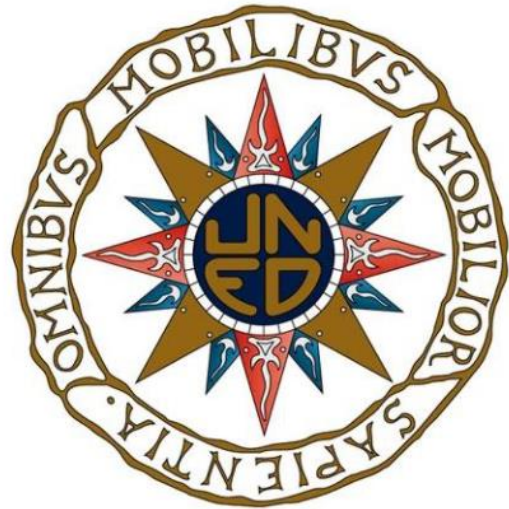


Máster en Ingeniería de Sistemas y Control



Universidad Nacional de Educación a Distancia

Universidad Complutense de Madrid

Proyecto Final de Máster

Medidor de magnitudes físicas ambientales con navegación inercial optimizada por aprendizaje reforzado

Curso 2020/2021 – Convocatoria de Junio

| | |
|--------------------------|---|
| Estudiante / Autor: | D. Juan Sandubete López |
| Profesores / Directores: | D. José Sánchez Moreno D. Pablo Otero Roth |

Máster en Ingeniería de Sistemas y Control



Universidad Nacional de Educación a Distancia

Universidad Complutense de Madrid

Proyecto Final de Máster

Tipo B: Proyecto específico propuesto por el alumno

Medidor de magnitudes físicas ambientales con navegación inercial optimizada por aprendizaje reforzado

Curso 2020/2021 – Convocatoria de Junio

| | |
|--------------------------|---|
| Estudiante / Autor: | D. Juan Sandubete López |
| Profesores / Directores: | D. José Sánchez Moreno D. Pablo Otero Roth |

Hoja de calificaciones

*A mi familia, a mis amigos y a todos aquellos
que me han ayudado a realizar
este proyecto.*

Abstract

This document shows the developments made towards the creation of a Modular Physical Magnitude Meter together with the design of some algorithms that could allow it to estimate the value of several magnitudes (pressure, temperature, luminosity, etc.) of a corrosive external medium, such as salt water, based on the signals produced by sensors inside a protective methacrylate case, without direct exposure to the environment, enabling the use of low-cost electronics.

To demonstrate the viability of the technology, a first prototype is built and subjected to initial shallow immersion tests. The data generated, and stored on a memory card during the test, is discussed.

On the other hand, since the system is designed to incorporate various accelerometers for inertial navigation performance, an algorithm for the fusion of the acceleration and angular velocity signals is presented and another algorithm is proposed for the integration of these signals in order to optimize the position estimation using a deep reinforced learning algorithm.

Keywords: Submersible Meter, Data-logger, Monitoring, Underwater Measurements, Algorithms, Observers, Luminosity, Temperature, Pressure, Image, Relative Humidity, Prototype, Methacrylate, 3D Printing, Signal Fusion, Kalman Filter, Inertial Navigation.

Resumen

En este proyecto se presentan los desarrollos realizados hacia la creación de un sistema Medidor Modular de Magnitudes Físicas junto con el diseño de unos algoritmos que podrían permitirle estimar el valor de diversas magnitudes (presión, temperatura, luminosidad, etc.) de un medio externo corrosivo como el agua salada en base a las señales producidas por sensores en el interior de una carcasa protectora de metacrilato, sin exposición directa al medio, facilitando el uso de electrónica de bajo coste.

Para demostrar la viabilidad de la tecnología, un primer prototipo es construido y sometido a unas primeras pruebas de inmersión a escasa profundidad. Los datos generados y almacenados en una tarjeta de memoria durante la prueba son discutidos.

Por otro lado, dado que el sistema se diseña para que incorpore diversos acelerómetros para el desempeño de navegación inercial, se presenta un algoritmo para la fusión de las señales de aceleración y velocidad angular y se propone otro algoritmo para la integración de estas señales con el fin de optimizar la estimación de la posición mediante un algoritmo de aprendizaje reforzado profundo.

Palabras clave: Medidor Sumergible, Registro, Monitorización, Mediciones Submarinas, Algoritmos, Observadores, Luminosidad, Temperatura, Presión, Imagen, Humedad Relativa, Prototipo, Metacrilato, Impresión 3D, Fusión de Señales, Filtro de Kalman, Navegación Inercial.

Índice de contenidos

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 17 |
| 1.1 Tecnologías de medición existentes | 18 |
| 1.2 Objetivos | 18 |
| 2. Diseño electrónico modular | 21 |
| 2.1 Módulos | 21 |
| 2.1.1 Módulo de gestión | 21 |
| 2.1.2 Módulo de navegación | 22 |
| 2.1.3 Módulo de medidas ambientales..... | 23 |
| 2.1.4 Módulo de alimentación | 23 |
| 2.2 Subsistemas Electrónicos | 25 |
| 2.2.1 Microcontrolador ESP32 | 25 |
| 2.2.2 Reloj de Tiempo Real - DS3231 | 25 |
| 2.2.3 Multiplexor TCA9548A | 26 |
| 2.2.4 Unidad de Medidas Inerciales - MPU6050..... | 27 |
| 2.2.5 Módulo GNSS | 29 |
| 2.2.6 ADS1115 | 31 |
| 2.2.7 LDR – Light Dependent Resistor | 32 |
| 2.2.8 BME280 – Temperatura, presión y humedad relativa | 33 |
| 2.3 Conexiones | 34 |
| 3. Diseños mecánicos | 35 |
| 3.1 Carcasa | 35 |
| 3.2 Elementos estructurales interiores | 38 |
| 3.3 Elementos de sujeción externos | 41 |
| 4. Algoritmos de estimación..... | 43 |
| 4.1 Algoritmos de observación..... | 44 |
| 4.1.1 Presión..... | 44 |
| 4.1.2 Temperatura..... | 52 |
| 4.1.3 Luminosidad | 54 |
| 4.1.4 Corriente | 56 |
| 4.2 Algoritmos de fusión | 57 |
| 4.2.1 Fusión de aceleraciones | 57 |
| 4.3 Algoritmos de Integración..... | 63 |
| 4.3.1 Variabilidad de señal | 63 |
| 4.3.2 Navegación inercial | 64 |
| 4.4 Algoritmos de clasificación..... | 67 |

| | |
|---|----|
| 4.4.1 Detección inercial de movimiento | 67 |
| 4.4.2 Detección de inmersión | 68 |
| 5. Programación | 69 |
| 5.1 ESP32 principal | 69 |
| 5.1.1 Máquina de estados | 70 |
| 5.1.2 <i>FreeRTOS</i> | 72 |
| 5.1.3 Arquitectura multihilo | 73 |
| 5.2 ESP32 de visión | 75 |
| 5.3 ATmega328p de interfaz | 76 |
| 6. Pruebas del sistema | 79 |
| 6.1 Pruebas de integración continua | 79 |
| 6.2 Pruebas de estanqueidad | 81 |
| 6.2.1 Comprobación de sellado simple | 81 |
| 6.2.2 Inmersión en aguas confinadas | 83 |
| 6.2.3 Inmersión en aguas abiertas | 88 |
| 7. Proyección Comercial | 91 |
| 7.1 Costes del proyecto | 91 |
| 7.2 Diseño comercializable | 92 |
| 7.3 Aplicaciones | 93 |
| 8. Conclusiones y trabajo futuro | 95 |
| 9. Bibliografía | 96 |
| 10. Anexos | 98 |
| 10.1 Anexo A: Instalación y programación de ESP32 | 98 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Placa de circuitos del módulo de gestión..... | 22 |
| Figura 2: Placa de circuitos del módulo de navegación. | 22 |
| Figura 3: Placa de circuitos del módulo de medidas ambientales. | 23 |
| Figura 4: Módulo de alimentación fabricado por Sincere Company con batería 18650 de Samsung a su derecha. | 24 |
| Figura 5: Reloj de tiempo real modelo DS3231. | 25 |
| Figura 6: Multiplexor TCA9548A. | 26 |
| Figura 7: Diagrama de conexiones de TCA9548A. Imagen obtenida de la hoja de datos del dispositivo..... | 26 |
| Figura 8: Módulos de medidas inerciales MPU6050: a) DFRobot, b) importación china..... | 27 |
| Figura 9: Diagrama de distribución de los acelerómetros en el módulo de navegación. | 28 |
| Figura 10: Convertidor analógico-digital ADS1115. | 31 |
| Figura 11: Conjunto de sensores LDR. | 32 |
| Figura 12: Sensor BME280..... | 33 |
| Figura 13: A la izquierda, conectores Dupont. A la derecha, conector JST-PHR. | 34 |
| Figura 14: Diseño de carcasa prototipo presentado en la solicitud de Modelo de Utilidad registrada en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM). | 35 |
| Figura 15: Detalle del cuerpo de la carcasa de metacrilato fabricada (izquierda) y una tapa lateral de la misma (derecha). | 36 |
| Figura 16: Figura 13: Detalle del cuerpo de la carcasa de metacrilato fabricada con una tapa colocada (izquierda) y una tapa lateral de la misma atornillada incluyendo arandelas y junta de sellado (derecha). | 36 |
| Figura 18: Detalle en microscopio del canal fabricado para la colocación de la junta de sellado. | 37 |
| Figura 17: Detalle en microscopio de perforaciones roscadas para la inserción de los tornillos en el cuerpo de la carcasa. | 37 |
| Figura 19: Tornillos de 16x3mm, arandelas de 3mm y tuercas de 3mm. Todo fabricado en AISI-316..... | 37 |
| Figura 21: Cilindro separador: a) vista frontal-lateral, b) vista trasera. | 38 |
| Figura 20: Estructura de sujeción de base por fricción..... | 38 |
| Figura 22: a) Cilindro separador para placa ambiental, b) Grapa de sujeción para módulo de alimentación. | 39 |
| Figura 23: Soportes para: a) módulo GNSS, b) cámara digital. | 39 |
| Figura 24: Muestra de los elementos estructurales impresos: a) estructura de fijación base, b) separador de placa ambiental, c) separador cilíndrico, d) soporte de cámara, e) soporte de GNSS, f) estructura de fijación techo. | 41 |
| Figura 25: Estructura de agarre exterior para el Medidor Modular de Magnitudes Físicas. | 42 |
| Figura 26: Diagrama de deformación de placa lateral. | 46 |
| Figura 27: Ejecución de los modelos de tensión en el centro, tensión en el perímetro y máximo desplazamiento en el centro (por orden descendente) en una de las placas laterales de PMMA Perplex Colada de 100mm de radio y 80mm de espesor. La línea discontinua muestra el límite plástico del material ante esfuerzo de flexión, 117MPa..... | 48 |
| Figura 28: Variación de presión interna para dos placas laterales aproximadas por deformación como casquetes esféricos ideales..... | 48 |
| Figura 29: Diagrama de analogía eléctrica para la transmisión de calor..... | 53 |
| Figura 30: Esquema de problema de transmisión de calor en la carcasa. | 53 |

| | |
|--|----|
| Figura 31: Circuito mínimo de acondicionamiento para sensor LDR. | 55 |
| Figura 32: Relación Resistencia (Ohm) - Luminosidad (Lux) del sensor LDR empleado. | 56 |
| Figura 33: Prueba de Filtro de Kalman con acelerómetro en reposo. | 59 |
| Figura 34: Diagrama de velocidades en un sólido rígido..... | 62 |
| Figura 35: Diagrama de fusión sensorial para una distribución no centralizada de los sensores inerciales..... | 63 |
| Figura 36: Diagrama de flujo de datos global. | 69 |
| Figura 37: Máquina de estados del microcontrolador principal. | 70 |
| Figura 38: Máquina de estados del microcontrolador de interfaz..... | 76 |
| Figura 39: Montaje en placa de pruebas para integración continua. | 80 |
| Figura 40: Montaje final en chasis impreso del prototipo. | 80 |
| Figura 41: Prueba de estanqueidad con junta de sellado de 83x3mm. | 81 |
| Figura 42: Resultados de la primera prueba de sellado..... | 82 |
| Figura 43: Prueba de estanqueidad con junta de sellado de 83x3.5mm. | 82 |
| Figura 44: Resultados de segunda prueba de sellado..... | 83 |
| Figura 45: Entorno de prueba para inmersión en aguas confinadas. | 84 |
| Figura 46: Montaje completo del primer prototipo de Medidor Modular de Magnitudes Físicas. | 84 |
| Figura 47: Vista sumergida de la prueba de inmersión en aguas confinadas. | 85 |
| Figura 48: Vista superior de la prueba de inmersión en aguas confinadas..... | 85 |
| Figura 49: Gráfica de datos obtenidos por sensor BME280 durante la prueba de inmersión en aguas confinadas. | 86 |
| Figura 50: Datos obtenidos de uno de los sensores inerciales durante la prueba de inmersión en aguas confinadas. | 87 |
| Figura 51: Imagen original tomada por ESP32-Cam durante la prueba de inmersión en aguas confinadas. A la derecha se muestra la misma procesada con un filtro paso-altas..... | 88 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Parámetros de impresión..... | 40 |
| Tabla 2: Clasificación de algoritmos implementados..... | 43 |
| Tabla 3: Costes del prototipo..... | 91 |
| | |
| Algoritmo 1: Estimación de presión externa..... | 52 |
| Algoritmo 2: Filtro de Kalman modificado para fusión sensorial secuencial..... | 61 |

1. Introducción

Los océanos ocupan más del 70% de la superficie terrestre y son un medio fundamental de transporte, soporte vital y ecológico del planeta. En las últimas décadas, los desarrollos en este medio se han incrementado enormemente gracias a la aplicación de los avances tecnológicos en diversos campos como la electrónica, robótica e informática; haciendo posible el desarrollo de nuevos modelos productivos como son la minería submarina, la generación eólica marina, la pesquería de precisión o la acuicultura de alta mar.

La importancia de las buenas prácticas en estos negocios es enfatizada en el reporte anual de Economía Azul de la Unión Europea [2] con el último fin de garantizar la salud de los océanos y salvaguardar la economía asociada, permitiendo mantener su productividad de forma sostenible a lo largo del tiempo.

En este mismo documento se definen las actividades que se consideran incluidas dentro del término “Economía Azul”:

- Actividades basadas en el mar: son aquellas realizadas en el océano, mar y áreas costeras como recursos vivos marinos (pesca, acuicultura, etc.), recursos minerales, energías renovables, desalinización, transporte y turismo.
- Actividades relacionadas con el mar: aquellas que usan productos o los producen, o servicios a partir de actividades marinas como procesamiento de alimentos de origen marino, biotecnología, astilleros, actividad portuaria, servicios digitales relacionados, etc.

En este contexto, el sector de la acuicultura ha experimentado una gran expansión de manera global; siendo especialmente importante en Noruega y Chile. Y aunque este aumento ha sido exitoso en términos económicos, la producción chilena, particularmente, ha pasado por una importante crisis sanitaria, con un gran impacto medioambiental asociado en términos de mareas rojas. Esto ha desembocado en cambio de políticas que, sin embargo, no parecen ser suficientes para disminuir este impacto medioambiental a niveles sostenibles. [3]

La acuicultura, sin embargo, no es el único de los sistemas productivos marinos con gran impacto en el medio. Hacia el año 2015 se detectó por primera vez el alga parda *Rugolopteryx okamurae*, originaria de las regiones subtropicales del Pacífico, en aguas del Estrecho de Gibraltar; traída probablemente por el tráfico marino de forma accidental. Este alga rápidamente ha colonizado una gran variedad de hábitats de los 0 a 40m de profundidad afectando negativamente a las especies endógenas, y particularmente a los corales [4].

La medición de magnitudes físicas en determinados medios corrosivos, especialmente en el medio marino, es sin embargo tan importante como costosa en muchos casos, por lo que reduce la capacidad tanto de empresas productoras como de agencias medioambientales para monitorizar el impacto producido y aplicar medidas que permitan optimizar la producción y garantizar la sostenibilidad de estas actividades de forma efectiva.

Así, en esta obra se presentan los desarrollos realizados para el diseño de un Medidor Modular de Magnitudes Físicas (M³F) de bajo coste, que incorpora sensores ambientales e inerciales y receptor GNSS así como diversos algoritmos que permiten su funcionamiento autónomo bajo diferentes condiciones, como propuesta de solución económica para la adquisición de datos que ayude a facilitar el desarrollo y aplicación de estrategias para una correcta transición hacia una economía azul sostenible y una mayor protección de ecosistemas marinos vulnerables.

1.1 Tecnologías de medición existentes

Uno de los desarrollos asociados al surgimiento de la electrónica digital de mayor importancia en lo pertinente a la instrumentación y medida fueron los convertidores analógico-digitales. Mediante el uso de estos, cualquier señal continua de tensión o corriente puede ser cuantificada y codificada, es decir, digitalizada. Además, mediante el uso de un transductor adecuado es posible transformar cualquier magnitud física medida al dominio eléctrico, permitiendo así analizar cualquier señal mediante técnicas complejas de procesamiento digital de señales comunes a diferentes disciplinas de la ingeniería y ciencia.

En la actualidad, los sistemas electrónicos tanto de adquisición como de procesamiento de datos así como las técnicas para su procesamiento existen con gran diversidad de topologías, tamaños y funcionalidades, lo que ha permitido integrarlos en la mayor parte de sectores productivos y científicos.

Las magnitudes físicas medidas en las ciencias del mar como la oceanografía o la biología marina e industrias como la pesquera de precisión o la acuicultura dependen del objeto concreto de estudio, sin embargo, podrían destacarse: temperatura, presión, conductividad, turbidez, luminosidad, salinidad, materia orgánica y oxígeno disueltos (MOD) y corriente.

A pesar de que la cantidad de dispositivos disponibles para la medición de estas magnitudes es inmensa, son menos las alternativas de bajo coste debido a la alta especialización de los sistemas que deben soportar las condiciones de un medio corrosivo como es el agua salada.

Por último, aunque la navegación inercial es usada para mejorar el posicionamiento de robots submarinos, no existe en el mercado una solución que emplee estas técnicas de navegación para permitir a los buzos emparejar las medidas del *data-logger* con la posición en que se ha tomado esta debiendo usualmente emparejar estos datos de forma aproximada *a posteriori*.

Es por ello el objetivo de este proyecto el ofrecer una solución de coste reducido para la medidas ambientales submarinas en aguas someras de hasta 50m de profundidad con información de posición estimada asociada.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo de un prototipo de Medidor Modular de Magnitudes Físicas (M³F) cuyos sistemas electrónicos sean de coste reducido, en sustitución de aquellos usualmente empleado en aplicaciones marinas y de mayor coste. Para ello, el dispositivo se diseña siguiendo un paradigma de medición basado en algoritmos de estimación que observan, en términos de control, las magnitudes del exterior a partir de las señales de sensores en el interior de una carcasa resistente a la corrosión.

Asimismo, con el objetivo de asociar de una coordenada y profundidad a cada conjunto de datos muestreados en cada ciclo, se presenta un algoritmo de navegación inercial donde se fusionan las señales de varios sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) y un método propuesto para la mejora de la integración de las señales mediante el uso de entrenamiento reforzado profundo.

Ordenadamente, los objetivos principales son:

1. Diseño, construcción y prueba de un prototipo de medidor modular de magnitudes físicas como plataforma para desarrollos posteriores.
2. Diseño de algoritmos para la observación de magnitudes físicas externas a partir de medidas internas.

3. Diseño de un algoritmo para la fusión e integración de señales inerciales.

Los objetivos secundarios del proyecto, por otro lado, son:

1. Realizar un cálculo teórico de los límites de operación del prototipo.
2. Minimizar los costes mediante la selección de componentes electrónicos de coste reducido.
3. Detectar fallos de diseño en el prototipo desarrollado.
4. Crear una arquitectura *software* fácilmente ampliable y reutilizable para la integración de módulos desarrollados posteriormente.
5. Prueba de los algoritmos de observación a partir de datos experimentales.
6. Optimización de consumo energético de los sistemas electrónicos.

El cumplimiento de estos objetivos es discutido en el apartado de Discusión y conclusiones.

2. Diseño electrónico modular

El dispositivo ha sido diseñado de forma modular con el fin de conseguir una fácil adaptación a las necesidades asociadas a la aplicación para la cual se desee emplear el mismo. Este consiste en una serie de placas de circuitos impresos, de forma circular, apiladas paralelamente y unidas por conectores de latón o nylon, cuya resistencia a la corrosión es mayor que la del acero de uso normal; especialmente frente al salitre.

En la placa principal del sistema se incluye un multiplexor digital de protocolo I²C al cual se pueden conectar hasta 2048 sensores con direcciones distintas (máximo seis sensores con misma dirección).

Cada una de estas placas de circuitos o PCB (Printed Circuit Board) circulares se conecta con la siguiente y la anterior a través de un bus de ocho pares de líneas correspondientes a los ocho canales de comunicación de protocolo I²C (un cable SDA -Serial Data Line- y otro SCL -Serial Clock Line- por cada canal) que llegan al multiplexor digital, conectado directamente al microcontrolador principal. La alimentación de cada una de las PCB, por otro lado, es realizada mediante dos pares de cables (V+, V-), de 5V y 3.3V respectivamente, independientes para cada placa y que parten directamente del módulo de gestión de la batería y alimentación. Protegiendo cada línea de alimentación mediante un fusible, se impide el fallo total del dispositivo en caso de cortocircuito en alguno de sus módulos.

2.1 Módulos

A continuación, se describen los bloques que componen al medidor modular de magnitudes físicas que, al menos, para el caso del prototipo construido para este trabajo, coincide con las placas de circuitos impresos fabricadas; divididas según la funcionalidad de la electrónica que portan. Igualmente, se definen los componentes electrónicos seleccionados para el prototipo.

Las placas han sido fabricadas en FR-4 de 130°C, a dos caras, 1.6mm de grosor, 1oz de cobre por pie cuadrado, con película protectora azul HASL con plomo y serigrafía blanca.

Para el diseño de estas placas se ha creado un zócalo para cada una de las PCB mínimas de los componentes instalados. Defino aquí PCB mínima como aquella placa con los elementos indispensables, como resistencias o diodos, para que el correcto funcionamiento del componente electrónico. Estas se distribuyen por cada uno de los módulos diseñados y son interconectadas con rutas de 0.6mm de grosor.

2.1.1 Módulo de gestión

Incluye todas las funcionalidades básicas para el funcionamiento del dispositivo en cualquier aplicación a la que se aplique. Alberga los siguientes dispositivos electrónicos:

- ❖ Microcontrolador principal: ESP32.
- ❖ Multiplexor digital para bus I²C: TCA9548A.
- ❖ Adaptador micro-SD vía SPI.
- ❖ Reloj de tiempo real para bus I²C con alimentación independiente: DS3231.

Además de los elementos antes citados, el módulo de gestión incluye un diodo LED que permite al usuario identificar el estado del dispositivo en algunas situaciones. En condiciones de monitorización, permanece apagado para aumentar la autonomía del sistema. No obstante, bajo el modo de operación de navegación, este se enciende unos instantes para que el usuario pueda comprobar su funcionamiento. El diseño de la placa de circuitos se puede apreciar en la Figura 1.

El tiempo exacto que permanece encendido, su encendido constante, así como su encendido en los diferentes estados de funcionamiento puede ser configurado desde el fichero de configuración del dispositivo.

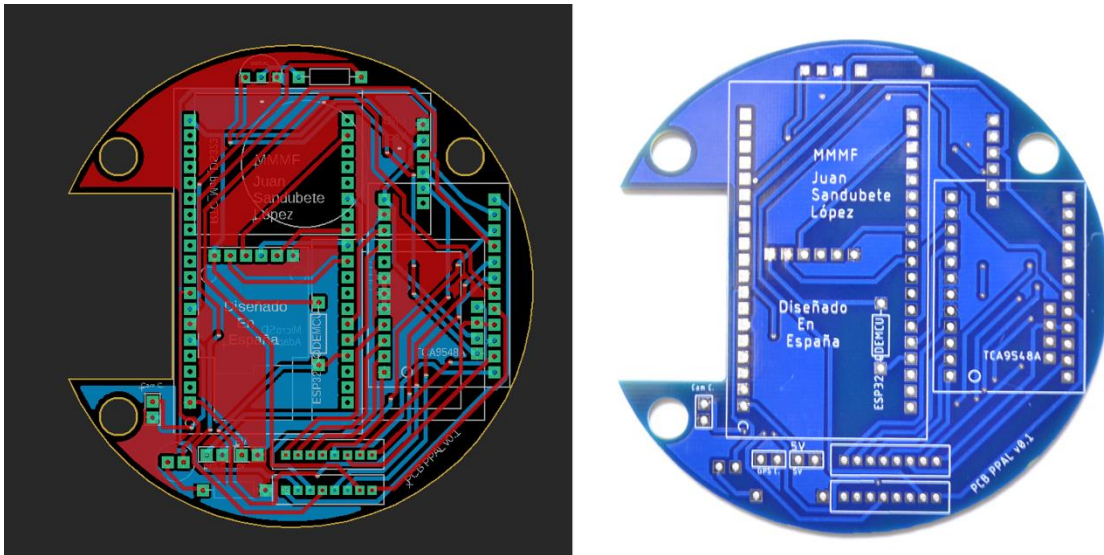


Figura 1: Placa de circuitos del módulo de gestión.

2.1.2 Módulo de navegación

En él se encuentran los sistemas electrónicos necesarios para la navegación inercial básica, así como para la obtención de la posición por GPS y su adaptación a protocolo I²C. Componentes:

- ❖ Unidades de medida inercial (acelerómetro/giroscopio): MPU6050.
- ❖ Módulo GNSS del fabricante TOPGNSS con adaptación de comunicación I²C mediante Atmega328p.
- ❖ Magnetómetro: No incluido en el prototipo.

Este módulo incluye no una, sino varias unidades de medidas inerciales, permitiendo reducir el ruido e incertidumbre asociadas a las señales de aceleración y velocidad angular mediante el uso de técnicas de fusión sensorial; como se ve en la sección 4.2. El diseño de la placa de circuitos del módulo de navegación se puede ver en la Figura 2.

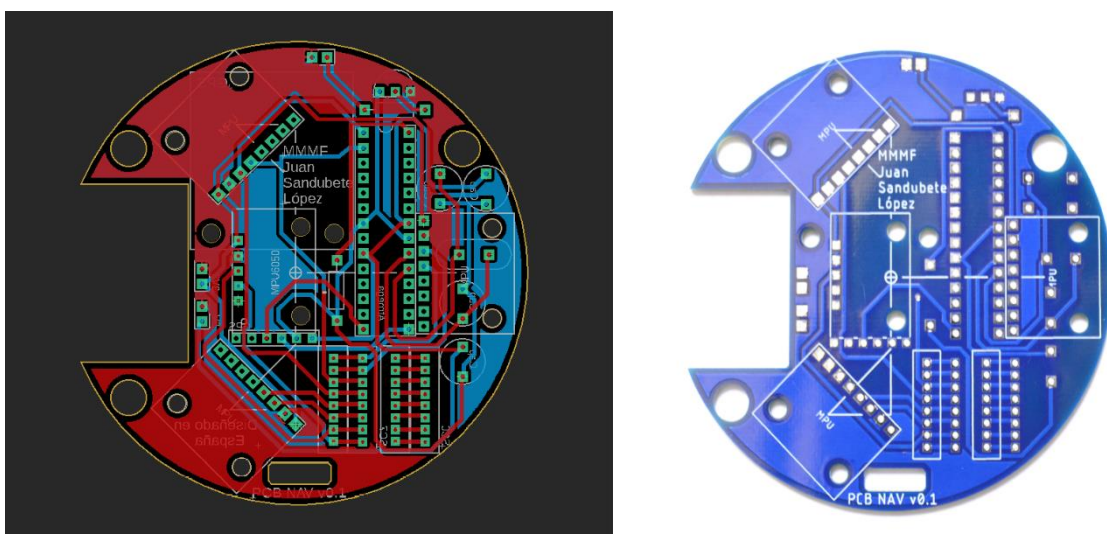


Figura 2: Placa de circuitos del módulo de navegación.

3.1.3 Módulo de medidas ambientales

Incluye todos los sensores empleados para el muestreo de las condiciones ambientales de interés, así como la electrónica de acondicionamiento de estos en caso de ser necesario. El prototipo porta los siguientes sensores:

- ❖ Cámara: ESP32-Cam con sensor OV2640 v2.0.
- ❖ Luminosidad3: LDR modelo GL5539 x4.
- ❖ Convertidor analógico-digital I²C: ADS1115.
- ❖ Temperatura, humedad, presión barométrica: BME280.
- ❖ Ranura para PCB de medida estándar

Es de esperar que haya múltiples módulos de medidas ambientales en dispositivos empleados en aplicaciones de mayor exigencia, variando el diseño de estos según los sensores que deban portar. El diseño de la placa de circuitos del módulo ambiental se puede ver en la Figura 3.

Para mayor versatilidad del prototipo inicial, se ha dejado espacio para la instalación de un ADS1115 adicional y la inserción de una placa, por definir, con salida para cuatro sensores analógicos y conexión de alimentación y referencia de tensión. Estas cuatro salidas van conectadas al ADS1115 extra.

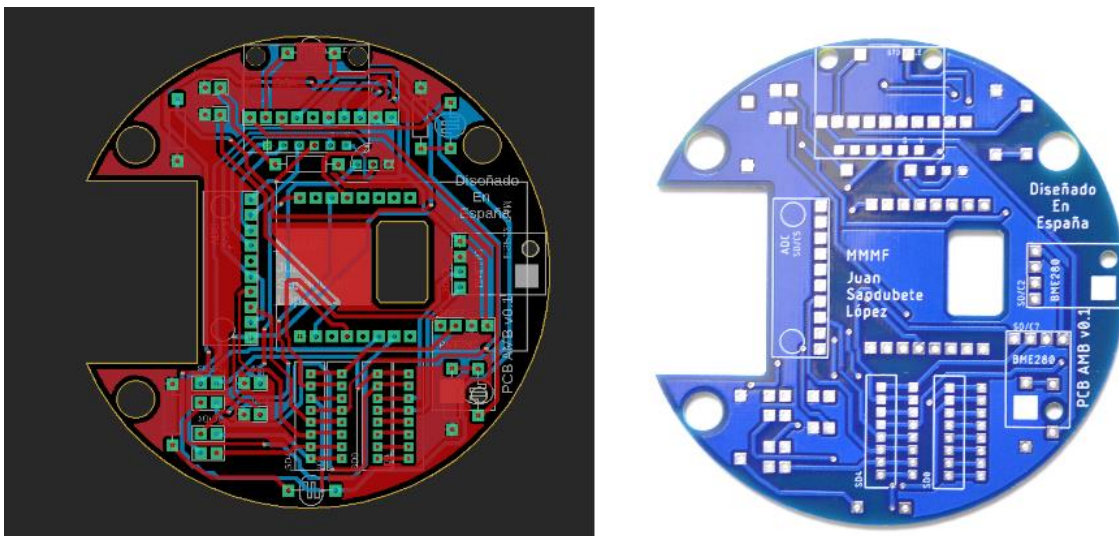


Figura 3: Placa de circuitos del módulo de medidas ambientales.

2.1.4 Módulo de alimentación

Gestiona la batería de litio que provee de energía al resto de subsistemas del dispositivo.

- ❖ Batería de ion de litio: 18650 de 3000mAh.
- ❖ Fusibles de bajo amperaje (no incluidos en el prototipo).

Para futuras versiones del dispositivo, podría resultar más conveniente emplear baterías de ion de litio planas en sustitución del modelo 18650; pues resultan más baratas y permiten un mayor aprovechamiento del espacio.

Por quedar fuera del alcance del prototipo, se ha empleado un módulo ya distribuido comercialmente con salidas de 5V y 3.3V; con capacidad de carga de 3A y 1A respectivamente.



Figura 4: Módulo de alimentación fabricado por Sincere Company con batería 18650 de Samsung a su derecha.

2.2 Subsistemas Electrónicos

En esta sección se amplía la información y se justifican los principales subsistemas electrónicos (convertidores, sensores y otros) empleados en los diferentes módulos anteriormente descritos y para el caso del prototipo desarrollado.

Los sistemas se muestran por orden de aparición en el apartado anterior.

2.2.1 Microcontrolador ESP32

Este es el microcontrolador empleado como unidad de procesamiento principal. Con un procesador de 32bits, este dispositivo desarrollado por la compañía china *Espressif*, cuenta con dos núcleos de procesamiento (permitiendo la ejecución multihilo real) que funcionan normalmente a 160MHz.

Este microcontrolador cuenta con módulos de I²C, SPI, ADC y modos de funcionamiento de bajo consumo además de conectividad Wifi y Bluetooth.

Entre el *software* implementado en el dispositivo se incluyen:

- Máquina de estados del sistema.
- Protocolos de comunicación y configuración de subsistemas.
- Hilo para el almacenamiento de los datos.
- Algoritmos de medida físico-digital.
- Algoritmos de navegación inercial.

Para mayor información acerca del código implementado, ver la sección 5.1.

2.2.2 Reloj de Tiempo Real - DS3231

El reloj de tiempo real, presentado en la Figura 5, es un sistema capaz de mantener un seguimiento de la hora a lo largo del tiempo. Cuenta con una unidad de alimentación independiente y permite la modificación de la hora (para sincronizarla, por ejemplo, usando el ordenador) además de poder configurar diferentes alarmas que disparan la activación de un pin de interrupción.



Figura 5: Reloj de tiempo real modelo DS3231.

La mayor granularidad de tiempo accesible desde los registros es el segundo, por lo que, en modo de navegación, al haber múltiples medidas por unidad de tiempo, todas las medidas realizadas en un mismo periodo compartirán misma etiqueta temporal.

El reloj de tiempo real es empleado principalmente con una finalidad triple:

Registro de hora asociado a cada medida realizada de magnitudes físicas.

Despertar del sistema en modo monitorización en periodos de tiempo de orden superior al segundo. Probablemente, decenas o quincenas de minuto.

Entrada para la estimación de la incertidumbre acumulada desde el último dato de posición GPS.

Este dispositivo está conectado mediante I²C al multiplexor. También se conecta de forma directa mediante el pin de interrupción el microcontrolador principal.

2.2.3 Multiplexor TCA9548A

El multiplexor digital TCA9548A, visible en la Figura 6, permite al microcontrolador principal realizar una comunicación por protocolo I²C con una mayor cantidad de componentes (hasta 256 dispositivos con direcciones distintas por cada uno de los ocho canales). Además, resuelve el problema de comunicación con aquellos componentes electrónicos cuya dirección I²C no es única ni configurable, como sucede con las MPU6050 entre sí; que también tienen misma dirección que el reloj DS3231.

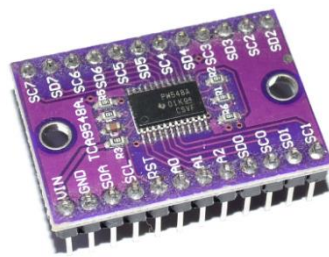


Figura 6: Multiplexor TCA9548A.

Asimismo, este multiplexor permite la interfaz entre componentes con diferentes tensiones de funcionamiento; tal y como sucede con el microcontrolador de interfaz ATmega328p, alimentado a 5V, y el microcontrolador principal (ESP32), alimentado a 3.3V.

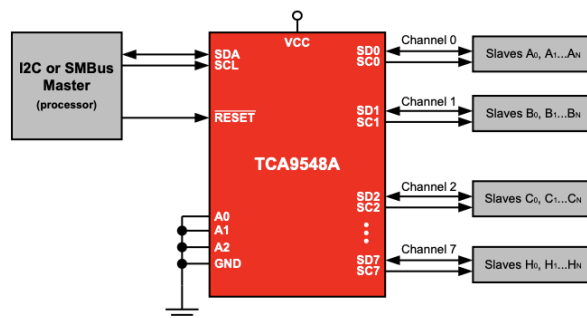


Figura 7: Diagrama de conexiones de TCA9548A. Imagen obtenida de la hoja de datos del dispositivo.

Por último, en caso de ser necesario es posible cambiar la dirección I²C del multiplexor conectando los pines A0, A1 y A2 (ver Figura 7) a GND o VCC; pudiendo tomar hasta ocho direcciones diferentes. Esto permitiría conectar 64 canales I²C con hasta 256 dispositivos por canal.

2.2.4 Unidad de Medidas Inerciales - MPU6050

Para permitir la implementación de algoritmos de navegación inercial es necesario medir tanto la aceleración como la velocidad angular del sistema.

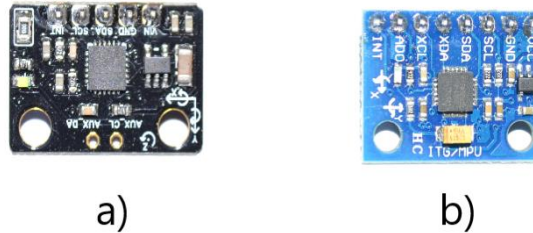


Figura 8: Módulos de medidas inerciales MPU6050: a) DFRobot, b) importación china.

Con el fin de reducir la varianza de las señales que deben ser integradas para la estimación de posición y orientación del dispositivo a lo largo de la travesía, múltiples unidades de medida inercial deben ser empleadas junto con un algoritmo de fusión sensorial. Para el caso del actual prototipo, se usan tres de estas unidades; con la posibilidad de instalar una adicional en caso de encontrarlo necesario.

La disposición de los acelerómetros, como se muestra en el diseño de la placa de navegación, Figura 2, están dispuestos tal que:

- Centro: acelerómetro de mayor calidad, aproximadamente coincidente con el centro geométrico del dispositivo. Concretamente, se ha instalado una MPU6050 del fabricante DFRobot. Figura 8.a
- Excéntricos: acelerómetros rotados, opcionales. Para estas posiciones, se han elegido acelerómetros clones de MPU6050 importados de China. Figura 8.b

En la Figura 9 se especifica la orientación de cada uno de los acelerómetros dispuestos en la placa de navegación.

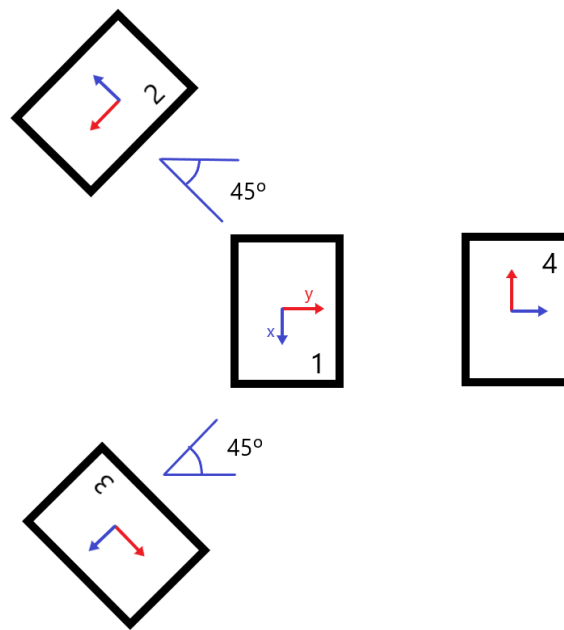


Figura 9: Diagrama de distribución de los acelerómetros en el módulo de navegación.

2.2.5 Módulo GNSS

El módulo seleccionado ha sido el fabricado por TOPGNSS con chip de procesamiento UBX-M8030-KT. Dado que este únicamente soporta el protocolo de comunicación serie, no es viable conectarlo directamente al microcontrolador principal pues el bus que interconecta cada una de las placas de circuitos modulares transmiten señales de protocolo I²C y sería necesario añadir dos líneas extra, Tx y Rx, para conectarlos. Esta solución no sería universal y únicamente aplazaría el enfrentamiento al problema al momento en que se intentara conectar un segundo dispositivo bajo protocolo serie. Por tanto, conviene realizar una adaptación intermedia que permita su conexión de forma análoga a la del resto de sensores y sistemas electrónicos.

Con este fin, se añade un microcontrolador de 8bits, un Atmega328p (empleado en los conocidos Arduino Uno), para funcionar como interfaz UART- I²C. Este microcontrolador intermedio se conecta al bus I²C como esclavo, asignándole una dirección I²C sin emplear por el resto de los dispositivos.

El funcionamiento planteado es sencillo: con cierto tiempo de muestreo previamente configurado, éste pedirá la información de posición al módulo de GPS por comunicación serie y actualizará los registros virtuales de datos internos. Cada vez que el microcontrolador principal lo requiera, este le devolverá los datos de los registros que se pidan.

El microcontrolador principal, además, tiene control directo sobre el MOSFET 2N7000 a través del cual se cierra el circuito de alimentación tanto del ATmega328p como del módulo GPS. Cuando se detecta un incremento en la presión interna, dado por el Algoritmo 1, se corta la alimentación de estos dispositivos para aumentar la autonomía del M³F.

2.2.5.1 Programación de ATmega328p

Dado que el microcontrolador usado es empleado por Arduino en su placa de prototipado, es posible hacer uso de sus herramientas para la implementación del código mediante el entorno de desarrollo de la empresa: Arduino IDE.

Este microcontrolador, por tanto, es programado exactamente igual que un Arduino Uno. Luego, para su colocación en la placa del módulo de navegación del dispositivo en desarrollo, se separa el microcontrolador de la placa de origen y se inserta en un zócalo con algunos condensadores y resistencias así como un reloj de cuarzo externo para su correcto funcionamiento.

Para programar estos microcontroladores con el entorno de Arduino, no es necesario más que un kit de desarrollo de Arduino (tarjeta Arduino UNO) y tantos microcontroladores ATmega328p como se requieran. En caso de que estos vengan sin programación previa de fábrica, se le instala el *bootloader* de Arduino empleando un microcontrolador previamente programado con el cual se comunicará por protocolo serie. Tras esto, se reemplaza el ATmega328p en la tarjeta de Arduino UNO, se compila e instala el programa, se extrae el microcontrolador y se coloca en el destino final junto con los elementos de funcionamiento básico nombrados en el párrafo anterior.

La estructura del programa implementado, dada en más detalle en 5.3, se muestra a continuación:

- i. Se configuran los subsistemas del Atmega328p, a saber: *timer*, interrupción, módulo UART, módulo I²C.
- ii. Se comprueba la conexión serie con el módulo GPS.
- iii. Se entra en el bucle para repetir:

- a. Entrar en modo sueño profundo.
 - i. Si despierta el puerto serie: actualizar datos de navegación.
 - ii. Si despierta el bus I²C: devolver últimos datos actualizados.

Para la comunicación con el módulo GNSS se ha empleado la librería NeoGPS [5]. En caso de resultar conveniente, ésta podría ser adaptada fácilmente para funcionar directamente en el ESP32 sin más que adaptar las funciones implementadas con las librerías de Arduino a las disponibles para ESP32 y las que han sido desarrolladas en el marco de este proyecto.

2.2.5.2 Control de alimentación

El consumo del módulo GPS más el microcontrolador de interfaz alcanza los 300mW durante los momentos de procesado más intenso; siendo igualmente alto, alrededor de los 200mW, en ausencia de señal GPS. Como es evidente, no es posible recibir señal satélite bajo agua, más allá de los primeros centímetros de profundidad, por la gran capacidad para absorber radiación que tiene esta y la baja potencia de la señal. Por ello, con el fin de cortar el suministro de potencia a este módulo, así como al propio microcontrolador de interfaz; las conexiones a tierra (referencia) de todos los componentes electrónicos implicados son manipuladas a través de un transistor MOSFET 2N7000 cuya compuerta es operada directamente mediante el GPIO del microcontrolador principal.

La elección del transistor 2N7000 en este módulo, así como para el control de la alimentación de la pantalla OLED y del módulo de la cámara, viene dada por la baja tensión necesaria para operar su compuerta; bastando los propios 3.3V del microcontrolador ESP32. No obstante, debido a la poca potencia bajo control, prácticamente cualquier otro transistor con bajo voltaje de operación sería válido.

2.2.6 ADS1115

Como se ha definido en el comienzo de este capítulo, cada placa de este dispositivo transmite la información a través de un bus de ocho canales de comunicación con protocolo I²C como método estandarizado de comunicación interna. Por este motivo, sensores analógicos como pueden ser resistencias PTC o LDR (para medir temperatura o luminosidad, respectivamente) no pueden ser leídos por los convertidores analógicos-digitales propios del microcontrolador principal, el ESP32. En su defecto, se han empleado convertidores ADS1115, Figura 10, para la lectura de las señales analógicas de tensión y su conversión y transmisión por vía digital.



Figura 10: Convertidor analógico-digital ADS1115.

Cada convertidor ADS1115 dispone de cuatro entradas analógicas y puede ser configurado para responder a una de cuatro direcciones I²C diferentes. Es decir, pueden conectarse hasta cuatro de estos convertidores a un mismo bus I²C; y con ellos, dieciséis sensores analógicos en total. Por tanto, haciendo uso de los ocho canales I²C disponibles gracias al multiplexor, pueden implementarse en el dispositivo hasta 128 lecturas analógicas diferentes.

Estos convertidores, fabricados por Texas Instruments, tienen diferentes características adicionales que los hacen apropiados para sistemas autónomos. Por ejemplo, permiten una configuración digital de ganancia previo a la lectura de la señal a medir, la generación de una señal de interrupción al detectar un valor superior a un umbral establecido (comparador) o lectura de forma continua, o bajo petición, de las señales. Así, dan lugar a la posibilidad de implementar diferentes algoritmos en respuesta a las señales.

Como resumen de características de este componente puede decirse:

- Temperatura de operación: -40°C a 125°C.
- Comparador programable con alerta asociada.
- Muestreo configurable: 8 a 860 [muestras/s].
- Bajo consumo: 150µA.
- Entrada analógica *rail-to-rail*.
- Resolución: 16bits.
- Offset por temperatura: 0.005 LSB/°C.
- Error en ganancia: normal ±0.01%, máximo ±0.15%.

El ruido inyectado sobre la señal por acción del convertidor es dependiente de la ganancia configurada, tanto en valor RMS como pico a pico, y también es dependiente de las muestras por segundo configuradas, únicamente en valor pico a pico.

En el prototipo fabricado, se han habilitado dos huecos para la inserción de las PCB mínimas de los ADS1115; siendo una dedicada a los sensores de luminosidad, y la otra conectada a una ranura para una PCB de sensores analógicos a definir.

Nota. Todos los sensores son analógicos, estrictamente hablando (es decir, alteran un voltaje o una intensidad en función de la variable física medida). Aquí, se llama sensor digital a aquel que dispone de capacidad de procesamiento y digitalización de la señal en el propio cuerpo que contiene al sensor analógico; como podrían ser la MPU6050 o el BME280.

2.2.7 LDR – Light Dependent Resistor

Los sensores analógicos empleados en este proyecto han sido las resistencias dependientes de la luminosidad, LDR, mostrados en la Figura 11. Estas, como su nombre indica, varían su valor resistivo en función de la luz ambiente, principalmente, aunque con cierto sesgo debido a la temperatura ambiente que, dependiendo de la precisión requerida por la aplicación, puede ser necesario corregirlo.

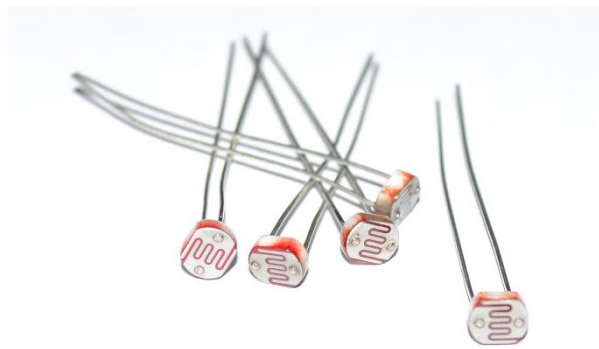


Figura 11: Conjunto de sensores LDR.

Para medir el valor de la resistencia del sensor pueden realizarse diferentes montajes clásicos propios del campo de la instrumentación electrónica. No obstante, por la naturaleza de este proyecto en el cual se pretende implementar únicamente un prototipo funcional, se ha optado por emplear un montaje simple: un divisor resistivo alimentado por una tensión de 3.3V.

En un montaje de este tipo, la elección del valor de la resistencia de referencia (aquella con la cual se divide la tensión y cuyo valor es prácticamente constante) dependerá de la variación de la resistencia con la cual se pretende comparar. El problema, por tanto, al usar una LDR es estimar el rango operativo de dicha resistencia que, para las empleadas en este prototipo, varía de los 50kOhm, a plena luz del día, a los 5MOhm, en penumbra.

Lo que es más, como se muestra en la Figura 31, la variación del valor resistivo con respecto de la luz ambiental sigue una curva logarítmica, dificultando la determinación de un valor apropiado de resistencia comparativa.

No obstante, gracias al uso del convertidor ADS1115 existe la posibilidad de configurar la ganancia dinámicamente, *in situ*. Así pues, se elige un valor de resistencia relativamente alto pero que permita leer un valor de tensión no despreciable con gran incidencia de luz; de unos 40kOhm. Para mayor oscuridad, bastará con aumentar la ganancia del amplificador.

Por otro lado, se han dispuesto varias (cuatro) resistencias dependientes de la luminosidad con ángulos diferentes con el fin de evitar el sesgo de las lecturas por sombras según la orientación del dispositivo, el ángulo de incidencia de la luz o cualquier otro fenómeno transitorio. Dos apuntan hacia el frente del dispositivo, en la misma dirección que lo hace la cámara, y las otras

apuntan hacia arriba y hacia abajo; colocadas en la parte superior e inferior del dispositivo. Tal y como se indica en el siguiente esquema.

2.2.8 BME280 – Temperatura, presión y humedad relativa

Se trata de un sensor digital con interfaz I²C así como SPI (Serial Peripheral Interface) capaz de medir temperatura, presión y humedad con las siguientes características:



Figura 12: Sensor BME280.

- Temperatura:
 - Rango: -40° a 85°C.
 - Precisión absoluta: Depende de la temperatura.
 - ❖ T(-40,-20)°C: ±1.5°C.
 - ❖ T(-20,0)°C: ±1.25°C.
 - ❖ T(0,65)°C: ±1°C.
 - Precisión relativa: No especificada.
 - Ruido RMS: En peores condiciones: 0.005°C.

- Presión:
 - Rango: 30 a 110kPa.
 - Precisión absoluta: Depende de la temperatura.
 - ❖ T(-20,0)°C: ±0.17kPa.
 - ❖ T(0,65)°C: ±0.1kPa.
 - Precisión relativa: Puede depender de la temperatura.
 - ❖ T(-20,0)°C: No especificada.
 - ❖ T(0,40)°C: ±0.012kPa.
 - ❖ T(40,65)°C: No especificada.
 - Ruido RMS: 0.2Pa.
 - Offset por temperatura: ±1.5Pa/K por encima de 25°C.

- Humedad:
 - Rango: 0 a 100%.
 - Precisión absoluta: ±3%.
 - Precisión relativa: No especificada.
 - Histéresis: ±1%.
 - Ruido RMS: 0.02%.

 - Observaciones: El rango se reduce según la temperatura, por debajo de 0°C y por encima de 60°C hasta un 65% en el peor de los casos (a -40°C). Por otro lado, no se especifica una desviación asociada a la temperatura; pero no tiene por qué significar que no exista.

El empaquetado del sensor es de un tamaño realmente reducido, de apenas 2.5mm x 2.5mm x 0.93mm. No obstante, en este prototipo se ha empleado ya soldado en una PCB mínima (ver Figura 12) para facilitar la construcción del prototipo, evitando la soldadura de componentes SMD. Igualmente, la PCB mínima empleada tiene un área inferior al centímetro cuadrado, por lo que ha sido posible crear espacio de inserción para dos unidades de BME280, para mayor redundancia.

2.3 Conexiones

En este apartado se describen los elementos eléctricos implicados en la interconexión de los diferentes módulos. Estas conexiones cableadas se resumen en el diagrama de bloques de la Figura { FIGURA de BLOQUES DE CABLEADO }.

Se tienen cuatro grupos de cables que siguen un código de colores definido para facilitar la identificación de cada uno:

- I. Alimentación 5V: Blanco para positivo, violeta para negativo.
- II. Alimentación 3.3V: Rojo para positivo, marrón para negativo.
- III. Señal digital binaria: Blanco para positivo, negro para referencia.
- IV. Bus I²C: No sujeto a código de colores. Cables enlazados en grupos de ocho.

Para el bus I²C de ocho canales (dieciséis cables), se instalan en cada cara de cada módulo dos conectores JST PHR de ocho cables hembra; en los cuales se insertan, en una cara, dos buses de cuatro canales, entrantes, y en la otra cara, dos buses de cuatro canales, salientes hacia el siguiente módulo.

Por otro lado, para las conexiones restantes se han seleccionado conectores Dupont dobles. Tanto estos como los buses de I²C han sido crimpados manualmente, cable por cable.



Figura 13: A la izquierda, conectores Dupont. A la derecha, conector JST-PHR.

Por último, resaltar que se ha considerado en el diseño la necesidad de establecer un funcionamiento en modo depuración del sistema. En este modo, el microcontrolador principal está conectado y alimentado por USB con el computador; transmitiendo la información por puerto serie. Para que esto sea compatible con la alimentación por batería del resto de módulos, se ha empleado el regulador de 3.3V de la tarjeta del microcontrolador para alimentar a los componentes electrónicos del mismo módulo que funcionan a dicha tensión. Así, para que el sistema funcione en modo depuración, basta con desconectar la alimentación del módulo de gestión proveniente de la batería, enchufar el ESP32 al USB correspondiente y encender la alimentación del resto de módulos del M3F.

3. Diseños mecánicos

Este proyecto tiene por uno de sus objetivos principales la reducción de los costes en la toma de medidas marinas y submarinas para facilitar los desarrollos científico-técnicos en estos entornos. Para ello, se emplea electrónica comercial en el interior de una carcasa que la aísla del medio, que es corrosivo, permitiendo que sea únicamente ésta la expuesta a la degradación más intensa. Por este motivo, el diseño de una carcasa estanca que cumpla con los requerimientos de deformación, así como la fijación firme de los elementos en su interior son especialmente importantes para el correcto funcionamiento del dispositivo a corto y largo plazo, tanto como para la consecución del objetivo de reducción de costes.

Esta sección se divide en tres apartados que tratan el diseño de los elementos interiores a la carcasa, los que componen la carcasa en sí y los exteriores a la misma.

3.1 Carcasa

La carcasa, al menos para el caso del presente prototipo, consiste en un volumen cilíndrico con tapas en ambos extremos. El material elegido para la carcasa de este prototipo es el metacrilato (PMMA). A pesar de su mayor coste con respecto a otros plásticos de propiedades mecánicas similares, su gran transparencia, así como la facilidad de mecanizado y alta resistencia mecánica lo hacen un buen material para un primer y sencillo diseño.

La transparencia de este material permite colocar tanto la cámara como los sensores de luminosidad y los LED indicadores de estado en cualquier sitio, facilitando el diseño de los elementos estructurales interiores y su modificación en caso de ser necesario. Igualmente, facilita un seguimiento visual del estado interno del dispositivo durante las pruebas sumergidas.

El rango de profundidad de operación requerido para las pruebas es de 0 a 50m en agua salada. Por ello, el grosor de la pared del cilindro se ha tomado de 10mm, mucho mayor al estimado como necesario por comparación con otros dispositivos de mismo rango de operación [6][7], lo que permite considerar despreciable su deformación por compresión bajo presión hidrostática. Gracias a esto, puede considerarse únicamente la variación de volumen interior debida a la deformación elástica de las tapas laterales, permitiendo la aplicación directa del estimador de presión exterior descrito en el Apartado 4.1.1.

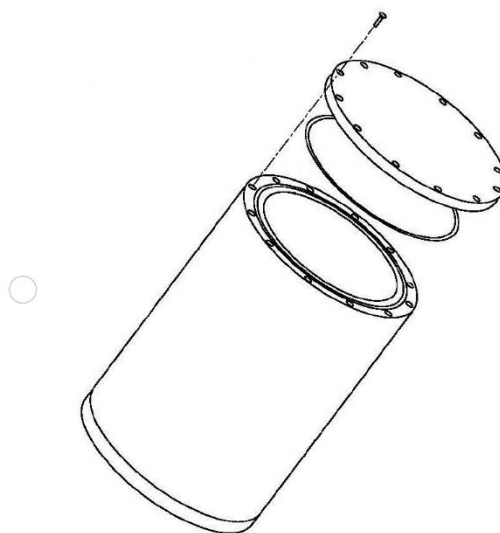


Figura 14: Diseño de carcasa prototipo presentado en la solicitud de Modelo de Utilidad registrada en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).

El cilindro principal tiene 100mm de diámetro exterior, 140mm de largo. Las tapas se fabricaron en grosor de 8mm; pero pueden tomarse otros grosores, eligiendo la apropiada según el rango de profundidad operativa. Estas se fijan al tubo principal mediante 12 tornillos (por tapa) de 16mm y M3 de acero inoxidable AISI-316, resistente a la corrosión; con arandelas de ala ancha (Figura 18). Existe un surco, de 1.5mm de profundidad, interior al diámetro de perforación de los tornillos (tanto en la tapa como en el cuerpo principal) para la colocación de una junta tórica de caucho de butadieno (NBR) de 83mm de diámetro interno. Para la elección del grosor adecuado de las juntas tóricas, con el fin de asegurar el sellado de la carcasa, se realiza una prueba sencilla de estanqueidad cuyos resultados pueden verse en el Apartado 6.2.1. El diseño puede apreciarse en la Figura 14, elaborada para la solicitud de Modelo de Utilidad presentada en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM).

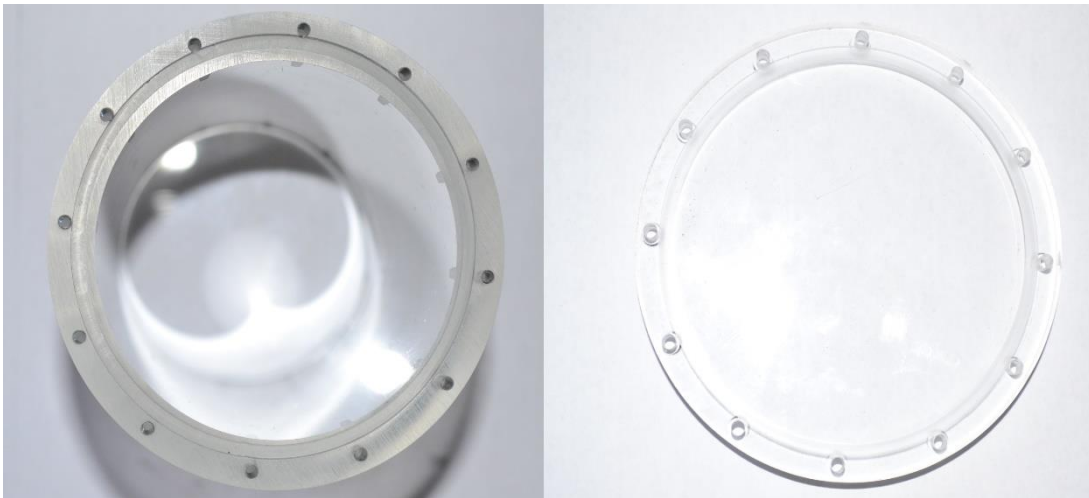


Figura 15: Detalle del cuerpo de la carcasa de metacrilato fabricada (izquierda) y una tapa lateral de la misma (derecha).



Figura 16: Figura 13: Detalle del cuerpo de la carcasa de metacrilato fabricada con una tapa colocada (izquierda) y una tapa lateral de la misma atornillada incluyendo arandelas y junta de sellado (derecha).

La carcasa ha sido fabricada a partir de un tubo original de metacrilato de 2m, cortado en tramos de 140mm que luego han sido mecanizados y taladrados mediante fresadora en un taller especializado. Las perforaciones en el tubo se han realizado con rosca, como se puede apreciar en el detalle con microscopio digital de la Figura 17. Las tapas han sido perforadas de forma pasante para tornillos M3 y fresadas, un canal de 1.5mm de profundo como en el cilindro, para que el espacio total para la junta tórica de sellado sea de una sección aproximada a 3mm².

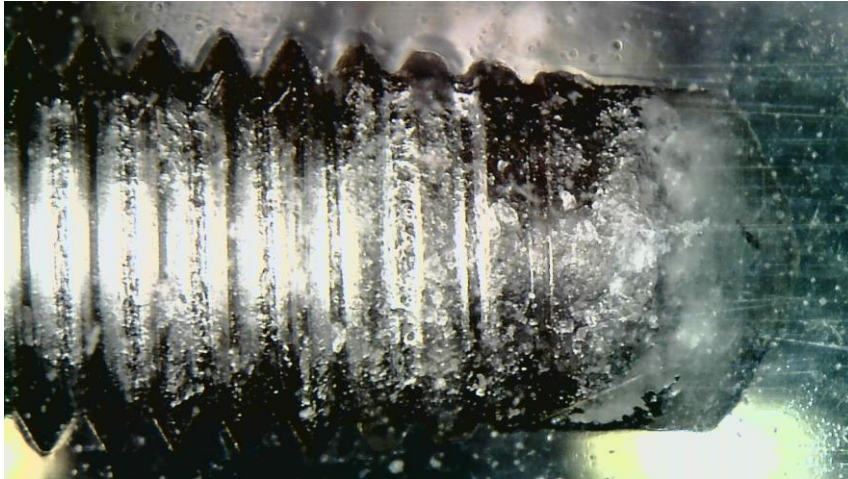


Figura 187: Detalle en microscopio de perforaciones roscadas para la inserción de los tornillos en el cuerpo de la carcasa.



Figura 17: Detalle en microscopio del canal fabricado para la colocación de la junta de sellado.



Figura 19: Tornillos de 16x3mm, arandelas de 3mm y tuercas de 3mm. Todo fabricado en AISI-316.

3.2 Elementos estructurales interiores

Estos elementos son aquellos que interconectan las placas de circuitos impresos en las que están insertados los sistemas electrónicos. También se incluyen los elementos estructurales que fijan dichas placas a la carcasa y otros que sirven de soporte para el correcto agarre de algunos componentes a las placas de circuitos, es decir, un chasis.

Los elementos estructurales interiores los componen los siguientes elementos:

- Sujeción de base.
- Sujeción de techo.
- Separadores cilíndricos.
- Grapas.
- Soporte de módulo GNSS.
- Soporte de cámara.

En los extremos, las sujeciones de base y techo, Figura 20, se mantienen agarradas a la carcasa por rozamiento gracias a un ajuste preciso de las tolerancias de impresión hallado mediante un proceso iterativo. Tienen un perfil inclinado para reducir al máximo el contacto con las tapas laterales de la carcasa con el fin de evitar contrarrestar la deformación de esta por acción de la presión.

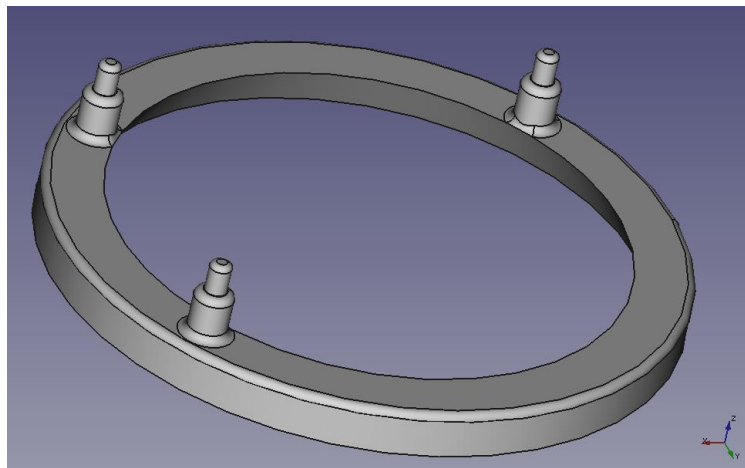


Figura 210: Estructura de sujeción de base por fricción.

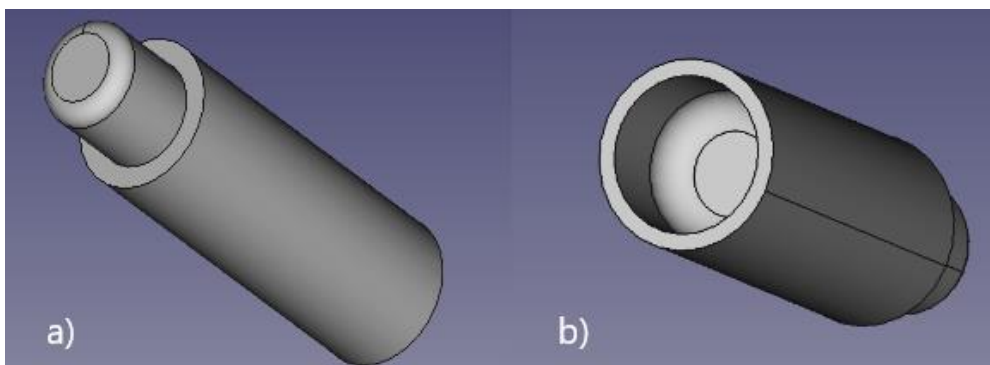


Figura 201: Cilindro separador: a) vista frontal-lateral, b) vista trasera.

De estas sujeciones salen tres cilindros con cambio de sección (una mitad con sección menor a la de las perforaciones de las PCB y otra mitad con sección mayor a la misma) en las cuales quedan

ancladas sendas placas de circuitos. En la parte excedente de dichos cilindros con cambio de sección, irán ancladas placas de circuitos; en los que, a su vez, se insertan separadores cilíndricos (Figura 21). De esta forma, la estructura completa es compuesta por partes de menor tamaño que permiten una más fácil fabricación por impresión 3D.

Por otro lado, el módulo de la batería, que es transversal al resto de placas de circuitos, queda agarrado por las grapas mostradas en la Figura 22.b.

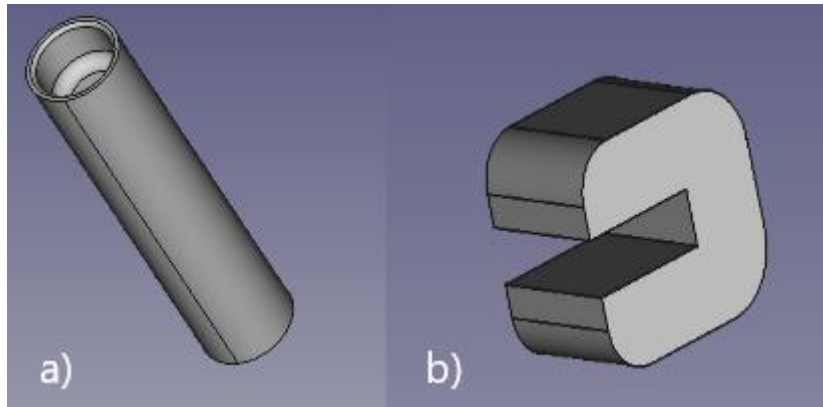


Figura 22: a) Cilindro separador para placa ambiental, b) Grapa de sujeción para módulo de alimentación.

Por último, los soportes del módulo GNSS y de la cámara tienen la función de mantener en la posición y orientación adecuada dichos dispositivos. Para el caso del GNSS, como se ve en la Figura 23.a, se ha aprovechado para intentar mejorar (mínimamente) la recepción de la señal en la antena al inclinarla ligeramente hacia fuera. Este soporte va agarrado a la placa de circuitos por dos tornillos, resistentes a la corrosión, que atraviesan también al módulo GNSS y quedan sujetos por dos tuercas de métrica 3mm. El soporte de la cámara, Figura 23.b, sin embargo, está únicamente fijado por pegamento termofusible al propio módulo ESP32-Cam.

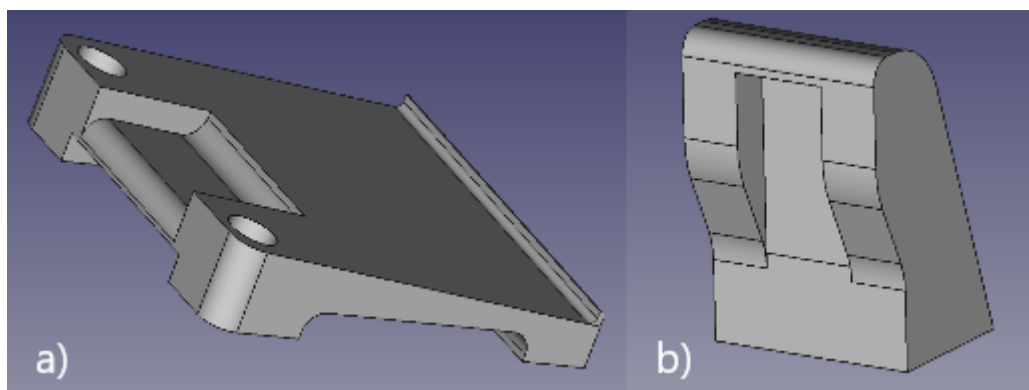


Figura 23: Soportes para: a) módulo GNSS, b) cámara digital.

Con el fin de fijar la estructura y reducir las vibraciones asociadas simplemente a un mal agarre de las estructuras, se ha empleado pegamento termofusible en aquellos puntos de esta que sufrirían de mayor holgura; debida a la dificultad de impresión con las tolerancias de la máquina empleada y su calibración actual.

En este prototipo, todos los elementos estructurales internos han sido impresos por una impresora 3D, modelo Anet A8, en plástico PLA. Los principales parámetros de fabricación se recogen en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros de impresión.

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|-------------------------|
| Velocidad de impresión | 60mm/s |
| Velocidad de desplazamiento | 120mm/s |
| Temperatura de extrusión | 205°C |
| Temperatura de cama caliente | 30°C |
| Ventilación de capa | No |
| Ventilación de extrusor | Sí |
| Retracción entre piezas | Sí |
| Material de impresión | Ácido Poliláctico (PLA) |
| Porcentaje de relleno | 20% |
| Patrón de relleno | Grid cuadrado |
| Ancho de pared | 0.8mm |
| Altura de capa | 0.2mm (mín. de Anet A8) |
| Soportes | Sí |
| Ángulo umbral de soportes | 60° |
| Patrón de soportes | Zig-zag |

Como nota a destacar acerca del proceso de fabricación está la dificultad que ha supuesto trabajar con las tolerancias de la impresora. Por un lado, la máxima resolución de esta es de unos 0.2mm; no obstante, el correcto ajuste de la distancia de la cama de impresión, la temperatura ambiente e incluso la corriente de aire incidente sobre la misma (para la ventilación de los gases producidos durante la fabricación) provocan variaciones en la impresión que han sido solucionadas por iteración y corrección experimental de los resultados.

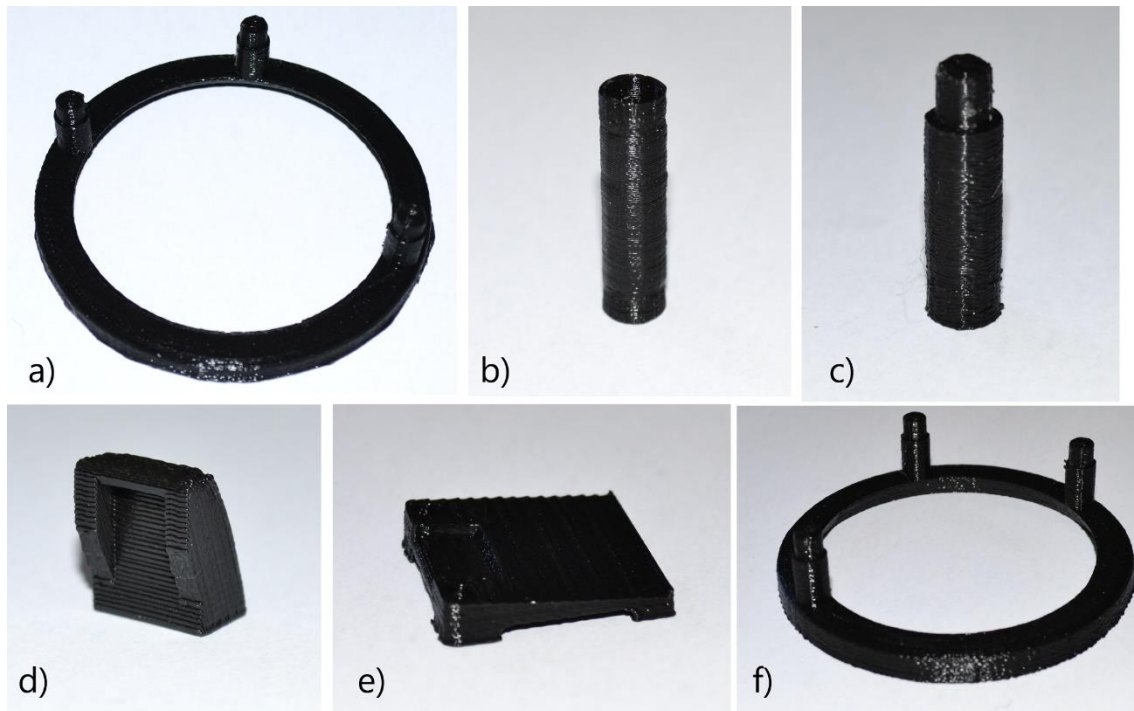


Figura 24: Muestra de los elementos estructurales impresos: a) estructura de fijación base, b) separador de placa ambiental, c) separador cilíndrico, d) soporte de cámara, e) soporte de GNSS, f) estructura de fijación techo.

3.3 Elementos de sujeción externos

La estructura cilíndrica de la carcasa sin imperfecciones notables es adecuada para soportar un ambiente hiperbárico exigente. Cualquier ranura o perforaciones que se le practique, corre el riesgo de convertirse en un punto de partida de fallo estructural al ser sometida a un esfuerzo. Por ello, para la sujeción de la carcasa se diseñan unas abrazaderas de PVC en las cuales se practican las perforaciones necesarias para agarrar el sistema completo al arnés del buzo o a una estructura fija.

Una aproximación fácilmente realizable mediante el corte y perforación de un tubo de PVC sería el mostrado en la Figura 25, que se muestra a continuación; donde el M³F es fijado únicamente por rozamiento mediante la selección de un tubo de PVC de las dimensiones adecuadas más, quizás, la colocación de algún elemento que sirva para eliminar holguras que pudieran existir.

Las cuatro perforaciones centrales permiten fijar el dispositivo a un arnés para ser portado por un buzo o a una estructura externa en la cual sea colocado de forma fija para la monitorización de una zona.

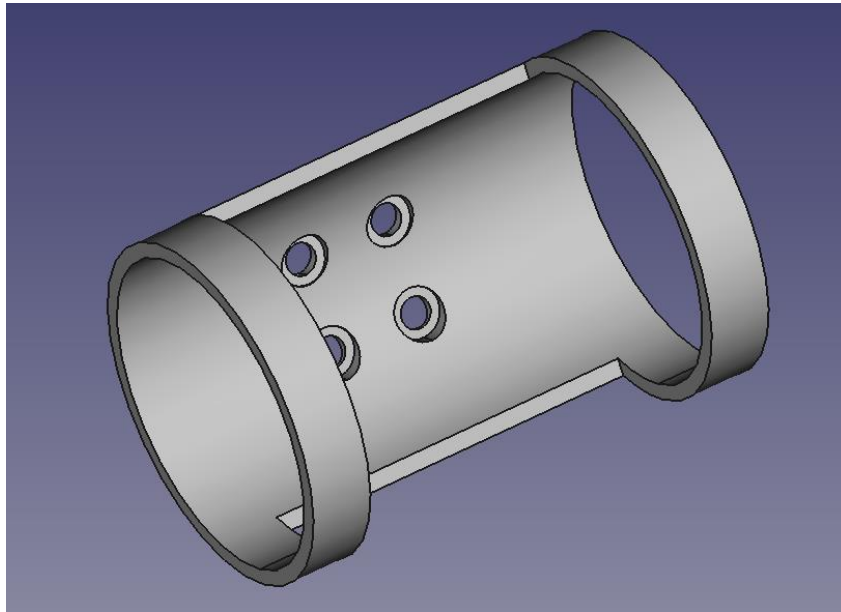


Figura 25: Estructura de agarre exterior para el Medidor Modular de Magnitudes Físicas.

4. Algoritmos de estimación

El dispositivo bajo desarrollo incorpora diferentes algoritmos como pieza fundamental para su funcionamiento autónomo. Estos algoritmos aportan cierto grado de inteligencia al dispositivo para tomar decisiones básicas de forma automática. Por ejemplo, en base a las señales de los acelerómetros y giroscopios, se ha creado un algoritmo simple que le permite estimar cuándo se encuentra anclado en un lugar y debe pasar, por tanto, al modo de monitorización desde el modo de navegación; o al contrario, cuando detecta más movimiento del esperado en este último estado, analiza las señales para decidir si volver al estado de navegación o no.

Los algoritmos hacen uso de técnicas de procesamiento de señales y clasificación para la toma de decisiones. En algunos de los algoritmos implementados no se reducen a una serie de reglas lógicas, pues implementan algunos mecanismos de clasificación automática como los *Support Vector Machine* o perceptrones multicapa para los casos en los que se deba responder a una cantidad de datos mayor.

Según la RAE, se define algoritmo como: “*Conjunto ordenado y finito de operaciones que permite hallar la solución de un problema*” [8]. Atendiendo a la anterior definición y por mayor facilidad de clasificación, se consideran incluidos dentro de la categoría de algoritmos los filtros extendidos de Kalman (EKF, Extended Kalman Filters) empleados para la fusión sensorial y los modelos físicos que permiten estimar la magnitud física externa a partir de la medición mediante sensores internos.

Tabla 2: Clasificación de algoritmos implementados.

| Entrada \ Salida | Una señal | Varias señales |
|------------------|-------------|----------------|
| Una señal | Observación | Fusión |
| Un escalar | Integración | Clasificación |

Por tanto, a partir de dichas definiciones y con el fin de reducir la ambigüedad de la materia tratada en este capítulo, se propone aquí una clasificación simple según la cantidad de datos que manejan y la naturaleza del producto que generan a la salida, dando lugar a cuatro categorías que se observan en la tabla 2 y se explican a continuación:

- ❖ Algoritmos de observación. Incluye aquellos algoritmos que procesan únicamente una señal y generan otra señal como salida; con una correspondencia uno-uno con respecto del tiempo; es decir, para cada muestra x_t en un instante t de la señal de entrada, existe una muestra procesada x'_t . Un ejemplo sería la estimación de la presión externa a partir de la variación de presión barométrica interna.
- ❖ Algoritmos de fusión. Estos son aquellos que toman varias señales y las fusionan, por ejemplo, para dar lugar a una señal de una magnitud común con un error asociado menor al original de cada señal o para estimar otra a partir de las relaciones físicas existentes entre estas. Un ejemplo de esto sería el EKF para fusión de señales de aceleración.

- ❖ Algoritmos de integración. Toman los valores de una señal a lo largo de un determinado periodo de tiempo y obtienen un valor escalar de una magnitud como resultado de la aplicación de operaciones sobre esta señal de entrada. Un ejemplo sería la estimación de la variabilidad de aceleración a partir de dicha señal.
- ❖ Algoritmos de clasificación. Se incluyen aquí todos aquellos que, en base a varias señales y, en algunos casos, estados de partida, generan un valor escalar. Nótese que una decisión puede ser considerada como una clasificación binaria, por lo que estos algoritmos de clasificación pueden usarse para modificar, directamente, parte del comportamiento del dispositivo en base a los datos de entrada; por ejemplo, pasar a modo navegación o no.

Varios de los anteriores pueden combinarse para enfrentar decisiones de una complejidad mayor con una probabilidad de éxito más alta.

Definida la clasificación propuesta para los algoritmos desarrollados en el marco de este proyecto, se pasa a continuación con la explicación de cada uno de ellos.

4.1 Algoritmos de observación

Dado que uno de los objetivos principales de este proyecto es el de conseguir una reducción significativa de los costes propios de los sistemas de medidas submarinas mediante el uso de electrónica comercial aislada de las condiciones corrosivas externas, estos observadores son de particular importancia.

Mediante este prototipo se pretenden estimar cuatro magnitudes externas a partir de los sensores internos: temperatura, presión (profundidad), luminosidad y corriente, siendo esta última la que mantiene una relación más indirecta con respecto a la magnitud medida.

4.1.1 Presión

Igual que antes con la temperatura, se pretende estimar la presión externa a partir de la presión barométrica medida mediante el sensor BME280 en el interior del dispositivo. Como se vio en el “Capítulo 4 – Diseño Mecánico”, el grosor de la carcasa se elige suficientemente grueso y de forma cilíndrica de forma que se pueda evitar su compresión en el rango de profundidad operativa, despreciando su efecto frente a otros presumiblemente mayores. No sucede lo mismo con las tapas laterales del cilindro, diseñadas planas y con un grosor que permita su deformación en unos márgenes suficientes como para permitir una variación de la presión barométrica interna detectable por el sensor.

Para determinar el grosor de las tapas de forma que permita esta variación de la presión interna para un determinado rango de presiones, puede seguirse los siguientes procedimientos:

1. Método teórico: determinar la deformación elástica de la placa de metacrilato circular a partir del cálculo de tensiones en la misma por acción de una presión uniforme sobre una de sus superficies.
2. Método empírico: probar placas con diferentes grosores en el rango de presiones de operación del dispositivo y elegir el mayor de los grosores que permita detectar la variación de presión.

La ventaja del primer procedimiento es que permite modificar las especificaciones de diseño para cada aplicación de forma automática sin más que cambiar las presiones de operación; sin pruebas posteriores más allá de su comprobación. Por el contrario, la carcasa del dispositivo tendrá un diseño puramente teórico en el que pueden pasarse por alto, por ejemplo, irregularidades en el material o efectos no considerados en la simulación como consecuencia de la deformación.

El segundo enfoque asegura el correcto funcionamiento del dispositivo una vez se encuentran varios pares grosor – rango de presión funcionales; no obstante, el coste de crear diferentes tapas y probarlas a diferentes profundidades es altamente costoso.

Para reducir costes e incertidumbre, se toma opta por una solución de compromiso: se simula el modelo de deformación de la tapa bajo presión desarrollado en el apartado 4.1.1.2 y se propone un grosor que permita la variación de presión interna aceptable para el rango de profundidades necesario (0, 50) metros, aumentando la probabilidad de que funcione correctamente gracias al respaldo teórico. Luego, se prueba este único grosor en el rango de presiones deseado y se realiza un informe con las observaciones.

Por último, se emplea un modelo teórico de deformación desarrollado para estimar la variación de volumen interno, y consecuente variación de presión, en el rango de presión de operación.

Los términos que rigen el cambio de presión interna y que componen el modelo teórico comentado se enumeran tal que:

- Compresión de tapas laterales.
- Compresión del cilindro principal.
- Compresión de juntas tóricas para el sellado de las tapas.
- Aumento de temperatura interna.
- Variación en la presión medida por el sensor asociada al aumento de temperatura.

La tarea descrita en esta sección tratará, por tanto, la elaboración del modelo que describa los anteriores efectos en el interior de la carcasa, permitiendo así la estimación de la presión externa en base a la medida interna.

4.1.1.1 Propiedades del PMMA

De cara al desarrollo de un modelo que permita predecir la deformación elástica de las tapas laterales, es necesario conocer las propiedades mecánicas características de dicho material con las cuales configurar el modelo simulado.

De la hoja de datos proporcionada por el fabricante PERSPEX para su material “PMMA Colada” pueden resumirse las siguientes características:

- Transparencia: >92%
- Índice de refracción: 1.4905 a 589.3 nm
- Densidad: 1.19g/cm³
- Punto de ebullición: 433K
- Susceptibilidad magnética: -9.06×10^{-6} (SI, 22 °C)
- Módulo de Young: 3210MPa
- Módulo de Poisson: 0.35-0.4
- Resistencia a flexión: 117MPa
- Material isótropo.
- Absorción de agua: 0.02%

4.1.1.2 Modelo de deformación de tapas laterales

Las tapas laterales, atornilladas mediante doce tornillos separados 30° cada uno de los demás, pueden aproximarse como placas planas circulares idealmente empotradas en su perímetro. La deformación por actuación de la presión hidrostática seguirá una curva similar a la que se muestra en la Figura 28.

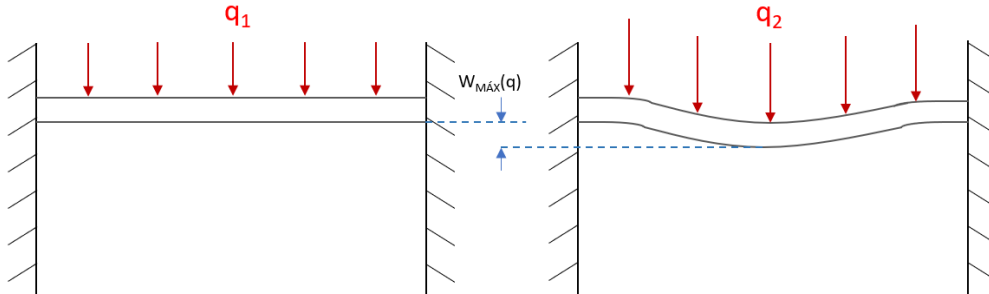


Figura 26: Diagrama de deformación de placa lateral.

La derivación de las ecuaciones que modelan los esfuerzos, momentos y desplazamientos generados como resultado de la actuación de una fuerza uniforme sobre toda la superficie de la placa (presión) resulta relativamente extenso y ajeno al tema del proyecto aquí tratado; por ello, se expone aquí un resumen de las mismas y se indica al lector las referencias adecuadas para obtener más información al respecto en caso de ser necesario.

El modelo empleado para simular la respuesta de la tapa ante la presión es el modelo de pequeñas deflexiones, pues es lineal y, por tanto, más simple que la alternativa no-lineal. Debido a las limitaciones de este modelo, el máximo desplazamiento del punto central de la placa circular debe ser menor a la mitad del grosor de la placa:

$$w_{max} = 0.5h \quad (4.1)$$

Para el caso de una placa de 8mm (valor central de los grosores considerados inicialmente) estimaría correctamente deformaciones inferiores a los 4mm.

La expresión que permite el cálculo de dicho desplazamiento máximo es la siguiente:

$$w_{max} = \frac{qr^4}{64D} \quad (4.2)$$

donde:

- q : carga distribuida uniformemente (presión) que vendrá dada por la profundidad.
- r : radio de la tapa lateral.

Por otro lado, el parámetro D es propio de las características de la placa y el material de construcción. Se calcula:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (4.3)$$

donde:

- E : módulo de Young o de elasticidad, 1800-3100 MPa para el PMMA.
- h : espesor de la placa, de 8mm como estimación inicial.
- ν : módulo de Poisson el material.

Por otro lado, la tensión vendrá dada por la expresión que sigue:

$$\sigma = \frac{6(M_c + M_t)}{h^2} \quad (4.4)$$

donde M_c y M_t son los momentos cortante y tangencial, respectivamente, por acción de la carga sobre la placa lateral y vienen dadas a su vez por las siguientes expresiones:

$$M_c = \frac{qr^2(1 + \nu)}{16} \quad (4.5)$$

$$M_t = \frac{\theta D(1 - \nu^2)}{r} + \nu M_r \quad (4.6)$$

donde θ es el ángulo de pendiente radial hacia el centro de la placa y M_r es el momento radial soportado en el mismo punto. Estos valores se calculan mediante las siguientes expresiones:

$$\theta = \frac{M_c r}{D(1 + \nu)} - \frac{qr^3}{16D} \quad (4.7)$$

$$M_r = -\frac{qr^2}{8} \quad (4.8)$$

Gracias a estas expresiones puede calcularse la tensión de la placa en los puntos críticos para analizar matemáticamente a partir qué máxima carga podría pasar el material de régimen elástico al plástico, y consecuentemente, cuál es la máxima profundidad de operación reversible del dispositivo. A pesar de la aparente complejidad de las anteriores expresiones, la carga es el único valor que varía, por lo que las tensiones varían linealmente con la profundidad.

Con estas expresiones, pueden realizarse curvas que muestren la deformación y tensión sobre las placas con respecto a la variación de profundidad aplicada al dispositivo. El modelo ha sido implementado en Python y los resultados pueden observarse en las Figuras 27 y 28. En ellas puede observarse que, según el modelo de resistencia aplicado para el material descrito en el apartado anterior, el valor límite de tensión en régimen elástico ante flexión, 117MPa, es alcanzado antes en el perímetro de la tapadera y a una profundidad de 60.5m; más allá de los 50m indicados como especificaciones deseadas del dispositivo.

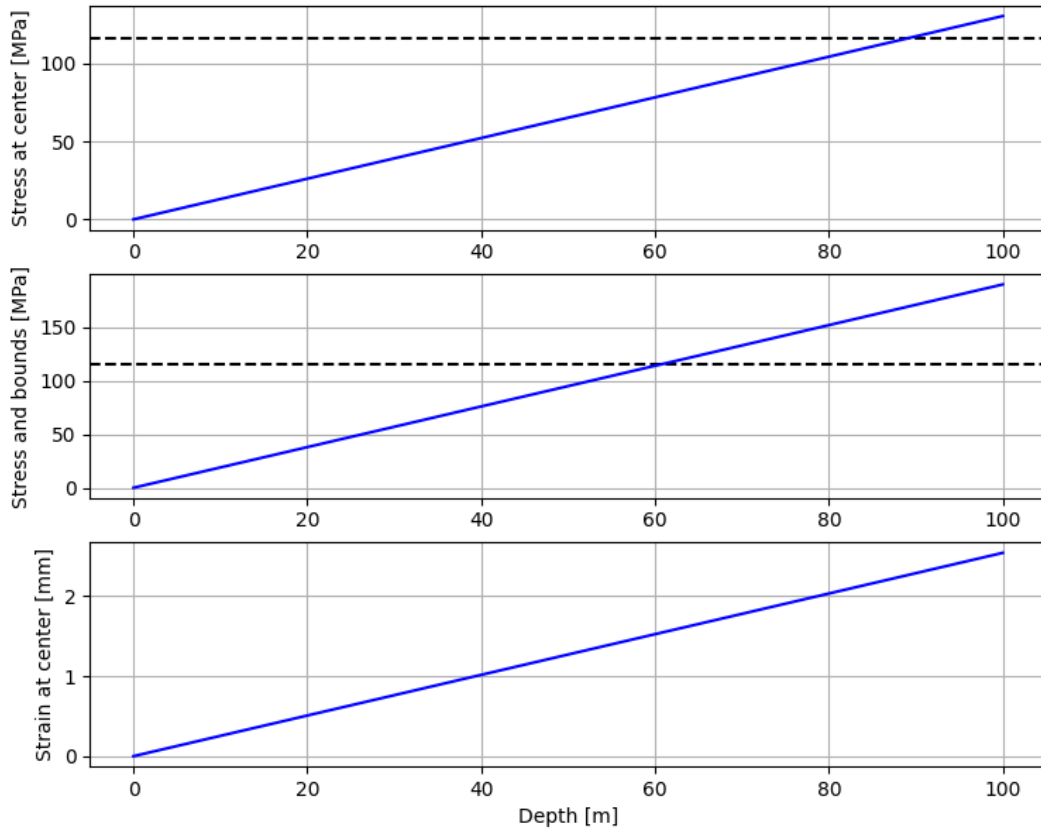


Figura 27: Ejecución de los modelos de tensión en el centro, tensión en el perímetro y máximo desplazamiento en el centro (por orden descendente) en una de las placas laterales de PMMA Perplex Colada de 100mm de radio y 80mm de espesor. La línea discontinua muestra el límite plástico del material ante esfuerzo de flexión, 117MPa.

Internal pressure VS depth.

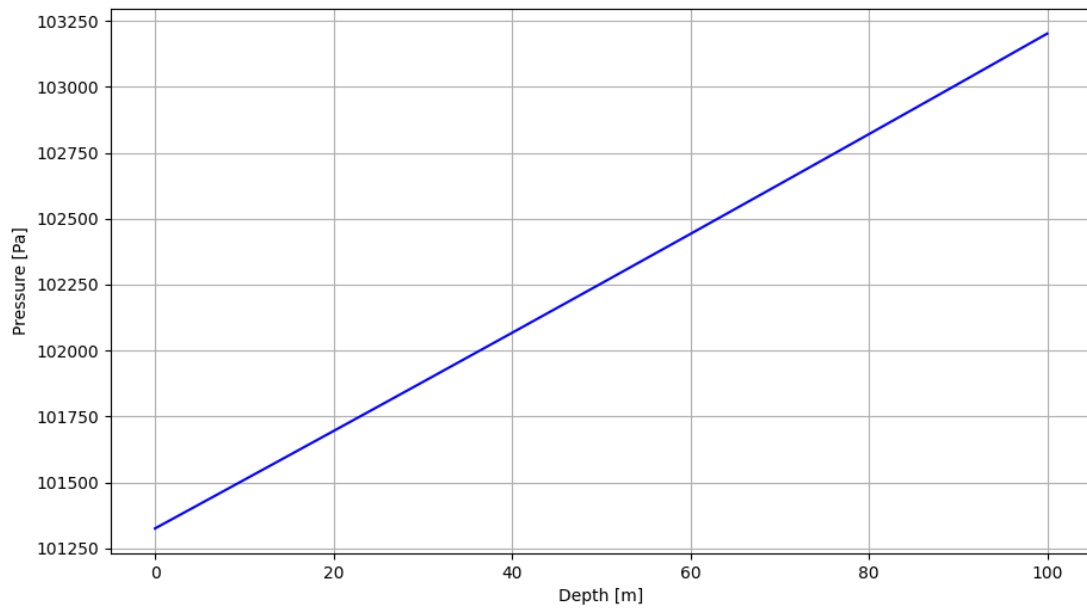


Figura 28: Variación de presión interna para dos placas laterales aproximadas por deformación como casquetes esféricos ideales.

4.1.1.3 Modelo de observación de presión externa

En primer lugar, según la hoja de datos del sensor empleado (BME280) existe una variación en la medida de presión debida a la variación de temperatura con respecto al valor inicial de medida:

$$\Delta P_{bias} = 1.5(T_{init} - T) \quad (4.9)$$

La precisión absoluta del sensor es de ± 1.0 hPa, por lo que todo cambio en magnitud inferior a dicho valor no será considerado relevante en la medición. No obstante, se añade el efecto por ser conocido. De aquí en adelante se considera que todas las presiones manejadas llevan la corrección de este efecto.

Es de esperar que el primer efecto notable sobre la carcasa sea la variación del volumen interior al deformarse la parte más blanda de esta: las juntas de sellado de goma. La variación de volumen por compresión de las juntas de sellado puede aproximarse como el acortamiento del cilindro, donde las juntas son modeladas como muelles ideales:

$$x = \frac{qA_{tapa}}{k} \rightarrow V_{cil} = \frac{qA_{tapa}}{k} A_{tapa} \quad (4.10)$$

donde q es la carga (presión) soportada por la tapa lateral de forma normal al plano principal de la misma, k es la constante elástica que modela la elasticidad de la junta de sellado como un muelle ideal y r es el radio de la tapa. Sustituyendo como antes en la ley de los gases ideales (para un número constante de moles) y teniendo en consideración el efecto del cambio de temperatura:

$$V_{rp} = \frac{P_o V_o T_{rp}}{T_o P_{rp}}, \quad V_{rp} = V_o - 2V_{cil} = V_o - \frac{2qA_{tapa}}{k} A_{tapa} \quad (4.11)$$

Quedando la presión externa determinada como sigue:

$$q = \left(V_o - \frac{P_o V_o T_{rp}}{T_o P_{rp}} \right) \frac{k}{2A_{tapa}^2} \quad \text{si } P_{rp,v} < P_{mxc} \quad (4.12)$$

Es de esperar que la junta de goma se comprima rápidamente con una presión menor (por ser un material más blando), por lo que será el efecto dominante a poca profundidad. Esta compresión tendrá fin cuando la tapa entre en contacto con el cuerpo del cilindro a partir de una presión umbral $P_{mxc}(\Delta T, x_{m\acute{a}x})$ o presión de máximo acortamiento del cilindro incluyendo el efecto de la temperatura, dando paso a la deformación de la tapa. Esta hipótesis debe ser validada bajo experimentación.

$$P_{mxc}(\Delta T, x_{m\acute{a}x}) = \frac{P_o V_o T_{rp}}{T_o V_{mxc}(x_{m\acute{a}x})} \quad (4.13)$$

El problema con esta expresión es que el valor exacto de $x_{m\acute{a}x}$ es desconocido y depende de la fabricación de cada carcasa así como del ajuste de roscado de los tornillos. No obstante, por inspección de los prototipos montados se sabe que el valor debe estar en un rango (0.0, 0.5)mm, por lo que puede ser ajustado por mínimos cuadrados una vez se obtengan suficientes datos experimentales.

Determinada la expresión que determina la máxima deformación de las placas laterales según la presión ejercida sobre estas en el apartado anterior, se emplea ahora la ley de los gases ideales, con moles constantes, para calcular cómo afecta dicho cambio a la presión interna incluyendo el efecto del cambio de temperatura. De forma aproximada, se considera que cada tapa se deforma

dando lugar a un casquete esférico de altura $w(q)$ cuyo volumen viene dado por la ecuación (4.14).

$$V_{casq} = \frac{\pi w}{6}(3r^2 + w^2) \quad (4.14)$$

Relacionando el volumen con la carga se consigue el término de presión debida a la deformación de las placas laterales:

$$\frac{P_o V_o^{mxc}}{T_o} = \frac{P_{rp} V_{rp}}{T_{rp}} \rightarrow V_{rp} = \frac{P_o (V_o - \Delta V_{cil}) T_{rp}}{T_o P_{rp}} \quad (4.15)$$

$$V_{rp} = V_o^{mxc} - 2cV_{casq} = (V_o - \Delta V_{cil}) - \frac{\pi w c}{3}(3r^2 + w^2) \quad (4.16)$$

Igualando ambas expresiones y despejando w se obtiene:

$$w^3 + 3r^2 w + \frac{3}{\pi c} \left(\frac{P_o (V_o - \Delta V_{cil}) T_{rp}}{T_o P_{rp}} - (V_o - \Delta V_{cil}) \right) = 0 \quad (4.17)$$

En esta expresión se ha añadido un parámetro de corrección, c , que permita reducir la diferencia entre el volumen correspondiente a la deformación real de las tapas laterales y la aproximación al considerarlo un casquete esférico ideal.

Para evitar la resolución numérica del polinomio reducido de tercer grado que proporciona el valor del máximo desplazamiento de la placa lateral, w , puede resolverse mediante la fórmula de Cardano [9]:

$$Q = \frac{3a_2 - a_1^2}{9} \quad (4.18)$$

$$R = \frac{9a_1 a_2 - 27a_3 - 2a_1^3}{54} \quad (4.19)$$

$$u = \sqrt[3]{R + \sqrt{Q^3 + R^2}} \quad (4.20)$$

$$v = \sqrt[3]{R - \sqrt{Q^3 + R^2}} \quad (4.21)$$

$$x_1 = u + v - \frac{a_1}{3} \quad (4.22)$$

$$x_2 = -\frac{u + v}{2} - \frac{a_1}{3} + \frac{i\sqrt{3}}{2}(u - v) \quad (4.23)$$

$$x_3 = -\frac{u + v}{2} - \frac{a_1}{3} - \frac{i\sqrt{3}}{2}(u - v) \quad (4.24)$$

Este set de ecuaciones permite hallar las raíces de un polinomio de la forma:

$$x^3 + a_1 x^2 + a_2 x + a_3 = 0$$

Dado que $a_1 = 0$, ya que no existe término cuadrático, las fórmulas de Cardano pueden reducirse quedando como sigue:

$$u = \sqrt[3]{\left(-\frac{a_3}{2}\right) + \sqrt{\frac{a_2^3}{3} + \left(-\frac{a_3}{2}\right)^2}} \quad (4.25)$$

$$v = \sqrt[3]{\left(-\frac{a_3}{2}\right) - \sqrt{\frac{a_2^3}{3} + \left(-\frac{a_3}{2}\right)^2}} \quad (4.26)$$

$$x_1 = u + v \quad (4.27)$$

$$x_2 = -\frac{u + v}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2}(u - v) \quad (4.28)$$

$$x_3 = -\frac{u + v}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2}(u - v) \quad (4.29)$$

donde:

$$a_2 = 3r^2 \quad (4.30)$$

$$a_3 = \frac{3}{\pi c} \left(\frac{P_{mxc} V_{mxc} T_{rp}}{T_o P_{rp}} - V_{mxc} \right) \quad (4.31)$$

Es necesario determinar el valor de desplazamiento, w , buscado a partir de las soluciones resultantes. En caso de que sólo exista una solución real, frente a dos imaginarias, se tomará esta. Si no, se toma aquella solución positiva más cercana a la anterior raíz hallada.

Despejando q de (4.2) para el caso de dos tapas laterales deformadas:

$$q = \frac{64Dw}{2r^4} \quad (4.32)$$

Este set de ecuaciones conforma el algoritmo de observación de la presión externa a partir de la medida de presión en el interior del dispositivo. Para poder ejecutar dicho modelo, basta con implementar el pseudocódigo de ejecución, Algoritmo 1, donde las ecuaciones han sido ordenadas resolviendo la causalidad computacional.

En este existen, al menos, dos parámetros que deben ser ajustados empíricamente. Para ello, se ha creado un *script* de Python que permite ajustar sus valores mediante una optimización por mínimos cuadrados a partir de datos experimentales. Los parámetros a ajustar con este código son:

- $x_{m\acute{a}x}$: Presión por máxima compresión de las juntas.
- c : Factor de corrección de volumen aproximado por casquete esférico ideal.

Como se dijo previamente, el máximo desplazamiento esperado, $x_{m\acute{a}x}$, es de unos 0.5mm; por lo que pueden pasarse unos límites al *script* para facilitar el ajuste. Igualmente, el valor de c puede buscarse en un intervalo (0.85, 1.0) como primera aproximación.

```
// Calcular parámetros la primera vez
a2 = 3r2
D =  $\frac{Eh^3}{12(1 - \nu^2)}$ 

// Determinación de presión exterior
ΔPbias = 1.5(To - Trp)
Prp = PBME - ΔPbias
Pmxc(ΔT, xmáx) =  $\frac{P_o V_o T_{rp}}{T_o V_{mxc}(x_{máx})}$ 

Si (Prp < Pmxc):
    q =  $\left( V_o - \frac{P_o V_o T_{rp}}{T_o P_{rp}} \right) \frac{k}{2A_{tapa}^2}$ 
Si no:
    a3 =  $\frac{3}{\pi c} \left( \frac{P_{mxc} V_{mxc} T_{rp}}{T_o P_{rp}} - V_{mxc} \right)$ 
    u =  $\sqrt[3]{ \left( -\frac{a_3}{2} \right) + \sqrt{ \frac{a_2^3}{3} + \left( -\frac{a_3}{2} \right)^2 } }$ 
    v =  $\sqrt[3]{ \left( -\frac{a_3}{2} \right) - \sqrt{ \frac{a_2^3}{3} + \left( -\frac{a_3}{2} \right)^2 } }$ 
    x1 = u + v
    x2 =  $-\frac{u + v}{2} + \frac{i\sqrt{3}}{2}(u - v)$ 
    x3 =  $-\frac{u + v}{2} - \frac{i\sqrt{3}}{2}(u - v)$ 
    w = criterio(x1, x2, x3)
    q =  $\frac{64Dw}{2r^4}$ 

Fin si.
```

Algoritmo 1: Estimación de presión externa.

4.1.2 Temperatura

La relación entre la temperatura medida en el interior del dispositivo y la temperatura del entorno puede modelarse mediante el planteamiento de un problema clásico de conducción de calor del exterior al interior en una tubería.

La medición de temperatura es realizada por el sensor BME280 con una precisión absoluta de ±1°C. Este mide la temperatura del aire directamente en contacto con el mismo, que, a su vez, recibe el flujo de calor directamente de la pared de la carcasa. El diagrama de analogía eléctrica puede observarse en la Figura 29.

De cara a estimar la temperatura externa en base a la temperatura medida en el interior en tiempo real, las ecuaciones que modelan este sistema de resistencias térmicas en serie, mostradas en el modelo análogo, son las siguientes:

$$Q = \frac{\Delta T}{\sum R} = \frac{(T_2 - T_3)}{R_{aire}} \quad (4.33)$$

$$T_1 = T_3 + Q(R_{PMMA} + R_{aire}) \quad (4.34)$$

donde las resistencias vienen dadas por:

$$R_{PMMA} = \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_b}\right)}{2\pi L K_{PMMA}} \quad (4.35)$$

$$R_{aire} \approx \frac{\ln\left(\frac{r_b}{r_a}\right)}{2\pi L K_{aire}(T_3)} \quad (4.36)$$

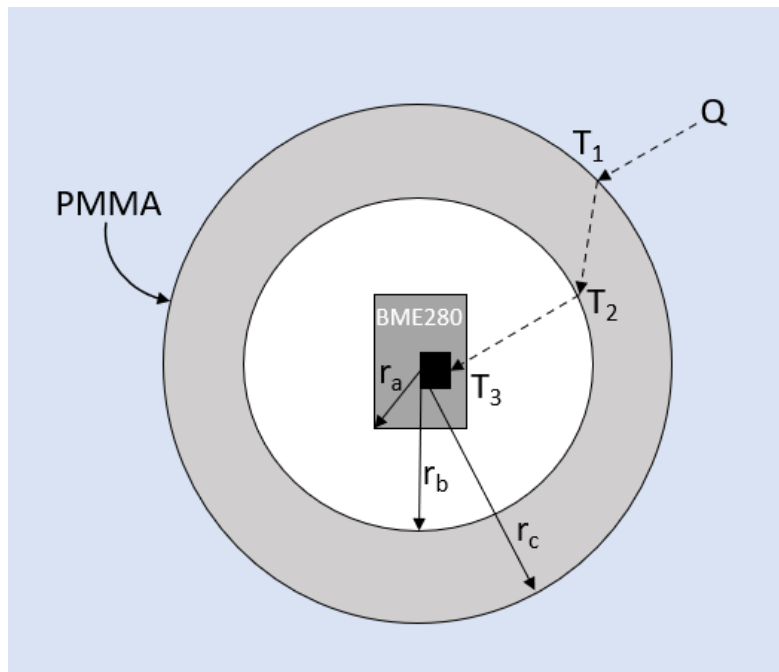


Figura 30: Esquema de problema de transmisión de calor en la carcasa.

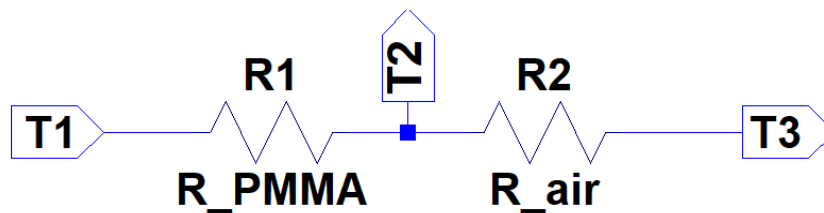


Figura 29: Diagrama de analogía eléctrica para la transmisión de calor.

El modelo presentado tiene dos inconvenientes:

- No incluye la disipación de energía en forma de calor asociada a la electrónica en funcionamiento que puede ser más o menos importante según la actividad computacional del sistema. Esta medida no se ha incluido porque el prototipo actual no incorpora un medidor de la misma.
- Dado que no se tiene un sensor de temperatura insertado en la carcasa (por ejemplo, una PTC), no es posible estimar el flujo de calor con el cual calcular la temperatura externa en tiempo real.

El primero de estos problemas sólo puede ser resuelto en este prototipo, por un lado, reduciendo la cantidad de calor disipado en el interior y, por otro lado, siendo la medida de la temperatura la primera acción que lleve a cabo el medidor cada vez que despierte de la hibernación, de forma que el calor producido en el interior afecte lo menos posible a la medida.

El segundo de los problemas, sin embargo, no puede corregirse con el modelo actual. Así pues, se propone un método alternativo que se trata de utilizar la información temporal de la señal de temperatura para estimar la tendencia de la variación de la temperatura interna y estimar con ello la temperatura externa a la cual tiende identificándola con curvas de transitorio correspondientes a diferentes temperaturas externas.

Este método alternativo queda fuera del alcance de esta obra, por lo que, por el momento, el prototipo será capaz de medir la temperatura únicamente en régimen permanente una vez se haya minimizado el calor disipado en el interior.

4.1.3 Luminosidad

Se dispone en el prototipo de dos sensores LDR además de la cámara. Varios niveles de procesamiento pueden realizarse; no obstante, sólo uno de ellos correspondería a esta categoría de clasificación de algoritmo de observación: considerando únicamente la reducción de luz por causa de la carcasa semitransparente y tomando tres estimaciones de luminosidad ambiente independientes.

El modelo considerado para la transferencia de radiación electromagnética del exterior al interior de la carcasa en el rango de radiación visible no es más que un factor de atenuación que se calibra empíricamente con un sensor y un foco de luz artificial; interponiendo, o no, la carcasa de metacrilato del prototipo. Por tanto, este modelo queda reducido a la expresión:

$$R_{LDR,ext} = R_{LDR,int} / K_{PMMA} \quad (4.37)$$

donde:

- $R_{LDR,ext}$ es el valor resistivo del sensor LDR que tendría si no hubiera una pared de metacrilato (PMMA) entre el foco y el sensor.
- $R_{LDR,int}$ es el valor resistivo del sensor LDR medido.
- K_{PMMA} es el factor de atenuación de radiación electromagnética determinado empíricamente.

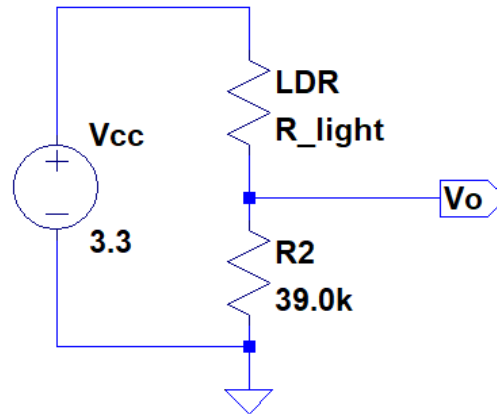


Figura 31: Circuito mínimo de acondicionamiento para sensor LDR.

Dado que el sensor se encuentra en un puente divisor de tensión de forma que, cuanto mayor sea la luz ambiente, mayor sea la tensión que recaiga sobre la resistencia de valor constante, R2.

Es necesario resolver dicho sencillo circuito para estimar R_{int} a partir del valor de tensión medido por el convertidor ADS1115. Sustituyendo dicha ecuación en la Ecuación (4.37) se obtendría la expresión que relaciona la tensión medida en el convertidor con la resistencia medida en la LDR expuesta directamente a la luz del foco:

$$R_{LDR,ext} = \frac{R_2(V_{cc} - V_o)}{V_o K_{PMMA}} \quad (4.38)$$

Igualmente, existe cierta correlación entre este valor de resistencia y la temperatura a la que se encuentra de forma proporcional, reduciéndose por debajo de los 20°C (temperatura de calibración) hasta un 20% a -20°C y aumentando hasta un 5% a los 40°C, por lo que es corregido de forma aproximada linealizando la relación con una pendiente de $4.17 \cdot 10^{-3} [^{\circ}C^{-1}]$.

$$R_{LDR,ext} = \frac{R_2(V_{cc} - V_o)}{V_o K_{PMMA}} \cdot (0.8 + 4.17 \cdot 10^{-3}(20 + T)) \quad (4.39)$$

Determinada el valor de resistencia de la LDR, dado que la curva exacta de cada sensor debería obtenerse por calibración a partir de otro medidor de referencia, proceso que queda fuera del alcance de esta obra, puede aproximarse el valor de lux [lumen/m²] mediante una expresión de correspondencia de valor central a la franja mostrada en la Figura 32 perteneciente a la hoja de datos proporcionada por el fabricante.

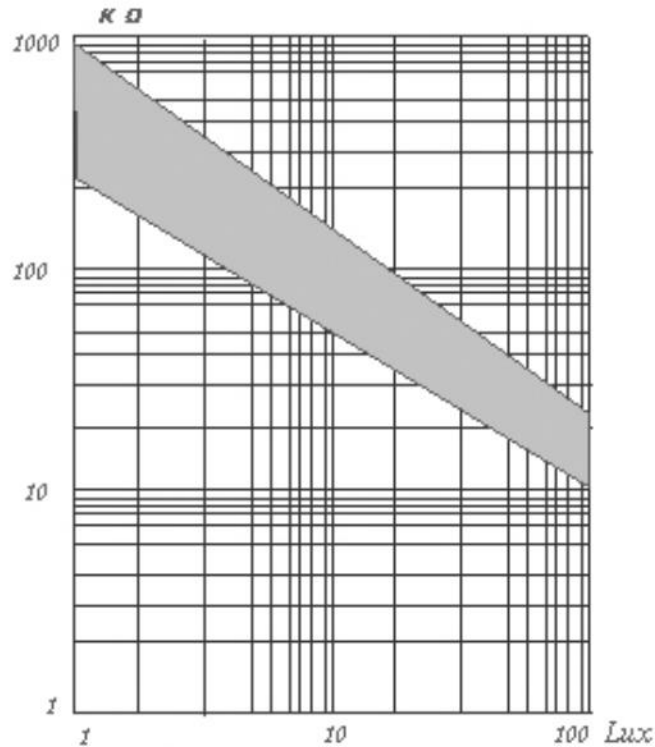


Figura 32: Relación Resistencia (Ohm) - Luminosidad (Lux) del sensor LDR empleado.

4.1.4 Corriente

El enfoque seguido para la estimación de la corriente que impacta directamente sobre el dispositivo es radicalmente diferente a los métodos implementados para la observación de las anteriores magnitudes.

En los anteriores casos, se medía una señal interna que, a razón de la carcasa que se interpone entre el sensor y la señal a medir, se veía atenuada; y es a partir de esta señal atenuada, pero de mismo dominio físico que la original, de la cual se reconstruye el valor original. Sin embargo, al menos en este prototipo, para la estimación de la corriente no se dispone de un sensor interno que permita identificar una señal atenuada de dicho flujo en el interior; por lo que se intenta realizar una transducción digitalmente. El objetivo es, a partir de una o varias señales de aceleración y/o velocidad angular, aproximar un valor de corriente externa.

El indicador a interpretar de la aceleración y/o velocidad angular es la vibración del dispositivo, por lo que, para que este enfoque sea posible, los siguientes puntos deben cumplirse:

- El dispositivo debe encontrarse en modo de monitorización y fijado en un lugar que no se desplace por efecto de la corriente.
- La corriente no es de caudal constante y uniforme.
- En caso de que el lugar al que se fije el dispositivo no oscile o vibre por acción de la corriente, el agarre de la carcasa del dispositivo debe permitir su ligera vibración, por ejemplo, mediante la sujeción por unas agarraderas con elementos de cierta elasticidad.

De estas tres premisas se pueden deducir ciertas limitaciones como que el dispositivo no será capaz de estimar la corriente (relativa) durante la navegación ya que las vibraciones estarán mezcladas con aquellas producidas por el portador; o que la geometría del lugar donde se disponga el dispositivo, así como el ángulo con el que incida la corriente, podrán afectar a la estimación.

Por otro lado, al ser éste un enfoque tan dependiente de la geometría del dispositivo, la geometría de las estructuras adyacentes, el ángulo de incidencia de la corriente o, en definitiva, la mecánica de fluidos involucrada en esta relación, se plantean tres alternativas como solución:

1. Desarrollar un modelo físico complejo que incluya los principales elementos que influyen en la relación entre vibración y corriente del agua.
2. Regresión de una relación entre las dos magnitudes (vibración – corriente) generando datos de la situación prevista mediante programas de simulación de fluidos (CFD) para cada uno de los sitios en los que se pretenda fijar el dispositivo. ^{Nota 1.}
3. Emplear un correntómetro tradicional para calibrar la estimación en cada lugar de aplicación en particular, generando datos durante un intervalo de tiempo que permita correlacionar futuros datos de vibración.

Nota 1. Otra opción sería hacer familias de simulaciones para aplicaciones en disposiciones similares. Un compromiso entre calidad de la estimación y versatilidad de los modelos.

La primera de las opciones queda fuera del alcance de este proyecto. La segunda de las soluciones propuestas es impracticable, al menos, bajo el desarrollo actual de este proyecto; pues supondrían una carga de trabajo adicional excesiva (modelado tridimensional de uno o varios entornos, simulaciones con diferentes condiciones, por ejemplo, con OpenFOAM [10], etc.) con la esperanza de unos resultados probablemente pobres. Por ello, se opta por la tercera de estas opciones, tomando como entrada las señales de aceleración fusionadas mediante un filtro de Kalman como se explica en el siguiente apartado. La correlación entre vibración y corriente, de ser suficientemente determinista, se modelará mediante técnicas de aprendizaje profundo una vez se tengan suficientes datos experimentales en futuras pruebas.

4.2 Algoritmos de fusión

4.2.1 Fusión de aceleraciones

La fusión de las señales de los acelerómetros se realiza para la observación de una señal de aceleración cuyo valor sea igual o más aproximado al valor real de la señal [11]. Es decir, mediante la fusión se pretende reducir el error en la medida de la señal dada por los sensores de forma individual.

En este trabajo dicha fusión se realiza mediante el uso de un filtro de Kalman lineal; por ello, en este apartado se realiza, primero, una breve introducción a este filtro, y después, una adaptación del mismo para la fusión de varias señales para el caso de unos sensores distribuidos de forma arbitraria sobre la placa de circuitos de navegación.

4.2.1.1 Introducción al filtro de Kalman

Este filtro es un algoritmo que permite la observación de un estado a partir de un modelo del sistema y una señal de entrada al mismo con ruido e incertidumbre caracterizados. De forma genérica, este algoritmo se divide en dos pasos: predicción y corrección. Durante la predicción,

se realiza una estimación del estado medido y el error cometido en su estimación. Durante la corrección, se actualiza el valor de la señal y su ganancia, y además, se corrigen *a posteriori* los valores estimados en el paso anterior.

El siguiente es el set de ecuaciones que componen el algoritmo del filtro de Kalman con la nomenclatura empleada en [11]:

- Predicción:

1. Propagación del vector de estados internos del sistema \hat{x}_k^- a partir del último valor de estos, ya corregido, \hat{x}_{k-1}^+ y una matriz de transición Φ_k . Estimación *a priori*:

$$\hat{x}_k^- = \Phi_k \hat{x}_{k-1}^+ \quad (4.40)$$

2. Cálculo de covarianza del error asociado a la anterior propagación P_k^- a partir del último valor corregido de error de estimación P_{k-1}^+ , la misma matriz de transición de antes Φ_k y una matriz de covarianza del ruido en la estimación, Q_{k-1} , para el anterior instante.

$$P_k^- = \Phi_k P_{k-1}^+ \Phi_k^T + Q_{k-1} \quad (4.41)$$

- Corrección:

3. Actualización de medición \hat{y}_k con realimentación del estado propagado \hat{x}_k^- para su corrección:

$$\hat{y}_k = z_k - H_k \hat{x}_k^- \quad (4.42)$$

4. Cálculo de ganancia de Kalman K_k , que se emplea para ponderar el valor de la información aportada por la señal del sensor en las siguientes correcciones. Esta se obtiene a partir de la anterior matriz de covarianza del error cometido, P_k^- , la matriz de mapeado estado-salida, H_k y la matriz de covarianza del ruido del sensor, R_k :

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (4.43)$$

5. Corrección del vector de estados \hat{x}_k^+ a partir de la señal del sensor corregida \hat{y}_k y la ganancia determinada K_k para ponderarla:

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k \hat{y}_k \quad (4.44)$$

6. Corrección de la matriz de covarianza del error asociado a la propagación del estado:

$$P_k^+ = (I - K_k H_k) P_k^- \quad (4.45)$$

Iterando este algoritmo para cada muestra de la señal del sensor se consigue obtener una señal de aceleración en la que la información de la calidad del sensor se mezcla con un modelo teórico del sistema para aumentar la calidad de la señal reduciendo su ruido. En la Figura X se muestra el resultado obtenido para uno de los acelerómetros del M3F en estado de reposo con el filtro de Kalman que se ha implementado usando C++ y la librería Eigen [12] para el cálculo matricial.

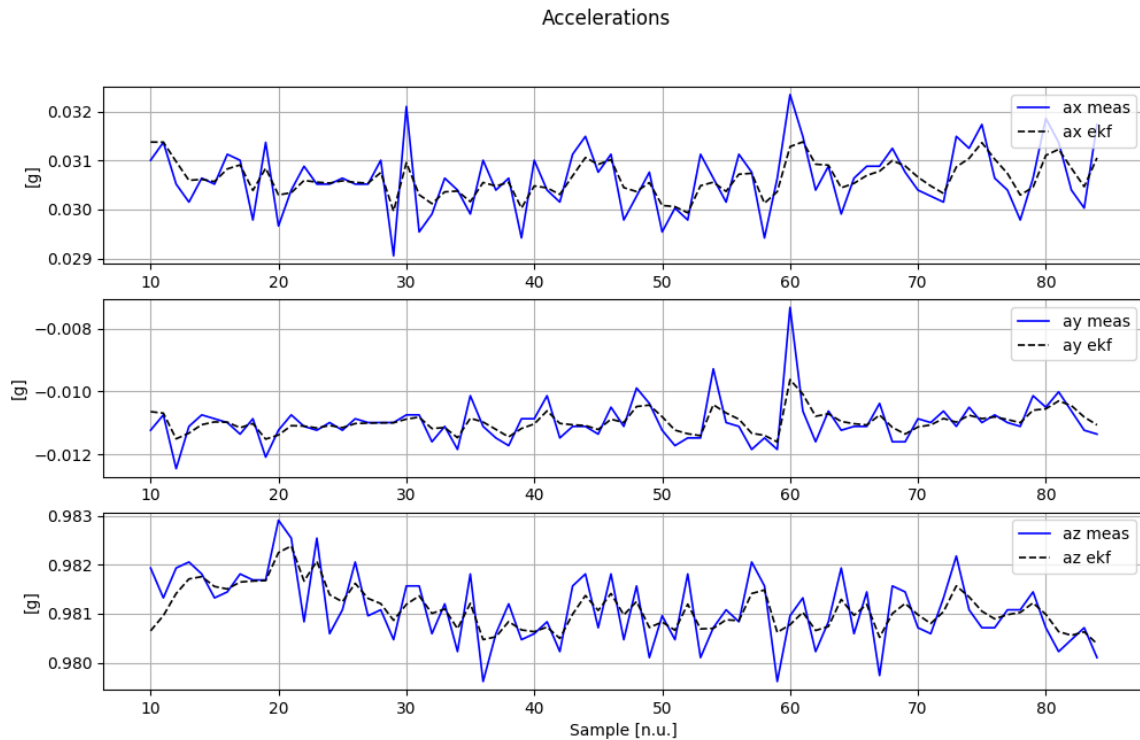


Figura 33: Prueba de Filtro de Kalman con acelerómetro en reposo.

4.2.1.2 Filtro de Kalman para fusión

Existen diferentes métodos para realizar la fusión de señales mediante filtros de Kalman. En [13] se presentan cuatro métodos de fusión diferentes, tres de ellos considerando muestreo sincronizados y un cuarto con datos desincronizados. Dado que en este proyecto se pretende disponer de señales de aceleración muestreadas de forma prácticamente simultánea (lanzando el muestreo primero y recogiendo los datos una vez están todos los datos listos), se elige una de las tres primeras estrategias.

Estas estrategias son:

- Filtro paralelo. El filtro se actualiza procesando todas las señales en paralelo. Aquí, cada señal tiene una ganancia de Kalman asociada, $K_{k,i}$, con la cual es ponderada de forma individual a la hora de actualizar covarianza y estados.
- Filtro secuencial. La actualización se realiza con bloques de datos independientes cambiando los valores de un único filtro. En cada instante de tiempo, los valores modificados en el paso de corrección (vector de estados, ganancia de Kalman y matriz de covarianza del error) son actualizados en tantos pasos como sensores existan, de forma acumulativa sin incrementar el horizonte temporal hasta empelar todas las señales.
- Filtro con compresión de datos. Las señales se combinan para formar una pseudo-señal, empleando la covarianza asociada a cada una para su ponderación, con la cual se actualiza un filtro de Kalman individual.

Asimismo, los autores del artículo presentan una estimación del número de operaciones asociadas a cada una de las estrategias como indicador de su eficiencia. El anterior orden coincide

con el que presentan en términos de eficiencia ascendente, siendo el filtro con compresión de datos el más eficiente de ellos.

Según [13], para el caso lineal con ruido gaussiano, las tres estrategias anteriores obtendrían resultados óptimos e idénticos. No obstante, dado que el caso real bajo estudio en este proyecto es probablemente no-lineal, se ha optado por implementar la segunda de las estrategias de cara a una posible futura implementación de modelos no-lineales ajustados para cada uno de los sensores; que no sería posible implementar con el filtro de compresión de datos.

Con esta estrategia de fusión de señales con filtro secuencial, el set de ecuaciones del filtro de Kalman queda adaptado de la siguiente forma:

- Predicción:

1. Propagación del vector de estados internos del sistema. Estimación *a priori*:

$$\hat{x}_k^- = \Phi_k \hat{x}_{k-1}^+ \quad (4.40)$$

2. Cálculo de la covarianza del error asociado a la anterior propagación:

$$P_k^- = \Phi_k P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (4.41)$$

- Corrección:

3. Actualización de la medición con realimentación del estado propagado para su corrección:

$$\hat{y}_{k,i} = z_{k,i} - H_{k,i} \hat{x}_{k,i-1}^+ \quad (4.46)$$

4. Cálculo de ganancia de Kalman:

$$K_{k,i} = P_{k,i-1}^- H_{k,i}^T (H_{k,i} P_{k,i-1}^- H_{k,i}^T + R_{k,i})^{-1} \quad (4.47)$$

5. Corrección del vector de estados:

$$\hat{x}_{k,i}^+ = \hat{x}_{k,i-1}^+ + K_{k,i} \hat{y}_{k,i} \quad (4.48)$$

6. Corrección de la matriz de covarianza del error asociado a la propagación del estado:

$$P_{k,i}^+ = (I - K_{k,i} H_{k,i}) P_{k,i-1}^- \quad (4.49)$$

En cada instante de tiempo, la predicción se ejecuta una única vez y la corrección se realiza N veces, siendo N el número de sensores cuyas señales se pretenden fusionar.

Entonces, antes de iniciar el bucle de corrección se hace que: $\hat{x}_{k,i-1}^+ = \hat{x}_k^-$, $P_{k,i-1}^- = P_k^-$; y después del mismo: $\hat{x}_{k-1}^+ = \hat{x}_{k,i}^+$, $P_{k-1}^+ = P_{k,i}^+$, de forma que el algoritmo propague los valores acumulados de un instante temporal al siguiente.

El algoritmo implementable queda tal y como se ve en Algoritmo 2, donde se presenta concibiendo unas señales iterables fuera de línea.

Algoritmo 2: Filtro de Kalman modificado para fusión sensorial secuencial.

```
// Inicialización de variables, matrices y vectores
Inicializar_variables()

// Recorrer señales cargadas de memoria
Para (k=0; k < k_final; k++)

    // Predicción
     $\hat{x}_k^- = \Phi_k \hat{x}_{k-1}^+$ 
     $P_k^- = \Phi_k P_{k-1}^+ \Phi_{k-1}^T + Q_{k-1}$ 

     $\hat{x}_{k,i-1}^+ = \hat{x}_k^-$ 
     $P_{k,i-1}^- = P_k^-$ 

    // Corrección
    Para (i=0; i < N_sensores; i++)

         $\hat{y}_{k,i} = z_{k,i} - H_{k,i} \hat{x}_{k,i-1}^+$ 
         $K_{k,i} = P_{k,i-1}^- H_{k,i}^T (H_{k,i} P_{k,i-1}^- H_{k,i}^T + R_{k,i})^{-1}$ 
         $\hat{x}_{k,i}^+ = \hat{x}_{k,i-1}^+ + K_{k,i} \hat{y}_{k,i}$ 
         $P_{k,i}^+ = (I - K_{k,i} H_{k,i}) P_{k,i-1}^-$ 

    Fin para

     $\hat{x}_{k-1}^+ = \hat{x}_{k,i}^+$ 
     $P_{k-1}^+ = P_{k,i}^+$ 

Fin para
```

4.2.1.3 Adaptación de aceleraciones descentralizadas

Puesto que los sensores están colocados de forma dispersa y con ángulos diferentes sobre la placa de circuitos de navegación, es necesario adaptar las señales de aceleración generadas por cada uno de ellos para que puedan ser combinadas por el algoritmo de fusión.

En primer lugar, para corregir la rotación de los sensores de forma que la correspondencia entre sus ejes y los ejes del acelerómetro central coincidan, basta con aplicar una matriz de rotación alrededor del eje z:

$$R_z(\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Como se indica en la Figura 9, los ángulos se corresponden con $\theta = 225^\circ, 315^\circ, 90^\circ$ para los sensores 2, 3 y 4 respectivamente.

A continuación, es necesario aplicar un modelo cinemático de sólido rígido para estimar la aceleración y rotación en el centro de masas que provoca las aceleraciones medidas por cada uno

de estas unidades de medida inercial colocadas alrededor del punto central. Por simplicidad, se ha asumido que el sensor central coincide con el centro de masas de forma ideal.

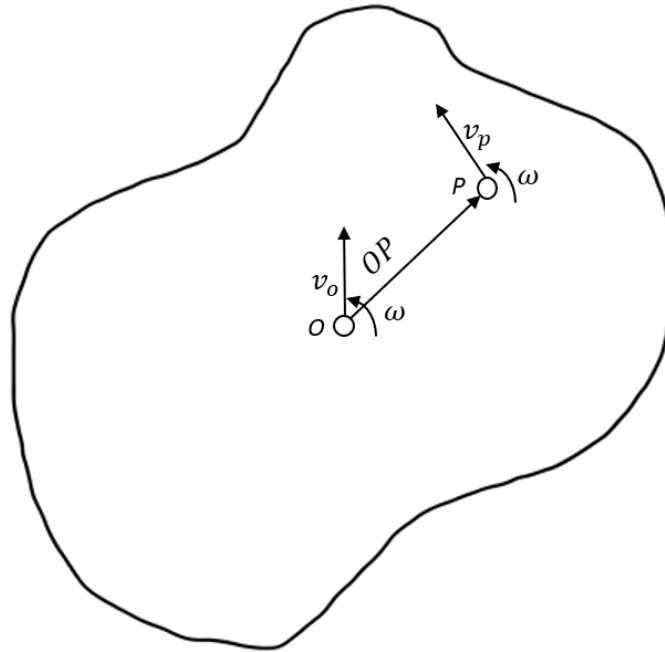


Figura 34: Diagrama de velocidades en un sólido rígido.

La velocidad que el movimiento del centro de masas provoca en un punto arbitrario del sólido viene dada por [1]:

$$v_p = v_o + \omega \times OP \quad (4.50)$$

donde:

v_p es la velocidad lineal en un punto arbitrario, P.

v_o es la velocidad lineal en centro de masas u origen, O, del sólido.

ω es la velocidad angular del sólido.

OP es el vector posición que une el origen, O, con el punto arbitrario, P.

Despejando y derivando se obtiene la aceleración lineal en el origen que, junto con la velocidad y aceleración angular, produce la aceleración medida en el acelerómetro:

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{dv_p}{dt} - \frac{d\omega}{dt} \times OP - \omega \times \frac{dOP}{dt} \quad (4.51)$$

$$a_o = a_p - \frac{d\omega}{dt} \times OP - \omega \times (\omega \times OP) \quad (4.52)$$

Para el caso en que no exista ninguna velocidad ni aceleración angular, la aceleración lineal real en el origen coincidirá con la aceleración lineal real en cualquier punto de la placa de navegación. El valor de aceleración a_p es el proporcionado por el acelerómetro situado en la posición P.

Los tres vectores de posición de los acelerómetros son, respectivamente:

$$OP_2 = (-24.00, -10.75, 0.00)$$

$$OP_3 = (24.00, -10.75, 0.00)$$

$$OP_4 = (0.00, 28.30, 0.00)$$

Expresados en milímetros.

Como se ve en la Ecuación (4.52), es necesario saber el valor de la velocidad y la aceleración angulares para poder realizar la observación de la aceleración central en base a la medida por el sensor. Por ello, de forma previa a su adaptación, se realiza la fusión de las señales de velocidad angular de los tres sensores; pues el valor de velocidad angular es común para cualquier punto de un sólido rígido. En base a dicho valor, se realiza el cálculo de la aceleración angular mediante la expresión:

$$\frac{d\omega_k}{dt} = \frac{\omega_k - \omega_{k-1}}{\Delta t} \quad (4.53)$$

El diagrama del algoritmo resultante para N sensores, se muestra en la Figura 35.

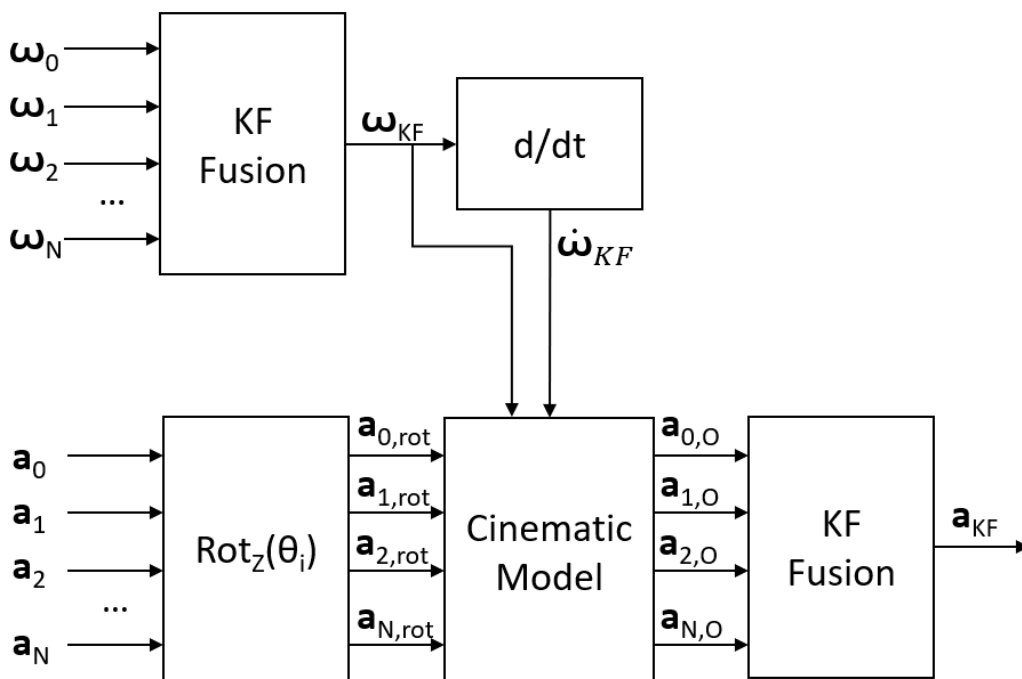


Figura 35: Diagrama de fusión sensorial para una distribución no centralizada de los sensores inerciales.

4.3 Algoritmos de Integración

Los algoritmos de integración implementados en este proyecto sirven, en su mayoría, como entrada a otros algoritmos

4.3.1 Variabilidad de señal

Para evitar redundancia de terminología, defino la variabilidad de una señal como la desviación estándar media de la diferencia entre sus valores sucesivos, con respecto de cero, para un periodo de tiempo finito. Por tanto, la variabilidad sirve como indicador de cambios en una señal a lo largo del tiempo, eliminando los *offsets* al diferenciarla.

Esta magnitud es particularmente útil para la detección estadística de eventos a partir de un flujo continuo de datos, como es el caso de la estimación de la corriente a partir de la vibración del medidor, donde se puede emplear esta variabilidad de la aceleración como indicador de la misma.

La definición de la variabilidad para el caso discreto es sencillamente aquella de la desviación típica de la diferencia de la señal en instantes sucesivos respecto con una media cero:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^{N-1} (x_{k+1} - x_k)^2} \quad (4.54)$$

4.3.2 Navegación inercial

La navegación inercial es un tipo de navegación por estima (o como se denomina en inglés: *dead reckoning*) que consiste en emplear los datos de sensores inerciales (acelerómetros y giroscopios) para determinar la posición actual a partir de una primera posición conocida. Para el caso bajo estudio en esta obra, esta primera posición viene dada por la última posición proporcionada satisfactoriamente por el módulo GNSS, en el momento previo a la inmersión.

A continuación, para estimar el incremento en posición en cada uno de los ejes es necesario realizar el siguiente proceso para cada muestra de aceleración:

1. Integrar las velocidades angulares proporcionadas por el giroscopio para obtener el cambio en la orientación actual con respecto a la que se tuviese en la posición inicial dada por el GNSS, asumiendo que esta orientación sea la tomada como referencia en el sistema de referencia global.
2. Emplear la anterior variación en orientación para aplicar una matriz de rotación en los tres ejes a las señales de aceleración que las haga coincidir la orientación actual con la del sistema de referencia global.
3. Integrar un par de veces la aceleración en cada uno de los ejes para obtener el incremento en posición en cada uno de ellos.

Los resultados obtenidos con esta estrategia empeoran con el tiempo debido al ruido en las señales de aceleración y velocidad angular que va acumulándose en la estimación rápidamente con cada integración de las señales.

Con el objetivo de reducir la cantidad de ruido y conseguir una estimación de mayor calidad durante suficiente tiempo, se emplea el algoritmo de fusión de las aceleraciones del Apartado 4.2. La idea es que, gracias al algoritmo de fusión, se puedan emplear tantos acelerómetros como sean necesarios para cumplir con los requerimientos de la aplicación, o bien, para aplicaciones con requerimientos menos exigentes, abaratar costes mediante la combinación de diversos acelerómetros de diferentes prestaciones.

Para mejorar los resultados de la navegación inercial, algunos autores [17] han empleado técnicas de aprendizaje automático por refuerzo profundo (o como se le denomina en inglés: *reinforcement learning*) o redes recurrentes [18] consiguiendo resultados mejores con respecto a otras técnicas más clásicas. Una de las ventajas de las técnicas de aprendizaje reforzado es que pueden funcionar bien con problemas donde las recompensas que recibe el algoritmo durante el aprendizaje se dan tras un número alto de interacciones, es decir, son dispersas (*sparse rewards*). Es un denominado problema de exploración difícil o *hard exploration problem*. En este proyecto, la señal GNSS con la cual comprobar si se ha integrado bien la señal de aceleración, o no, puede

llegar tras quince minutos o tras hora y media de funcionamiento. Por tanto, parece un problema apropiado para aplicar esta estrategia.

Así, para integrar las señales de aceleración y velocidad angular filtradas por el algoritmo de fusión (Figura 35), la idea es entrenar una red neuronal de aprendizaje por refuerzo, o *Deep Q Learning Agent* (DQN *Agent*) para que aprenda a aplicar unas correcciones, $c_{i,j,k}$, al integrar las señales que le permitan filtrarlas para optimizar la función de error en la estimación de la posición tras un proceso de entrenamiento previo.

4.3.2.1 Descripción del problema

El objetivo de un algoritmo de aprendizaje por refuerzo clásico es encontrar una regla (*policy*) Q que permita optimizar una función de recompensa $R_{k_0} = \sum_{k=k_0}^N (\gamma^{k-k_0} r_k)$, donde N es el número de intervalos totales de la simulación y γ es una ponderación que asegura la convergencia del sumatorio, con un valor entre 0 y 1. Su valor permite dar más importancia a recompensas inmediatas frente a inciertas recompensas futuras.

La regla Q es una función que mapea una tupla estado-acción al espacio de recompensas. Sabiendo esta función, por tanto, puede determinarse las acciones que consigan optimizar la recompensa obtenida durante la ejecución del algoritmo. En el problema clásico, Q es una gran tabla que mapea estado-acción con el valor de recompensas. Este enfoque ha sido mejorado por [16] mediante la sustitución de la tabla por una red neuronal. El problema entonces queda reducido a aproximar la Q del problema, desconocida, mediante una red neuronal, que son aproximadores universales, a través de un proceso de entrenamiento.

Integrando las señales de aceleración lineal y velocidad angular, las acciones que el agente DQN podrá tomar serán los valores de corrección, $c_{i,j,k}$, aplicados a las señales tal que:

$$\theta_{j,k} = (c_{1,j,k} \omega_{j,k} + c_{2,j,k}) + \theta_{j,k-1} \quad (4.55)$$

$$\mathbf{a}^W = \text{Rot}(\theta_{x,k}, \theta_{y,k}, \theta_{z,k}) \mathbf{a}^L \quad (4.56)$$

$$v_{j,k}^W = (c_{3,j,k} a_{j,k}^W \Delta t + c_{4,j,k}) + v_{j,k-1}^W \quad (4.57)$$

$$p_{j,k}^W = (c_{5,j,k} v_{j,k}^W \Delta t + c_{6,j,k}) + p_{j,k-1}^W \quad (4.58)$$

Para: $j = x, y, z$

$k = 0, 1, 2 \dots N$

Donde:

- $\theta_{j,k}$ es el ángulo en el eje j en el k -ésimo instante.
- \mathbf{a}^W son las aceleraciones lineales respecto del sistema de referencia global.
- \mathbf{a}^L son las aceleraciones lineales respecto del sistema de referencia local.
- Δt es el incremento de tiempo entre una muestra y la siguiente.
- $v_{j,k}^W$ es la velocidad en el eje j en el k -ésimo instante.
- $p_{j,k}^W$ es la posición en el eje j en el k -ésimo instante.

Con los anteriores valores de corrección se pretende que el agente DQN aprenda a compensar a través de estos, y en la medida de lo posible, el ruido e incertidumbres asociados a las señales a partir de los datos de entrenamiento; permitiendo así mejorar los resultados de la estimación de posición por navegación inercial.

4.3.2.2 Arquitectura y entrenamiento de la red neuronal

Dado que el volumen de entradas y salidas de la red es reducido, la arquitectura elegida como primera aproximación para este modelo de aprendizaje automático se trata simplemente de un perceptrón multicapa cuyo número de nodos interiores será ajustado mediante experimentación.

Las entradas que recibe este modelo son:

- Aceleraciones en los tres ejes.
- Velocidades angulares en los tres ejes.
- Recompensa acumulada.

Sus salidas serán únicamente seis valores, $c_{1,j}$, $c_{2,j}$, ..., $c_{6,j}$, por cada eje para los parámetros de corrección aplicados en esta última interacción.

Puesto que la recompensa proporcionada por resolver el problema es dispersa, es necesario crear un sistema de recompensas intrínsecas que permitan impulsar al algoritmo a tomar acciones. No obstante, no se dispone de información *ground truth* con la cual comparar los resultados obtenidos en la evaluación, por ello, estas recompensas se van a calcular de la siguiente forma:

Dados:

1. Un número finito de interacciones restantes hasta obtener la señal de GNSS.
2. Un valor de posición final.
3. Una aceleración y velocidad máximas.

Se define entonces un área, alrededor de la posición final, en la cual es posible alcanzar la posición objetivo en el número de interacciones restantes sin superar las limitaciones de aceleración y velocidad máximas. El agente recibirá una pequeña recompensa por cada ciclo que permanezca dentro de dicha área sin saber ninguno de los tres parámetros que definen el área de recompensa positiva; sin embargo, en caso de que la posición quede fuera del área definida en cualquier momento se dará por terminada la simulación. Cuanto más tiempo pase dentro del área de posición probable, mayor recompensa acumulará. Acabado el número de intervalos sin señal GNSS, se le da una última recompensa inversamente proporcional al error cometido con respecto a la posición final esperada.

Así, para cada iteración sobre el set de datos durante el entrenamiento:

1. Se le darán las entradas, incluyendo la recompensa acumulada, a la red neuronal.
2. Se aplicarán los valores de salida para integrar la posición estimada actual.
3. Se calcula el incremento de recompensa según la última estimación.

De cara al proceso de entrenamiento, al principio el modelo no contiene nada de información en lo relativo a las reglas que debe seguir para conseguir mejores resultados. Por tanto, para encauzar el aprendizaje del modelo se pretende realizar un entrenamiento por lotes de datos en los cuales el número de interacciones hasta recibir una recompensa vaya incrementándose paulatinamente con cada lote hasta alcanzar el tiempo requerido por la aplicación, de una hora de funcionamiento sin señal GPS.

Este algoritmo será probado una vez se hayan generado suficientes datos como para realizar el entrenamiento de los modelos de aprendizaje profundo.

4.4 Algoritmos de clasificación

4.4.1 Detección inercial de movimiento

Este algoritmo es empleado para detectar cuándo debe realizarse un cambio de estado de navegación a monitorización y viceversa. A pesar de su aparente simpleza, es de vital importancia para el funcionamiento del dispositivo a largo plazo; pues de él depende directamente la autonomía del dispositivo ya que, bajo el modo de navegación, el consumo de energía es muy superior al correspondiente bajo el modo de monitorización.

Aunque ciertamente es parecido al algoritmo empleado para la estimación de la corriente en base a las señales inerciales (aceleración y velocidad angular), la diferencia radica en que la salida de este algoritmo es únicamente el estado en que estima que se encuentra el dispositivo y de forma binaria: desplazamiento o estático.

Para estimar el estado del dispositivo puede partirse de un razonamiento sencillo: si el medidor se encuentra anclado (y por tanto, pseudo-estático), las aceleraciones lineales del mismo tendrán media nula para un tiempo suficientemente largo.

Lo anterior debe cumplirse siempre que:

1. No exista una corriente constante y persistente que incida sobre el medidor a partir de cierto momento posterior al cambio de estado de desplazamiento a estático.
2. La estructura de sujeción no se vea perjudicada de manera irreversible.
3. La variación de los valores de *offset* de la aceleración con respecto del tiempo (característica *random walk* estudiada en los acelerómetros) sea baja con respecto del periodo de comprobación.

Cualquiera de las dos primeras situaciones generaría una aceleración cuya media sería distinta de cero y provocaría un cambio momentáneo de estado de estático a desplazamiento. No obstante, el algoritmo volverá a pasar el estado de desplazamiento a estático si la nueva posición es lo suficientemente estática. El tercero de los problemas sólo puede mejorarse mediante el empleo de un sensor de mayor calidad o de la fusión sensorial a partir de múltiples sensores.

Los datos de entrada al algoritmo serán la variabilidad de la aceleración lineal en los tres ejes espaciales, así como la variabilidad de la velocidad angular en los tres ejes para N instantes de muestreo anteriores.

Como estructura del clasificador se proponen dos:

- Clasificador simple por umbral. Las variabilidades se ponderan con ciertos pesos, cuya suma es la unidad, y se comparan con respecto a un umbral seleccionado de forma empírica.
- Clasificador por *Support Vector Machine*. Las variabilidades son ponderadas automáticamente por el clasificador.

Evidentemente, el segundo de los enfoques es más robusto pero necesita de cierta base de datos inicial con la que ser entrenado. Por tanto, se implementa el primero y, en un futuro, se utilizarán los resultados, más una corrección posterior de falsos positivos y falsos negativos, para el entrenamiento del SVM.

4.4.2 Detección de inmersión

El algoritmo implementado para detectar la inmersión almacena presión y temperatura iniciales y monitoriza el cambio de presión debido exclusivamente al cambio de volumen del dispositivo, adaptando el umbral de presión según el incremento de la temperatura interna, es decir, aplicando la ley de Gay-Lussac. Si dicha presión supera un umbral configurable de presión expresado como porcentaje incremental respecto de la presión inicial durante un tiempo también configurable, se activa el *flag* correspondiente a inmersión iniciada. Y al contrario, si la presión adquiere un valor por debajo del umbral indicado durante suficiente tiempo, se desactiva el *flag* asociado.

$$P_{\text{lim}}(\Delta T) = \frac{P_o T_{BME}}{T_o} \quad (4.59)$$

5. Programación

El Medidor Modular de Magnitudes Físicas es un sistema electrónico con un funcionamiento totalmente regido por su programación *software* implementada a través de los tres microcontroladores programados personalmente por el autor; a saber: el microcontrolador principal (ESP32), el microcontrolador interfaz del módulo GPS (ATmega328p) y el microcontrolador de gestión de la cámara (ESP32). En este capítulo se explican los diferentes modos de funcionamiento del sistema a través de la máquina de estados ejecutada en el microcontrolador principal así como las arquitecturas de los códigos implementados en los microcontroladores que permiten la consecución de los requerimientos para cada uno de los modos de operación.

Es necesario destacar que, para la configuración y comunicación de cada uno de los sistemas electrónicos (sensores, convertidores, etc.) y la implementación de la máquina de estados, entre otras cosas, se han escrito alrededor de 1500 líneas de código; por lo que en este capítulo se realizará una explicación funcional, mostrando código únicamente en casos puntuales. De esta forma se protege igualmente la propiedad intelectual del dispositivo desarrollado.

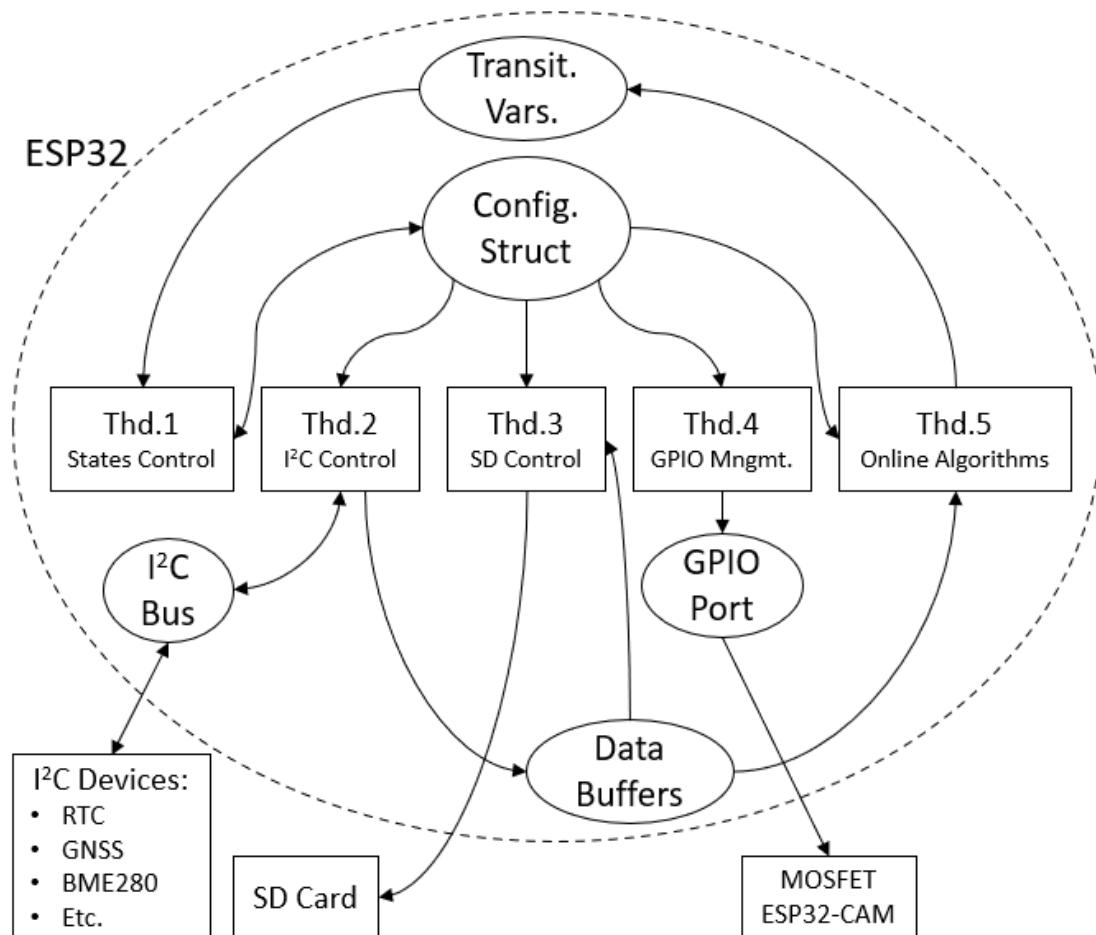


Figura 36: Diagrama de flujo de datos global.

5.1 ESP32 principal

Este microcontrolador implementa la mayor parte del código desarrollado para el dispositivo. Sus principales funciones se pueden resumir en las siguientes:

- Configuración de los sistemas electrónicos periféricos.
- Recogida y procesamiento básico de datos de los sensores.
- Gestión de modos de bajo consumo propio y de sistemas periféricos.
- Apagado/encendido de sistemas periféricos.
- Almacenamiento de datos.

Cada una de las anteriores tareas se realiza de forma diferente, en mayor o menor medida, según las necesidades del sistema. Estas diferentes configuraciones han sido agrupadas en estados o modos de operación cuyas transiciones son provocadas por los algoritmos de clasificación asociados.

El código del ESP32 principal ha sido escrito en C y C++, siendo ejecutados los programas por una copia de *freeRTOS* ejecutada en el microcontrolador. En el anexo A se explican los pasos necesarios para la instalación de la *toolchain* de Espressif para la programación de los ESP32, así como el método seguido para compilar el código e instalarlo en el microcontrolador empleando sistema operativo Ubuntu 18.04 LTS.

5.1.1 Máquina de estados

En la Figura 37 se aprecia el diagrama correspondiente a la máquina de estados implementada. Para este prototipo, basta con cuatro estados para recoger todas las configuraciones asociadas a los modos de funcionamiento del dispositivo:

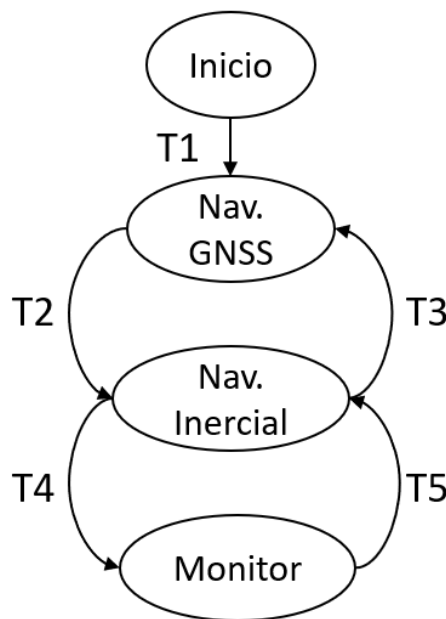


Figura 37: Máquina de estados del microcontrolador principal.

Inicio: El sistema adquiere este estado únicamente en los instantes posteriores a su encendido. Aquí se inicializan todas las variables de sistema y se inician todos los hilos del programa.

Navegación GNSS: Se comienza asumiendo que el M3F ha sido encendido antes de la inmersión y, por tanto, existe la posibilidad de recibir señal de posicionamiento satélite hasta ser sumergido en agua.

Navegación inercial: Se corta la alimentación al módulo GNSS que es incapaz de recibir señal satélite bajo el agua y se comienzan a muestrear, al menos, los sensores implicados en la

navegación inercial a la tasa configurada, que es presumiblemente mayor a la empleada en el resto de estados.

Monitor: El sistema es configurado en modo de bajo consumo y despertado mediante una interrupción lanzada por flanco de bajada en el GPIO del ESP32 principal a cargo del reloj de tiempo real. El periodo de activación de la alarma depende de la aplicación, siendo un posible valor normal 15min. Una vez recogidos los datos, el sistema vuelve a modo de bajo consumo a la espera de la próxima interrupción

Por otro lado, las transiciones que se observan en la Figura 37 tienen la siguiente correspondencia con los algoritmos de clasificación del Apartado 4.4:

T1. Transición directa una vez son ejecutadas todas las órdenes. No obstante, se realiza una espera de dos segundos antes de transitar al siguiente estado.

T2. Transición asociada al algoritmo de detección de inmersión por cambio de presión exterior, sección 4.4.2.

T3. Al igual que en T2, se detecta la emersión por cambio de presión exterior.

T4. En caso de que la variabilidad de la aceleración sea reducida, el algoritmo de detección inercial de movimiento, sección 4.4.1, activa esta transición.

T5. Inversamente a T4, cuando la variabilidad de las aceleraciones sea superior, el dispositivo considerará que se encuentra en movimiento y activará esta transición.

La configuración interna del dispositivo (frecuencia mínima de muestreo, sensores legibles y otros) es almacenada en una estructura de datos que puede ser leída por cualquier hilo. Por tanto, cuando se realiza un cambio de estado basta con actualizar dicha estructura de manera segura en sentido multihilo (thread-safe) para que todos los procesos bajo ejecución cambien su comportamiento al deseado.

Respecto a las prioridades de las transiciones desde cada uno de los estados, únicamente puede existir simultaneidad de activación de transiciones para el estado de navegación inercial, ya que para el resto de los estados únicamente es posible transitar a un único modo de operación subsiguiente.

Tratando entonces el estado de navegación inercial, la simultaneidad de activación de sus transiciones implicaría que, por un lado, la variabilidad de las aceleraciones es lo suficientemente baja como para que el algoritmo establezca que se encuentra en reposo y que, por otro lado, existe un cambio de presión negativo suficientemente alto como para que el algoritmo determine que ha emergido del agua.

Este caso, para aplicaciones de carácter general para las cuales se ha pensado el dispositivo parece relativamente improbable. No obstante, la prioridad entre estas dos transiciones podrá configurarse según la aplicación en cuestión. Por ejemplo, si se pretende monitorizar un punto intermareal, puede ser conveniente mantener el dispositivo en modo de monitorización para ahorrar energía en lugar de pasar a navegación GNSS cada vez que baje la marea. El prototipo de este proyecto, sin embargo, tiene programada la prioridad al contrario y será modificada únicamente cuando se considere necesario.

5.1.2 FreeRTOS

Este sistema operativo pertenece, ha sido desarrollado y mantenido por *Real Time Engineers Ltd* [14] y es distribuido bajo licencia MIT, de forma totalmente gratuita.

FreeRTOS es un sistema operativo de pequeño tamaño | diseñado para su implementación en sistemas embebidos (tanto microcontroladores como microprocesadores de poca capacidad) escrito principalmente en C y en una pequeña parte en ensamblador, pensado para aplicaciones de tiempo real de requerimientos tanto soft como hard.

El *kernel* de *FreeRTOS* permite ejecutar simultáneamente el código de varios hilos si el microprocesador tiene más de un núcleo, decidiendo qué hilo ejecutar en cada momento según la prioridad asignada a los mismos.

Para el caso de aplicaciones no demasiado complejas, basta con asignar prioridad alta a aquellos hilos que implementen funcionalidades de requerimientos *hard*, es decir, aplicaciones que deban ser ejecutadas con una temporización precisa para evitar un fallo del sistema. Un ejemplo de esto sería el muestreo de las aceleraciones en el instante adecuado. Alternativamente, aquellas funcionalidades cuyo retraso de ejecución no implique un problema para el funcionamiento del sistema, estos son requerimientos *soft*, serán lanzadas con una prioridad menor.

Para lanzar como hilo una función previamente creada basta con ejecutar la siguiente sentencia:

```
xTaskCreate(storage_task, "sd_storage_task", 2048, NULL, 7, &xSDtask);
```

donde:

- `storage_task` es el nombre de la función que compone el código del hilo.
- `"sd_storage_task"` es el identificador dado al hilo.
- 2048 es el espacio en palabras de 4 bytes de memoria RAM asignado para la pila del hilo. Dado que el ESP32 tiene un microprocesador de arquitectura de 32-bits, se asignan 2048 x 4 bytes como pila.
- NULL sustituye a un puntero de tipo (`void*`) que podría emplearse para pasar argumentos al hilo.
- 7 es la prioridad del hilo, mayor cuanto mayor sea dicho número.
- `&xSDtask` es un manejador pasado por referencia que puede cumplir con diferentes funciones, como el cambio de prioridad del hilo durante la ejecución.

Dado que el sistema operativo permite la coexistencia de múltiples hilos en ejecución, es necesario que provea de las herramientas para permitir el acceso adecuado a las variables comunes y la comunicación entre los hilos en caso de ser necesario. FreeRTOS proporciona efectivamente muchas funciones para cubrir dichas necesidades. De entre todas ellas, el código actualmente hace uso únicamente de las siguientes:

Mutex (Mutual exclusion variable o semáforos binarios):

```
xSemaphoreHandle xMutex;  
  
xMutex = xSemaphoreCreateMutex();  
  
xSemaphoreTake( xMutex, portMAX_DELAY )  
  
xSemaphoreGive(xMutex);
```

Estas funciones son empleadas para crear, inicializar, bloquear y liberar las variables de exclusión mutua, respectivamente. Sólo uno de los hilos puede bloquear (o tomar) dicha variable simultáneamente, por lo que permite bloquear ciertos tramos del código para que un único hilo pueda modificar, por ejemplo, las variables compartidas. Una vez ejecutado el código, se libera la variable y se permite el acceso a la memoria compartida al siguiente hilo, que permanece en espera mientras tanto.

También puede emplearse para gestionar el uso de los periféricos como el módulo de I²C o SPI.

Señales de notificación:

```
ulTaskNotifyTake( pdTRUE, portMAX_DELAY );  
  
xTaskNotifyGive( xSDtask );
```

Las funciones de notificación a las tareas (o hilos) se pueden emplear para sincronizar eventos: mientras un hilo permanece en espera de notificación, como el hilo de almacenamiento de datos en la tarjeta microSD, otro realiza el muestreo de los sensores y notifica (y desbloquea) al hilo de almacenamiento una vez todos los registros han sido actualizados.

Existen otras funcionalidades de este conjunto de funciones de notificaciones, como las notificaciones en abierto (*broadcast*) que permiten el desbloqueo de múltiples hilos simultáneamente o la generación de notificación a partir de una interrupción; pero no han sido empleadas en esta versión del código.

5.1.3 Arquitectura multihilo

El código ejecutado en el microcontrolador principal ha sido construido mediante hilos que ejecutan diferentes funcionalidades del sistema. Como se ha comentado previamente, cada uno de estos hilos tiene acceso a la estructura de datos de configuración global que determina qué operaciones debe llevar a cabo cada uno de ellos en cada iteración. Se utilizan concretamente cinco hilos para la realización de las tareas:

Hilo 1: Gestión de estados.

Prioridad 9.

Este es el encargado de comprobar los valores de las variables de transición, modificadas únicamente por el hilo de ejecución de algoritmos en línea (hilo 5), y realizar los cambios asociados al nuevo modo de operación sobre la estructura de datos de configuración global del sistema, de forma segura, en caso de que una de estas variables cumpla la condición de transición.

Este hilo se sincroniza con el quinto hilo, encargado de la ejecución de los algoritmos, para comprobar únicamente las variables de transición que han sido actualizadas. Para ello, este está en hibernación de forma indefinida hasta que es desbloqueado por la señal proveniente del hilo 5.

Hilo 2: Comunicación I²C con sistemas periféricos.

Prioridad 9.

Ejecutándose con una frecuencia definida para el modo de operación habilitado, comprueba en la estructura de configuración y para cada sistema periférico si debe intentar actualizar la información de este en el ciclo actual. Esta decisión depende de si el sistema periférico está habilitado en el estado actual de la máquina de estados y de si el ciclo actual coincide con su periodo de muestreo.

Por ejemplo, la señal del módulo GNSS es actualizada por el módulo con un periodo de un segundo. Muestrearlo con un periodo inferior carece de sentido por lo que, si el M3F está funcionando con una tasa de muestreo de 0.25s, el contador de ciclos de GNSS en la estructura de configuración global deberá ser incrementado cuatro veces hasta que su información sea actualizada tras cuatro ciclos sucesivos.

Hilo 3: Almacenamiento de datos en tarjeta SD.

Prioridad 8.

Este hilo, como el primero, permanece en espera indefinida de forma habitual a la escucha de la señal de desbloqueo por parte del Hilo 2, la cual es emitida cada vez que se realiza una actualización de los datos de los sistemas periféricos del bus.

La información de los sensores y otros sistemas es transformada a ASCII desde el tipo de datos de origen (flotante o entero, principalmente) y escrita como una línea adicional en el fichero de datos que esté abierto en ese momento. Estos datos están compartimentados en ficheros independientes cuya duración puede ser configurada, asegurando los mismos ante un posible corte repentino en la alimentación.

El formato de almacenamiento de los datos es CSV (*Comma Separated Values*), pues se trata de una estructura de almacenamiento sencilla en la que únicamente se emplean comas, entre variables, y tabulaciones, entre ciclos de muestreo, para separar los datos; indicando la cabecera el nombre de cada una de las columnas. Este formato es un estándar *de facto* para el almacenamiento de datos.

Hilo 4: Gestión de pines de propósito general.

Prioridad 6.

Este hilo se encarga de los elementos conectados a los puertos de pines de propósito general del ESP32 como el LED de indicación de estado o las compuertas de los MOSFET 2N7000 que regulan la alimentación del módulo GNSS y su microcontrolador interfaz o la pantalla OLED que no ha sido programada para esta obra.

Igual que en los hilos ya discutidos, con un periodo de ejecución dado, se comprueban cuales de los pines deben permanecer en estado lógico alto, 3.3V, y cuáles deben estar en estado lógico bajo, 0V. En caso de no coincidir su valor actual con el establecido en la estructura de configuración, se aplica el cambio.

Hilo 5: Ejecución de algoritmos en línea.

Prioridad 7.

Con un periodo de actualización mayor o igual al establecido para el hilo 2, se actualizan los valores de las variables de transición que provocan el cambio de estado del sistema a través del hilo 1. En concreto, se ejecutan los algoritmos asociados a las transiciones T2, T3, T4 y T5 por pares según el estado actual del sistema. Por ejemplo, en estado de navegación inercial sólo se ejecutan los algoritmos asociados a T3 y T4.

A pesar de que estos algoritmos pudieran ser ejecutados dentro del hilo 1, se dejan en un hilo independiente para mayor claridad en caso de añadir otros algoritmos no relacionados con la transición de estados en un futuro; como sería el caso del algoritmo de estimación de posición en tiempo real.

En la Figura 36 se muestra el diagrama de flujo de información de los sistemas. Dado que el microcontrolador dispone de dos núcleos, los hilos preparados para su ejecución (y no bloqueados) pueden ser ejecutados por pares; decidiéndose el orden según la prioridad del hilo. Por otro lado, los hilos bloqueados se ejecutan tan pronto como sean desbloqueados y haya un núcleo libre. Los hilos bloqueados no son únicamente aquellos sincronizados por medio de señales (hilos 1 y 3), sino también cualquiera de los otros en el momento de una espera. Por ejemplo, el hilo 2, en comunicación con el convertidor analógico digital (CAD), debe esperar a que se realicen las medidas cuando estas han sido comandadas al convertidor antes de poder recibir la información.

Los datos actualizados el hilo 2 y leídos por los demás están almacenados en una estructura global de medidas. Para garantizar su acceso y edición seguros, así como sucede con la estructura global de configuración, se protegen sus datos por medio de una variable de mutua exclusión, *mutex*. Estas variables, como se ha explicado en el apartado anterior, son bloqueadas y liberadas cada vez que un hilo pretende leer o editar el contenido de estas estructuras globales.

5.2 ESP32 de visión

La complejidad del código implementado en este microcontrolador se ha mantenido relativamente básica en este prototipo. Concretamente, cada vez que este es encendido:

1. Apaga todos aquellos módulos internos innecesarios para su operación.
2. Carga la configuración de la librería de la cámara.
3. Realiza una fotografía.
4. Carga de la memoria *flash* un contador de fotografías, lo incrementa.
5. Guarda la fotografía en la propia microSD del módulo con identificador único usando el anterior contador.
6. Actualiza el contador de la memoria *flash*.
7. Entra en modo sueño profundo.

El séptimo punto es importante para asegurar el funcionamiento a largo plazo de los módulos internos del microcontrolador, dado que, al entrar en modo de sueño profundo, desconecta la mayoría de estos de forma segura. Así se evitan posibles roturas por un corte incorrecto de la alimentación.

Como se puede deducir del anterior código, en la actual versión es necesario reiniciar el microcontrolador cada vez que se pretenda realizar una fotografía. Esto se hace a través del MOSFET 2N7000 que controla su alimentación; cuya compuerta está conectada directamente al GPIO del ESP32 principal.

De cara a un posible funcionamiento más complejo en el cual se procesen las imágenes para integrarlas con el algoritmo de navegación, es necesario habilitar una vía de comunicación con el microcontrolador principal a través de la cual puedan transmitirse los resultados del procesamiento. Con este fin se ha conectado el módulo de la cámara al bus I²C general a través de dos posibles canales que permanecen en circuito abierto hasta que se colocan dos *jumpers* (por cada canal) en posiciones establecidas, permitiendo la transmisión de las señales.

Se han creado dos posibles vías de comunicación al bus I²C en lugar de una debido a que este módulo en concreto, ESP32-Cam, parece ser problemático a la hora de gestionar I²C y SPI juntos. De esta forma, se aumentan las posibilidades de éxito futuro.

5.3 ATmega328p de interfaz

Como se viene diciendo previamente en este trabajo, la función de este microcontrolador es la de hacer de interfaz con el módulo GNSS que únicamente es capaz de transmitir los datos mediante protocolo serie. Asimismo, este microcontrolador ha sido programado para *parsear* los

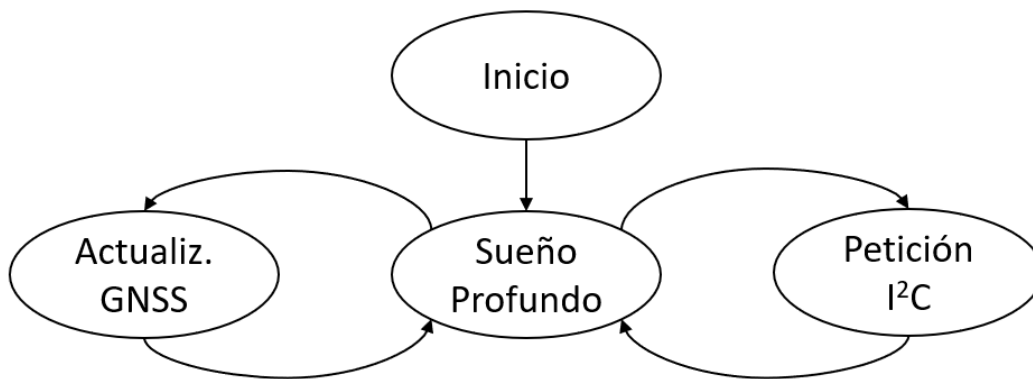


Figura 38: Máquina de estados del microcontrolador de interfaz.

datos emitidos por el módulo de forma que pueda transmitir por el bus I²C sólo aquellos datos que se han encontrado útiles para el sistema. El diagrama del proceso implementado puede verse en la Figura 38.

Como se observa en el diagrama de esta Figura, el microcontrolador se inicializa al encenderse, configurando interrupciones y apagando aquellos módulos internos no empleados en esta aplicación. Tras ello, pasa directamente a modo de sueño profundo para ahorrar energía. De esta hibernación puede salir por interrupciones de orígenes diferentes: puerto serie o canal I²C, ejecutándose la rutina asociada a la fuente de interrupción.

Por un lado, la actualización de la información GNSS se realiza en múltiples pasos dado que las sentencias NMEA que recibe el módulo GNSS varía en contenido. La librería empleada, llamada NeoGPS [5], realiza la actualización únicamente de la información recibida en la sentencia NMEA correspondiente y deja indicada su reciente actualización en la estructura de datos. De este modo, cada vez que el módulo GNSS recibe una sentencia NMEA, la transmite por puerto serie al microcontrolador, despertándolo para que actualice la información. Una vez procesada la información, vuelve al estado de sueño profundo.

Por otro lado, para la atención de peticiones provenientes del bus I²C el microcontrolador copia la información interpretada de los mensajes recibidos de los satélites, almacenada en *arrays* declarados globalmente, en el *buffer* de datos de I²C y los envía como una única secuencia de bytes que son interpretados apropiadamente en el microcontrolador principal.

Para poder transmitir datos de punto flotante (y otros tipos) a través del bus I²C se pasan estos datos a bytes para que encajen en el *buffer* de salida. Esto se consigue fácilmente guardando los resultados en estructuras de tipo "*union*" de la siguiente forma:

Conversión *float-byte*

```
typedef union {  
    float float_data;  
    unsigned char byte_data[4];  
} UNION_uint8_float;
```

Accediendo a los datos luego de la forma conveniente, como datos de punto flotante o como secuencia de bytes.

Además los programas ejecutados en los sistemas embebidos que se han presentado en esta sección, se han creado programas para la implementación de los modelos físicos desarrollados o el graficado de los datos obtenidos, así como para la ejecución de los algoritmos que, hasta el momento, son únicamente ejecutados fuera de línea, como el algoritmo de navegación.

Por simplicidad de cara a la implementación de los modelos, se ha seleccionado Python como lenguaje de codificación en la mayoría de los casos, aunque otros, como los filtros de Kalman, han sido implementados en C++ para facilitar su posterior ejecución en tiempo real dentro del dispositivo desarrollado.

6. Pruebas del sistema

En este capítulo se describen las diferentes pruebas a las que se ha sometido el sistema para comprobar su funcionamiento, seleccionar los componentes más adecuados para cumplir con las especificaciones y calibrar los parámetros de los medidores, así como para demostrar la viabilidad del diseño propuesto. Estas pruebas son:

- Integración continua: Pruebas realizadas durante la programación del dispositivo para comprobar el funcionamiento del código a medida que se van añadiendo subsistemas electrónicos al dispositivo.
- Estanqueidad: Serie de pruebas con exigencia cada vez mayor de profundidad, y por tanto, de presión; que comprueban la posible existencia de fallos de estanqueidad o daños en la estructura tras cada una de ellas.

A continuación, siguiendo en orden la anterior clasificación de las pruebas, se realiza una descripción de los objetivos de la prueba, se define el procedimiento de esta y se anotan las observaciones realizadas durante y tras las pruebas.

6.1 Pruebas de integración continua

Se han realizado numerosas pruebas de funcionamiento durante el desarrollo del dispositivo. Concretamente, para cada uno de los sensores y periféricos electrónicos, el proceso ha consistido en:

1. Escribir código para el funcionamiento del ESP32 exclusivamente con el subsistema electrónico añadido.
2. Añadir el subsistema al montaje en *breadboard* con el conexionado necesario.
3. Prueba individual de funcionamiento con el subsistema recientemente añadido.
4. Integración del código asociado al último subsistema en el programa global del medidor modular de magnitudes físicas.
5. Prueba de funcionamiento del sistema completo.

De esta forma se ha podido comprobar que ninguno de los subsistemas entraba en conflicto con los demás durante el funcionamiento normal. En la Figura 39 puede verse el montaje de pruebas del sistema prácticamente completo.

De igual modo, a partir de la iteración en la que fue añadido el adaptador de tarjetas microSD, se han generado archivos de datos de las pruebas que han sido empleados para comprobar el correcto funcionamiento del sistema interconectado.

Por último, comprobado que el sistema electrónico completo funciona en el montaje de prueba, se sueldan e interconectan los dispositivos a las placas de circuitos del prototipo para realizar la misma comprobación de funcionamiento en el montaje final del mismo. Este montaje puede observarse en la Figura 40. Los resultados fueron satisfactorios salvo por uno de los canales de I²C correspondiente a uno de los acelerómetros. Estos fueron crimpados manualmente por el autor y los resultados son mejorables.

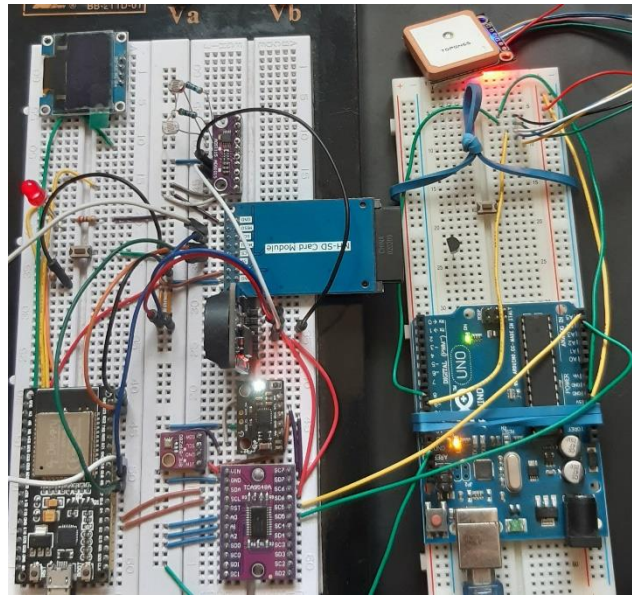


Figura 39: Montaje en placa de pruebas para integración continua.

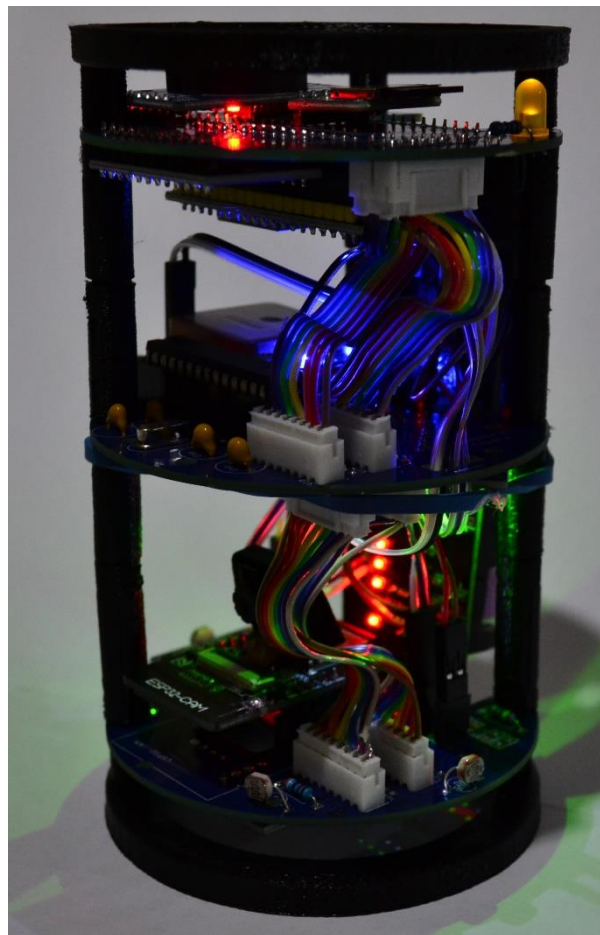


Figura 40: Montaje final en chasis impreso del prototipo.

6.2 Pruebas de estanqueidad

6.2.1 Comprobación de sellado simple

Objetivo: Esta es la primera de las pruebas de estanqueidad de la carcasa. Esta prueba, la de menor exigencia para la carcasa, es empleada para comprobar cuál de las juntas adquiridas es adecuada para asegurar la estanqueidad del dispositivo.

Teniendo la ranura de inserción de la junta un diámetro interno de $83.1 \pm 0.1\text{mm}$ y uno exterior de $86.1 \pm 0.1\text{mm}$, son tres las juntas propuestas para el sellado con medidas (diámetro interno, espesor): 82 x 3mm, 83 x 3mm, 83 x 3.5mm respectivamente.

Procedimiento: Se realiza el montaje de una de las tapas que componen la carcasa; luego, se vierte agua en su interior hasta una altura de 105mm. Las carcasas se colocan sobre papel fino y se dejan reposar. Tras 30min, se retiran las carcasas y se buscan posibles marcas de agua en las hojas de papel.

Observaciones:

Prueba 1.1 Se realiza el procedimiento de la prueba descrita empleando la junta de 83 x 3mm. Con ella, sólo una de las tres carcasas muestra la estanqueidad deseada. De las otras dos:

- Se observa una gota de agua que, sin embargo, podría deberse a una salpicadura pasada por alto durante la colocación de las carcasas.
- La tercera carcasa muestra claramente un fallo de estanqueidad inadmisibile. [Nota 1]

En las Figuras 41 y 42 se puede ver el montaje y los resultados de la prueba respectivamente.

Nota 1. La tercera de las carcasas tiene defectos de fabricación, por lo que las ranuras de inserción de la junta tórica no están correctamente alineadas. Como resultado, se crean pequeñas cavidades que dificultan el sellado con el diseño original.



Figura 41: Prueba de estanqueidad con junta de sellado de 83x3mm.

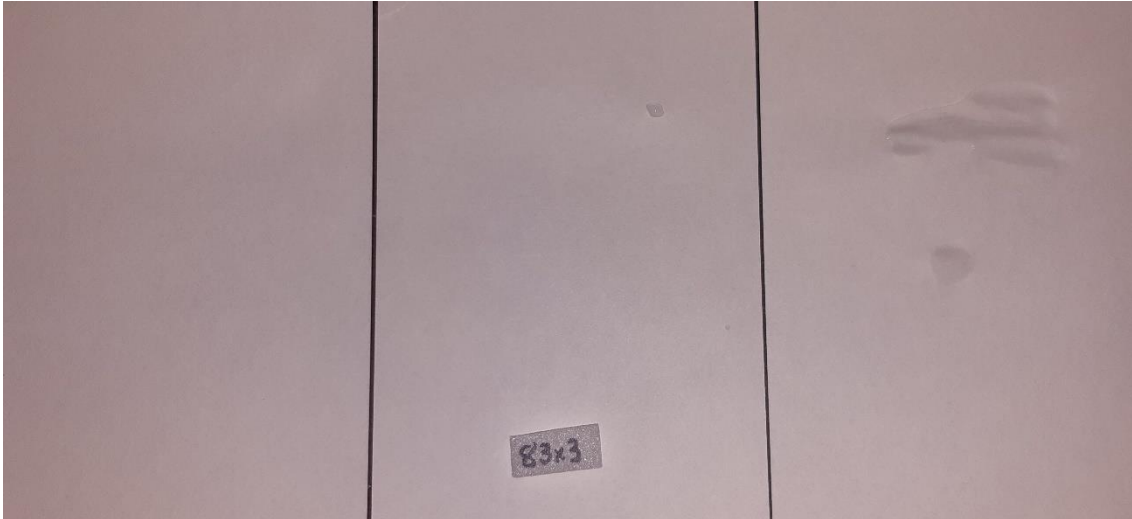


Figura 42: Resultados de la primera prueba de sellado.

Prueba 1.2 Igual que antes, se realiza la prueba empleando la junta de 83 x 3.5mm. Los resultados, tras 30min de espera, son mejores que los anteriores; no observándose ninguna filtración sobre las hojas de papel, tal y como se observa en las Figuras 43 y 44.

Como es de suponer, con esta junta tórica, tapa y cilindro no entran en contacto debido a que el espesor de la junta es superior al espacio de inserción de la junta, cuya sección es de 3x3mm. No obstante, precisamente por ello, todas las posibles cavidades quedan cubiertas por el material sobrante de la junta.

Se selecciona esta junta, de dimensiones 83 x 3.5mm, como adecuada para el sellado.



Figura 43: Prueba de estanqueidad con junta de sellado de 83x3.5mm.



Figura 44: Resultados de segunda prueba de sellado.

6.2.2 Inmersión en aguas confinadas

Objetivo: Se pretende comprobar que el sellado simple probado en 8.1.1 es adecuado cuando la presión externa es mayor que la interior y no al contrario. Asimismo, se realiza la primera comprobación de resistencia de la estructura y se usan los datos generados para comprobar el funcionamiento de algunos de los algoritmos.

Procedimiento: El dispositivo es sometido, como en la anterior prueba, a un ambiente hiperbárico por inmersión en agua dulce durante unos 60min en total a unas profundidades de entre uno y dos metros. Este entorno es mostrado en la Figura X. En esta ocasión, los sistemas electrónicos para la realización de las mediciones están colocados y operativos en el interior de una de las tres carcasas probadas con el fin de recabar datos durante la misma.

En primer lugar, se realiza la prueba con dos de las carcasas sin la electrónica instalada. De esta forma, se comprueba su estanqueidad sin comprometer la integridad de los sistemas electrónicos a 1m de profundidad. Tras 5min, se estudia su interior en busca de fallos del sellado. En caso de obtener buenos resultados, se procede con la carcasa restante con los sistemas electrónicos en su interior y encendidos, como se muestran en la Figura x. Pasados 10min de prueba, se realiza una inspección en busca de agua por filtraciones. En caso de no haber fallos, se lleva el dispositivo a la zona de mayor profundidad, a unos 1.65m de profundidad y se deja el dispositivo alrededor de 50min en reposo.

Pasado este tiempo, se extrae el dispositivo, se realiza una inspección visual en búsqueda de posibles fallos de estanqueidad y se realiza una inspección por microscopio de la estructura en busca de posibles fisuras difíciles de ver a simple vista.

Por otro lado, se vuelcan en el ordenador los datos capturados para su análisis.

Todo el procedimiento es grabado por una cámara con carcasa sumergible modelo AEE S60.



Figura 45: Entorno de prueba para inmersión en aguas confinadas.

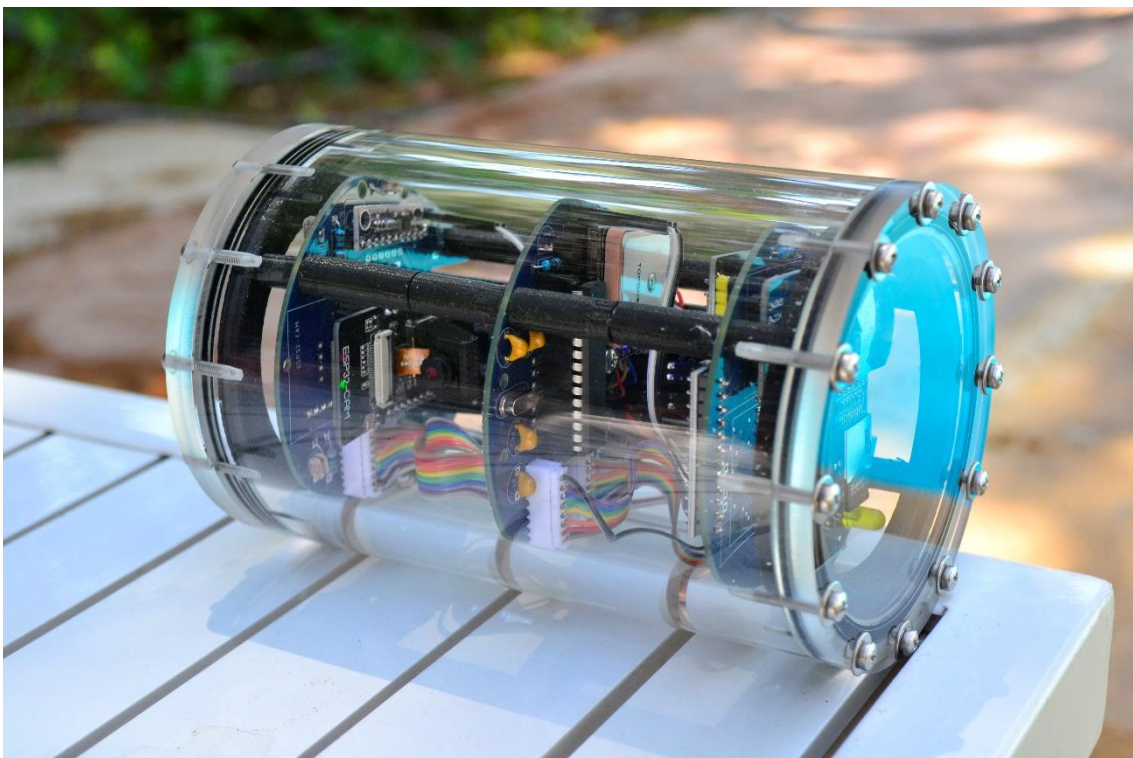


Figura 46: Montaje completo del primer prototipo de Medidor Modular de Magnitudes Físicas.

Dado que el dispositivo tiene cierta flotabilidad positiva, ha sido necesario anudarle aproximadamente 400 gramos de lastre, quedando el montaje final de la prueba tal y como se observa en las Figuras 47 y 48, donde se observa el medidor modular de magnitudes físicas desde la cámara de monitorización del proceso y desde la superficie, respectivamente.

Observaciones: Los resultados obtenidos en esta primera prueba han sido en gran medida satisfactorios y han permitido detectar varios problemas menores de funcionamiento que deben ser subsanados.

Los datos extraídos del sensor BME280 se muestran en la Figura 49. Para interpretar esta gráfica correctamente es necesario realizar una aclaración previa acerca de los eventos asociados a cada una de las partes que componen el experimento. El periodo de muestreo es de 250ms.

El registro de la prueba es el que sigue:

- Al principio la presión tiene un valor de aproximadamente 101850Pa. Este es el momento previo a ser sumergido (mientras se termina de atornillar la tapa lateral).

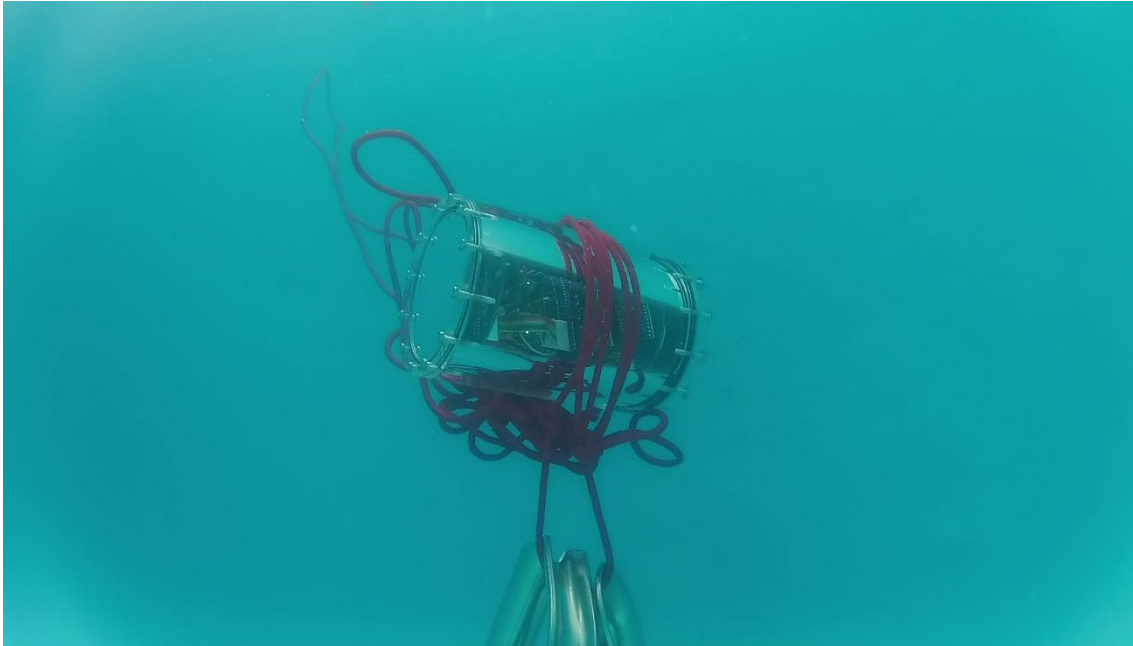


Figura 47: Vista sumergida de la prueba de inmersión en aguas confinadas.

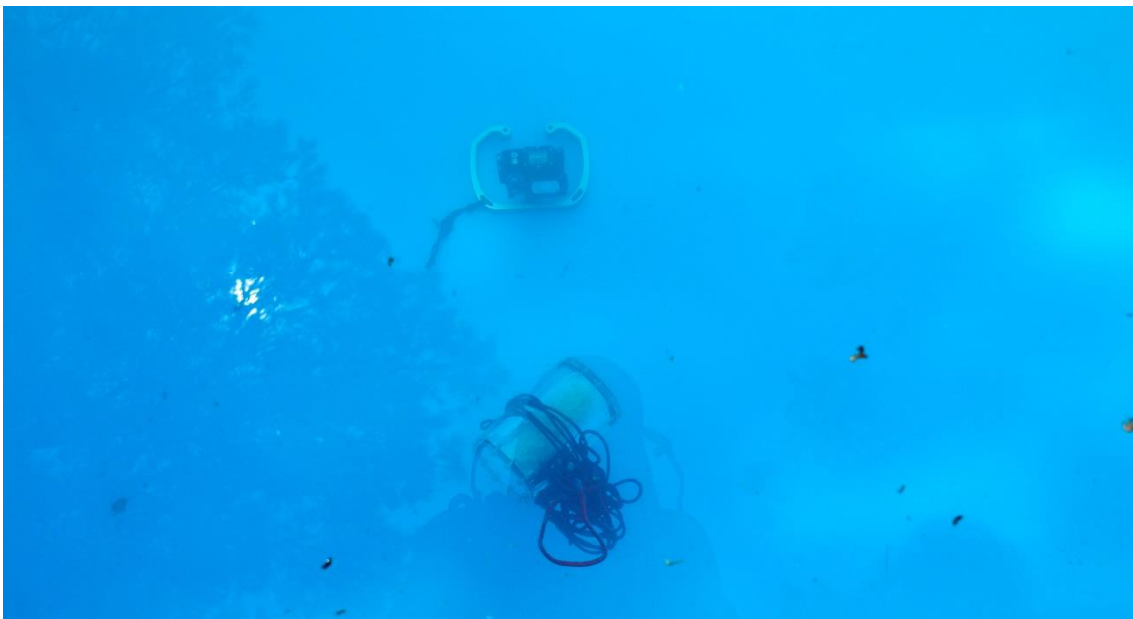


Figura 48: Vista superior de la prueba de inmersión en aguas confinadas.

- Alrededor de la muestra 1000 se introduce el dispositivo en el agua a 1m de profundidad. Como la electrónica trabaja sin descanso, ya que los modos de bajo consumo no han sido introducidos aún en el código, la temperatura sigue aumentando junto con la presión.

- En la muestra 2400 se pasa el dispositivo a la zona profunda, a 1.65m de profundidad. Se deja reposar alrededor de 40min en esta posición. La temperatura y presión son estables pero la humedad aumenta.

- Luego, en la muestra 8000 se toma el M3F y se recorre la piscina ida y vuelta tres veces a diferentes velocidades y profundidades con el fin de obtener un mínimo set de datos de movimiento.

- Alrededor de la muestra número 8300 se la libera para que flote libremente en la superficie del agua. Probablemente la luz del sol incidente produjo efecto invernadero en su interior, subiendo la temperatura hasta 38°C respecto a 25°C ambientales (o los 26°C del agua).

- Por último, se extrae el dispositivo del agua, se retira la tapa y es apagado.

Por otro lado, los escalones que se ven se deben a los periodos en los que se cierra el fichero actual de datos y se crea uno nuevo para compartimentar los datos.

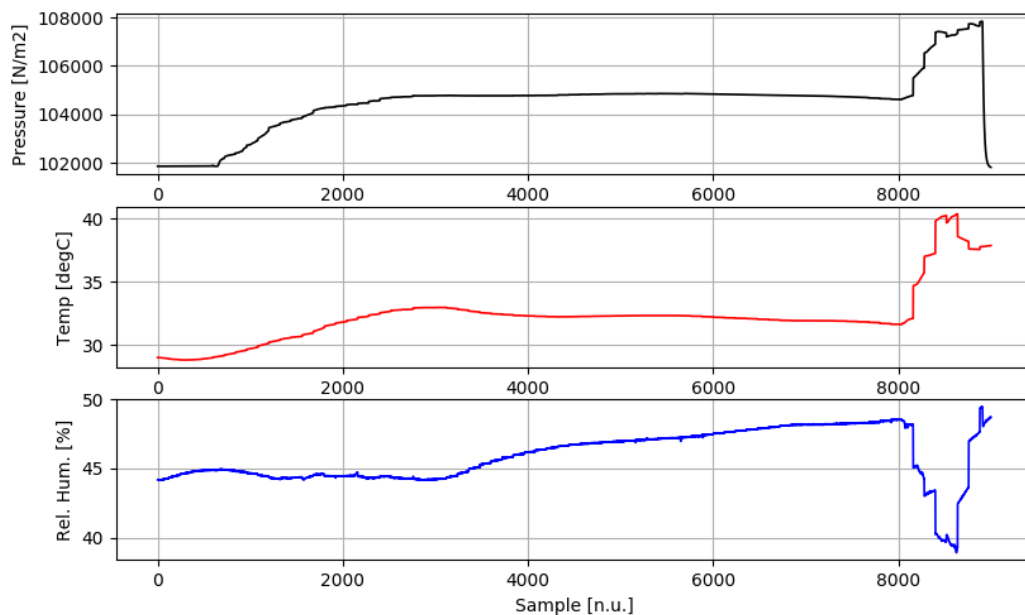


Figura 49: Gráfica de datos obtenidos por sensor BME280 durante la prueba de inmersión en aguas confinadas.

Análisis de los resultados:

Los siguientes son algunos razonamientos acerca de los datos obtenidos durante la prueba, así como de los problemas de funcionamiento detectados.

- El aumento de temperatura es probablemente debido al funcionamiento continuo de la electrónica que no incluía los modos de bajo consumo en esta primera prueba. De hecho, incluso el módulo GNSS que consume alrededor de 300mA permaneció encendido durante la prueba completa con el fin de comprobar que no era posible recibir señal incluso a poca profundidad.

La potencia transformada en calor por dicho módulo es de 1.5W de forma continuada. Únicamente su apagado por detección automática de la inmersión permitirá reducir la temperatura alcanzada en el interior en gran medida.

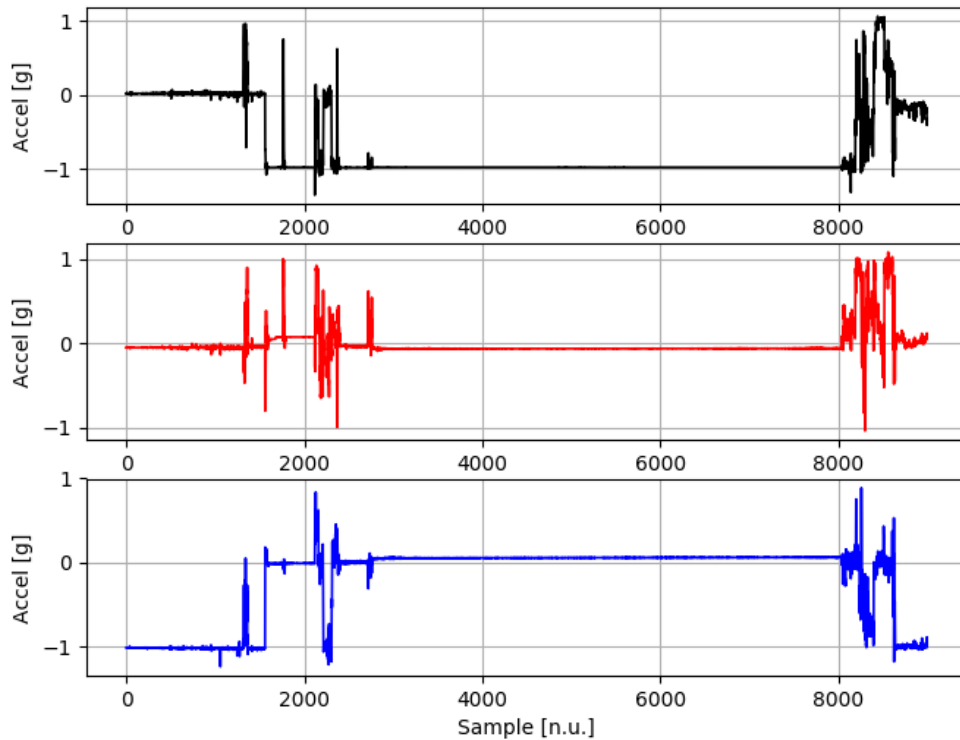


Figura 50: Datos obtenidos de uno de los sensores inerciales durante la prueba de inmersión en aguas confinadas.

- El aumento continuado de la humedad relativa puede ser originado por la condensación del agua en el interior de la carcasa. Otro de los motivos que podría causar este aumento de humedad interna es la absorción de agua del PMMA, que, a pesar de ser un material hidrofóbico, puede absorber hasta un 2% en volumen dependiendo del material exacto [15]. Una última causa posible es que la estanqueidad no sea absoluta y exista alguna filtración de agua; no obstante, tras la inspección posterior a la prueba del dispositivo, no se encontró ningún rastro de acceso de agua en el interior.
- Para reducir o incluso evitar los escalones de datos debidos al tiempo durante el cual se está cerrando y creando un fichero, pueden tomarse una o varias de las siguientes medidas:
 - ❖ Crear un búfer que almacene los datos de forma temporal mientras el fichero de almacenamiento no está disponible.
 - ❖ Aumentar la prioridad del hilo para que se realice el cambio de fichero lo antes posible.
 - ❖ Aumentar el tamaño de los ficheros para reducir el número de escalones.
 - ❖ Buscar métodos para reducir el tiempo necesario para cerrar un archivo y crear otro nuevo.
- Se detectó un fallo en el conexionado de los sensores de luminosidad que debe ser corregido. El circuito únicamente está conectado a tierra y a la entrada del CAD, por lo que los datos que proporcionó son inútiles. Debe corregirse conectándole la alimentación.

- De los tres acelerómetros con los que se realizaron las pruebas: uno ha resultado llegar defectuoso de fábrica (o haber sido destruido por descarga electrostática durante su manipulación) y otro estaba conectado al canal mal crimpado del bus I²C. Por tanto, sólo uno de estos ha producido datos, que son los mostrados en la Figura 50.
- Las imágenes tomadas por la cámara de a bordo deben ser mejoradas mediante el adecuado control de los parámetros de la misma; en concreto, parece que la exposición es demasiado alta para las condiciones en que se realizaron las pruebas. Una solución sería usar los datos obtenidos por las LDR para elegir un buen valor de exposición según la situación. En la Figura 51 se muestra una de estas imágenes, que fueron tomadas en intervalos de 5s durante la prueba. A la derecha se muestra la imagen pasada por un filtro paso-altas y en escala de grises para permitir identificar otra de las carcasas que estaba siendo probada en el momento de la fotografía.
- Se ha demostrado que existe una variación de la presión interna correlacionada con la presión externa y los demás parámetros incluidos en el modelo de observación de la magnitud.
- Se ha demostrado que el diseño presentado de la carcasa fabricada en metacrilato con tornillería, arandelas y juntas de sellado ofrece buenos resultados para su uso, al menos, a poca profundidad y durante un tiempo no menor a una hora. Por tanto, se ha demostrado que puede ser útil para aplicaciones superficiales con su diseño actual. Este prototipo parece poder ser certificado con IP68.

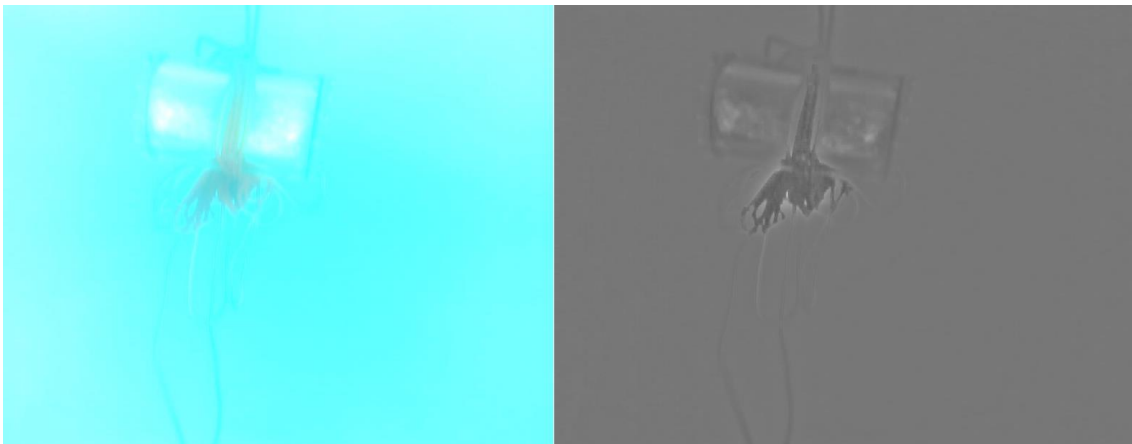


Figura 51: Imagen original tomada por ESP32-Cam durante la prueba de inmersión en aguas confinadas. A la derecha se muestra la misma procesada con un filtro paso-altas.

Gracias a esta primera prueba de funcionamiento ha sido posible descubrir múltiples problemas que deben ser subsanados de forma previa a la siguiente prueba, que será en aguas confinadas nuevamente de forma que pueda comprobarse en las mismas condiciones que los fallos detectados han sido arreglados, y además ha permitido crear un primer set de datos con los que probar algunos de los algoritmos desarrollados.

6.2.3 Inmersión en aguas abiertas

Objetivo: Primera prueba en inmersión en mar abierto. Con esta prueba se pretende comprobar la capacidad del sistema para aguantar las condiciones hiperbáricas propias de una inmersión de poca profundidad. Asimismo, se recogen datos de los sensores del ordenador de inmersión para

usarlos en una primera calibración del sistema. El tiempo total de la prueba estará limitado por el ritmo de consumo de aire propio, por lo que será inferior a 60min.

Procedimiento: En esta prueba se toma únicamente uno de los prototipos y se coloca en el sistema de sujeción especificado en la sección 3.3 para ser portado por un buzo. La prueba de inmersión se realiza en la Isla de Tarifa. El perfil de profundidades esperado consiste en paradas de unos 5min a 2, 4.5, 6, 9, 12 metros.

En cada uno de los puntos indicados se anota la profundidad indicada por el ordenador de inmersión así como temperatura y tiempo. El dispositivo se agita de forma brusca varias veces de forma que puedan correlacionarse fácilmente los datos con las anotaciones.

Igualmente, todo el procedimiento es grabado por una cámara con carcasa sumergible modelo AEE S60. La temperatura, profundidad y tiempo son anotados manualmente en un cuaderno sumergible, sujeto al antebrazo.

Esta prueba no ha sido realizada aún en el momento de redacción de este documento.

7. Proyección Comercial

En el presente capítulo se tratan los aspectos económicos y posibilidades comerciales del producto ideado, más allá del prototipo diseñado y construido. En primer lugar, se realiza un repaso de los costes asociados a la manufactura, prueba y protección comercial del Medidor Modular de Magnitudes Físicas (M³F). A continuación, se comentan cambios necesarios en el diseño del prototipo para su distribución comercial y reducción de costes. Por último, se discuten algunas de las aplicaciones reales para las cuales el uso de este sistema podría resultar beneficioso.

7.1 Costes del proyecto

En el contexto de este proyecto se han fabricado tres prototipos de M³F, principalmente para reducir los retrasos que conllevaría la posible destrucción de un único prototipo durante las pruebas experimentales. No obstante, en la Tabla 3 se realiza el desglose de costes unitario que es más útil en la realización de un análisis económico del producto más allá de la fase de prototipado.

Tabla 3: Costes del prototipo.

| Identificación | Unidades | Precio Total (€) |
|---|----------|------------------|
| Rsoamy Batería 18650 | 1 | 4.00 |
| Módulo adaptador 18650 | 1 | 5.80 |
| Condensadores | 4 | 0.10 |
| LDR GL5539 | 4 | 0.78 |
| Tarjeta microSD 4Gb | 2 | 6.00 |
| ESP-WROOM-32 | 1 | 6.00 |
| Resistencias | 8 | 0.16 |
| MOSFET 2N700 | 3 | 0.36 |
| Conectores JST-PH Macho 8Pin | 8 | 1.60 |
| Conectores JST-PH Hembra 8Pin | 8 | 1.60 |
| Multiplexor TCA9548A | 1 | 2.80 |
| Pantalla OLED 0.96" | 1 | 5.61 |
| Tiras de pines de inserción | 4 | 1.40 |
| Reloj DS3231 | 1 | 3.43 |
| Adaptador microSD | 1 | 0.34 |
| BME280 (Presión, Temperatura, HR) | 1 | 4.54 |
| MPU6050 - DFRobot | 1 | 8.39 |
| MPU6050 - China | 3 | 10.70 |
| Módulo GNSS - TOPGNSS | 1 | 7.48 |
| ADS1115 | 2 | 2.34 |
| ESP32-Cam OV2640 | 1 | 3.77 |
| Cristal de cuarzo 16MHz | 1 | 0.70 |
| Fabricación de las PCB | 3 | 9.40 |
| ATmega328P | 1 | 4.50 |
| Tornillo AISI-316 16x3mm | 26 | 1.58 |
| Arandela AISI-316 3mm | 24 | 0.53 |
| Tuerca AISI-316 3mm | 2 | 0.08 |
| Junta de sellado NBH 83x3.5mm (Oferta) | 2 | 0.36 |
| Carcasa de PMMA con tapas (material y mano de obra) | 1 | 197.76 |
| Total | | 292.11 |

Además del desglose anterior, que no incluye gastos de envío de los productos, existen otros costes asociados cuya asignación no es trivial, como el desgaste producido en las herramientas o el uso de productos fungibles:

- Soldador JBC 30-ST 230V.
- Estaño de alta calidad con plomo.
- Alicates de crimpado con conectores Dupont adquiridos para el proyecto.
- Impresora 3D Anet A8.
- PLA negro de Filament2Print.
- Consumo eléctrico.
- Microscopio digital para inspección visual.
- Osciloscopio.
- Etc.

Por último, deben considerarse igualmente los gastos asociados a la actividad desarrolladora del autor así como los gastos debidos al registro del diseño como Modelo de Utilidad en la Oficina Española de Patentes y Marcas (OEPM) y la agencia contratada para la asistencia en el proceso.

7.2 Diseño comercializable

Con el fin de reducir los costes y facilitar la fabricación serie del M³F dos puntos del diseño en concreto pueden optimizarse: la carcasa y los componentes electrónicos.

El diseño de la carcasa es uno de los puntos críticos para el correcto funcionamiento del dispositivo bajo agua por razones evidentes. De la misma forma, debido a los requerimientos físicos de resistencia a compresión del sistema, que debe soportar como mínimo siete atmósferas (60m de profundidad) y resistir en un medio corrosivo durante un periodo prolongado de tiempo, esta carcasa debe ser construida de manera robusta y con materiales adecuados.

Para el caso del prototipo, el material elegido para la fabricación completa de la carcasa fue el metacrilato (PMMA), pues, para el espesor de pared elegido, no sólo resulta suficientemente robusta para los requerimientos de profundidad y resistencia a ambiente corrosivo especificados, sino que también es completamente transparente, en ausencia de proliferación de algas en su superficie, permitiendo colocar los sensores de luminosidad e imagen en cualquier lugar de su interior, facilitando la etapa de diseño del prototipo.

No obstante, el coste asociado a la fabricación de dicha carcasa en metacrilato es alto. En la Sección 7.1 se especifica el coste de la carcasa en 197.76€. Este coste puede desglosarse de la siguiente forma:

- El cilindro hueco de PMMA, de 100mm de diámetro externo y 80mm de interno, se distribuye en piezas extruidas de 2m de largo como mínimo, con un coste de 248.62€.
- Este cilindro se divide en 14 piezas de 140mm de largo, costando 17.76€ cada uno.
- La mano de obra (en torno) para fabricar los canales de sellado y tornillería en tres de las catorce piezas anteriores resultó de 540€, a 180€ por carcasa.

Por tanto, es evidente que la carcasa supone el mayor coste material del M³F, al menos, en esta fase de prototipado, debido al coste de la mano de obra.

De cara a reducir los costes asociados a la carcasa, así como facilitar su manufactura, y reducir coste de mano de obra, por ende, ésta podría ser fabricada mediante inyección de PVC en molde.

Los moldes de inyección tienen unos costes fijos asociados elevados, no obstante, al repartirse este gasto entre un gran número de unidades, resulta económicamente más asequible que la fabricación cuasi artesanal de cada carcasa. Por otro lado, eliminaría la necesidad de emplear el torno para la fabricación de los canales de sellado donde se colocan las juntas tóricas.

Una complejidad que añade esta fabricación en PVC es la necesidad de crear ventanas para los medidores de luminosidad e imagen. La geometría cilíndrica del prototipo de M3F es esencial para resistir las altas presiones en las profundidades operativas y cualquier cambio en la estructura, como ventanas de metacrilato atornilladas, supone la creación de posibles puntos débiles en la misma. Por tanto, antes de invertir capital en creación del molde de inyección final, será necesario crear una segunda carcasa de prototipo fabricada con los materiales finales e incluyendo las ventanas bajo discusión y someterla a las pruebas de resistencia pertinentes.

7.3 Aplicaciones

El sistema ha sido diseñado modular para aumentar su versatilidad y hacerlo útil, por tanto, en una gran variedad de aplicaciones. Al ser de tamaño reducido, originalmente ideado para ser portado por un buzo sujeto a su arnés, el sistema puede ser empleado en cualquier actividad que requiera la extracción de datos en un entorno que pueda resultar corrosivo para la electrónica de medición, no estando, por tanto, limitado a aplicaciones submarinas.

En el ámbito de investigación científica, el dispositivo puede ser empleado para aplicaciones como las siguientes:

- Empleando múltiples unidades con un equipo de buzos, puede caracterizarse una zona de interés tridimensionalmente para observar la variación de magnitudes, como la luminosidad, a diferentes profundidades en diferentes coordenadas.
- Monitorización durante la recuperación de corales y otras especies en peligro.
- Añadiendo un dispositivo de visualización de datos portátil, el sistema podría ser empleado como unidad de estimación de posición independiente de GNSS, aumentando la seguridad de los buzos durante una inmersión en aguas de visibilidad reducida.
- Caracterización de variables ambientales durante expediciones espeleológicas.
- Inclusión como módulo independiente en robots comerciales para recopilación de datos en entornos dañinos o inaccesibles para las personas.

Por otro lado, podría repercutir positivamente al tejido industrial, principalmente impulsando su digitalización, en aplicaciones como las siguientes:

- Recopilación de datos ambientales para agricultura. El dispositivo puede contar con conectividad Wi-Fi y Bluetooth; por lo que supondrían una solución sencilla para la digitalización del campo si se implementara con estrategias de Big Data.
- Monitorización de obra submarina en puertos y muelles.
- Monitorización de granjas de peces o bateas de mejillones en acuicultura; dado que es de esperar que, a diferencia de los requerimientos de alta precisión en los sensores empleados en oceanografía, en acuicultura sea más conveniente tener múltiples unidades de recogida de datos y de bajo coste para monitorizar la mayor extensión posible de la planta.

El interés científico del dispositivo queda patente pues, en el momento de redacción de esta obra, se han acordado pruebas en aguas abiertas con una ONG que trabaja en la recuperación de corales de aguas frías en las costas orientales de Andalucía.

Igualmente, se ha presentado una solicitud en la Oficina Española de Patentes y Marcas para registrar este diseño en calidad de Modelo de Utilidad y bajo el nombre de “Medidor Modular de Magnitudes Físicas” con el fin de proteger la propiedad intelectual de los desarrollos y dar pie a una futura distribución comercial a través de la expedición de un contrato de explotación.

8. Conclusiones y trabajo futuro

En esta obra se ha diseñado, fabricado y probado un prototipo de Medidor Modular de Magnitudes Físicas (M³F), se han desarrollado múltiples algoritmos para la estimación de los valores de las magnitudes físicas del medio a partir de sensores sin exposición directa al mismo y se han presentado las bases para la realización de navegación inercial en ausencia de señal de posicionamiento satélite.

Debido a la gran envergadura del proyecto propuesto, la cantidad de desarrollos que han podido ser demostrados experimentalmente ha sido limitada. No obstante, se ha conseguido desarrollar un prototipo funcional que puede ser empleado no sólo para poner a prueba los algoritmos desarrollados, sino también para servir como plataforma para desarrollos posteriores o incluso para ser usado en algún proyecto piloto como demostrador tecnológico.

Las pruebas de funcionamiento, aunque limitadas, han permitido detectar igualmente efectos no esperados, como el aumento continuo de la humedad relativa en el interior durante la prueba o la alta temperatura alcanzada en el interior por la actividad de la electrónica; pero también han permitido validar el diseño de carcasa estanca propuesta y generar datos con los que probar algunos de los algoritmos.

A pesar de que el coste material unitario del prototipo haya alcanzado los 292.11€, el 70% se debía al coste de la mano de obra especializada contratada para el mecanizado del metacrilato. Eliminando dicha mano de obra, el coste se reduce a 137€ por prototipo, siendo posible reducirlo mediante las estrategias descritas en apartado 7.2 a un precio aún menor.

También fue posible simular unos modelos teóricos que permitieran establecer el límite operativo del dispositivo, de manera aproximada, alrededor de los 60m de profundidad.

Como última referencia a la ejecución de los objetivos planteados para este proyecto se puede comentar que, a pesar de no haber podido realizar la optimización de consumo energético en la programación del dispositivo, sí ha sido posible implementar un código modular (gracias a la arquitectura compartimentada mediante hilos) y fácilmente reutilizable escrito principalmente en C y C++.

Los siguientes pasos en un futuro inmediato para este proyecto son la corrección de aquellos fallos detectados durante la primera prueba de inmersión, la optimización del consumo energético de los diferentes módulos internos, la generación de sets de datos experimentales con los cuales probar y calibrar los modelos y, finalmente, la experimentación con el prototipo desarrollado con el último fin de determinar un rango real de operación.

Además, gracias al interés mostrado en el dispositivo por parte de una ONG especializada en la recuperación de corales de aguas frías, se han planeado pruebas para dos prototipos adicionales: uno monitorizando granjas de corales a 40m de profundidad y otro empleado para la generación de mapas tridimensionales de varias magnitudes físicas de interés.

Por último, la naturaleza modular del diseño puede aprovecharse aún más. Este prototipo tiene espacio para dos módulos adicionales aún por definir y un zócalo para incorporar una pantalla OLED de 0.96" de interfaz usuario cuya librería aún no ha sido programada.

El potencial del dispositivo parece alto pero hay aún mucho trabajo por realizar.

9. Bibliografía

- [1] Mosca, G., Kyker, G., Gautreau, R. and Tipler, P., 2018. *Study guide to accompany Paul A. Tipler, Physics for scientists and engineers, 4th edition*. New York, N.Y.: W.H. Freeman.
- [2] Directorate-General for Maritime Affairs and Fisheries, 2021. *The Blue Economy Report*. [online] Available at: <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/0b0c5bfd-c737-11eb-a925-01aa75ed71a1>> [Accessed 10 June 2021].
- [3] Bachmann-Vargas, P., van Koppen, C. and Lamers, M., 2021. Re-framing salmon aquaculture in the aftermath of the ISAV crisis in Chile. *Marine Policy*, 124, p.104358.
- [4] Sempere-Valverde, J., Ostalé-Valriberas, E., Maestre, M., González Aranda, R., Bazairi, H. and Espinosa, F., 2021. Impacts of the non-indigenous seaweed *Rugulopteryx okamurae* on a Mediterranean coralligenous community (Strait of Gibraltar): The role of long-term monitoring. *Ecological Indicators*, 121, p.107135.
- [5] GitHub. 2021. *SlashDevin/NeoGPS*. [online] Available at: <<https://github.com/SlashDevin/NeoGPS>> [Accessed 12 May 2021].
- [6] 500ft, G., 2021. *GoPro Housing for GoPro Hero 9 - rated to 500ft*. [online] Golemgear.com. Available at: <<https://www.golemgear.com/p-814-gopro-housing-for-gopro-hero-9-rated-to-500ft.aspx>> [Accessed 4 May 2021].
- [7] Community.gopro.com. 2021. *How Deep Can You Dive With GoPro Cameras?*. [online] Available at: <<https://community.gopro.com/t5/en/How-Deep-Can-You-Dive-With-GoPro-Cameras/ta-p/390206>> [Accessed 4 May 2021].
- [8] ASALE, R., 2021. *algoritmo* | *Diccionario de la lengua española*. [online] «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario. Available at: <<https://dle.rae.es/algoritmo>> [Accessed 5 April 2021].
- [9] Uspensky, J. and Maquieira, J., 1992. *Teoría de ecuaciones*. México: Limusa.
- [10] OpenFOAM. 2021. *OpenFOAM*. [online] Available at: <<https://www.openfoam.com/>>
- [11] Groves, P., n.d. *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems*.
- [12] Eigen.tuxfamily.org. 2021. *Eigen*. [online] Available at: <https://eigen.tuxfamily.org/index.php?title=Main_Page>.
- [13] Willner, D. & Chang, Chaw-Bing & Dunn, Keh-Ping. (1977). Kalman filter algorithms for a multi-sensor system. 570 - 574. 10.1109/CDC.1976.267794.
- [14] Barry, R., 2011. *The FreeRTOS reference manual*. [S.l.]: Real Time Engineers.
- [15] Unemori, M., 2003. Water absorption of poly(methyl methacrylate) containing 4-methacryloxyethyl trimellitic anhydride. *Biomaterials*, 24(8), pp.1381-1387.
- [16] Ecoffet, Adrien et al. "First return then explore." *Nature* 590 7847 (2021): 580-586 .
- [17] Gao, Xile, Luo, Haiyong, Ning, Bokun, Zhao, Fang, Bao, Linfeng, Gong, Yilin, Xiao, Yimin, and Jiang, Jinguang. "RL-AKF: An Adaptive Kalman Filter Navigation Algorithm Based on Reinforcement Learning for Ground Vehicles." *Remote Sensing (Basel, Switzerland)* 12.11 (2020): 1704.

[18] Dai, Hai-fa, Bian, Hong-wei, Wang, Rong-ying, and Ma, Heng. "An INS/GNSS Integrated Navigation in GNSS Denied Environment Using Recurrent Neural Network." *Defence Technology* 16.2 (2020): 334-40

10. Anexos

10.1 Anexo A: Instalación y programación de ESP32

Primero, instale los requisitos previos con la siguiente secuencia:

```
sudo apt-get install git wget flex bison gperf python python-pip python-setuptools cmake  
ninja-build ccache libffi-dev libssl-dev dfu-util
```

Después, cree un directorio esp / dentro de home / {su usuario aquí} con un comando:

```
git clone --recursive https://github.com/espressif/esp-idf.git
```

Instale todo con el script install.sh y, también, los requisitos de python con pip install -r requirements.txt. Debe agregar el directorio tools / (dentro del directorio clonado) a la ruta de forma similar a:

```
RUTA = "$ RUTA: $ INICIO / jsandu / esp / esp-idf"
```

En la anterior ruta, sustituya "jsandu", sin los corchetes, por su nombre de usuario.

Para la configuración de IDE (<https://github.com/espressif/esp-idf>), vaya al directorio tools / dentro del esp-idf (lo que clonó) y ejecute:

```
export IDF_PATH = ~ / esp / esp-idf  
  
export PATH = "$ IDF_PATH / tools: $ PATH"  
  
source export.sh  
  
export PYTHONPATH = "$ IDF_PATH / tools: $ IDF_PATH / tools / ci / python_packages: $  
PYTHONPATH" (esto no siempre es necesario)
```

Luego, vaya a un directorio de ejemplo (dentro de examples /) y ejecute:

```
idf.py menuconfig  
  
idf.py compilación
```

Si tiene problemas para ejecutar los comandos anteriores debido a la versión de pygdbmi, intente esto:

```
pip desinstalar pygdbmi  
pip install pygdbmi == 0.9.0.2
```

Y, para flashear el ESP32 (reemplazando ttyUSB0 por la extensión en la que está conectado, lo que se puede verificar con `ls / dev / tty *`):

```
idf.py -p / dev / ttyUSB0 flash
```

Utilice este monitor para ver la comunicación en serie:

```
monitor flash idf.py
```

O bien, sin la comunicación serie:

```
flash idf.py
```

Con esto ya tendría el microcontrolador ESP32 ejecutando su código de ejemplo.