada. A continuación, vamos a analizar el gesto técnico para identificar las fuerzas que podrían aparecer. Denominaremos los ejes de la embarcación de la siguiente manera (Fig. 2).

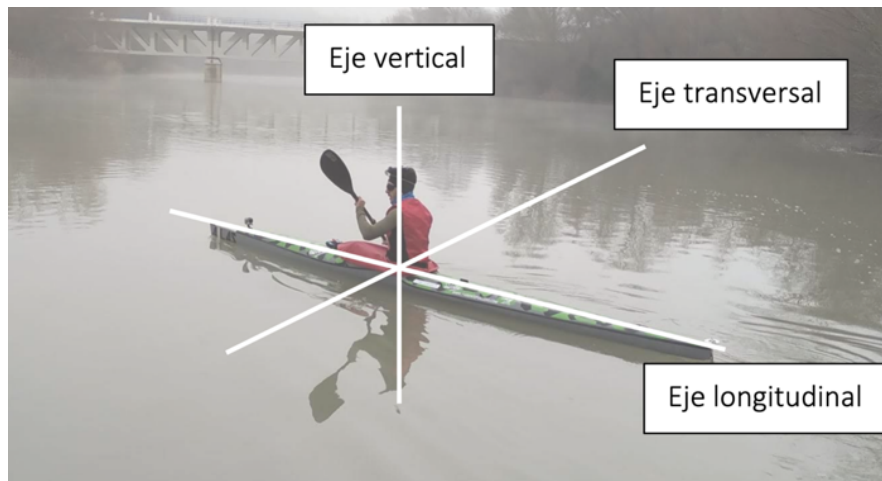


Fig. 2: Identificación de los ejes en la piragua

La palada se suele dividir en dos fases principales, la fase aérea y la fase acuática, así que vamos a analizar cada una por separado.

La fase aérea son aquellos momentos en que la pala no se encuentra en contacto por el agua. Por este motivo, en esta fase no van a aparecer más fuerzas que la de rozamiento, la cual será mayor cuanto mayor sea la velocidad. El resto de los movimientos que se puedan producir en esta fase, tanto verticales como de rotación en torno al eje longitudinal, serán consecuencia del desequilibrio generado durante la fase acuática.

La fase acuática, por otro lado, es la que consigue que la embarcación se desplace. Se divide, a su vez, en otras tres fases: la fase de ataque, la fase de aplicación de la fuerza, y la fase de salida de la pala.

El ataque es la entrada de la pala en el agua hasta que la hoja se encuentra totalmente sumergida. La pala ha de introducirse a la misma velocidad a la que está pasando el agua en relación con el barco, ya que si se realiza a una velocidad mayor la fuerza se transmitirá al eje vertical debido a que la pala se encuentra mirando hacia el agua (Fig. 3), y si se realiza a una velocidad menor la pala será arrastrada por el agua y frenará la embarcación. En caso de producirse una inclinación del barco en esta fase, no sería debido a la fuerza aplicada en la pala, sino a la fuerza aplicada en el reposapiés antes de tener un apoyo fijo en el agua, lo cual debería limitarse a la siguiente fase.

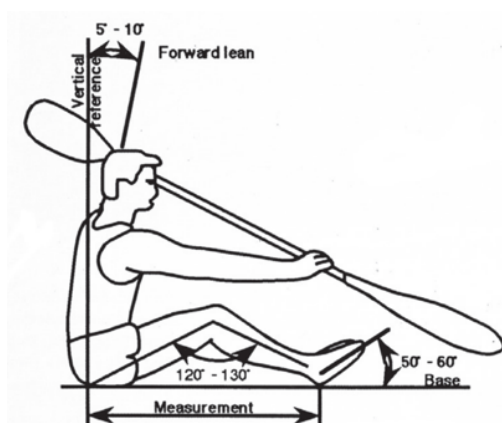


Fig. 3: Comienzo de la fase de ataque [5]

La aplicación de la fuerza se realiza una vez la pala está totalmente sumergida en el agua. Para ello, se aplicará fuerza sobre el reposapiés de la embarcación por el lado de paleo, de tal manera que el tronco rote y la pala sea arrastrada hacia atrás. La trayectoria de la pala en el agua comienza cerca del casco de la embarcación y se va alejando conforme avanza la fase (Fig. 4).

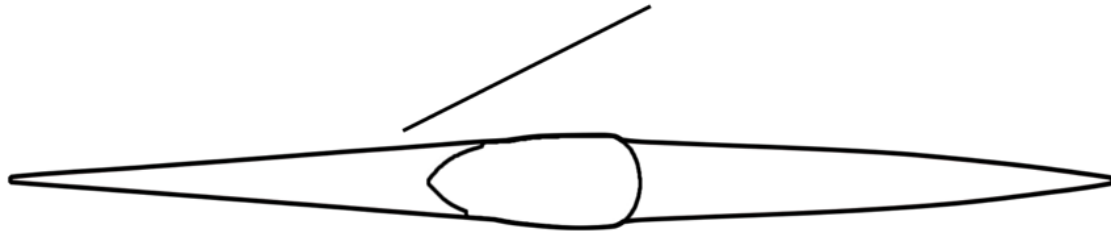


Fig. 4: Trayectoria de la pala en el agua

Esta trayectoria es causada por la asimetría en la forma de la hoja de la pala, la cual es más gruesa en la zona exterior y, además, genera un efecto similar a la fuerza de sustentación en las alas de los aviones (Fig. 5).

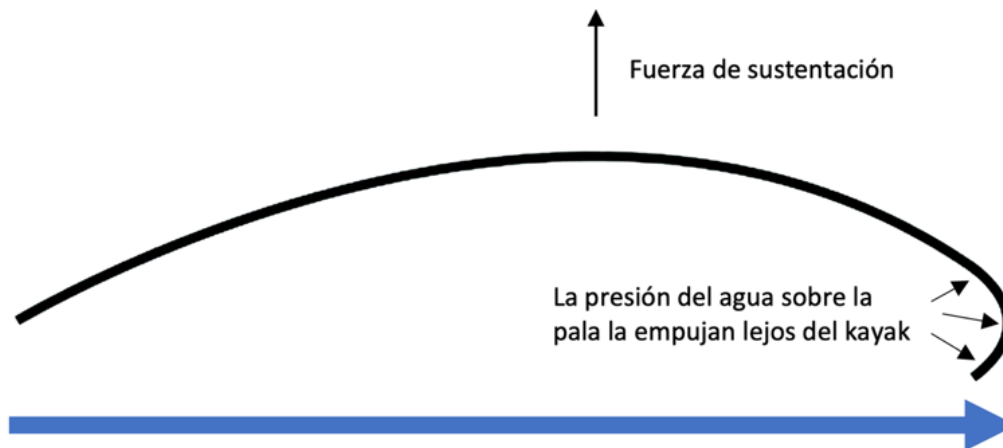


Fig. 5: Sección transversal de la hoja de kayak, con las fuerzas que actúan sobre ella

En esta fase es común, sobre todo en fases de iniciación, desplazar la pala utilizando los músculos de los brazos, forzándola para que siga una trayectoria paralela a la embarcación. Esto provocará que el palista tenga que compensar esta fuerza para evitar volcar y se produzca una inclinación del barco hacia el lado contrario.

La salida de la pala ha de ser rápida, conforme la hoja se aleja de la embarcación la pala va perdiendo su verticalidad hasta que, más o menos cuando pasa a la altura de la cadera, sale del agua. En el caso de que el palista haya forzado la trayectoria de la pala para que vaya paralela a la embarcación, la salida de esta pala se producirá con la hoja mirando hacia arriba, lo que generará que la embarcación bote y se incline hacia el lado contrario, desestabilizando también la fase aérea.

De cara a la distribución de las fuerzas en el eje longitudinal, existen diferentes estilos de paleo (Fig. 6). En las competiciones de distancias cortas se aplica toda la fuerza al inicio de la fase de aplicación de la fuerza, que es cuando se encuentra la mayor verticalidad de la pala, haciendo que la pala salga rápido del agua y así conseguir una mayor frecuencia de paladas. En el otro lado,

en las competiciones de maratón no se puede mantener un ritmo alto de paladas durante toda la competición, por lo que la fuerza se reparte más entre toda la fase.

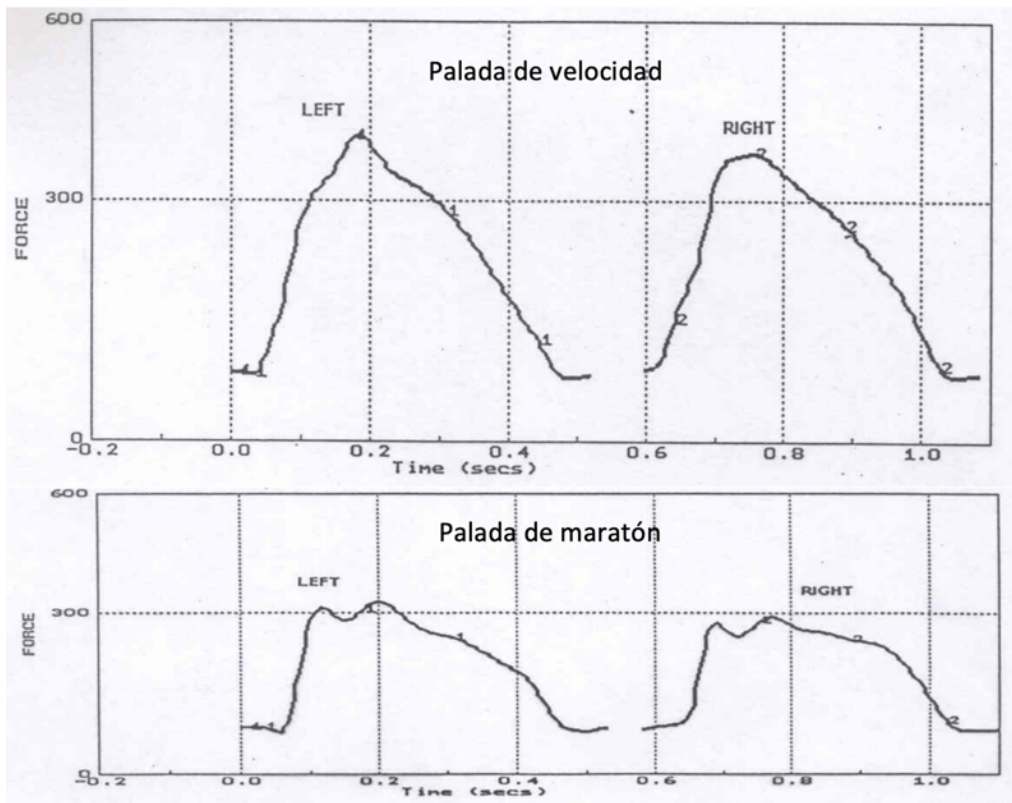


Fig. 6: Diferencias en el tiempo de aplicación de la fuerza [5]

En el caso de la canoa las fuerzas serán bastante similares (Fig. 7), pero al llevar la hoja plana la trayectoria de esta por el agua será paralela a la embarcación. Además, al no llevar timón, el control de la dirección se realiza modificando esta trayectoria en las fases de ataque y salida de la pala, conocidas como timoneo.

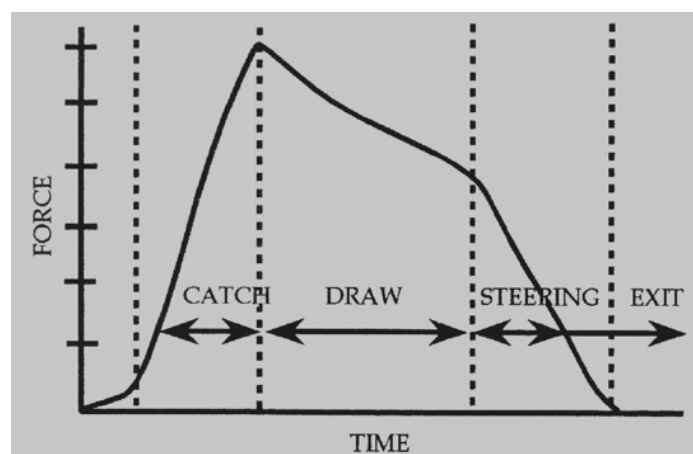


Fig. 7: Gráfico de aplicación de la fuerza en la canoa [5]

Así pues, el cálculo del ritmo de paladas se podrá realizar mediante la detección de la fuerza aplicada en el eje longitudinal de la embarcación, y un buen estimador de la técnica de paleo será el ángulo de inclinación de la embarcación.

PLANIFICACIÓN DE LAS ACTIVIDADES

En este primer capítulo hemos analizado las necesidades del producto, así como las diferentes alternativas disponibles actualmente y los principios de funcionamiento que utilizaremos.

En el capítulo 2 se estudiarán las diferentes soluciones que podríamos utilizar para la fabricación del producto. También se analizarán la forma de obtención de los diferentes datos necesarios y las alternativas para la comunicación con el palista y el entrenador.

Los componentes se escogerán en el capítulo 3, comentando las características principales y el modo de conexión de cada módulo.

En el capítulo 4 se explica el algoritmo utilizado para la comunicación con los sensores, así como el cálculo de las diferentes variables y el envío de los resultados.

En el capítulo 5 se analiza el prototipo desarrollado y los resultados obtenidos, también se analizan los datos de consumo y se proponen mejoras a realizar para la comercialización del producto.

Por último se presentan las conclusiones del proyecto, tanto del trabajo realizado como del potencial de la herramienta.

En el diagrama de Gantt (Fig. 8) se pueden ver la distribución en el tiempo de las tareas realizadas.

	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
<i>Estudio de las necesidades</i>	■							
<i>Análisis de las soluciones</i>	■	■	■					
<i>Elección de los componentes</i>		■	■	■				
<i>Estudio de los componentes</i>		■	■	■				
<i>Desarrollo de un algoritmo</i>			■	■	■			
<i>Calibración del sistema</i>					■	■	■	
<i>Pruebas de funcionamiento</i>					■	■	■	
<i>Análisis de los resultados</i>						■	■	■
<i>Planteamiento de mejoras</i>							■	■
<i>Elaboración del informe</i>					■	■	■	■

Fig. 8: Diagrama de Gantt de las actividades desarrolladas

2. ANÁLISIS DE LAS POSIBLES SOLUCIONES

2.1. PLATAFORMA

Las dos opciones principales en las que podríamos implementar el dispositivo sería un teléfono inteligente (*Smartphone*) que ya cuente con todo el hardware necesario, y un diseño electrónico específico para la aplicación.

Teléfono inteligente

Prácticamente todos los teléfonos inteligentes actuales disponen de acelerómetro y giroscopio para determinar su posición en todo momento, así como una gran variedad de opciones de comunicación tanto de corta como de larga distancia, por lo que son una opción muy popular para realizar aplicaciones de este tipo.

Su mayor problema es la colocación en la embarcación. Exceptuando los dispositivos de más alta gama, la mayoría de teléfonos todavía no son resistentes al agua y necesitarían de una funda estanca para evitar su rotura. Además, cualquier elemento colocado sobre el kayak tiene el riesgo de ser golpeado con la pala durante algún movimiento causado por el desequilibrio, así que, aunque fuese resistente al agua, necesitaría estar protegido por una funda resistente.

Dispositivo específico

El desarrollo de un dispositivo específico nos permite la implementación únicamente de los componentes y sensores necesarios para nuestra aplicación, reduciendo de esta manera el coste y el consumo de energía necesarios. Para desarrollar un dispositivo específico necesitaríamos un microcontrolador al que conectaríamos los demás componentes que necesitamos.

Este tipo de dispositivos nos resta versatilidad ya que si deseáramos actualizarlo para añadir nuevas funcionalidades podría ser necesario modificar parte del hardware. Por otro lado, al poder elegir cada componente individualmente, podríamos elegir los que más se adaptasen a nuestras necesidades.

2.2. SENSORES

En nuestra aplicación necesitamos detectar los movimientos del barco, y podemos distinguir dos tipos.

Primero tenemos todos los movimientos que se repiten cíclicamente con cada palada, como pueden ser el cabeceo de la embarcación producido durante la aplicación de la fuerza o la inclinación causada por la torsión. Estos movimientos nos permitirán conocer el ritmo de paladas y la calidad de la ejecución técnica.

El otro movimiento predominante es el desplazamiento de la embarcación, a través del cual podemos valorar el resultado del entrenamiento ya que nos permite conocer la velocidad alcanzada en cada parte de éste.

Para poder medir estos movimientos necesitaremos dos tipos de sensores, de movimiento y de desplazamiento de la embarcación.

2.2.1. MOVIMIENTOS DE LA EMBARCACIÓN

Acelerómetro

El acelerómetro es un sensor que nos permite determinar las aceleraciones a las que está sometido. Por esta razón, es muy utilizado como método para determinar el nivel de actividad física [6], ya sea a través del teléfono o de las pulseras de actividad.

El principio básico de funcionamiento de la mayoría de acelerómetros consta de una masa sujeta mediante unos soportes elásticos. Según el primer principio de Newton, esa masa no se desplazará si no hay una fuerza que actúe sobre ella y, conociendo la constante elástica del soporte, podemos determinar la aceleración en función del desplazamiento de la masa (Fig. 9).

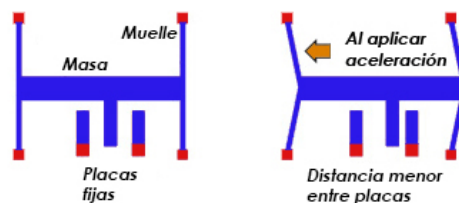


Fig. 9: Principio de funcionamiento del acelerómetro [7]

Existen diferentes tipos en función de la forma en que miden este desplazamiento [8]. Los de tipo capacitivo son los más utilizados, ya que se pueden integrar fácilmente en un circuito integrado barato y que ocupa poco espacio; se basan en la variación de la capacitancia de unas capas fijas y otras en la masa móvil, e integran en el mismo chip la circuitería de acondicionamiento. Otros tipos de sensores están ya en desuso, como los de tipo mecánico, que miden los desplazamientos utilizando galgas extensométricas o detectores de proximidad. En los acelerómetros de tipo térmico hay un calentador en la masa móvil y la distancia se mide utilizando la temperatura medida por unos termopares.

Actualmente se comercializan acelerómetros que contienen sensores en los tres ejes, por lo que podríamos obtener mucha información del comportamiento del barco. A través de las aceleraciones en el eje longitudinal podríamos detectar cuándo se produce una palada, y a través de la dirección en la que es detectada la aceleración de la gravedad podremos determinar la inclinación.

Giroscopio

El giroscopio permite conocer la variación de un ángulo, por lo que permite determinar la orientación del sólido sobre el que se encuentra.

En función del principio de funcionamiento, podemos distinguir tres tipos principales de giróscopos [9]:

- Los giroscopios rotatorios constan de una masa que gira en torno a su eje de simetría, el cual está sujeto mediante cardanes con poco rozamiento (Fig. 10) que hacen que mantenga su posición pese a los movimientos exteriores, permitiendo medir el ángulo que se ha desplazado.

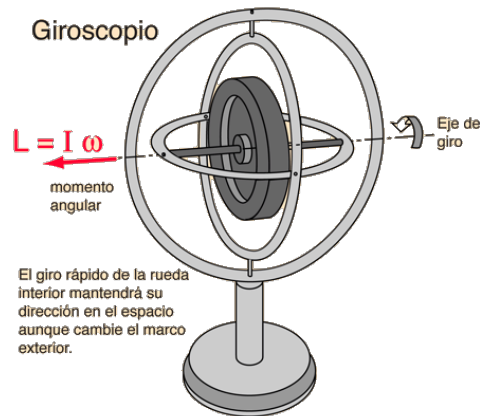


Fig. 10: Principio de funcionamiento del giróscopo rotatorio [10]

- Los giroscopios de estructura vibrante constan de una masa vibrante que, al rotar, genera una segunda vibración en dirección perpendicular causada por la fuerza de Coriolis (Fig. 11) [11].

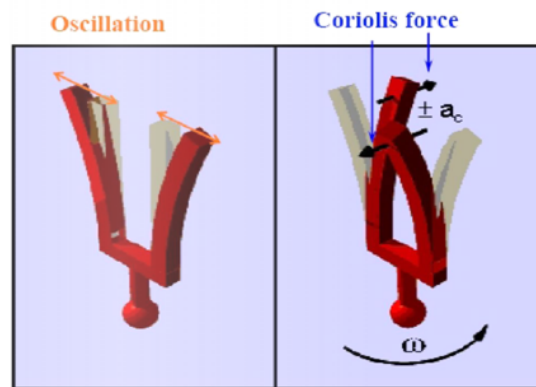


Fig. 11: Principio de funcionamiento del giroscopio de estructura vibrante [11]

- Los giroscopios de fibra óptica utilizan en principio de Sagnac, quién demostró que al rotar un anillo en el que se introducen dos señales de fibra óptica rotando en sentido contrario, aparece entre estas una diferencia de fase [12].

Un giroscopio nos permitiría medir las oscilaciones del barco de una manera más precisa que con un acelerómetro ya que no se verá afectado por otras aceleraciones que puedan suceder, como el bote del barco, pero no nos permitiría detectar las paladas, por lo que sería necesario implementar un acelerómetro en el eje longitudinal.

En nuestra aplicación sólo nos interesa medir el giro en torno al eje longitudinal y, debido a que las aceleraciones que van a aparecer al eje transversal de la piragua son mínimas, podemos estimarlo con suficiente precisión utilizando únicamente el acelerómetro. De esta manera también se conseguirán reducir los costes del dispositivo.

2.2.2. DESPLAZAMIENTO DE LA EMBARCACIÓN

Para conocer la velocidad de la piragua podríamos integrar la aceleración a la que está sometida, pero esto generaría muchos problemas debido a la acumulación de errores de medición que se

producirían, por lo que resulta más preciso utilizar un receptor GPS (*Global Positioning System*, Sistema de Posicionamiento Global).

El GPS funciona mediante una red de satélites que orbitan la tierra en diferentes planos, de manera que toda la superficie esté cubierta en todo momento. Estos satélites emiten unas señales que son captadas por los receptores y, al combinar las señales de varios satélites, nos permiten triangular nuestra posición en la superficie terrestre [13].

El uso de receptores GPS está muy extendido a la hora de registrar los entrenamientos deportivos ya que te permite no sólo conocer tu ritmo de entrenamiento, sino también guardar el recorrido realizado para tener referencias para otras sesiones.

En nuestra aplicación, el conocer la posición podrá permitirnos comparar las velocidades en las diferentes partes de una distancia de competición, ayudando a elaborar estrategias y a encontrar aquellas zonas en las que hay un mayor margen de mejora.

2.3. GESTIÓN DE LOS DATOS

Una vez recogidos los datos necesarios, tenemos que ofrecer la información al palista y al entrenador, que se puede encontrar en la orilla o en una lancha.

2.3.1. VISUALIZACIÓN POR EL PALISTA

Para que el palista pueda conocer la información acerca de su ritmo de paladas y velocidad necesitaremos de una pantalla. Según la cantidad de datos a mostrar podremos utilizar visualizadores de siete segmentos, que nos permitirían ofrecer información del ritmo de paladas; o visualizadores alfanuméricos de varias líneas, con los cuales podemos ofrecer más variables al palista. Vamos a analizar las diferentes tecnologías disponibles.

Pantallas LED

Estas pantallas están formadas por diodos LED (*Light-Emitting Diode*, Diodo Emisor de Luz) que se iluminan para representar la información. Gracias al tamaño tan pequeño que han alcanzado los diodos así como a la combinación de colores RGB (*Red Green Blue*, Rojo Verde Azul) que se pueden conseguir, permiten representar gran variedad de información.

El principal problema presenta una pantalla LED en nuestra aplicación sería que, como va a ser utilizada en condiciones de mucha luz, necesitaríamos una pantalla con mucho brillo para poderla visualizar correctamente, y eso no es muy común en las pantallas LED pequeñas. Por ello, en este proyecto no se va a utilizar.

Pantallas LCD

El funcionamiento de las pantallas LCD (*Liquid-Crystal Display*, Pantalla de Cristal Líquido) se basa en unas moléculas cuya polarización se modifica para dejar pasar más o menos luz. Según el origen de esta luz se pueden distinguir tres tipos (Fig.13) [14].

Las pantallas reflectivas utilizan un espejo para reflejar la luz exterior, por lo que funcionarán correctamente siempre que haya suficiente iluminación exterior.

Las pantallas transmisivas incorporan unas lámparas como fuente de iluminación para funcionar. Esto hace que funcionen cuando hay menor luz exterior, pero necesitarán tener mucha

iluminación para funcionar también cuando hay más luz. El consumo de este tipo de pantallas LCD es superior al de las reflectivas.

Por último, están las pantallas transflectivas, las cuales incorporan tanto un espejo como unas lámparas para compensar la falta de luz exterior. Esto hace que funcionen tanto bajo luz directa como en condiciones nocturnas. La mayoría de los relojes de entrenamiento que se emplean ahora incorporan pantallas de este tipo y nosotros también vamos a incorporar una en el proyecto.

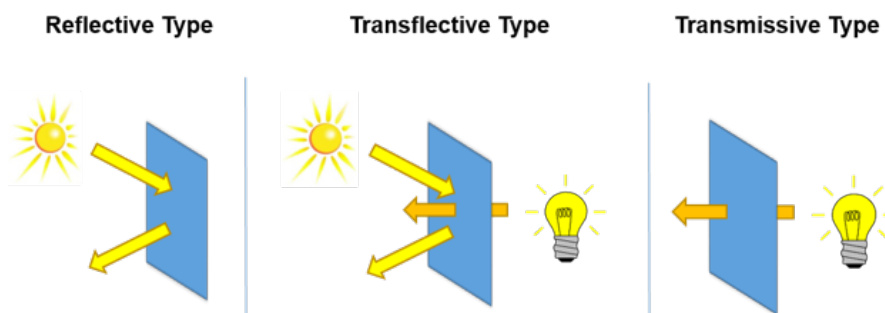


Fig. 12: Tipos de pantallas LCD [14]

2.3.2. ENVÍO AL ENTRENADOR

Para enviar los datos al entrenador, el cual se encontrará o en la orilla o en una lancha acompañando al palista, debemos considerar la distancia de transmisión que nos permiten los diferentes métodos.

Bluetooth

La tecnología Bluetooth utiliza una banda cercana a los 2 GHz para permitir comunicaciones de corto alcance. Este método nos permitiría enviar los datos directamente a un teléfono móvil sin necesidad de ningún dispositivo externo, siempre que se encuentre como máximo a 10 o 15 metros.

La utilización de esta tecnología quitaría versatilidad al dispositivo, ya que obligaría al entrenador a seguir al palista muy de cerca con una lancha en todo momento para poder recibir la información.

Radiofrecuencia convencional LPD433

En el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) se definen algunas frecuencias para usos no licenciados, generalmente para dispositivos de baja potencia.

Un ejemplo de este tipo de bandas sería la LPD433 (*Low-Power Device*, Dispositivo de Baja Potencia), entre los 433,05 y los 434,79 MHz, en la que la máxima potencia aparente permitida es de 10mW en España [15]. Esta banda es utilizada por algunos transmisores de radiocontrol o estaciones meteorológicas domésticas, y pueden proporcionar un rango de varias centenas de metros.

La ventaja de esta frecuencia con respecto a otras más altas es que se puede conseguir una mayor distancia utilizando módulos de menor potencia, lo que reducirá el tamaño y el consumo del dispositivo. Va a ser la técnica utilizada en nuestro caso.

GPRS

Los módulos basados en el GPRS (*General Packet Radio Service*, Servicio General de Paquetes vía Radio) nos permiten realizar llamadas, enviar SMS y conectarnos a Internet utilizando la red móvil. Este método nos permitiría conectarnos al dispositivo sin importar la distancia a la que se encuentre, siempre y cuando disponga de cobertura.

Las dos opciones que tenemos con este sistema sería el envío de los datos por SMS o a través de un servidor de internet, pero estamos limitados por la velocidad de transmisión. La velocidad de transmisión por internet utilizando GPRS es de 56 kbps en condiciones óptimas de conexión, que en la práctica se reduce considerablemente, mientras que el envío de SMS ronda los 30 mensajes por minuto [16].

Este sistema de envío de datos tiene un coste mensual ya que necesitamos tener un contrato con una compañía telefónica para la conexión a la red.

2.3.3. ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de los datos del entrenamiento para realizar un análisis posterior más detallado se puede hacer tanto en el dispositivo del palista como con los datos recibidos por el entrenador, pero la primera opción nos daría más versatilidad ya que podría funcionar también en los entrenamientos en solitario.

El almacenamiento de los datos se realizará en una tarjeta SD ya que de esta manera es más sencillo el trasladar los datos al ordenador para un posterior análisis. Además, al disponer de una capacidad de almacenamiento tan elevada nos permite aumentar el tiempo de vida de la tarjeta utilizando diferentes direcciones de memoria en lugar de estar sobrescribiendo la misma, lo cual nos dejaría con 100.000 ciclos de escritura.

La utilización de una tarjeta micro-SD nos permitirá reducir el tamaño del dispositivo con respecto a una SD estándar, aunque se aumenta también ligeramente el precio.

3. DISEÑO DEL HARDWARE

3.1. PLATAFORMA

La opción desarrollada consta de dos módulos: el módulo principal irá colocado en la embarcación del palista y será la que nos permitirá obtener toda la información del barco (Fig. 13); el módulo auxiliar irá conectado al ordenador del entrenador e irá mostrándole la información a éste también (Fig. 14).

El microcontrolador del módulo principal será un ATmega2560 de ATMEL, montado sobre una placa Arduino Mega para poder probar con más facilidad el prototipo. Este microcontrolador tiene las siguientes características [17]:

- 54 pines E/S digitales
- 15 pines con PWM (*Pulse-Width Modulation*, Modulación del Ancho de Pulso)
- 16 pines de entrada analógicos
- 256 kb de memoria flash.

- 4 kb EEPROM
- 8 kB SRAM
- Frecuencia de reloj de 16MHz

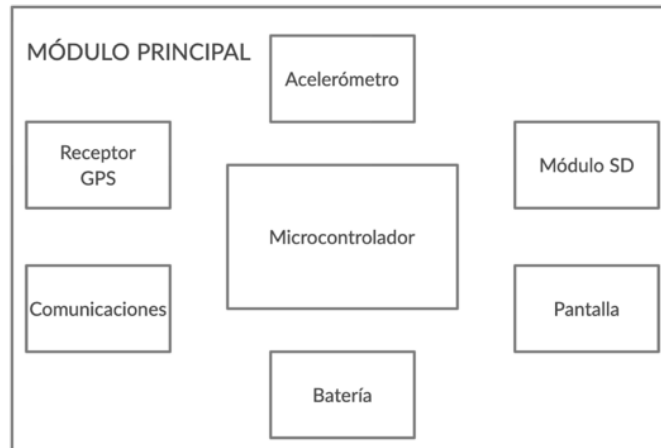


Fig. 13: Diagrama de bloques del módulo principal

Por otro lado, el microcontrolador del módulo auxiliar será el ATmega328P de ATMEL sobre una placa Arduino UNO poder programarlo más fácilmente. Las características de este microcontrolador son las siguientes [17]:

- 14 pines E/S digitales
- 6 pines con PWM
- 6 pines de entrada analógicos
- 32kb de memoria flash.
- 1 kb EEPROM
- 2 kB SRAM
- Frecuencia de reloj de 16 MHz

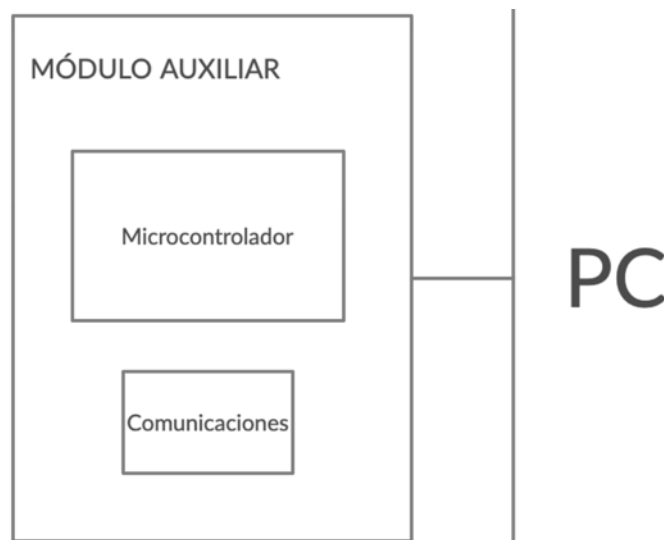


Fig. 14: Diagrama de bloques del módulo auxiliar

3.2. ACCELERÓMETRO

Para detectar los movimientos del barco vamos a utilizar el módulo de acelerómetro digital ADXL345 de ANALOG DEVICES.

Este acelerómetro se puede conectar utilizando una interfaz o I2C (*Inter-Integrated Circuit*, Circuito Inter Integrado) o una SPI (*Serial Peripheral Interface*, Interfaz de Periféricos Serie) de 3 o 4 cables (Fig. 15).

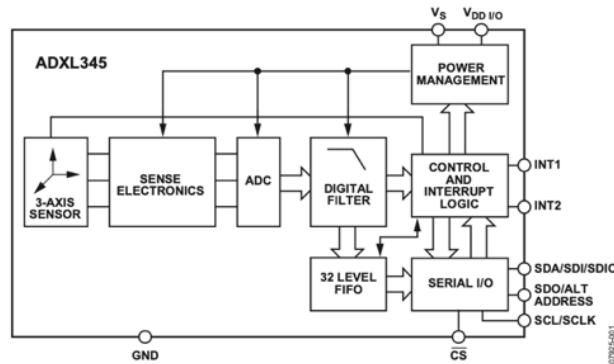


Fig. 15: Diagrama de bloques de acelerómetro (*Datasheet*)

La resolución de este módulo es de 3,9 mG/LSB, de acuerdo con la hoja de características, por lo que si la pasamos a m/s^2 quedaría:

$$3,9 \frac{mG}{LSB} \cdot \frac{1 G}{1000mG} \cdot \frac{9,8 \frac{m}{s^2}}{1G} = 0,03822 \frac{m}{s^2} \frac{1}{LSB}$$

Este valor debería tener suficiente resolución, ya que utilizando el acelerómetro de un dispositivo móvil hemos comprobado que el orden de las aceleraciones está en torno a los $2,5 m/s^2$.

Para conseguir que la medida sea la aceleración real de la piragua, este módulo irá fijo sobre una tabla, que a su vez irá fija sobre la embarcación, para conseguir que la transferencia de las fuerzas sea total.

3.3. MÓDULO GPS

El módulo GPS seleccionado es el NEO GY-GPS6MV2, de u-blox, el cual promete una precisión en la posición de 2,5 m y en la velocidad de 0,1 m/s. El tiempo teórico en recibir la primera posición válida es de 27 s durante el arranque en frío.

La conexión de este módulo con el microcontrolador se realizará utilizando la interfaz UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*, Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) a través de un puerto serie (Fig. 16).

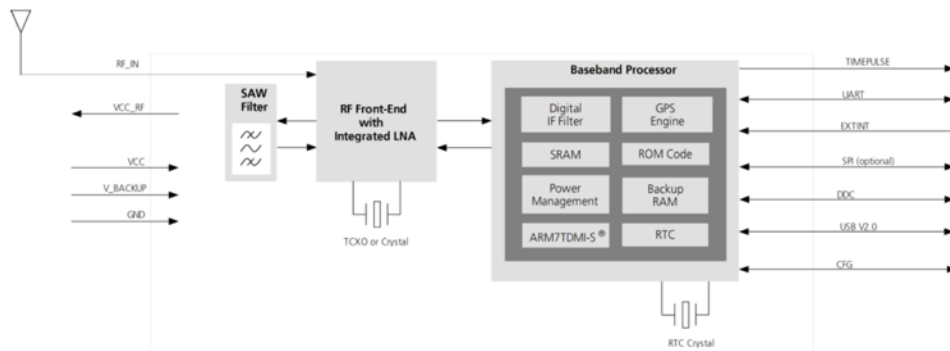


Fig. 16: Diagrama de bloques del módulo GPS (*Datasheet*)

La antena utilizada para recibir las señales de los satélites es de tipo *patch* (parche) y pasiva (Fig. 17), ya que no va a ser colocada lejos del módulo y de esta manera no requiere alimentación externa. Este tipo de antenas se colocan en el plano horizontal con visión del cielo abierto.



Fig. 17: Antena para el módulo GPS

3.4. PANTALLA

La pantalla seleccionada es la PDC-6x1 (Fig. 18), una pantalla LCD transreflectiva con 6 displays de 7 segmentos fabricada por SURENOO y con un controlador HT1621 de HOLTEK.



Fig. 18: Pantalla LCD

La conexión de la pantalla se realiza mediante comunicación serie, la información a mostrar se envía mediante el puerto DATA, y la escritura se habilita utilizando el puerto WR.

Además de los 6 dígitos, tiene tres indicadores para mostrar el estado de batería que se podrán utilizar para indicar cuando la oscilación del barco es excesiva. También tiene la opción de encender o apagar la luz LED, lo que permitirá prolongar el uso de la batería.

3.5. MÓDULO DE COMUNICACIONES

Para el envío de los datos al entrenador se utilizará la banda de 433 MHz, y el módulo seleccionado es el HC-12 de Seeed Technology. Este módulo tiene una potencia máxima de 100 mW, pero se puede configurar para limitarlo a los 10 mW permitidos en España.

El rango de comunicaciones del módulo es de 1 km con las opciones que vienen por defecto, pero esta distancia se reduce por más de la mitad al configurarlo a 10 mW de potencia.

También se puede configurar la velocidad de envío de datos desde los 5.000 bps hasta los 236.000 bps, reduciéndose la sensibilidad, y por lo tanto el rango, al aumentar esta velocidad (Fig. 19).

Baud rate in the air	5,000bps	15,000bps	58,000bps	236,000bps
Wireless receiving sensitivity	-117dBm	-112dBm	-107dBm	-100dBm

Fig. 19: Sensibilidad al aumentar la velocidad de envío de datos en el HC-12

La antena seleccionada es de tipo *spring* (resorte), también diseñada para la banda de frecuencias de 433 MHz (Fig. 20).

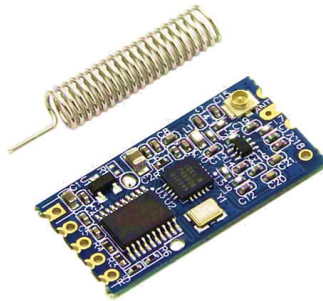


Fig. 20: Módulo de comunicaciones HC-12

La comunicación con el módulo se realiza utilizando la interfaz UART a través del puerto serie, disponiendo también de otro pin para entrar en el modo de configuración del dispositivo y poder enviar comandos.

3.6. ALMACENAMIENTO

El almacenamiento de los datos se realizará en una tarjeta micro-SD utilizando el módulo Adafruit 254 (Fig. 21), el cual cuenta con una memoria buffer que nos permite grabar 512 bytes de datos cada vez.

Este módulo se conecta utilizando SPI y permite la utilización de tarjetas SDHC (*Secure Digital High Capacity*, SD de alta capacidad) de hasta 32 Gb. También cuenta con un adaptador del nivel de tensión por lo que puede ser utilizado tanto a 3,3 V como a 5 V.

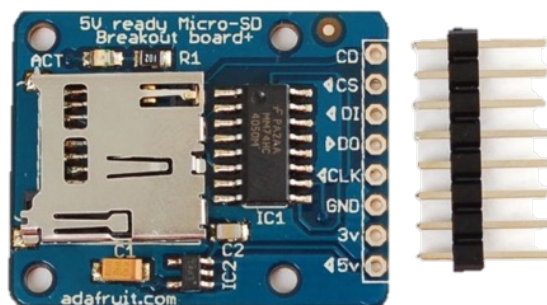


Fig. 21: Modulo SD

4. DISEÑO DEL SOFTWARE

Para optimizar el consumo de energía, así como para mejorar el funcionamiento del dispositivo, este dispone de dos métodos de funcionamiento:

- El modo ENTRENAMIENTO permite analizar la sesión de entrenamiento completa, registrando las paladas y la posición GPS para poder ofrecer datos de ritmo de paleo, velocidad y distancia recorrida por cada palada. Este modo de funcionamiento permite la visualización *on-line* de los datos por parte del entrenador.
- El modo TÉCNICA guarda en alta resolución las aceleraciones de la embarcación para poder analizar los movimientos del barco durante una palada. Para ello, registrará durante 10 segundos (unas 15 paladas) las aceleraciones para su posterior análisis. Este modo de funcionamiento solo permite la visualización *off-line* de los datos.

Al iniciar el dispositivo se inicia en modo ENTRENAMIENTO y, a través de un comando a través del módulo de comunicaciones, se puede iniciar el modo TÉCNICA (Fig. 22).

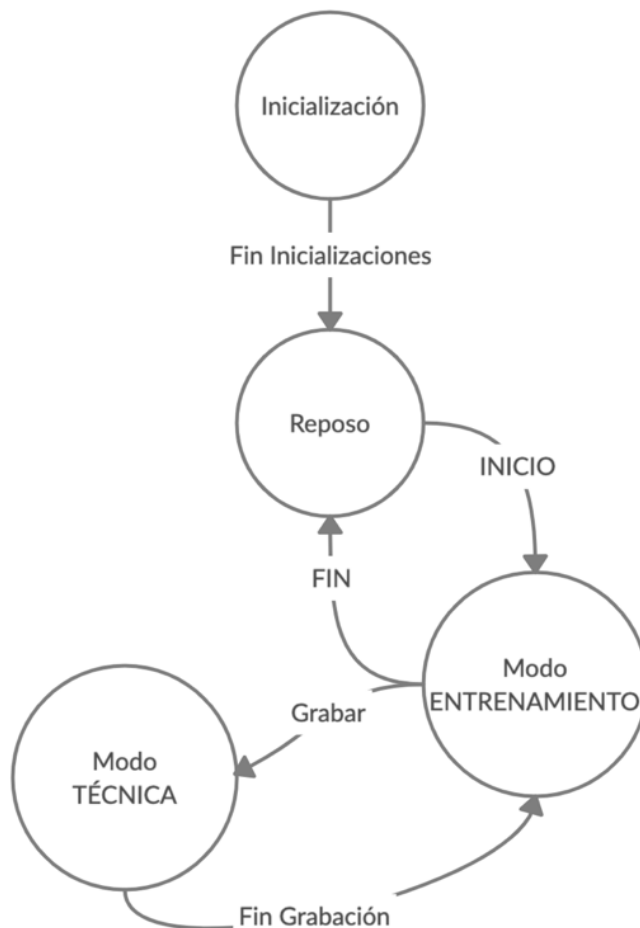


Fig. 22: Esquema de funcionamiento del Software

4.1. MODO ENTRENAMIENTO

Las funciones que realizará el modo ENTRENAMIENTO serán las siguientes (Fig. 23):

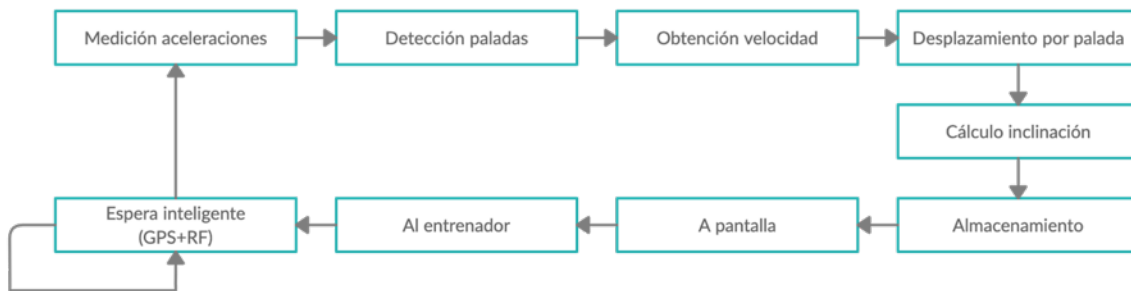


Fig. 23: Diagrama de flujo del modo ENTRENAMIENTO

4.1.1. MEDICIÓN DE LAS ACELERACIONES

Los datos que envía el acelerómetro son de 13 bits, por lo que estarán en el rango $[-4096, 4095]$, y mide aceleraciones de hasta 16 G, así que habrá que realizar la conversión del valor leído al valor de aceleración real que ha medido. Utilizaremos como unidades de aceleración las milésimas de fuerza G.

$$\text{Aceleración (mG)} = \text{Valor}_{BIN} * 3,9$$

Para filtrar el posible ruido en la medida utilizaremos la media de las 8 últimas medidas.

4.1.2. RITMO DE PALADAS

Cuando la aceleración detectada en el eje longitudinal sea superior a la media, sabremos que nos encontramos en la fase de aplicación de la fuerza y, por lo tanto, que hemos realizado otra palada.

Para calcular el ritmo de paladas utilizaremos el mismo método que utilizan los cronómetros profesionales como [18], mediremos el tiempo que le toma al palista el realizar tres paladas y, a partir de ahí, calcularemos el ritmo utilizando:

$$\text{Ritmo(paladas/min)} = \frac{3 \text{ paladas}}{t_f(\text{ms}) - t_0(\text{ms})} \cdot \frac{60000\text{ms}}{1\text{min}}$$

Para conseguir una resolución de al menos 1 palada por minuto, necesitaremos estudiar la frecuencia con la que tendremos que muestrear la aceleración para la detección de paladas. Si despejamos el tiempo transcurrido para cada ritmo de paladas obtenemos (Fig. 24):

$$\Delta t = \frac{3 \text{ paladas}}{\text{Ritmo}} \cdot \frac{60000\text{ms}}{1\text{min}}$$

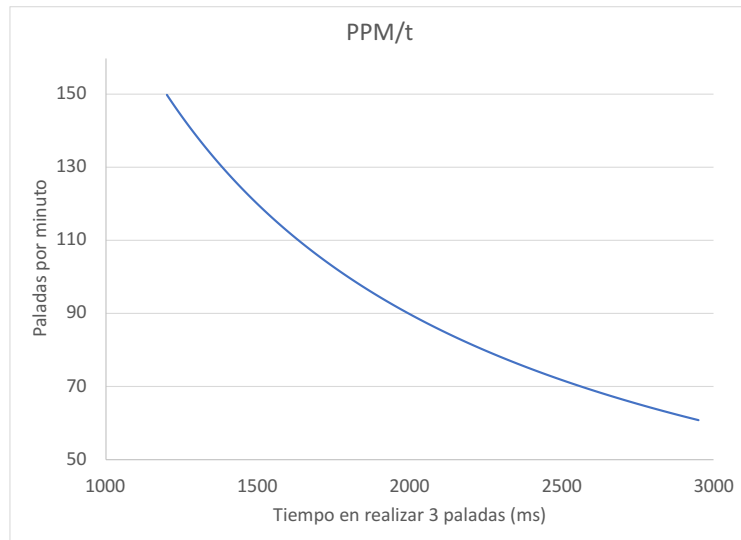


Fig. 24: Ritmo de paladas en función del tiempo en realizar tres paladas

Como podemos comprobar, la diferencia de tiempo entre dos ritmos diferentes se reduce al aumentar estos ritmos, así que, si queremos asegurar la resolución en todo el rango, debemos asegurarla en el ritmo más alto de paladas. Para ello consideraremos la frecuencia de paladas máxima alcanzable como 150 ppm.

$$\Delta t (150ppm) = 1200ms$$

$$\Delta t (149ppm) = 1208ms$$

La diferencia entre ambos ritmos es de 8 ms, por lo que este será el periodo de muestreo mínimo para asegurar la resolución, lo que se corresponde a 125 Hz.

Como las opciones de configuración del acelerómetro pasan de 100 Hz a 200 Hz, vamos a comprobar si merece la pena el aumentar hasta los 200 Hz o si con 100 ya es suficiente. Para ello, vamos a representar las paladas máximas que podríamos representar con una resolución de 1 ppm con respecto a la frecuencia de muestreo (Fig. 25).

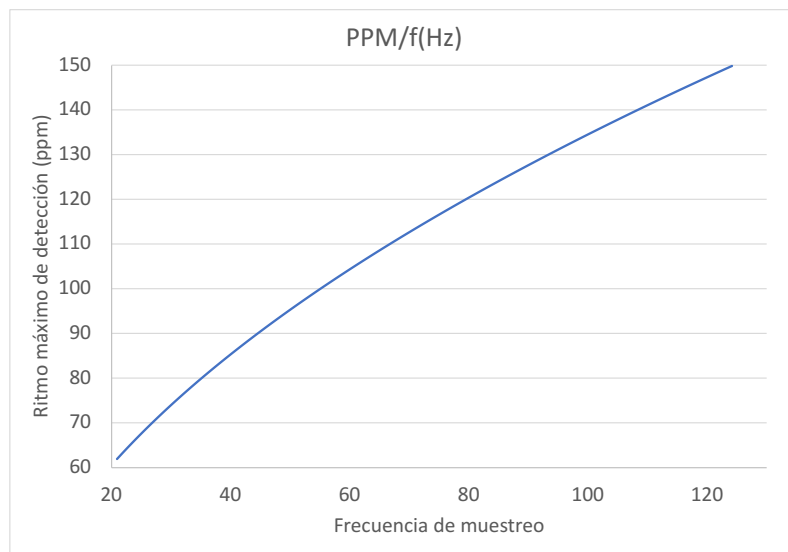


Fig. 25: Ritmo máximo al que cumplimos la condición en función de la frecuencia de muestreo

Así pues, con 100 Hz podríamos representar hasta un ritmo de 135 ppm, lo cual es más que suficiente para los entrenamientos en barcos individuales, y solamente sería necesario aumentar la frecuencia en el caso de entrenamientos de K2 o K4.

Una vez que sabemos que la frecuencia de muestreo será generalmente 100 Hz, necesitamos conocer el tamaño que necesitaremos para el registro que calculará la media del valor de la aceleración durante al menos una palada. Para ello consideraremos 60 ppm como el menor ritmo de paladas en entrenamiento, lo que sería una palada por segundo, por lo que necesitamos calcular la media de los 100 últimos valores.

Para calibrar esta función y evitar que el ruido de medición o algún movimiento del palista haga que el sistema detecte una palada, utilizaremos una constante que representará una aceleración mínima, con respecto a la media, que será necesario superar para detectar una palada.

Una vez estudiado todo esto, el diagrama de flujo del cálculo del ritmo de paladas sería el siguiente (Fig.26):

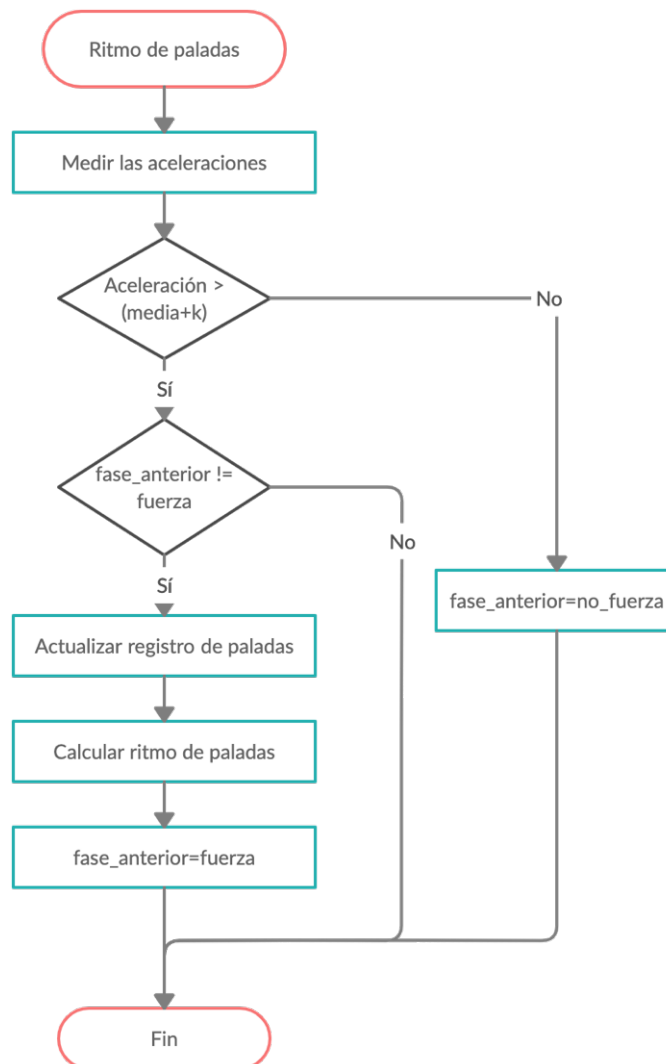


Fig. 26: Diagrama de flujo del cálculo del ritmo de paladas

4.1.3. POSICIÓN Y VELOCIDAD

Los datos obtenidos de los satélites GPS son enviados por el módulo utilizando el protocolo NMEA (*National Marine Electronics Association*, la Asociación Estadounidense para la comunicación de la Electrónica Marina), el cual envía diferentes frases con los distintos datos. Un ejemplo de una de estas frases sería “\$GPGLL,4139.30,N,52.64,W,225444,A,*1D”, la cual nos indica [19]:

- \$GPGLL: tipo de mensaje, en este caso *Geographic Latitude and Longitude* (Latitud y Longitud Geográficas).
- 4139.30,N: latitud en grados y minutos decimales.
- 52.64,W: longitud en grados y minutos decimales.
- 225444: hora, en este caso 22:54:44 UTC (Tiempo Universal Coordinado).
- A: dato activo.
- *1D: verificación.

Así pues, para conocer la información de posición y velocidad, solamente será necesario decodificar las frases del módulo GPS.

4.1.4. INCLINACIÓN DEL BARCO

Para medir la inclinación del barco utilizaremos la aceleración en el eje transversal de la embarcación. Ya que no es necesario conocer el ángulo de inclinación en todo momento, sino solo saber si la inclinación máxima durante la palada es superior a los 20° que se consideran excesivos, será suficiente con comparar la aceleración máxima en ese eje con el valor de aceleración que se obtendría si la inclinación fuese de 20°.

Vamos a representar la fuerza de gravedad al inclinar el barco, actuando sobre la superficie en que irá colocado el acelerómetro (Fig. 27):

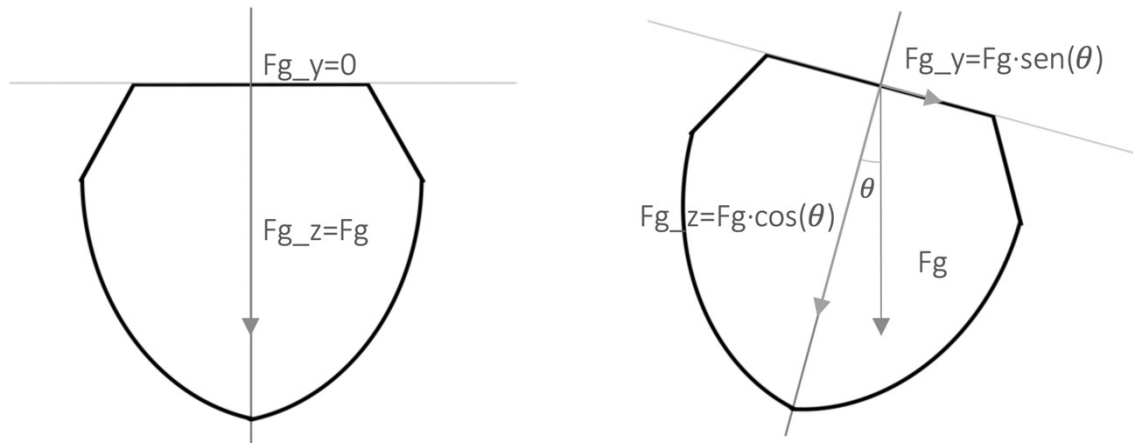


Fig. 27: Actuación de la fuerza de gravedad al inclinarse el barco

Al inclinarse la piragua aparece en el eje “y” una componente de la fuerza de gravedad que será proporcional al seno del ángulo de inclinación. Podemos calcular la aceleración que medirá el sistema cuando la inclinación sea de 20°.

$$a_{g_z} = a_g \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$a_{g_z} (\theta = 20^\circ) = 1G \cdot \text{sen}(20^\circ) = 342mG$$

De esta manera, al detectar esta aceleración, podemos avisar al palista para que lo corrija lo antes posible.

4.1.5. DESPLAZAMIENTO DE LA PALADA

Otro dato que nos puede servir para hacernos una idea de la calidad de la técnica es el desplazamiento del barco en cada palada. Este dato no es tan representativo como el anterior ya que varía considerablemente en función de la dirección y velocidad del agua, así como del ritmo de paladas, por lo que habrá que tener cuidado antes de sacar conclusiones.

El módulo GPS es capaz de ofrecer la velocidad de desplazamiento horizontal con una precisión de 0,1 m/s, y el tiempo entre paladas lo podemos realizar con un error de 10ms en el modo de ahorro de energía del acelerómetro. Podemos calcular el desplazamiento de la palada como el producto de la velocidad por el tiempo en realizar la palada.

$$\text{Desplazamiento} \left(\frac{m}{pal} \right) = v \cdot t_{palada}$$

En cuanto al error, podemos observar que el error del acelerómetro se verá acentuado cuando el tiempo de paladas sea el mayor, es decir, cuando tengamos el menor número de paladas. Por otro lado, el error en el tiempo de la palada aumentará al incrementarse la velocidad. Ambas condiciones no pueden cumplirse simultáneamente, ya que si se incrementa la velocidad es porque necesariamente se ha incrementado el número de paladas, así que vamos a comprobar el error que obtenemos considerando las siguientes combinaciones de ritmo y velocidad (Fig. 28).

PPM	Vel. Min	Vel. Max
60	8	12
70	9	13
80	10	14
90	10	15
100	11	16
110	11	17
120	12	18
130	12	19
140	13	20
150	14	20

Fig. 28: Combinaciones consideradas de ritmo y velocidad

Si calculamos el desplazamiento medio podemos comprobar que al aumentar el ritmo de paladas el desplazamiento por palada disminuye (Fig. 29), consecuencia del mayor rozamiento de la embarcación con el agua y de la menor eficiencia técnica.

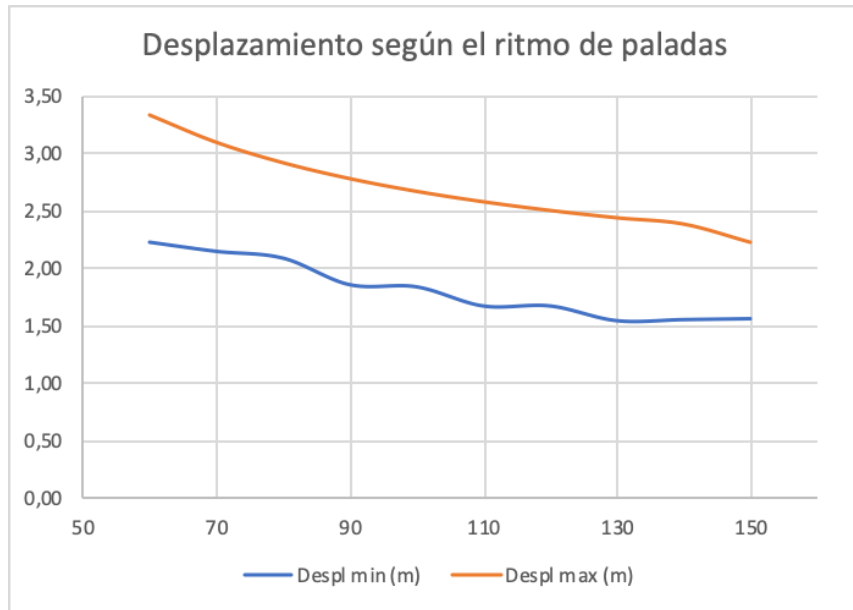


Fig. 29: Desplazamiento en función del ritmo de paladas

Así pues, si calculamos el error de medición del desplazamiento con los ritmos y velocidades considerados, podemos observar que el mayor error se produce al palear con un ritmo de paladas bajo (Fig. 30), por lo que podemos deducir que le afecta más el error de medición del módulo GPS que el del ritmo de paleo.

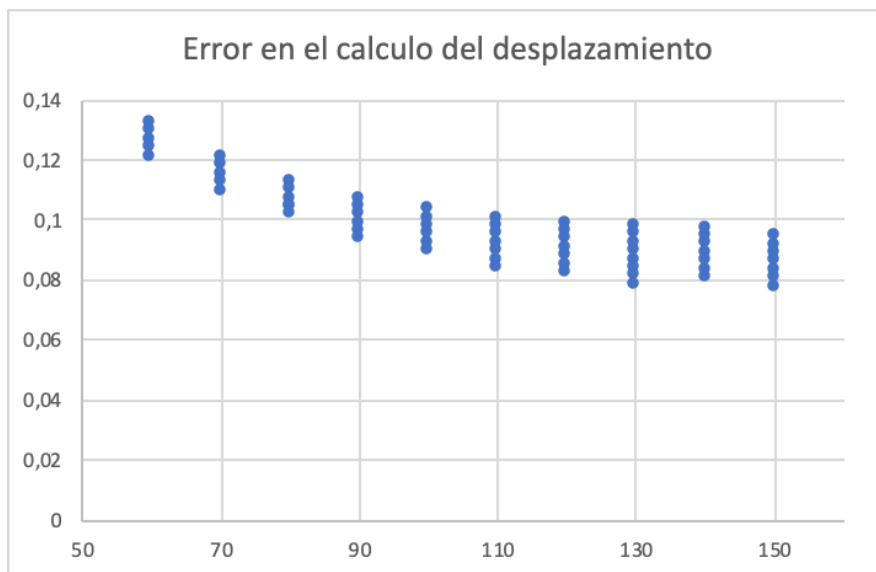


Fig. 30: Error en el cálculo del desplazamiento para las velocidades consideradas en función del ritmo de paladas

El error máximo que se produce es de 0,13 m/palada, pero para ver con algo más de contexto estos datos, vamos a representar también su relación con respecto al desplazamiento real (Fig. 31).

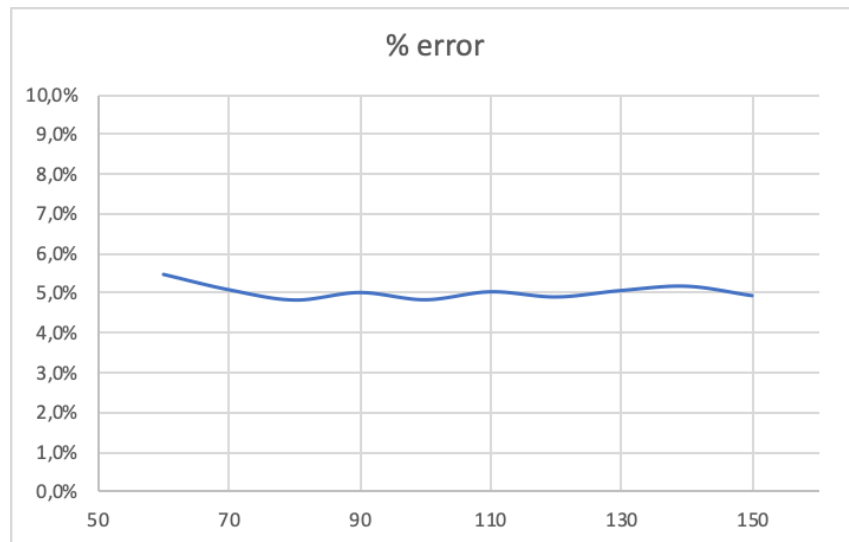


Fig. 31: Error máximo (%) en función del ritmo de paladas

Como se puede observar, el error permanece en torno al 5% para cualquier ritmo de paladas, lo cual es un valor más que razonable para una medida que solo se va a utilizar como un indicador aproximado de la eficiencia de la palada, y a la cual le afectarán mucho las variaciones en la velocidad del agua en las diferentes partes del río, así como el sentido de desplazamiento.

4.1.6. COMUNICACIONES

En este modo de funcionamiento es suficiente con enviar los datos una vez por segundo, ya que con esta frecuencia nos es suficiente para representar la velocidad y el ritmo de paladas.

Los datos se envían utilizando UART, a través del puerto serie, como una cadena de caracteres ASCII. Para cada byte de datos se envían un bit de inicio de comunicación seguido de los 8 bits de datos y de un bit de fin de la transmisión. Además, se puede configurar para el envío de otro bit de paridad y asegurar que el dato recibido es correcto. Así pues, para enviar un byte de datos, el sistema envía 11 bits.

La secuencia que enviaremos contendrá la hora, la velocidad y el ritmo de paladas:

hh:mm:ss vv.v PPM

En total son 17 bytes más dos bytes de retorno de carro, que indica que la frase se ha terminado de enviar. La frecuencia mínima que necesitaremos será:

$$19 \frac{\text{bytes de datos}}{\text{s}} \cdot \frac{11 \text{ bits}}{1 \text{ byte de datos}} = 209 \text{ bps}$$

Así pues, configuraremos el módulo de configuraciones para funcionar con su frecuencia mínima, 1200 bps, que se corresponden con 5000 bps en el aire, por lo que conseguiremos el mayor rango posible.

4.1.7. ALMACENAMIENTO

Capacidad necesaria

El almacenamiento se realizará en un fichero de texto en la tarjeta SD, así que necesitaremos asegurar que disponemos del espacio suficiente.

Los datos que nos interesa guardar a lo largo de todo el entrenamiento son: hora, posición GPS, velocidad, ritmo de paladas y distancia recorrida por cada palada. Por ello, la secuencia máxima que obtendremos será:

```
hh:mm:ss:cs -°°°'.'',-°°°'.' ' vv.v PPM d.pp
```

Siendo, respectivamente:

```
Hora Latitud,Longitud Velocidad Ritmo Distancia/palada
```

Si contamos el número de caracteres que necesitamos enviar nos salen 45 más el retorno de carro, y si tenemos en cuenta que cada carácter ASCII es un byte, en total son 47 bytes/frase.

Si queremos recoger bien la variación de velocidad en series cortas, necesitaremos guardar los datos cada segundo, con lo que necesitaremos 47 bytes/s, o lo que es lo mismo, 2820 bytes/min, 2,75 kB/min.

Para establecer el tiempo de entrenamiento consideraremos las sesiones más largas que se realizan, las competiciones de maratón, en las cuales el tiempo de control está sobre las 2 horas y media. Por lo tanto, el tamaño necesario para guardar toda la sesión será de 413 kB.

Medición de los tiempos.

También tenemos que considerar la frecuencia de guardado del archivo, y para ello debemos entender como funciona el módulo y la librería que lo controla.

Cuando escribimos algo mediante el comando write() o print(), este no es enviado a la tarjeta directamente, sino a una memoria presente en el módulo que tiene una capacidad de 512 bytes. Una vez esta memoria está llena, los datos son transferidos a la tarjeta SD. Por otro lado tenemos el método flush(), el cual se asegura de que todos los datos están correctamente guardados en el fichero, esto se realiza también al cerrar el fichero.

Tras medir los tiempos de cada operación sabemos que el escribir a la memoria del módulo tarda alrededor de 0,5 ms, mientras que el transferir los datos a la tarjeta cuesta 4 ms. El realizar un flush() es algo más lento, alrededor de 8ms.

En este modo de funcionamiento tenemos un periodo de 10 ms, y se ha comprobado que funciona correctamente guardando los datos al fichero mediante un flush() cada vez que se almacena algún dato.

4.1.8. PANTALLA

El dato más representativo para el palista es el ritmo de paladas, así que será el que se represente en la pantalla LCD. Para poder indicar al palista si la inclinación es excesiva usaremos los indicadores de batería de la pantalla LCD, de manera que se encienda si hay que corregirla.

4.1.9. ESPERA INTELIGENTE

Para permitir al dispositivo el recibir la información del GPS o del módulo de comunicaciones necesitaremos que esté pendiente del puerto serie durante los periodos de espera.

De esta manera, en caso de recibir un dato del GPS lo codificará para obtener los datos del tiempo, la posición o la velocidad, según la secuencia. Del mismo modo, recibirá cualquier orden del módulo de comunicaciones y activará una variable en caso de cambio de modo.

4.2. MODO TÉCNICA

En este modo tomaremos el mayor número de muestras posible con el fin de poder analizar más detalladamente los movimientos del barco durante la palada (Fig. 32). En este modo no será necesario guardar los valores de posición y velocidad, ni mostrar por pantalla ningún dato.

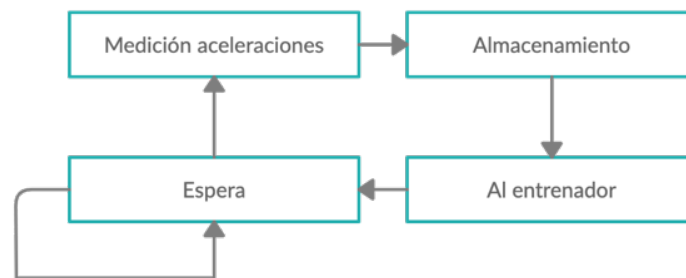


Fig. 32: Diagrama de flujo del modo TÉCNICA

Para determinar cuál es esta frecuencia máxima de almacenamiento necesitaremos analizar las limitaciones de cada componente.

4.2.1. MEDIDAS DE LA ACELERACIÓN

La velocidad máxima del acelerómetro utilizando el bus I2C es de 800 muestras por segundo, para la cual hay que aumentar la frecuencia del bus hasta los 400 kHz.

4.2.2. COMUNICACIONES

Para aumentar la velocidad de envío de datos y conseguir enviar en tiempo real, configuraremos el puerto serie a 9600 bps, lo que conlleva una velocidad de 15000 bps en el aire. Esto supondrá que la distancia de envío se reducirá a la mitad, pero al ser series cortas no tiene tanta importancia.

Vamos a analizar la frecuencia máxima que podremos conseguir si enviamos los datos de las tres aceleraciones. Para ello consideraremos que la secuencia más larga que nos podemos encontrar será la siguiente:

-Aex -Aey -Aez

Siendo, respectivamente:

aceleración (eje x) aceleración (eje y) aceleración (eje z)

Lo que suponen 14 bytes más 2 de retorno de carro. Si tenemos en cuenta que cada byte de datos son 11 bits, tenemos que para cada frase necesitamos 176 bits. Así pues, con una velocidad de envío de 9600 bps, podríamos enviar unos 54 datos por segundo.

Si decidiésemos enviar solamente la aceleración en un eje tendríamos que enviar 6 bytes de datos, lo que serían 66 bits y nos permitirían transmitir 145 datos por segundo.

Aun así, podemos ver que el módulo de comunicaciones limita más que el acelerómetro, por lo que, si queremos maximizar los datos registrados, podremos deshabilitar el envío de los datos para priorizar el almacenamiento de los datos en la tarjeta SD para un posterior análisis.

4.2.3. ALMACENAMIENTO

Capacidad necesaria

Necesitaremos la mayor capacidad de almacenamiento en el caso de no enviar los datos en tiempo real, lo que nos permitiría almacenar 800 datos por segundo. Por lo que la secuencia máxima que guardaremos será:

10000 -aeX -aeY -aeZ

Siendo, respectivamente:

Tiempo (ms) acel (x) acel (y) acel (z)

Por lo que el número de bytes máximo por frase será de 22, que si tenemos en cuenta los 800 datos por segundo serán 17.600 bytes/s. Para cada grabación de 10 segundos necesitaremos 172 kB.

En una prueba de esfuerzo se realiza una serie de 12 minutos aumentando el ritmo de paladas cada minuto para ver el momento en que se deja de controlar la técnica y el nivel de esfuerzo desarrollado. Si queremos guardar una muestra a cada ritmo, necesitaremos en total 2 MB de espacio de almacenamiento.

Medición de los tiempos

En este modo de funcionamiento no podemos permitirnos el realizar un flush() cada iteración, ya que esto ralentizaría mucho el programa, pero como solo se van a realizar series cortas es posible realizarlo únicamente al final.

Pero seguimos teniendo un problema, y es que cada 512 bytes el módulo necesita 4ms para almacenar los datos en la tarjeta, así que si quisiésemos mantener la frecuencia de los datos constante, este sería el periodo mínimo al que podríamos trabajar, lo que supone una velocidad de 125 datos por segundo.

Finalmente, con el fin de aprovechar al máximo el acelerómetro, se ha decidido muestrear a la velocidad máxima que este puede dar: un dato cada 1,25 ms, y reconstruir posteriormente los datos perdidos durante el almacenamiento en la SD. Podemos calcular cada cuanto se realizará la pérdida de datos:

$$\text{Datos entre pérdida} = \frac{512 \text{ bytes}}{22 \frac{\text{bytes}}{\text{dato}}} = 23 \text{ datos}$$

Por lo tanto, sabemos que cada 23 datos habrá que reconstruir 3. La reconstrucción de estos datos se realizará mediante una interpolación lineal, ya que con los filtros posteriores no va a ser perceptible.

5. PROTOTIPO DESARROLLADO

En este apartado analizaremos el prototipo construido y el funcionamiento global del sistema.

5.1. MÓDULO PRINCIPAL

El módulo principal se ha introducido en una caja de almacenamiento de plástico y estanca para prevenir su rotura en caso de volcar la embarcación sobre el que va colocado. El único elemento colocado en el exterior de esta caja es la antena de comunicaciones, para de esta manera reducir los obstáculos entre ambos módulos. La conexión entre los componentes se ha realizado mediante cables de puente (*DuPont*) para prototipos.

El acelerómetro se ha colocado alineando el eje X con la embarcación, y sujeto a la superficie para evitar su movimiento. Por su parte, la pantalla se ha colocado en ángulo de manera que pueda ser visualizada por el palista (Fig. 33).

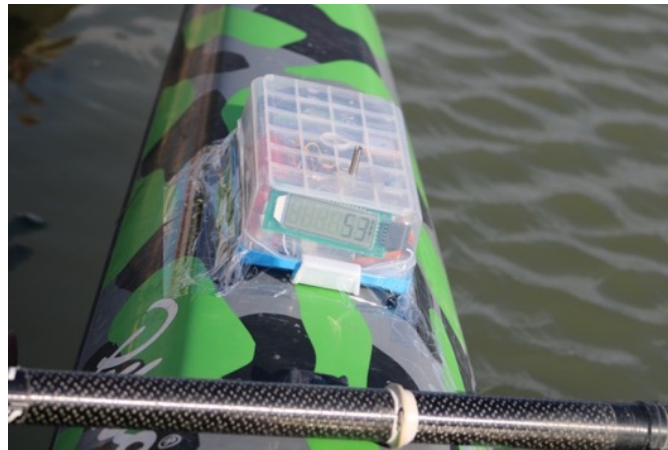


Fig. 33: Módulo principal colocado en la embarcación

La alimentación del controlador se suministra mediante una batería portátil (*Powerbank*) utilizando el puerto USB-A que tiene la placa Arduino (Fig. 34). Para alimentar el resto de los componentes se han creado unos buses de alimentación y masa empleando placas para prototipos (*protoboard*).



Fig. 34: Módulo principal, vista de la alimentación

5.2. MÓDULO AUXILIAR

En el módulo auxiliar (Fig. 35) la alimentación proviene directamente desde el ordenador, por lo que no es necesaria ninguna batería adicional.



Fig. 35: Módulo auxiliar

5.3. RESULTADOS OBTENIDOS

Las pruebas del dispositivo se han realizado con palistas del club Monkayak Hiberus (Fig. 36), en las categorías de juvenil y sub-23.



Fig. 36: Dispositivo durante una prueba

5.3.1. VELOCIDAD Y RANGO DE LAS COMUNICACIONES

Se han realizado pruebas con dos velocidades de transmisión diferentes: a 9600 bps para transmitir las aceleraciones durante la grabación de la técnica, y a 1200 bps para transmitir el ritmo de paladas durante el entrenamiento.

A 9600 bps, la distancia máxima a la que se recibían los datos era de unos 100 m (Fig. 37), y nos permitía obtener unos 50 datos por segundo de las aceleraciones en los 3 ejes, o 150 datos por

segundo en 1 solo eje. Este rango, para el modo de grabación técnica, es suficiente ya que solo se van a grabar 10 segundos y no se van a recorrer más de 100 metros. La velocidad de envío es suficiente para hacernos una idea general de la técnica de paleo, pero para analizar cada parte del gesto sería necesario obtener más datos.

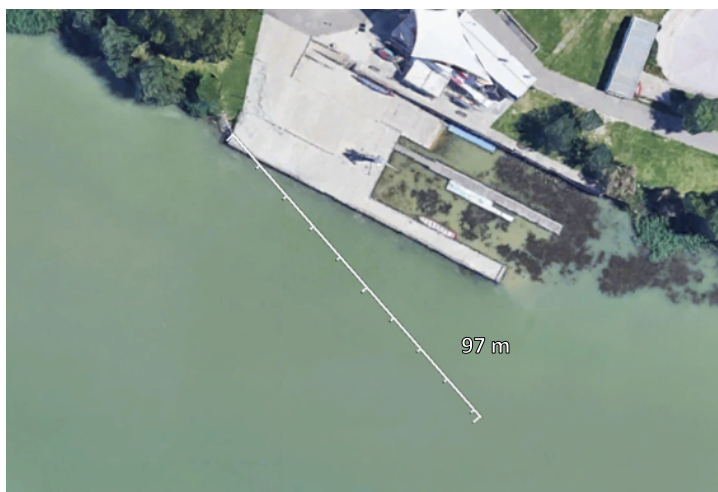


Fig. 37: Máxima distancia alcanzada con una velocidad de envío de 9600 bps

Si el palista se aleja más de los 100 metros se empiezan a perder datos y pocos metros después ya no se recibe ninguno.

A 1200 bps la distancia de envío se duplica, alcanzando casi 200 metros en línea recta (Fig. 38). Este rango se queda bastante corto si lo que queremos es ver el estado del palista durante todo el entrenamiento, ya que obligaría al palista a dar vueltas de 800 metros como mucho. Por otro lado, esta velocidad de envío es suficiente para seguir sin problemas el entrenamiento del palista.



Fig. 38: Máxima velocidad alcanzada con una velocidad de envío de 1200 bps

5.3.2. DATOS OBTENIDOS

El módulo GPS tarda unos 20 segundos de media en recibir la primera posición válida. Este dato es inferior al que aparecía en la hoja de características y posiblemente sea debido a las condiciones atmosféricas favorables que suelen estar presentes cuando se realiza este deporte.

La precisión inicial no cumple las características de la hoja de datos, pero van mejorando con el tiempo hasta que, tras un par de minutos, ya alcanza los $\pm 0,1$ m/s cuando el sistema está parado. Podemos representar el avance por palada a lo largo de 1000 m (Fig. 39) y observamos que su valor varía en función de la zona del río. Por ejemplo, a las 15:34:51 se puede observar una disminución del avance al pasar bajo un puente, donde hay mayor corriente.



Fig. 39: Representación del avance por palada durante una distancia de 1000m (contracorriente)

Los datos de aceleración también se obtienen correctamente. A través de los datos es posible encontrar asimetrías en el paleo o la aplicación incorrecta de la fuerza. Se pueden apreciar diferencias notables entre diferentes palistas (Fig. 40).

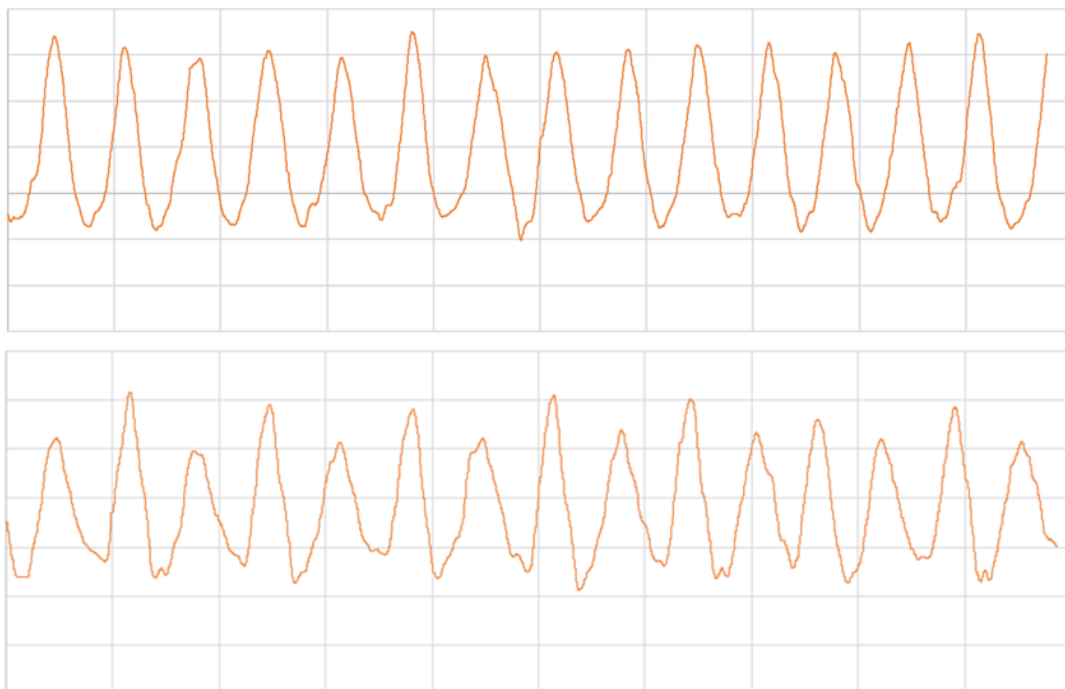


Fig. 40: Comparación de la distribución de la fuerza de palada entre dos palistas diferentes

Por otro lado, la dificultad para alinearlos correctamente provoca que en la medida del eje longitudinal (Fig. 41) aparezcan oscilaciones del eje transversal (Fig. 42), que tienen una mayor frecuencia.



Fig. 41: Medidas del eje longitudinal

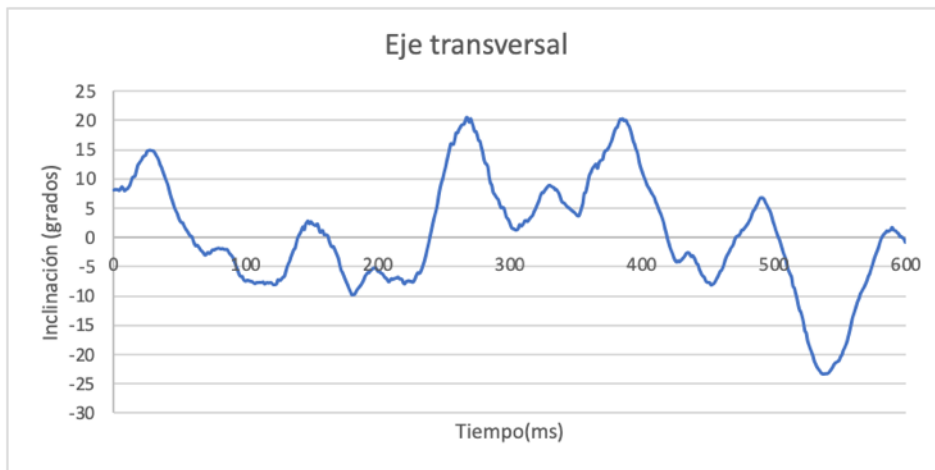


Fig. 42: Inclinación de la embarcación

Para obtener un gráfico representativo de la distribución de la fuerza durante una palada, es necesario filtrar la aceleración utilizando una media ponderada de los últimos 100 datos para reducir este ruido (Fig. 43).

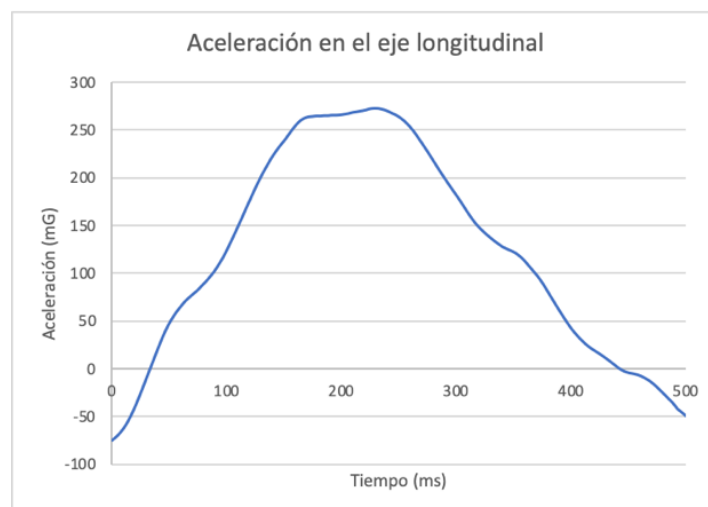


Fig. 43: Distribución de la fuerza en la palada, filtrado

5.3.3. CONSUMO DE ENERGÍA

Se ha medido la corriente que consume el sistema utilizando un amperímetro y se ha obtenido un valor medio de unos 120 mA. Esto supone, dado que actualmente está alimentado a 5 V, que tiene un consumo de unos 600 mW.

Para poder dimensionar la batería vamos a considerar un tiempo máximo de entrenamiento de 3 horas, lo que implica que la energía consumida será de 1,8 Wh.

Una elección para alimentar el sistema podría ser una batería de 500 mAh y 3,7 V. Esto, si consideramos que la duración media de los entrenamientos suele ser de unos 70 minutos, nos ofrecería autonomía suficiente para registrar 2 sesiones completas.

Durante el modo TÉCNICA, el consumo asciende hasta unos 130mA en el caso de no enviar los datos en tiempo real y 160 mA en el caso de que sí se envíen.

Podemos comparar estos datos con los obtenidos de las diferentes hojas de características y vemos que no difieren demasiado (Fig. 44).

	Consumo	
Mega2560	48 mA	
Acelerómetro	0,15 mA	
SD	12 mA	
Pantalla	4 mA	
GPS	39 mA	
HC-12	Reposo	Transmisión
	16 mA	100 mA
Total	119 mA	203 mA

Fig. 44: Consumo teórico del dispositivo

Por su parte, el módulo auxiliar consume 65 mA de media, pero al ser suministrados por el ordenador no tiene problemas de autonomía.

5.3.4. PRECIO DE LOS COMPONENTES

El coste del prototipo con los componentes utilizados es el siguiente (Fig. 45).

Componente	Precio
Mega2560	5,48€
UNO R3	3,28€
ADXL345	0,68€
Módulo SD	0,41€
Tarjeta SD	2,43€
NEO-6	2,83€
HC-12	2 x 2,49€
Total	20,09€

Fig. 45: Precio de los componentes

Teniendo en cuenta que los relojes normalmente utilizados para entrenar superan los 100€, el coste del prototipo es bastante asequible.

5.4. MEJORAS FUTURAS

De cara a una posible comercialización del producto, sería necesario introducir algunas mejoras:

- Creación de una PCB sobre la que colocar los diferentes componentes y de esta manera poder reducir tanto el tamaño del prototipo como las posibles interferencias producidas por los cables.
- Modificación del módulo de comunicaciones para conseguir incrementar el rango. Debido a las limitaciones de potencia de la frecuencia libre no ha sido posible conseguir más de 200 metros de rango, sería necesario utilizar una frecuencia comercial para incrementarlo al menos hasta los 600 metros.
- Utilización de una pantalla con más dígitos para poder enseñar al palista información adicional, como la velocidad o el tiempo de entrenamiento. Una buena opción podría ser una de dos líneas de 16 dígitos.
- Inclusión de una batería dimensionada para el dispositivo. Como hemos calculado, un buen dimensionamiento de la batería serían 1,8 Wh, así que con una batería de 500 mAh y 3,7 V sería suficiente.
- Creación de una carcasa impermeable personalizada en la que colocar el dispositivo, de manera que la pantalla quede en la orientación correcta.

6. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado se ha dividido en dos partes diferenciadas. La primera fase ha consistido en el estudio de las necesidades del dispositivo, analizando las posibles opciones que podrían aportar una solución. La segunda fase ha consistido en el diseño del hardware y del software del sistema, a partir del diseño se ha construido un prototipo operativo que registra los movimientos que sufre la embarcación y permite analizar los datos.

La elaboración de una herramienta que permite el entrenamiento utilizando como referencia el ritmo de paladas abre una nueva posibilidad a la hora de planificar los entrenamientos en piragüismo. Las ventajas de este método frente a la simple medición de la frecuencia cardíaca permitirán a los clubes mejorar la calidad de sus sesiones de entrenamiento. Esta utilidad también abre una posibilidad para el desarrollo de estrategias en la distancia de competición, permitiendo a los palistas comparar los tiempos realizados a diferentes ritmos de paleo.

El módulo de comunicaciones, aunque no alcanza la distancia de envío deseable, permitirá al entrenador conocer el estado de sus palistas en todo momento y verificar el correcto desarrollo de la planificación.

Este trabajo también abre una nueva posibilidad para el análisis de técnica en función a la distribución de las fuerzas en la palada. Esta nueva herramienta podrá utilizarse para añadir a las bases de datos de los clubes una nueva valoración técnica, que hasta ahora solo consistían en grabaciones de vídeo, para analizar las diferencias entre los palistas y su progresión.

Esta herramienta también abre la posibilidad de volver a analizar el modelo técnico, cambiado frecuentemente, mediante el análisis de la distribución de la fuerza de palistas de diferentes territorios, comparando estos datos con sus resultados obtenidos.

En el futuro próximo, este prototipo va a ser utilizado ya para el análisis de algunos deportistas aragoneses, que se encuentran en un programa de tecnificación de la Federación Española, durante unos test a realizar a lo largo del mes de septiembre. En ellos se analizará tanto su técnica de paleo como la estrategia desarrollada en las diferentes distancias de competición.

En definitiva, el desarrollo de este proyecto ha abierto nuevas posibilidades tanto de planificación de entrenamientos como de análisis técnico, dotando de una herramienta tecnológica a un deporte que destaca por la ausencia de estas.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Piragüismo Tartessos, «Tabla de ritmos,» [En línea]. Available: <http://www.piraguismotartessoshuelva.es/images/pdf/Tabla-ritmos.pdf>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [2] Nelo, «Nelo Coach,» [En línea]. Available: <http://www.nelocoach.com/index.php>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [3] Google Play, «GoPaddler,» [En línea]. Available: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.gopaddler.app>.
- [4] «Kinovea,» [En línea]. Available: <https://www.kinovea.org/>.
- [5] SmartLoadCell, «Smart Strain Gauge Module,» [En línea]. Available: <http://smartloadcell.com/slc-strain/smart-strain-gauge-force.html>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [6] C. Szanto, Level 2 and 3 Coaching Manual, ICF Canoe Sprint Coaches Education Programme, 2010.
- [7] M. J. Aguilar Cordero, A. M. Sanchez Lopez, R. Guisado Barrilao, R. Rodriguez Blanque, J. Noack Segovia y M. D. Pozo Cano, «Descripción del acelerómetro como método para valorar la actividad física en los diferentes periodos de la vida,» Marzo 2014. [En línea]. Available: <http://scielo.isciii.es/pdf/nh/v29n6/05revision02.pdf>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [8] «Acelerómetro, sensor de movimiento o vibración,» Ingeniería Mecafenix, Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://www.ingmecafenix.com/automatizacion/acelerometro/>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [9] «Acelerómetro,» Omega Engineering, [En línea]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/acelerometro.html>. [Último acceso: Julio 2020].
- [10] D. F. Pozo Espin y N. Sotomayor, «Diseño y construcción de una plataforma didáctica para medir ángulos de inclinación usando sensores inerciales como acelerómetro o giróscopo,» Febrero 2010. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1794/1/CD-2772.pdf>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [11] M. Olmo y R. Nave, «Giroscopio,» Hyperphysics, [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/gyr.html>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [12] F. A. Candelas Herias y J. A. Corrales Ramón, «Giroscopios en el sistema GypsyGyro-18,» Marzo 2007. [En línea]. Available:

<https://www.yumpu.com/es/document/read/14883621/giroskopios-en-el-sistema-gypsygyro-18-aurova>. [Último acceso: Agosto 2020].

- [13] H. C. Lefèvre, *The Fiber-optic gyroscope*, Boston: Artech House, 2014.
- [14] Á. J. d. Luis, «La nueva era del GPS,» *Muy Interesante*, nº 424, 2018.
- [15] New Vision Display, «What LCD Modes Mean: Reflective, Transmissive, Transflective,» Marzo 2017. [En línea]. Available: <https://newvisiondisplay.com/lcd-modes/#:~:text=Transflective%20LCD%20displays%20have%20both,a%20hole%20for%20each%20pixel.&text=At%20the%20same%20time%2C%20ambient,in%20direct%20sunlight%20as%20well..> [Último acceso: Julio 2020].
- [16] Boletín Oficial del Estado, «Orden ETU/1033/2017, de 25 de octubre, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2017-12318#:~:text=A%20las%20notas%20UN%20le,UE%20y%20de%20servidumbres%20radioel%C3%A9ctricas.&text=La%20nota%20UE%20indica%20las,por%20referencia%20en%20el%20CNAF..> [Último acceso: Junio 2020].
- [17] L. Blasco, «Cuáles son las diferencias entre E, GPRS, 3G, 4G, 5G y esas otras redes a las que se conecta tu celular (y cómo te afectan tu conexión a internet),» Septiembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37247130>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [18] M. Gudino, «Arduino Uno vs. Mega vs. Micro,» Diciembre 2017. [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/arduino-uno-vs-mega-vs-micro>. [Último acceso: Julio 2020].
- [19] Astopwatch, «Professional level 500 lap segmented memory stopwatch,» [En línea]. Available: <https://www.astopwatch.co.uk/products/index.asp?product=fastime-14-52-473>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [20] D. DePriest, «NMEA Data,» [En línea]. Available: <https://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm#GLL>. [Último acceso: Julio 2020].