



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)

INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

# CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA

Autor: Ángel Salgado Iturrino  
Directores: Juan Luis Zamora Macho  
Luis Mochón Castro

Madrid  
julio 2016

Ángel  
Salgado  
Iturrino

**CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA**







## **AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESIS O MEMORIAS DE BACHILLERATO**

### ***1º. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.***

El autor D. Ángel Salgado Iturrino

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: Construcción, modelado y control de un sumergible a escala, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

### ***2º. Objeto y fines de la cesión.***

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

### ***3º. Condiciones de la cesión y acceso***

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducirla en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

### ***4º. Derechos del autor.***

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

### ***5º. Deberes del autor.***

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e intereses a causa de la cesión.

- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

**6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.**

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 18 de Julio de 2016

**ACEPTA**

Fdo. A. Salgado

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:

--

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
**CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A  
ESCALA**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2015/2016 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es  
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.:



Fecha: 18 / 07 / 2016

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:



Fecha: 18 / 07 / 2016

Fdo.:



Fecha: 18 / 07 / 2016

Vº Bº del Coordinador de Proyectos

Fdo.:

Fecha: / /





# CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

---

## TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

*Autor:*

Ángel Salgado Iturrino

*Directores:*

Juan Luis Zamora Macho

Luis Mochón Castro

Julio de 2016



## ***Agradecimientos***

*A Juan Luis por su incalculable ayuda y dedicación.*

*A Luis por contagiarme su entusiasmo.*

*A Mariano, David y Benito por su ayuda desinteresada y sus consejos.*

*A mi familia por su continuo apoyo.*

*A Ana por su cariño y no dejar que me rindiese.*



# CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA

**Autor: Salgado Iturrino, Ángel.**

Directores: Zamora Macho, Juan Luis.

Mochón Castro, Luis

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

### 1. INTRODUCCIÓN

#### 1.1. Objetivos

En este proyecto se va a diseñar y construir un sumergible con la finalidad de añadirle la electrónica suficiente para que pueda dirigirse por control remoto y, además, implementarle los controles automáticos necesarios para lograr su estabilidad en la navegación, tanto en superficie como bajo el agua.

Los objetivos del proyecto se detallan a continuación:

- Realizar en un software de diseño 3D un prototipo de un sumergible a escala. Este diseño se lleva a cabo en el software de siemens SolidEdge.
- Imprimir el modelo en una impresora 3D. Habilitar el prototipo impreso y la electrónica para que sea navegable y estanco.
- Control remoto: En los ejes con estabilidad natural añadir lo necesario para que el sumergible sea radio controlable. Realizar las modificaciones oportunas para que el control sea suave, sencillo y eficaz.
- Control automático: En los ejes en los que el movimiento sea inestables será necesario sacar el modelo de la planta y utilizar un simulador sobre el que probar las distintas estrategias de control. Diseñar e implementar un control para lograr una navegación estable en todos los grados de libertad que lo requieran.

Para proceder con los dos últimos objetivo planteados es necesario adaptar la electrónica al microcontrolador Ardupilot y programarla en el entorno de programación de Matlab y Simulink.

#### 1.2. Estado del arte y motivación

Desde hace 30 años se comenzaron a desarrollar vehículos submarinos no tripulados destinados a

tareas de investigación marina. Por un lado están los ROV (Remotely-operated Underwater Vehicles), que son manejados a distancia por un operador humano, y por otro, los AUV (Autonomus Underwater Vehicles) que operan de forma automática. Aunque estos vehículos poseen completos sistemas de control, presentan desventajas como su elevado coste, su gran tamaño y su nula comercialización. Es, por tanto, difícil adquirir un sumergible a escala que se comporte como uno real. Lo más cercano a lo deseado son los submarinos radio control. Estos modelos, en su mayoría, son hechos a mano o comprados en tiendas específicas de modelismo. Normalmente no vienen provistos de sistemas de corrección o control automático, más bien se limitan a una conexión directa entre la emisora y los actuadores. Debido a esto, la calidad de la navegación se basa en la habilidad de corrección de rumbo que tiene el “piloto” que, sumado a los problemas de visibilidad del dispositivo debajo del agua, conduce a unos inevitables y pobres resultados en cuanto a estabilidad y precisión del movimiento del sumergible, sin otra utilidad más allá del entretenimiento [1]. De esta razón nace la primera motivación del proyecto, que es explorar un terreno poco utilizado en el control automático mediante la construcción de un diseño propio de sumergible mediante una impresora 3D. La idea de este proyecto es dotar a la universidad Pontificia de Comillas el ser pioneros en este medio.

Por otra parte, otra motivación fundamental es la espeleología marina. Un sumergible de estas dimensiones, es capaz de acceder a sitios a los que otros vehículos acuáticos no podrían llegar. La idea del proyecto es dejar el espacio necesario para añadir una cámara en un futuro y así poder grabar y tomar fotos del fondo marino y sus especies.

Tal como se indica en el título: “Construcción, modelado y control”, este es un proyecto multidisciplinar cuyas distintas fases permiten abarcar una gran cantidad de áreas de la ingeniería y

así aplicar los conocimientos de diversas materias como la fabricación, la mecánica de fluidos y por supuesto, el control automático. Por tanto, otra motivación del proyecto es demostrar la utilidad y la interconexión de las diversas asignaturas estudiadas en el grado de ingeniería electromecánica de la universidad Pontificia de Comillas que, aunque en un principio se estudien separadas, en los proyectos reales tienen que emplearse de forma conjunta.

### **Funcionamiento de los sumergibles radio control**

Lo más significativo para estudiar cómo funcionan las distintas clases de submarinos radio control es acudir a su sistema de inmersión, también conocido como sistema de lastre. Existen dos tipos fundamentales:

- Sistema de lastre dinámico: estos modelos poseen una flotabilidad positiva. Para conseguir la fuerza necesaria para la inmersión, se usa la fuerza impulsora de la turbina que provoca una velocidad. Si se dimensionan los planos de inmersión correctamente (timones), estos crean el empuje hacia abajo necesario.
- Sistema de lastre estático: se trata de variar el peso del modelo para lograr la inmersión. Con un incremento del peso se logra la inmersión y, a la inversa, se logra la maniobra de emerger. Es naturalmente lo que más se aproxima a una maniobra real, por tanto será el que se abordará en este proyecto.

### **Estabilidad**

Es necesario que el submarino sea capaz de estar estabilizado en todos los grados de libertad. Si no, será imposible alcanzar una navegación precisa.

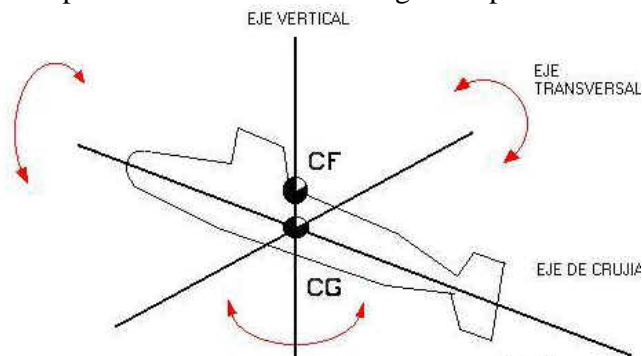


Figura 1.1. Grados de libertad del sumergible en el espacio. CG representa el centro de gravedad y CF el centro de flotabilidad.

Si se analiza la estabilidad en cada uno de los grados de libertad que se muestran en la Figura 1.1, se puede comprobar que en el eje vertical y en el eje de crujía (longitudinal), habrá una estabilidad natural siempre que la construcción del sumergible sea correcta. Para lograrlo se alinean el centro de flotabilidad y el centro de gravedad del sumergible, tratando de situar este último lo más abajo posible, distribuyendo los pesos en la parte inferior.

El problema se presenta en el eje transversal, pues debido a la resistencia hidrodinámica de la vela o quiosco (la parte frontal del submarino), el área lateral queda por encima de la línea de empuje, originándose un par de desequilibrio que tiende a subir la proa del modelo. Este efecto indeseado se corrige mediante continuas correcciones de la posición de los timones horizontales. Para ello será necesario un control automático [2].

## **2. METODOLOGÍA**

### **2.1. Diseño**

Antes de proyectar el sumergible en el software de diseño 3D, es necesario tener en cuenta diversos aspectos que garanticen obtener un dispositivo verdaderamente utilizable y no una simple maqueta: la posibilidad de imprimirlo en 3D, que sea robusto, la posibilidad de hacerlo estanco, que quepan todos los componentes, que tenga la forma de un submarino real que le proporcione estabilidad y lo más importante, realizar los cálculos previos necesarios que garanticen una flotabilidad positiva del submarino.

Para realizar esta tarea es necesario imprimir diferentes prototipos que, sometidos a distintas pruebas, den una idea de importantes aspectos: un prototipo con el que probar la dimensión de las ranuras habilitadas para las juntas tóricas que logran la estanqueidad de las uniones de las distintas piezas; otro prototipo con el que establecer el espesor necesario del sumergible; y por último, otro prototipo para impermeabilizar el plástico de la impresora 3D, ABS, mediante el uso de acetona, consiguiendo así, eliminar su porosidad y obtener una superficie lisa e impermeable.

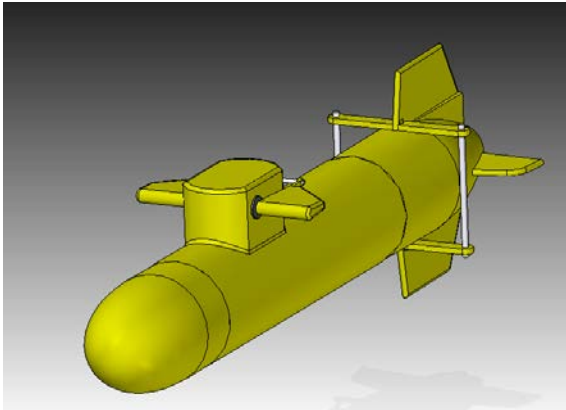


Figura 1.2. Ensamblaje del diseño completo del sumergible.

En la Figura 1.2 se muestra el diseño definitivo del sumergible teniendo en cuenta todas las observaciones anteriores. Gracias a diseñar también toda la electrónica interior del sumergible se obtuvieron, con el software de diseño 3D, importantes datos necesarios para situar los componentes del interior del sumergible correctamente y así lograr la estabilidad de este: los momentos de inercia, la posición del centro de masas y del centro de flotabilidad y su peso.

## 2.1. Construcción

Una vez diseñado el sumergible se procede a su construcción. Este proceso comienza con la impresión del casco, tras ello se elimina el material de soporte mediante una disolución de sosa cáustica y se introducen las piezas en una cuba de ultrasonidos que produce micro vibraciones para hacer penetrar la disolución por todos los recovecos. Posteriormente se impermeabilizan las piezas con acetona. A continuación, se instalan todos los componentes electrónicos. Para ello es necesario impermeabilizar algunos de ellos como los servos, en los que hay que introducir grasa.

### *Conexión de los componentes electrónicos*

La totalidad de los componentes electrónicos del sumergible se pueden apreciar en la Figura 1.3: batería LiPo (1), módulo de alimentación (2), regulador de tensión UBEC (3), puente en H (4), bomba de agua (5), depósito de agua (6), receptor de la emisora (7), controlador de velocidad o ESC (8), motor Brushless (9), servos (10 y 11) y tarjeta de control similar a Ardupilot (12).

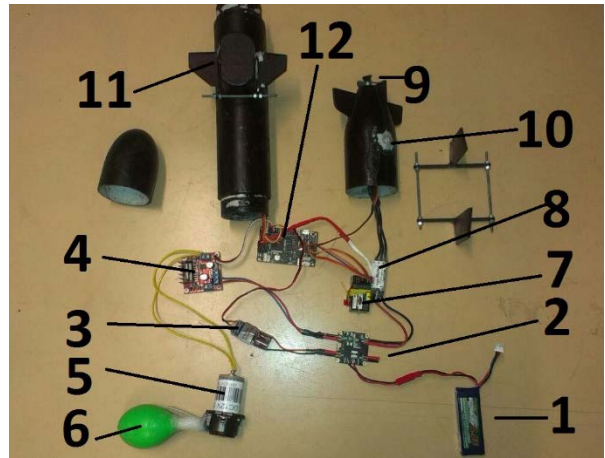


Figura 1.3. Componentes electrónicos interiores del submarino.

## 2.1. Control remoto

Para poder controlar el sumergible desde una emisora consiguiendo que siga la trayectoria y se posicione en la profundidad que quiera el piloto, no es suficiente limitar el control remoto a conectar los actuadores al receptor de una emisora. En primer lugar porque varios actuadores no se comportan de forma lineal. Por ejemplo, los servos de los timones horizontales no se tienen que mover de forma simétrica, pues si bajan demasiado chocarían con el casco del sumergible y se romperían. Es por eso que es necesario implementar varias máquinas de estado que interpreten las señales de la emisora para poner en el receptor la señal adecuada. Por ello es necesario un microcontrolador en el que se implementan distintas máquinas de estado con esta finalidad. Se programan en el entorno de desarrollo Matlab / Simulink [3].

Además, la bomba es peristáltica. Consiste en una serie de rodillos, accionados con un motor de continua de 12V, que van apretando un tubo por el que pasa el agua, logrando que esta se desplace. Por tanto, para controlar el uso de esta bomba será necesario emplear un puente en H en su motor de continua. De esta forma se consigue regular la velocidad de la bomba y, ante todo, su sentido de giro (meter o expulsar agua en el depósito). Este puente en H tiene 3 pines: un enable y 2 entradas de control PWM. Por lo tanto, para controlarlo de la forma deseada mediante la emisora, será necesario implementar también una máquina de estados en el microcontrolador, tal como muestra la Figura 1.4.

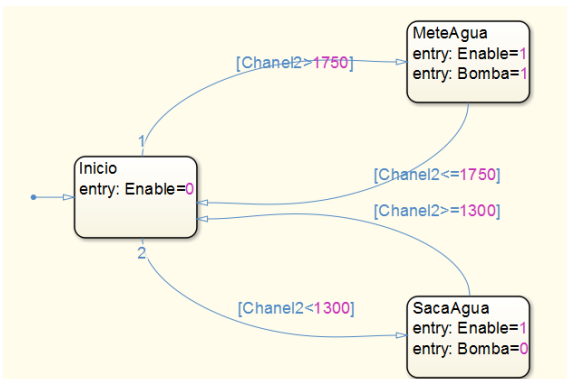


Figura 1.4. Máquina de estados del control de la bomba peristáltica

## 2.1. Control automático

### Modelado

Antes de proceder con el control es necesario obtener el modelo matemático de la planta que relaciona el comportamiento del cabeceo del sumergible con la posición de sus timones horizontales o timones de proa [4].

Existen diversos métodos para modelar la planta de un sistema, pero dado que lo que se quiere es simplemente obtener la planta entre el ángulo de cabeceo y los pulsos (voltaje) que recibe el servo que mueve los timones, no merece la pena estudiar todas las ecuaciones mecánicas que rigen el comportamiento del sumergible, sería un trabajo en balde. Por tanto, se usará otra alternativa: un ensayo con una señal PRBS. Esta señal periódica mueve los timones horizontales de forma aleatoria y, midiendo con los giróscopos los ángulos de cabeceo que se van produciendo durante esta señal, se modela la planta. En la Figura 1.5 se muestra el ensayo realizado: el ángulo del cabeceo del sumergible (gráfico superior) ante una señal PRBS en los mandos de los timones horizontales (gráfico inferior).

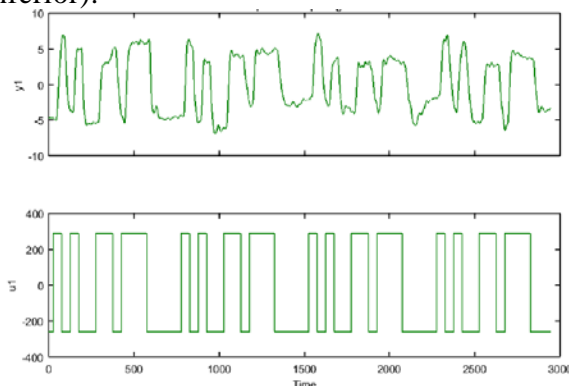


Figura 1.5. Respuesta del giro del sumergible (gráfica superior) ante una señal PRBS en el mando de los timones (gráfica inferior)

## Control

Tras la obtención de la planta, se probaron distintos métodos de control en simulación, siendo el más satisfactorio el PID, seguido del PI.

Este control Proporcional – Integral – Derivativo consigue, gracias a la acción proporcional, que la acción de control sea proporcional al error. Por otro lado, la acción integral asegura que la salida concuerde con la referencia, logrando que el error sea nulo, el inconveniente principal es que tarda bastante tiempo en alcanzar el régimen permanente. En última instancia, la acción diferencial o derivativa al derivar el error tiene en cuenta su tendencia [5].

## 3. RESULTADOS

Tras realizar todos estos pasos, se obtuvieron notables resultados en cuanto al manejo radio control del sumergible y su estabilidad natural.

En cuanto al modelado de la planta, gracias al ensayo PRBS, se obtuvo una función de transferencia que se estima que tiene un 67% de precisión. Esta fiabilidad es óptima si se tienen en cuenta las dificultades con las que se realizó el ensayo. La función de transferencia obtenida se muestra en la Ecuación 3.1.

$$\frac{-0.0006456 \cdot s + 6.231 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.08092 \cdot s + 0.004559}$$

(Ecuación 3.1)

No obstante, se tuvieron problemas en cuanto a la penetración de agua en el sumergible, lo que provocaba cuantiosos retrasos en la reinstalación de los componentes dañados. Es por eso por lo que, por cuestiones de tiempo, no se pudieron hacer todas las pruebas necesarias para comprobar el control automático.

Para solventar esta cuestión, se simuló el comportamiento del cabeceo del sumergible en el entorno de programación Matlab. Gracias al ajuste apropiado de los distintos parámetros se



consiguió obtener una respuesta en simulación que anula el error en régimen permanente de forma precisa pero que a la vez se trata de una respuesta rápida, aunque sea sacrificando sobrepaso. En la Figura 1.6 se puede ver la respuesta en simulación a un escalón de amplitud uno al aplicar el control PID.

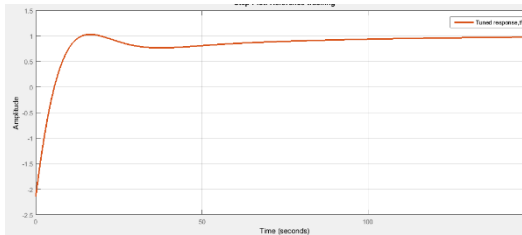


Figura 1.6. Control PID: Respuesta a un escalón de amplitud 1

#### 4. CONCLUSIONES

Este proyecto permite llegar a importantes conclusiones que, sin duda, serán de utilidad para realizar mejoras en un futuro.

Las impresoras 3D tienen un gran potencial y son perfectamente aplicables en temas acuáticos. Eso sí, debido a los problemas de penetración de agua, en gran medida ocasionadas por la bomba, es preferible usar un método de inmersión dinámico en el sumergible basado en el posicionamiento de planos de profundidad, en vez de usar un método de inmersión estática.

El control remoto es suficiente para controlar de forma eficiente 5 de los 6 grados de libertad del sumergible. El inconveniente lo presenta la bomba de agua, que al estar destinada a la dosificación presenta una velocidad de respuesta reducida para regular la profundidad.

Para insertar el control automático en el eje longitudinal, antes la señal PRBS ofrece un resultado del 65% de acierto en cuanto al modelado de la planta del cabeceo lo que. La aplicación de un control PID, al menos en simulación, proporciona un resultado óptimo en cuanto a velocidad de respuesta y corrección del error.

Finalmente, la realización de este proyecto ha permitido demostrar lo necesarias que son las distintas asignaturas que se estudian en este grado de ingeniería electromecánica de la Universidad Pontificia de Comillas pues, los proyectos reales son

multidisciplinares y sólo se pueden llevar a cabo con la interconexión de los distintos campos de la ingeniería.

#### 5. REFERENCIAS

[1] Healey, Anthony J, "Dynamics of Marine Vehicles", course notes, Naval Postgraduate School, Monterey California, Fall 1992.

[2] Abkowitz, Martin A. "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles" MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1969.

[3] Jesús Fernández Ibarz, "Modelo de simulación y control dinámico para un catamarán submarino con seis grados de libertad".

[4] Antonio Galo Ruiz Ortega, "Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV".

[5] Héctor Alonso Moreno Ávalos, "Modelado, control y diseño de robots submarinos de estructura paralela con impulsores vecotizados".

# CONSTRUCTION, MODELING AND CONTROL OF A SUBMERSIBLE

**Author: Salgado Iturrino, Ángel.**

Directors: Zamora Macho, Juan Luis.

Mochón Castro, Luis

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## ABSTRACT OF THE PROJECT

### 1. INTRODUCTION

#### 1.1. Objectives

In this project it will be designed and built a submersible with the purpose of adding it electronic in order to be directed by remote control. In addition, it will be implemented an automatic control to reach stability in the navigation, in surface and under water.

The objectives of the project are detailed below:

- To make in a design software a three dimensions' prototype of a scale submersible. This design is carried out in the software of Siemens SolidEdge.
- To print the prototype in a 3D printer and adapt all the electronic in order to be navigable and waterproof.
- Remote control: In the axes with natural stability will be added what is necessary for making the submersible radio controlled. Also, appropriate modifications will be done to make this control soft, simple and effective.
- Automatic control: In the axes where the movement is unstable, it will be necessary to obtain the model of the plant and use a simulator to try different control strategies. To design and implement a control to achieve a stable navigation in all the degrees of freedom.

To proceed with the last two objectives, it is necessary to adapt the electronic to the microcontroller Ardupilot and to programme it in Matlab and Simulink development environment.

#### 1.2. State of the art and incentive

Thirty years ago unmanned underwater vehicles were started to be develop for marine investigation tasks. On one hand there are ROVs (Remotely-operated Underwater Vehicles), which are remote piloted by a human operator and, on the other hand, AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) which

work in an automatic way. Even though these vehicles have complex control systems, they present disadvantages such as high cost, great size and null marketing. Consequently, it is difficult to acquire a scale submersible which works as a real one. The most similar are radio control submarines. Many of this models are hand-made or bought in specific naval modelling shops. Usually, they are not provided with correction systems or automatic control, they are limited to a direct connection between the broadcasting station and the actuators. Due to this, the navigation quality is based on the correction ability of the "pilot" which, added to the visibility problems of the gadget under the water, leads to poor results related with stability and movement accuracy of the submersible, with no utility, just entertainment [1]. Due to this reason appears the first incentive of the project, which is to explore an unusual field for automatic control through the construction of an own design of a submersible with a 3D printer. The idea of this project is to provide to the Universidad Pontificia de Comillas experience in this field.

Moreover, another key motivation is the marine speleology. A submersible of these dimensions is able to access to places that other water vehicles can not reach. The project idea is to prepare the prototype to add a camera in the future so marine depths could be recorded.

As it indicated in the heading: "Construction, modeling and control", this is a multidisciplinary project whose different phases allow to cover a lot of areas of engineering and to apply knowledge of different fields such as manufacturing, fluid mechanics and of course, automatic control. Therefore, another incentive of the project is to demonstrate the usefulness and interconnection of the subjects studied in the electromechanical engineering degree from the Pontifical University of Comillas, despite initially are studied separately, in real projects must be applied jointly.

## Submersibles radio control operation

The most significant aspect to study how the different radio control submarines work is attending to their immersion system, also known as ballast system. There are two main types:

- Dynamic ballast system: these models have a positive floatability. To obtain the necessary strength for the immersion, the driving force of the turbine is used, though it causes a speed. If the immersion plans are properly dimensioned (rudders), they generate the necessary push downwards.
- Static ballast system: it consists in varying the model's weight to achieve immersion, normally increasing the weight (what is normally obtained with a weight increase). Conversely, emerge manoeuvre is obtained. Naturally it is what approaches more to a real manoeuvre, so it is going to be the one to deal with in this project.

## Stability

It is necessary that the submarine is able to be stabilized in all the degrees of freedom. If not, it would be impossible to reach an accurate navigation.

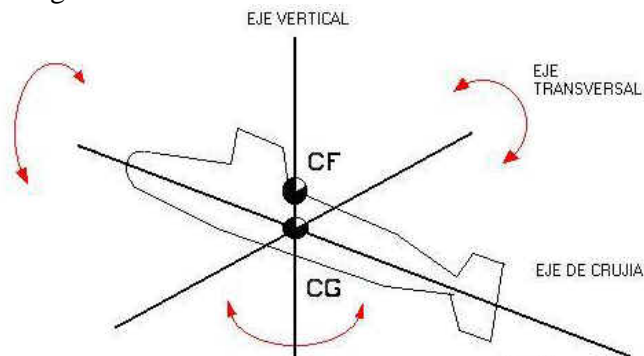


Figure 1. Submersible degrees of freedom in the space. CG represents the centre of gravity and CF the centre of floatability.

If stability in each of the degrees of freedom shown in Figure 1 is analysed, it can be verified that on the vertical and longitudinal axis, there would always be a natural stability, providing a correct construction of the submersible. To achieve it, the centre of floatability and the centre of gravity of the submersible are lined-up, trying to place this last one as low as possible, distributing the weights in the bottom part.

The problem arrives in the transversal axis, as due to the hydrodynamic resistance of the candle or kiosk (the front part of the submarine), the lateral area remains above the thrust line, causing an imbalance torque that tends to arise the bow of the model. This undesirable effect is corrected by continuous corrections of the position of the horizontal rudders. For that purpose an automatic control will be required. [2]

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Design

Before design the submersible in the 3D software, it is necessary to consider several aspects which guarantee obtaining an usable device and not a simple hobby model: the possibility of print it in 3D, to be robust, the possibility of making it waterproof, to have the shape of a real submarine which provides it stability and, most important, carry out the previous and necessary calculations to guarantee a positive floatability of the submersible.

To perform this task it is necessary to print different prototypes that, checked with several tests, give an idea of important aspects: first a prototype where test the dimension of the slots enabled for the O-rings; another prototype to establish the required thickness of the submersible; and finally, another prototype to waterproof the plastic of the 3D printer, ABS, using acetone, eliminating porosity and obtaining a smooth and impermeable surface.

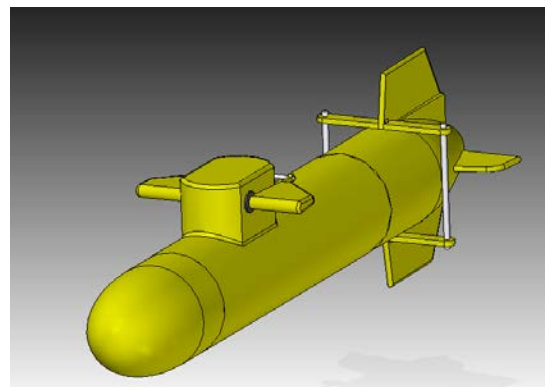


Figure 2. Assembling of the whole design of the submersible

In Figure 2 it is shown the final design of the submersible, taking into account all the previous observations. Also, thanks to design all the electronic components which are situated inside the

submersible, the 3D software gives important and necessary information to place properly all the components of the submersible to achieve the stability: moments of inertia, the position of the center of mass and the center of floatability and the weight.

### 2.1. Construction

Once the submersible is designed, the following step is its construction. This process starts with the impression of the hull. Then the support material is removed with a caustic soda solution and the pieces are introduced in an ultrasonic tank that produces micro vibrations which make the solution penetrate through every nook. Then the pieces are waterproofed with acetone. To continue, all the electronic components are installed. To do this it is necessary to waterproof some of them such as the servos, in which grease must be introduced.

#### Connection of the electronic components

All the electronic components of the submersible can be appreciated in Figure 3: LiPo battery (1), power module (2), voltage regulator UBEC (3), H-bridge (4), pump water (5) water tank (6), receiver station (7), speed controller or ESC (8), brushless motor (9), servos (10 and 11) and microcontroller ArduPilot (12).

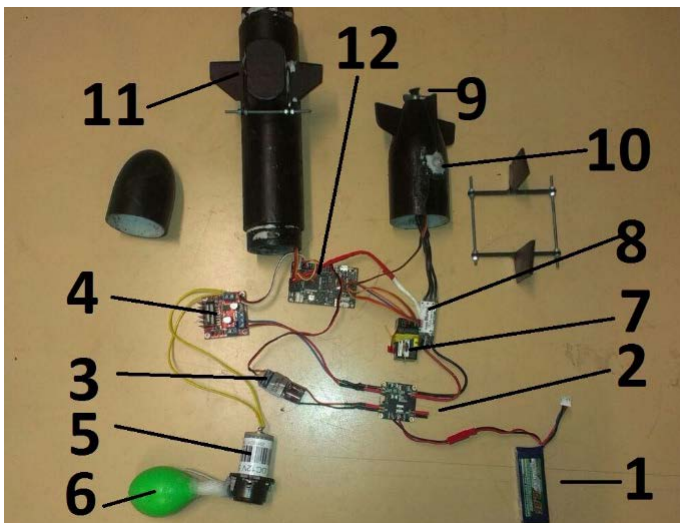


Figure 3. Electronic components inside the submarine.

### 2.1. Remote control

To be able to control the submersible from a radio station and make it follow the position and the depth

that the pilot wants, it is not enough to limit the remote control to connecting the actuators to the receivers of the station. First of all because several actuators do not have a linear behaviour. For example, the servos of the horizontal rudders do not have to move symmetrically, as if they descend too much they would crash with the submersible hull and brake. That is why it will be necessary to implement several state machines that interpret the station signals in order to put in the receivers the proper signal. It is therefore necessary a microcontroller in which different state machines are implemented for this purpose. They are programmed in the Matlab / Simulink development environment [3].

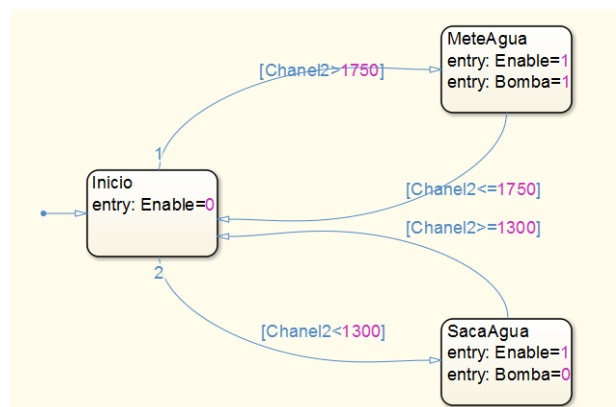


Figure 4. State machine of the control of the peristaltic pump.

Furthermore, the pump is peristaltic. It consists of three rollers, driven by a 12V DC motor, which are squeezing a tube making the water move. Therefore, to control the use of this pump will be necessary to use an H-bridge connected to the DC motor. With this option it is achieved to regulate the speed of the pump and its direction of rotation (put water in the tank or expel it). This H-bridge has 3 pins: one enable and 2 PWM inputs of control. Therefore, to control as desired by the transmitter, it is also necessary to implement a state machine in the microcontroller, as shown in Figure 4.

### 2.1. Automatic control

#### Modeling

Before proceeding with the control it is necessary to obtain the mathematical model of the plant which relates the behaviour of the submersible pitch with the position of its horizontal rudders [4].

There are several methods to model the plant of a system but though what is wanted is just to obtain the plant between the pitch angle and the pulses (voltage) that the servo which move the rudders receive, it is not worth considering all the mechanical equations which govern the submersible's behaviour. It would be a wasted work. Therefore, another alternative will be used: a test with a PRBS signal. This periodical signal move the horizontal rudders in a random way and, measuring with the gyroscopes the pitch angles that are being produced during this signal, the plant can be modelled. Figure 5 shows the test carried out: the pitch angle of the submersible (upper graphic) due to a PRBS signal in the horizontal rudders commands (lower graph).

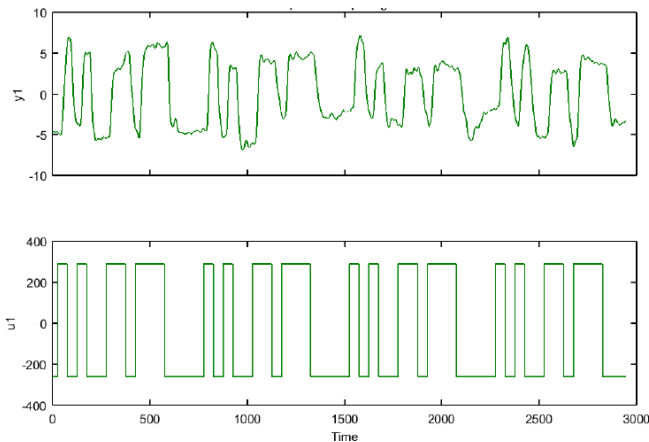


Figure 5. Response of the rotation angle of the submersible (upper graph) due to a PRBS signal in the horizontal rudders (lower graph).

### Control

After obtaining the plant, different control methods in simulation were tried, being the PID the most satisfactory one, followed by the PI.

This Proportional- Integral - Derivative control thanks to the proportional action, obtains that the control action is proportional to the error. Also, the integral action ensures that the output matches with the reference, achieving a null error. Its principal inconvenient is that it takes a long time to reach the permanent regime. Ultimately, the differential or derivative action when deriving the error it is able to consider its tendency [5].

### 3. TESTS

After performing all these steps, notable results were obtained in the radio control handling of the submersible and in its natural stability.

With regard to the modeling of the plant, thanks to the PRBS test, it was obtained a transfer function that is estimated to have 67% accuracy. This percentage is optimal taking into account the difficulties that the test has when it was performed. The transfer function obtained is shown in Equation 3.1.

$$\frac{-0.0006456 \cdot s + 6.231 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.08092 \cdot s + 0.004559}$$

(Equation 3.1)

Nevertheless, there were problems due to the water penetration in the submersible which caused substantial delays in the reinstallation of the damaged components. For this reason, because of time, all the necessary tests to check the automatic control could not be done.

To solve this issue, the behaviour of pitch of the submersible was simulated in Matlab and Simulink programming environment. Thanks to the proper adjustment of several parameters, it was possible to obtain a simulated response which annuls the error in steady state and, at the same time, it has a fast response, despite of the growing of the damping factor. In Figure 6 we can see the simulated response of a step applying a PID control.

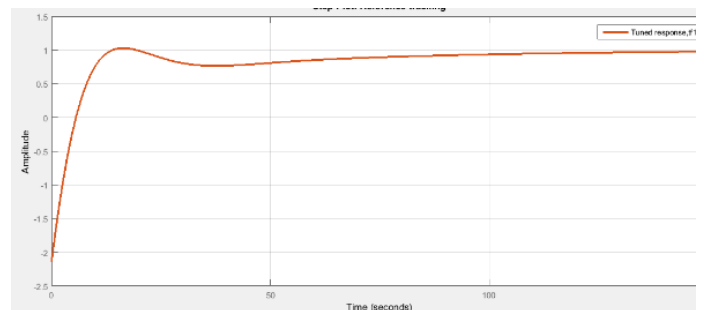


Figure 6. PID Control: Response to a step of amplitude 1

#### 4. CONCLUSIONS

This project allows to reach important findings that will undoubtedly be useful to make improvements in the near future.

The 3D printers have a great potential and they are perfectly applicable in aquatic topics. But due to water penetration problems, mostly caused by the pump, it is better to use a dynamic immersion method in the submersible based on the correct positioning of the rudders, instead of using a static immersion method.

The remote control is enough to control efficiently five of the six degrees of freedom of the submersible. The water pump presents another problem because it is thought to be used in dosing tasks so it has a reduced speed for regulating depth.

To implement the automatic control in the longitudinal axis, first the PRBS signal offers a result of 65% accuracy in terms of modeling the pitch plant. Then, the application of PID control, at least in simulation, provides an optimum result in terms of speed response and error annulment.

To conclude, the realization of this project has demonstrated how necessary are the different subjects studied in this electromechanical engineering degree from the Universidad Pontificia de Comillas because, actual projects are multidisciplinary and can only be carried out with the interconnection of various fields of industrial engineering .

#### 5. REFERENCES

[1] Healey, Anthony J, "Dynamics of Marine Vehicles", course notes, Naval Postgraduate School, Monterey California, Fall 1992.

[2] Abkowitz, Martin A. "Stability and Motion Control of Ocean Vehicles" MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1969.

[3] Jesús Fernández Ibarz, "Modelo de simulación y control dinámico para un catamarán submarino con seis grados de libertad".

[4] Antonio Galo Ruiz Ortega, "Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV".

[5] Héctor Alonso Moreno Ávalos, "Modelado, control y diseño de robots submarinos de estructura paralela con impulsores vectorizados".

# CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE  
INGENIERÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

## MEMORIA

---

*Autor:*

Ángel Salgado Iturrino

*Directores:*

Juan Luis Zamora Macho

Luis Mochón Castro

Julio de 2016





# Índice de contenidos

Capítulo 1 Introducción.....	5
1.1 Sobre los sumergibles a escala .....	6
1.2 Motivación del proyecto .....	6
1.3 Objetivos del proyecto.....	7
1.4 Metodología y recursos .....	8
Capítulo 2 Estado de la cuestión.....	11
2.1 Introducción histórica .....	11
2.2 Funcionamiento de los submarinos RC.....	13
2.2.1 Sistema de lastre dinámico .....	13
2.2.2 Sistema de lastre estático .....	14
2.3 Sobre la estabilidad.....	16
2.3.1 Eje vertical.....	16
2.3.2 Eje longitudinal (crujía).....	16
2.3.3 Eje transversal.....	17
2.4 Impresoras 3D.....	19
2.4.1 Modelado por deposición fundida (FDM).....	20
2.5 Modelado de la planta.....	22
2.5.1 Ensayo PRBS.....	22
2.5.2 Funcionamiento de los servos .....	23
2.6 Métodos de control, el PID .....	24
2.7 Software utilizado.....	24
2.7.1 SolidEdge .....	24
2.7.2 CatalystEX 4.4 .....	25
2.7.3 Matlab y Simulink.....	25
2.7.4 BLHeli Suite .....	26
Capítulo 3 Diseño .....	27
3.1 Consideraciones previas al diseño.....	27
3.1.1 Requisitos de impresión.....	27
3.1.2 Estanqueidad .....	28
3.1.3 Cámara de vídeo .....	29
3.1.4 Cálculos previos.....	29
3.2 Modelos de referencia.....	31
3.3 Prototipos de prueba.....	32
3.3.1 Prototipo impermeabilización ABS .....	33
3.3.2 Prototipos: juntas tóricas y espesores.....	34
3.3.3 Diseños 3D para comprobar cálculos .....	36

3.4 Planos definitivos.....	36
Capítulo 4 Construcción .....	41
4.1 Impresión 3D y construcción del casco .....	41
4.2 Instalación de los componentes y habilitación para la navegación .....	41
4.3 Elementos del submarino.....	44
4.3.1 Servos.....	44
4.3.2 Motor brushless .....	44
4.3.3 Controlador de velocidad (ESC).....	45
4.3.4 Bomba de agua peristáltica .....	46
4.3.5 Tarjeta de control HKPilot.....	47
4.3.6 Regulador de tensión (U-BEC 5V) .....	47
4.3.7 Batería LiPo y cargador .....	48
4.3.8 Sistemas de comunicaciones .....	49
4.4 Circuito de funcionamiento bomba (Puente en H) .....	50
4.5 Conexionado final de los elementos.....	53
Capítulo 5 Control remoto.....	53
5.1 Uso de un microcontrolador en el radio control.....	55
5.2 Frecuencia de emisión .....	56
5.3 Control remoto de los timones verticales de popa .....	58
5.4 Control remoto de los timones horizontales de proa .....	58
5.5 Control remoto de la bomba de agua.....	59
5.6 Control remoto del motor brushless .....	60
Capítulo 6 Control automático.....	63
6.1 Desequilibrio en el ángulo de cabeceo.....	63
6.2 Modelado matemático del sumergible.....	64
6.3 Diseño del control automático y simulación. ....	66
Capítulo 7 Conclusiones y resultados .....	67
Referencias.....	69
Anexo A.....	71
Anexo B.....	77

# Capítulo 1

## Introducción

Si hay una ventaja que destaca en la electrónica es su cercanía al usuario, la facilidad de llevar a cabo casi cualquier proyecto, en cualquier lugar, con unos pocos componentes electrónicos y una sencilla interfaz de programación. Esta ventaja se ha potenciado más en los últimos años, si cabe, gracias al aumento de potencia de los microcontroladores y microprocesadores y su consecuente reducción de tamaño. Controles que antes sólo se podían implementar en grandes dispositivos con potente tecnología, ahora se pueden incorporar a cualquier objeto, sin importar su tamaño. En concreto, en el caso de los vehículos a escala, se pueden encontrar unos avances increíbles.

Es común que el ingeniero tienda a desarrollar proyectos relacionados con vehículos aéreos y terrestres, quizás por la cercanía que presenta su entorno, el aire y la tierra. Sin embargo, parece que el medio acuático ha caído, en cierto modo, en el olvido. En este proyecto se va a tratar de romper este tópico para realizar el control de un vehículo completamente acuático: un sumergible.

Este proyecto, al intentar abordar un ámbito relativamente novedoso desde la perspectiva del control automático, precisa unir el campo de la electrónica con el campo de la fluidodinámica. Para ligar estas dos disciplinas será necesario obtener un dispositivo capaz de navegar debajo del agua, un submarino. Es aquí donde se plantea el problema inicial: Encontrar un aparato de estas características en el mercado es tarea complicada. Por lo general, en las tiendas se pueden encontrar submarinos sin posibilidad de implementar un control y con muy poca tecnología, los que vienen a ser submarinos de juguete. Por otro lado, los submarinos profesionales tienen un coste elevado y son difíciles de encontrar. La solución será la fabricación del sumergible. Para realizar esta ardua tarea, se necesita llevar a cabo un estudio intensivo de la dinámica de los sumergibles y submarinos y elaborar un diseño propio. Tras la realización del diseño se imprime en ABS con una impresora 3D disponible en las instalaciones de la universidad. Este sumergible requiere un cuidadoso dimensionado y una enorme precisión ya que los componentes electrónicos son elementos delicados que distan de ser impermeables, el dispositivo debe de ser completamente estanco.

## 1.1 Sobre los sumergibles a escala

Aunque en este documento se utilizará de forma indistinta una palabra u otra, es importante distinguir los matices de las palabras sumergible y submarino. Por un lado, un sumergible es una nave o buque que puede navegar bajo el agua. En cambio, un submarino está pensado para trabajar casi la totalidad del tiempo debajo de esta, siendo muy poco frecuente un ascenso a la superficie. En este sentido, la definición de sumergible encaja mejor con lo buscado, pues requiere un diseño capaz de controlarlo tanto en superficie como completamente sumergido. Esta versatilidad es una de las cualidades fundamentales del vehículo usado.

Se pueden agrupar los sumergibles a escala en dos grupos fundamentales según su método de inmersión o lastre: Aquellos con un método de lastre dinámico, cuyo estado natural es el de flotabilidad positiva. Para sumergirlos en el agua se tiene que aplicar de forma permanente una fuerza hacia abajo y para emerger simplemente dejar de aplicar dicha fuerza. Por otro lado se encuentran los sumergibles de lastre estático: tienen la capacidad de aumentar su peso para pasar rápidamente de flotabilidad positiva a flotabilidad negativa y así realizar la inmersión, para emerger pierden peso. Al ser este último tipo el que más se aproxima al funcionamiento real de los sumergibles, es el que se va a llevar a cabo en este proyecto. Para conseguirlo se hará uso de bombas de agua que, vaciando o llenando un depósito, sean capaces de cambiar el peso del submarino y conseguir flotabilidad variable.

Cabe destacar que un submarino es un elemento inestable por naturaleza, pues a pesar de que se puede conseguir un equilibrio natural con una construcción correcta del submarino, requiere de un control para hacer constantes correcciones a los desequilibrios que se dan durante la navegación, corrigiendo así el rumbo del sumergible. En el siguiente capítulo se explicará en profundidad el tema de la estabilidad.

## 1.2 Motivación del proyecto

Como se explicará en Capítulo 2 “estado de la cuestión”, el control de vehículos acuáticos se está empezando a adaptar ahora en drones resistentes al agua, pero es relativamente difícil encontrar submarinos o sumergibles a escala con un control de estabilidad incorporado, esta dificultad crece si además, como en nuestro caso, se buscan sumergibles a escala que simulen el comportamiento real de uno de ellos (con un sistema de lastre estático). De esta razón nace la primera motivación del proyecto, que es explorar un terreno poco utilizado en el control automático. La idea de este proyecto es dotar a la universidad Pontificia de Comillas el ser pioneros en este medio. Pues tal como dijo André Gide “El hombre no puede descubrir nuevos océanos a menos que tenga el coraje de perder de vista la costa.”

Por otra parte, otra motivación fundamental es la espeleología marina. Un sumergible de estas características, es capaz de acceder a los sitios más recónditos del océano soportando las altas presiones de las grandes profundidades abisales. Otros vehículos acuáticos, como los drones impermeables, sólo son capaces de hacer inmersiones de un par de metros. El hecho de que sea un vehículo no tripulado posibilita aún más el acceso a mayores profundidades. Además, su pequeño tamaño unido a su capacidad de maniobra le dota de grandes ventajas en cuanto a la accesibilidad a sitios difícilmente alcanzables por otros sumergibles de mayores dimensiones, por ejemplo fosas oceánicas o restos de barcos hundidos. La idea del proyecto es dejar el espacio necesario para añadir una cámara en un

futuro y así poder grabar y tomar fotos de las especies marinas que se encuentran en las profundidades del océano.

Tal como se indica en el título: “Construcción, modelado y control”, este es un proyecto multidisciplinar cuyas distintas fases permiten abarcar una gran cantidad de áreas de la ingeniería y así aplicar los conocimientos de diversas materias como la fabricación (el diseño en 3D, el dimensionamiento, la estanqueidad); la mecánica de fluidos (estabilidad y comportamiento del submarino); máquinas eléctricas (motores brushless), comunicaciones (sistema de comunicación entre el emisor y la nave) y por supuesto, el control automático. Por tanto, otra motivación del proyecto es demostrar la utilidad y la interconexión de las diversas asignaturas estudiadas en el grado de ingeniería electromecánica de la universidad Pontificia de Comillas que, aunque en un principio se estudien separadas, en los proyectos reales tienen que emplearse de forma conjunta.

### 1.3 Objetivos del proyecto

Los objetivos que se pretenden abordar en el proyecto corresponden con las tres fases principales del proyecto:

- **DISEÑO:**

Realizar en un software de diseño 3D un prototipo de un sumergible a escala. Este diseño se lleva a cabo en el software de Siemens SolidEdge.

- **CONSTRUCCIÓN:**

Imprimir el modelo en una impresora 3D disponible en las instalaciones de la universidad. El material empleado será el plástico ABS. Habilitar el prototipo impreso y la electrónica para que sea navegable y estanco.

- **MODELADO Y CONTROL:**

- Control remoto: En los ejes con estabilidad natural añadir lo necesario que el sumergible sea radio controlable. Realizar las modificaciones oportunas para que el control sea suave, sencillo y eficaz.
- Control automático: En los ejes en los que el movimiento sea inestable será necesario sacar el modelo de la planta y utilizar un simulador sobre el que probar las distintas estrategias de control. Diseñar e implementar un control para lograr una navegación estable en todos los grados de libertad que lo requieran.

Para proceder con este objetivo es necesario adaptarlo al microcontrolador Ardupilot y realizarlo en el entorno de programación Matlab y Simulink.

- Como objetivo opcional se adaptará el sumergible con vistas a la instalación de una futura cámara que permita grabar las profundidades.

## 1.4 Metodología y recursos

Para llevar a cabo este proyecto, se pueden distinguir varias etapas claramente diferenciadas:

Estudio de la dinámica de los sumergibles y su estabilidad. Este estudio previo versa sobre los sumergibles de mayor tamaño, sus dimensiones y las leyes de mecánica de fluidos que rigen el comportamiento de este tipo de vehículos.

Diseño en el software SolidEdge del prototipo. Se tiene en cuenta la resistencia y el espesor del material que se empleará: ABS. Así como un cuidadoso dimensionado para que el submarino sea estanco. También se considera un espacio para una futura cámara de grabación. Será necesario el diseño de diversos prototipos de prueba y su correspondiente impresión debido al novedoso uso de la impresora 3D para la fabricación de un dispositivo acuático.

Fabricación del sumergible. Imprimir el modelo en una impresora 3D disponible en las instalaciones de la universidad en ABS.

Instalar la electrónica al sumergible y habilitarlo para la navegación. Para ello se tendrán que realizar las modificaciones pertinentes en el sumergible impreso para que sea impermeable y estanco (baño en acetona del ABS).

Control remoto. Añadir lo necesario para que el sumergible sea radio controlable en aquellos grados de libertad que posean estabilidad natural y que no requieran control automático sino que baste con el radio control. Para ello es necesario instalar el sistema de comunicaciones entre la emisora y el sumergible y realizar las modificaciones oportunas para que el control sea suave, sencillo y eficaz. Esto se adaptará al microcontrolador Ardupilot y se realizará en el entorno de programación Matlab y Simulink.

Modelado de la planta. Sacar el modelo de la planta de aquellos grados de libertad inestables del sumergible y adaptarlo a la herramienta ArduPilot utilizando un simulador sobre el que probar las distintas estrategias de control. Esto se hará en el entorno de programación Matlab y Simulink. El propio diseño en 3D del submarino nos ayudará con la información necesaria para obtener el modelo matemático del submarino.

Diseñar e implementar en el sumergible un control para lograr una navegación estable en todos los grados de libertad que lo requieran.

En la siguiente página se muestra la Figura 1.1 que constituye el cronograma con el seguimiento completo de las tareas realizadas:

*Nota: Aunque la planificación comienza en Enero de 2016, desde Junio de 2015 se comenzó a realizar el proyecto con el estudio previo y el diseño 3D del sumergible a escala.*

Tarea	Enero				Febrero				Marzo				Abril				Mayo				Junio			
	Sm 1	Sm 2	Sm 3	Sm 4	Sm 1	Sm 2	Sm 3	Sm 4	Sm 1	Sm 2	Sm 3	Sm 4	Sm 1	Sm 2	Sm 3	Sm 4	Sm 1	Sm 2	Sm 3	Sm 4	Sm 1	Sm 2	Sm 3	Sm 4
Estudio previo	■	■																						
Diseño 3D	■	■	■	■																				
Prototipos prueba				■	■	■																		
Impresión 3D						■	■		■	■														
Sumergible estanco									■	■	■	■												
Instalación componentes electrónicos										■	■	■	■											
Habilitación para la navegación										■	■	■	■	■	■	■					■	■		
Adaptar bomba agua para el control															■	■	■							
Montaje de circuitos															■	■	■							
Habilitación para la navegación										■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Instalación del Ardupilot													■	■	■									
Control remoto sistemas giro															■	■	■							
Control remoto sistema avance/retroceso															■	■	■							
Control remoto sistema de lastre															■	■	■							
Ajuste de controles máquina de estados																■	■	■	■					
Modelado planta sistema cabeceo inestable																			■	■	■	■	■	■
Control automático correcciones navegación																				■	■	■	■	■
Diseño de la máquina de estados completa																					■	■	■	■
Ensayos navegación y últimos retoques																			■	■			■	■
Redacción de la memoria											■	■		■			■	■	■	■	■	■	■	■

Figura 1.1. Planificación semanal del proyecto.

### Recursos empleados

- Programas informáticos:
  - SolidEdge.
  - Matlab.
  - Simulink.
  - BLHeli Suite.
  - CatalystEX 4.4.
  
- Sumergible:
  - 500 gramos de ABS.
  - 2 microservos.
  - Bomba agua peristáltica.
  - Puente en H.
  - Motor brushless.
  - Controlador velocidad ESC.
  - UBEC 5V.
  - Batería LiPo 950 mAh, 2 celdas (7,4 V). Cargador-balanceador.
  - Tarjeta de control HKPilot Mega 2.7 (similar a ArduPilot).
  - Emisora de radio control 30 MHz y receptor de Dynam Racon X6.
  - Conector USB - micro USB y cableado.





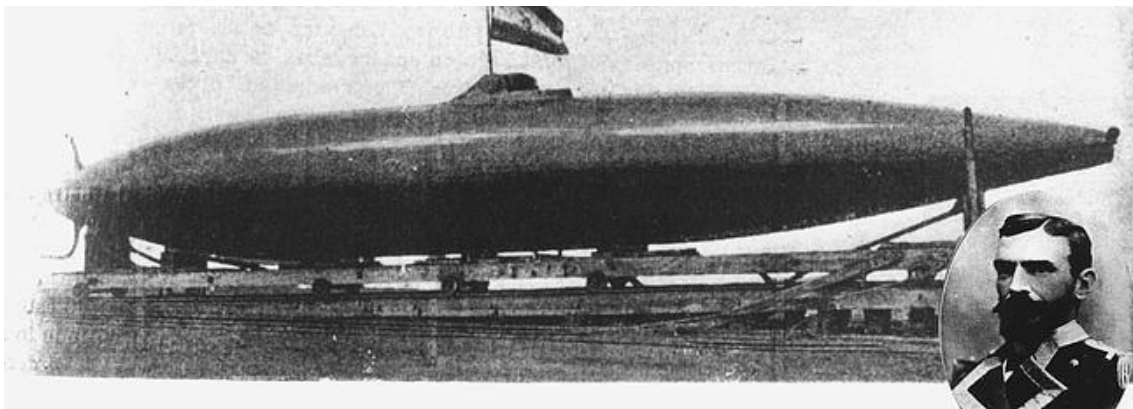
# Capítulo 2

## Estado de la cuestión

### 2.1 Introducción histórica

Si se quiere introducir el estado del arte de este proyecto puede parecer exagerado comenzar hablando de los primeros submarinos, pues estos se diseñaron hace 400 años. Sin embargo, es interesante ver cómo han ido evolucionando estos vehículos acuáticos para así poder analizar sus métodos de control de dirección y avance hasta el día de hoy.

Tiempo ha pasado desde que en el año 1600, el olvidado ingeniero español Jerónimo de Ayanz y Beaumont construyera el primer sumergible registrado hasta la fecha. Este primer dispositivo y los que le sucedieron, hechos todos de madera, distan del concepto actual que se tiene de submarino, pues básicamente consistían en una rudimentaria barca submarina propulsada con brazos mecánicos o pedales. La mayor parte eran no tripulados y se controlaba su dirección mediante un sistema de hilos y cuerdas movidas desde la superficie. Tenían como finalidad la exploración subacuática y no pasaron muchos años hasta que se dieron cuenta de sus aplicaciones militares.



*Figura 2.1. Submarino El Peral, primero en incorporar propulsión eléctrica.*

Los primeros vehículos considerados submarinos y que ya no tenían propulsión manual o pedal, sino combustión interna o vapor, evocan nombres más conocidos como Narciso Monturiol o el ilustre Isaac Peral, que botó su submarino en Cádiz en 1888 alcanzando una profundidad máxima de 30m. Estos submarinos ya iban teniendo la configuración actual y son los predecesores de los submarinos modernos. Gracias a las hélices, las bombas de agua y a los distintos timones se podía controlar el movimiento del submarino en todos los grados de libertad del espacio.

No sería hasta 1955 cuando se botó el primer submarino propulsado por energía nuclear, el USS Nautilus. Fue un acontecimiento importante, pues marcó la transición entre las naves lentas y los submarinos capaces de mantener una velocidad de 25 nudos (46 Km/h). En torno a esta fecha, el interés por los submarinos, tanto convencionales como nucleares, empezó a crecer y fue cuando se desarrollaron importantes avances en el control

automático del submarino: gracias al uso de sensores como el sónar, era capaz de detectar objetos y redirigirse automáticamente para evitar colisiones.

Desde hace 30 años se empezaron a desarrollar los vehículos no tripulados submarinos UUV (Unmanned Underwater Vehicles), los cuales son capaces de operar bajo el agua sin ningún tipo de tripulación ni piloto en los mandos. Por un lado están los ROV (Remotely-operated Underwater Vehicles), que son manejados a distancia por un operador humano, y por otro, los AUV (Autonomous Underwater Vehicles) que operan de forma autónoma. En este momento se emplea el término vehículo marítimo no tripulado, o UMS (Unmanned Maritime System) [1].



*Figura 2.2. Distintos modelos de submarinos no tripulados.*

En sus inicios, los ROV fueron empleados como blanco para entrenamiento de buques y submarinos, pero después se comenzaron a usar contra la amenaza de las minas, o para la colocación de equipos submarinos diversos relacionados, a menudo, con la guerra electrónica submarina. Actualmente los ROV disponen de modernos sistemas de control que les permiten la navegación autónoma, regresar a la superficie cuando la batería se les va a acabar, detectar obstáculos e incluso el seguimiento de especies marinas por su entorno marino. Sus aplicaciones han ido evolucionando y hoy en día utilizan más en otros campos como en investigación.

En cuanto a la construcción de sumergibles radio control, hay que remontarse a la década de los 50. Los primeros modelos se construían totalmente en madera y se controlaban mediante los equipos de radio de la época, que funcionaba aún con válvulas. Hacia la segunda mitad de la década de los 60 se empezaron a comercializar los primeros submarinos RC de la historia. Sucedió en Reino Unido, lugar donde se desarrolló un casco de plástico gracias al cual se pudo comercializar un modelo RC de un submarino alemán de la clase VII C. Hoy en día existen modelos profesionales con cascos en fibra de vidrio y todo tipo de accesorios para su maniobra, desde bombas de inmersión hasta los elementos menos imaginables; como torpedos autopropulsados.

## 2.2 Funcionamiento de los submarinos RC.

Tal como se ha descrito anteriormente, es difícil encontrar un sumergible a escala que se comporte como uno real. Lo más cercano a lo deseado son los submarinos radio control. Estos modelos, en su mayoría, son hechos a mano o comprados en tiendas específicas de modelismo. Normalmente no vienen provistos de sistemas de corrección o control automático, más bien se limitan a una conexión directa entre la emisora y los actuadores. Debido a esto, la calidad de la navegación se basa en la habilidad de corrección de rumbo que tiene el piloto que, sumado a los problemas de visibilidad del dispositivo debajo del agua, conduce a unos inevitables y pobres resultados en cuanto a estabilidad y precisión de movimiento del sumergible, sin otra utilidad más allá del entretenimiento. Lo más significativo para estudiar cómo funcionan las distintas clases de submarinos RC es acudir a su sistema de inmersión, también conocido como sistema de lastre. Existen dos tipos fundamentales [2]:

### 2.2.1 Sistema de lastre dinámico

La mayor parte de submarinos RC, por simplicidad, usan un método de inmersión dinámico. El funcionamiento básico de estos modelos es el siguiente:

En primer lugar, estos modelos poseen una flotabilidad positiva (cuanto inferior sea mejor, de esta forma se puede sumergir con menor esfuerzo). Tal como se muestra en la Figura 2.3, para conseguir la fuerza necesaria para la inmersión, se usa la fuerza impulsora de la turbina, que provoca una velocidad. Si se dimensionan los planos de inmersión correctamente, estos crean el empuje hacia abajo necesario [3].

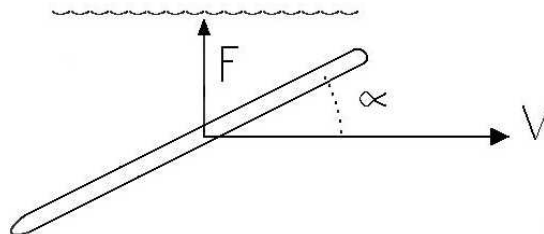


Figura 2.3. Posición correcta de los planos de inmersión (timones) para contrarrestar la fuerza de empuje (F) gracias a la velocidad de la turbina (v).

La ecuación experimental 2.1 publicada por la revista RCModel da una idea de la relación entre la velocidad (v), el ángulo de calaje ( $\alpha$ ) y la fuerza generada por superficie plana (F).

$$F = 94,8 \cdot v \cdot 2 \cdot \frac{\sin \alpha}{1 + \sin \alpha}$$

(Ecuación 2.1)

Si se observa la Figura 2.4, dependiendo de la maniobra a realizar (inmersión o emersión), los planos delanteros y traseros cambiarán de posición simultáneamente.

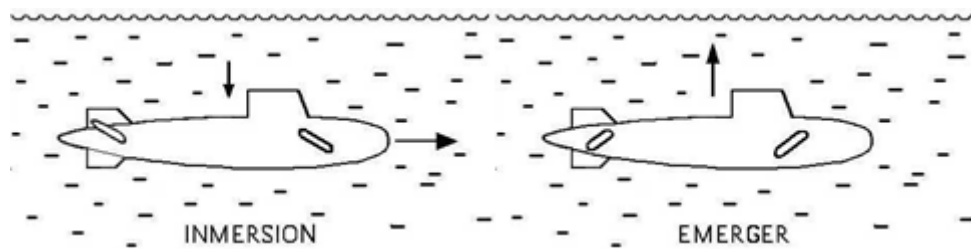


Figura 2.4. Posición correcta de los timones para las maniobras de inmersión y emersión

La limitación de este sistema de inmersión es que el sumergible solo puede sumergirse estando en movimiento, ya que detenido no se produciría la fuerza de inmersión necesaria. Para solventar este inconveniente existe un método también hidrodinámico que se basa en el trabajo de una turbina empujando hacia abajo para la inmersión. Dicho método se puede visualizar en la Figura 2.5.

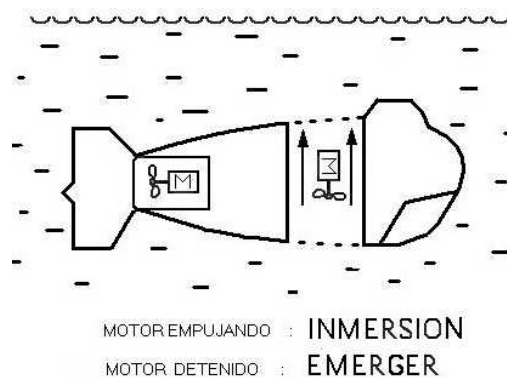


Figura 2.5. Sistema de inmersión por turbina vertical.

## 2.2.2 Sistema de lastre estático

Aunque son menos frecuentes, también se pueden encontrar submarinos RC de lastre estático, conocidos también como submarinos de desplazamiento variable. Es naturalmente lo que más se aproxima a una maniobra real, por tanto será el que se abordará en este proyecto.

Salvando las distancias, variar el desplazamiento significa variar el peso del modelo, lográndose la inmersión normalmente con un incremento del peso y, a la inversa, se logra la maniobra de emerger.

Se darán unas pinceladas de los sistemas más usados:

### Sistema de émbolo o émbolos:

Básicamente se trata de un depósito con un pistón accionado a través de un motor eléctrico (ver Figura 2.6). El pistón tiene una de las caras en contacto con el agua y la otra

con el aire del interior del compartimento estanco. Este pistón se encarga de introducir o expulsar agua del submarino como si de una jeringuilla se tratase. La presión del agua actuando sobre la cara del pistón y las presiones originadas por el desplazamiento del émbolo originan grandes fuerzas que deben ser vencidas. Todo esto implica que se deben usar motores relativamente grandes.

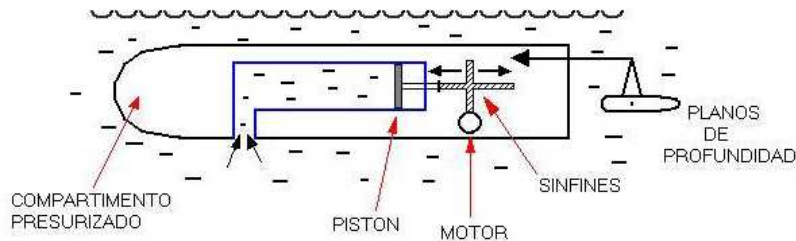


Figura 2.6. Método de inmersión estático mediante sistema de émbolo.

Si se utiliza un pistón en proa y otro en popa se puede lograr un mayor control de estabilidad en el eje transversal [4].

### Sistema con bombas:

Se basa en pequeñas bombas de agua y una válvula para el venteo de aire que se acciona con un servo (ver Figura 2.7). Abriendo la entrada del depósito y la válvula de venteo, el lastre se inunda por propia presión del agua, esto se puede acelerar accionando la bomba del revés.

Cuando el submarino ya está sumergido, se cierra el venteo y se detiene la bomba. Para emerger, bastará con encender la bomba, la cual sacará algo de agua haciendo un ligero vacío en el poco aire del lastre, y luego cuando emerge a la superficie se abre la válvula de venteo, y continuar bombeando el agua hacia afuera.

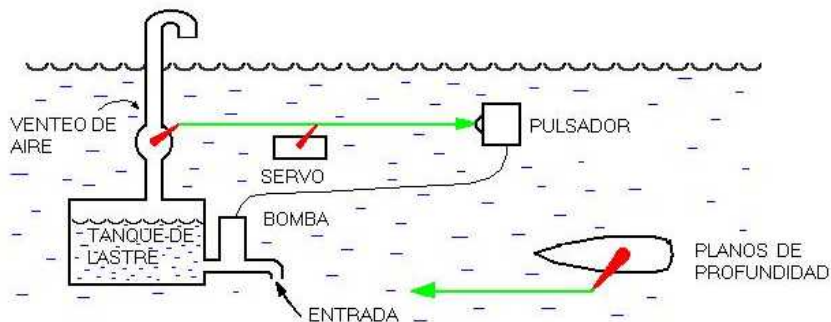


Figura 2.7. Método de inmersión estático mediante sistema con bombas.

En este proyecto se utilizará una variación de este último método de lastre.

## 2.3 Sobre la estabilidad

Cualquier objeto del espacio tiene seis grados de libertad. Lograr la estabilidad y el control del submarino en los tres desplazamientos y en los tres giros de Euler será el objetivo último de este proyecto. Para ello se hará uso de turbinas, timones, aletas y bombas de agua. En la Figura 2.8 se pueden ver las denominaciones estándar que se dan a los tres ejes en el mundo náutico. Cabe destacar que el eje de crujía es como se denomina al plano longitudinal de simetría del buque, es decir, el espacio de proa a popa. Por otra parte el eje transversal va de babor (izquierda) a estribor (derecha).

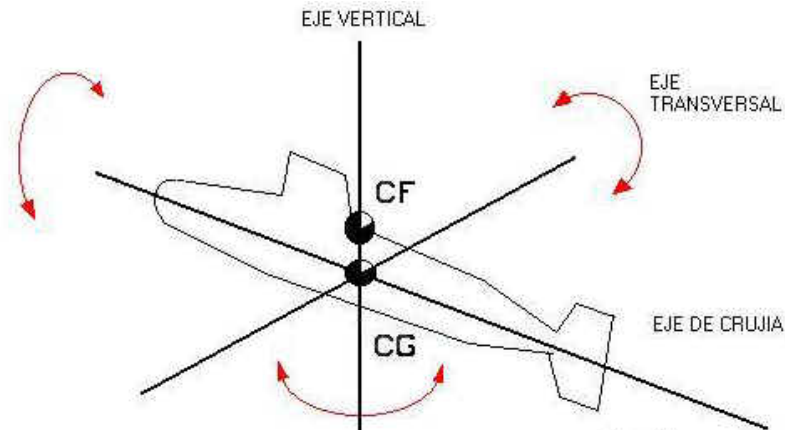


Figura 2.8. Esquema de los seis grados de libertad del sumergible en el espacio. CG representa el centro de gravedad y CF el centro de flotabilidad.

Es necesario que el submarino sea capaz de estar estabilizado en todos los grados de libertad. Si no será imposible alcanzar una navegación precisa. Para ello se van a ir analizando por separado los ejes y comprobando si requieren continuas correcciones o, por lo contrario, no necesitan control.

### 2.3.1 Eje vertical

Se trata de un eje con giro libre, es decir, es el que establece la dirección a seguir, por tanto se controla con los timones verticales de popa (los traseros) a voluntad del piloto. Si el submarino está construido con simetría en el plano definido por este eje, no experimentará perturbaciones y mantendrá la dirección constante. En definitiva, no requiere control automático al gozar de estabilidad natural.

### 2.3.2 Eje longitudinal (crujía)

La estabilidad en este eje evita que nuestro modelo de una vuelta de campana al actuar el par producido por el giro de la turbina. Para lograrlo, la solución será aumentar el par que el submarino produce en sentido contrario al giro del motor y que lo tiende a alinear y a dejar en su posición natural. Este par “corrector” es producido por el peso del submarino.

En la Ecuación 2.2 se aprecia con detalle que el par (M), provocado por una fuerza (F), aumenta si aumenta también la distancia (D) a la que se aplica, luego si se aumenta la distancia en sentido vertical que separa el centro de flotabilidad (CF) y el centro de gravedad (CG), se logrará que aumente el par antes mencionado.

$$M = F \cdot D$$

(Ecuación 2.2)

De este modo, tal como muestra la Figura 2.9, si la distancia entre centros (D) es pequeña, el momento generado es pequeño también, y nuestro modelo puede dar vueltas sobre sí mismo ante la torsión del motor. Para aumentar este momento, se sitúan los elementos más pesados lo más abajo posible, y aquellos que otorgan flotabilidad positiva lo más arriba posible [5].

Por tanto, este eje no requiere control automático al gozar, siempre y cuando la construcción sea perfecta, de estabilidad natural.

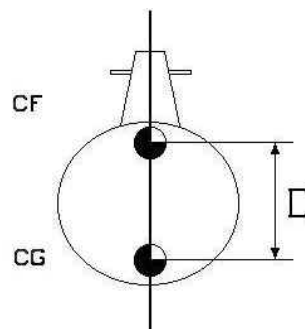


Figura 2.9. Distancia D entre el centro de flotabilidad (CF) y el centro de gravedad (CG)

### 2.3.3 Eje transversal

La estabilidad en este eje garantiza una trayectoria en postura horizontal a igual profundidad en todos los puntos del sumergible. Este equilibrio se logra haciendo que coincidan en una misma línea vertical el centro de gravedad CG del modelo y el centro de flotabilidad CF (lugar donde se aplica el empuje según el principio de Arquímedes). De esta forma se tienen dos fuerzas en la misma línea opuestas y equilibradas, que no provocaran par de giro en ningún caso. Esto se ilustra en la Figura 2.10.

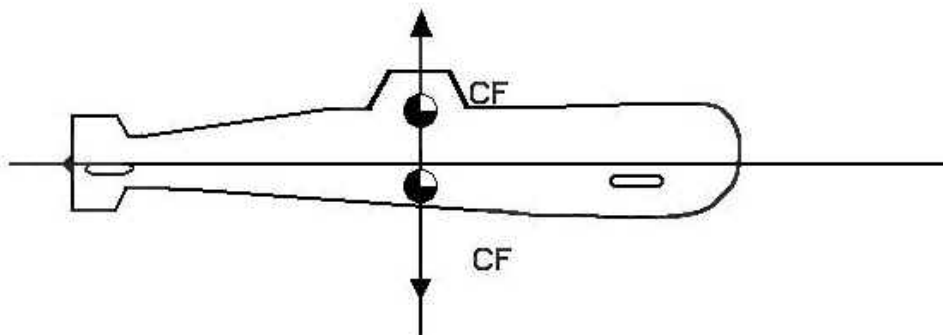


Figura 2.10. Correcto alineamiento del centro de flotabilidad (CF) y de gravedad (CG)

Alinear estos dos puntos se puede hacer de dos maneras según sea necesario: desplazando elementos que muevan el CG de su posición (plomo, batería,...), o colocando

elementos que cambien de lugar el CF (elementos con flotabilidad positiva: trozos de poliestireno expandido, cámaras estancas,...).

Pero en este eje se plantea el problema principal de la navegación de cualquier tipo de sumergible: la resistencia hidrodinámica de la vela o quiosco (la parte frontal del submarino) puede provocar la inestabilidad pues, debido a ella, el centro del área lateral (CAL) queda por encima de la línea de empuje (E), originando un par de desequilibrio que, tal como se muestra en la Figura 2.11 y sumado a otras fuerzas, tienden a subir la proa del modelo [6].

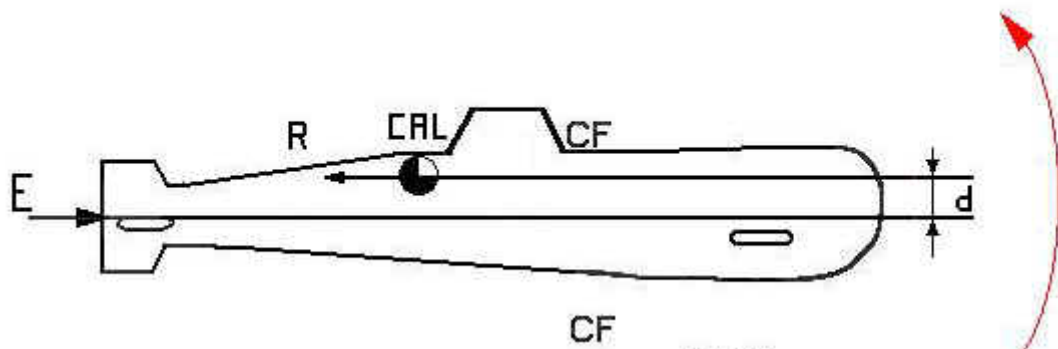


Figura 2.11. Par de desequilibrio debido a la resistencia del agua.

Este desequilibrio indeseado se corrige con el correcto posicionamiento de los timones horizontales, que crean una fuerza hacia abajo que reestablece el equilibrio. Estos timones, que como se verá más adelante, en el sumergible usado se denominan timones de popa, se muestran en la Figura 2.12.



Figura 2.12. Timones horizontales de un modelo de submarino RC.

Mantener este equilibrio de forma manual obliga a continuas correcciones, lo cual es inviable si se busca una precisión mínima. Por tanto se debe recurrir a algunos sistemas de "ayuda automática de equilibrio", es decir, técnicas de predicción y control.

Por tanto la inestabilidad en el eje transversal del submarino nos obliga a implementar un sistema de control automático que sea capaz de mover los timones delanteros para que mantengan en la misma línea horizontal a todo el casco del submarino y no cabecee o se incline hacia arriba al actuar la resistencia hidrodinámica en la quilla.



## 2.4 Impresoras 3D

El diseño y la construcción del sumergible es una etapa fundamental del proyecto, puesto que si este punto fallase, sería imposible continuar con el mismo. Por tanto, es importante ver la tecnología de la que se dispone para fabricar este vehículo acuático: las impresoras 3D.

Las impresoras 3D funcionan como las impresoras de chorro de tinta pero, en vez de tinta, depositan el material deseado en una serie de capas sucesivas para crear un objeto procedente de un formato digital. Fue en 1984 cuando algunas adaptaciones y avances transformaron la impresión con tinta a impresión con materiales. En los años posteriores se empezaron ya a usar en el prototipado de piezas e incluso, gracias a su enorme potencial, en los últimos años están siendo utilizadas para construir prótesis médicas.

Como se ha comentado en el Capítulo 1, encontrar un sumergible con la posibilidad de instalarle un microcontrolador, que sea capaz de controlar los distintos actuadores, es muy complicado. Pues, mientras que por un lado se encuentran los submarinos RC básicos para aficionados, por otro lado se encuentran submarinos profesionales con costes exageradamente elevados. Esta es la razón principal por la que en este proyecto se va a usar una impresora 3D: el proyecto exige elaborar un diseño propio de submarino y que pueda ser fabricado. Esto solo es posible con un software de diseño y una impresora 3D.

Las formas con las que logra depositar el material son diversas: extrusión, hilado, granulado, laminado,... Y según el método que se use, la impresora utilizará una tecnología distinta: modelado por deposición fundida (FDM), laminado por capas (LPC), fabricación por haz de electrones (EBF),... Por si fuera poco, cada una de estas tecnologías permite imprimir en un material distinto: HDPE, ABS, PLA, fotopolímeros,... En resumen, hay una infinidad de tipos de impresoras 3D y ni mucho menos todas ellas son adecuadas para la fabricación de un sumergible. Para elegir la impresora, se han tenido en cuenta tres factores principales: que el material sea resistente a los esfuerzos mecánicos, que sea impermeable y que sea apenas sea poroso.



*Figura 2.13. Impresora modelo Dimension disponible en las instalaciones de ICAI*

En las instalaciones de la Universidad Pontificia de Comillas se encuentran también distintos modelos de impresoras, pero siguiendo las conclusiones a las que se ha llegado en el párrafo anterior se ha decidido imprimirlo en el modelo “Dimension” diseñado por la empresa Stratasys (véase Figura 2.13.). Este modelo, ofrece una resolución de alta calidad (hasta 0,178 mm) gracias a la gran potencia de la tecnología FDM. Además, utiliza el

termoplástico ABS para fabricar los modelos. El acrilonitrilo butadieno estireno o ABS es un plástico muy resistente al impacto (golpes) e impermeable. Por medio de la extrusión de delgadas capas de ABS, se va creando un modelo sólido en tres dimensiones. En el Capítulo 4 se explicará cómo se ha logrado hacer que no sea poroso para así poder construir un compartimento estanco como es el submarino.

#### 2.4.1 Modelado por deposición fundida (FDM)

Como se ha dicho anteriormente, la impresora usada funciona con la tecnología FDM (Fused Deposition Modeling). El proceso es el siguiente:

1. Una vez diseñada la pieza, se parte de un fichero estereolitografico (stl) que es procesado por un software, en nuestro caso el CatalystEX 4.4, que se encarga de orientar la pieza para ser impresa dividiéndola en capas y de realizar los cálculos necesarios para que la boquilla siga la trayectoria adecuada para depositar el material.
2. Ahora es el momento de introducir el filamento plástico, que inicialmente se almacena en rollos, por un cabezal de impresión. El cabezal, que puede desplazarse en los tres ejes gracias a varios servos, se calienta para estar por encima de la temperatura de fusión del ABS.
3. En este momento se empieza a mover el cabezal y va depositando finos hilos de ABS en un estado semilíquido, capa por capa, que solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla. La impresora nos permite elegir el grosor de los hilos (capas más finas implican mejor calidad en la pieza final). Normalmente se generan estructuras de soporte sobre las que se apoyan las capas definitivas, al finalizar la impresión es retirado.

Este proceso se ilustra en la Figura 2.14.

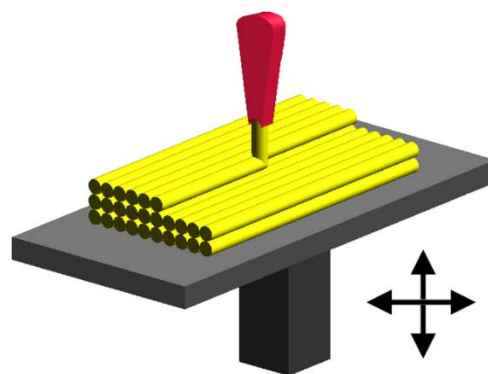


Figura 2.14. Proceso de impresión con tecnología FDM

Una vez finalizada la impresión basta con sacar la base de plástico reciclable de la impresora 3D y desmoldar el modelo.

Para quitar el material de soporte sin dañar el prototipo, en la universidad Pontificia de

Comillas se dispone del siguiente método: se introduce el prototipo en una solución de sosa, situada en una cuba de ultrasonidos (véase Figura 2.15). Gracias a las micro vibraciones que se producen en la cuba, la sosa se introduce por todos los recovecos del prototipo y elimina, sin dañarlo, la totalidad del material de soporte.



*Figura 2.15. Cuba de ultrasonidos disponible en las instalaciones de ICAI.*

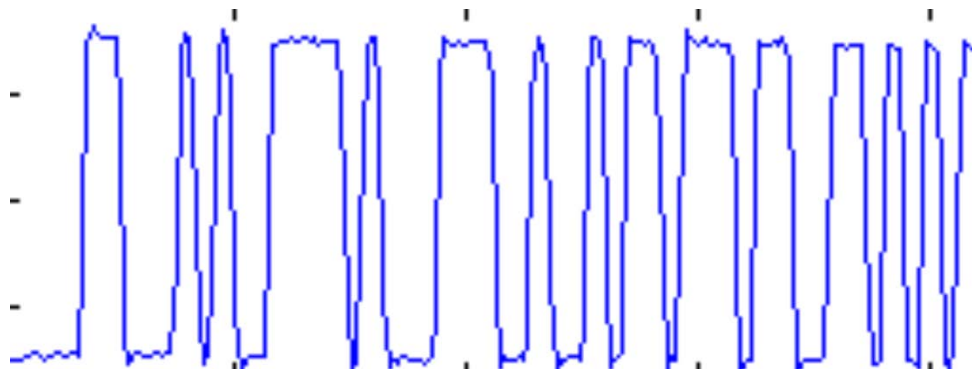
## 2.5 Modelado de la planta

Después de haber estudiado, en el apartado sobre la estabilidad, la necesidad de implementar un control automático en el cabeceo del sumergible, es importante detenerse a analizar el método que se va a usar para modelar la planta entre este giro y el mando que lo controla: el servo que mueve los timones horizontales.

### 2.5.1 Ensayo PRBS

Dado que lo que se quiere es simplemente obtener la planta entre el ángulo de cabeceo y los pulsos (voltaje) que recibe el servo que mueve los timones, no merecería la pena estudiar toda la dinámica del submarino y todas las ecuaciones mecánicas que rigen el comportamiento de este para sacar la planta, sería un trabajo en balde. Por tanto, se usará una alternativa: un ensayo con una señal PRBS.

La señal PRBS o secuencia binaria pseudoaleatoria se usa para técnicas de identificación paramétricas, consiste en una señal irregular casi aleatoria, gracias a la cual se obtiene a la salida del ensayo otra señal con la mayor cantidad de frecuencias no despreciables posible, logrando amplificar una gran cantidad de armónicos. En la Figura 2.16 se puede observar un ejemplo de señal PRBS.



*Figura 2.16. Ejemplo de señal PRBS.*

Aunque en el Capítulo 6 se explicará con más detalle cómo se ha hecho el ensayo de identificación de la planta con la señal PRBS, aquí se adelanta que conectando la señal PRBS a los mandos que mueven los timones y repitiéndola de forma periódica durante todo el ensayo [7], se va midiendo la respuesta que provocan en el ángulo de cabeceo del sumergible y se va guardando todo esto en la memoria Flash del microcontrolador. Posteriormente, comparando la PRBS con la salida de los giros de cabeceo, se podrá obtener una función de transferencia que sea correcta para un espectro lo más amplio posible.

Para generar esta señal y realizar todo el ensayo se utilizará el Software de Matlab y Simulink.

## 2.5.2 Funcionamiento de los servos

Un servo es un pequeño dispositivo que, dependiendo de la amplitud de la señal que recibe, puede llevar su eje a posiciones angulares diferentes. Tal como muestra la Figura 2.17, está constituido por: un pequeño motor eléctrico de corriente continua, un juego de engranajes, una circuitería de control interna, una resistencia variable o potenciómetro y tres cables de conexión; el rojo es para la alimentación (normalmente 5 V), el negro para tierra (GND) y el de distinto color para la señal de control.

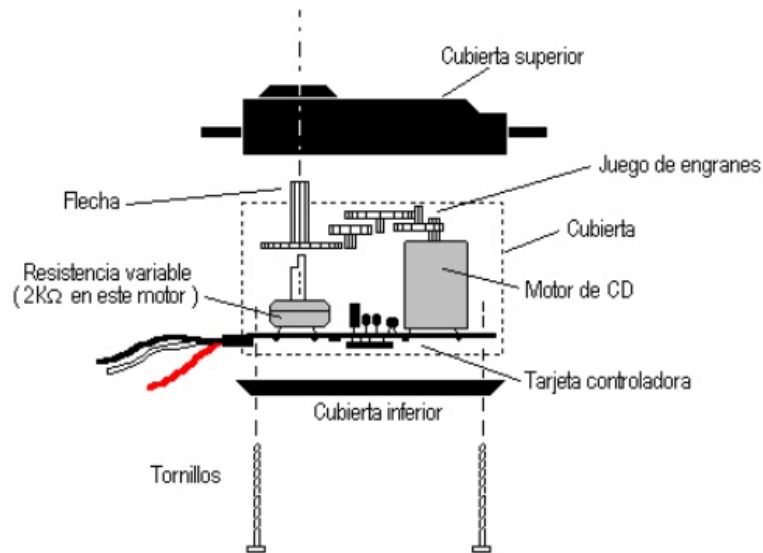


Figura 2.17. Partes principales de un Servomotor.

La resistencia variable está conectada al eje central del servo. El potenciómetro envía la posición donde está situado y la circuitería de control interna del servo lo compara con la señal de control que recibe desde el exterior, normalmente de un microcontrolador. Si tras esta comparación el eje está en el ángulo correcto el motor se apagará, pero si se detecta que no está en posición correcta el motor girará hasta alcanzarla. La cantidad de voltaje aplicado al motor es proporcional a la distancia que este necesita viajar. Así, si el eje necesita regresar una distancia grande, el motor regresará a toda velocidad. Si este necesita regresar sólo una pequeña cantidad, el motor correrá a una velocidad más lenta.

Para controlar el servo normalmente la señal de control es un pulso que se repite cada 20 ms. Si el ancho de pulso es de 0.5 ms el servo se colocará en el menor ángulo que pueda, si es 1.5 ms se situará en la referencia de ángulos  $0^\circ$  y si es 2.5 ms en el máximo ángulo. A esta forma de funcionamiento por modulación del ancho de pulso se le conoce como PWM. En la Figura 2.18 se ilustra para el caso de un servo de  $180^\circ$  y los ángulos de  $-90^\circ$ ,  $0^\circ$  y  $90^\circ$  [8].

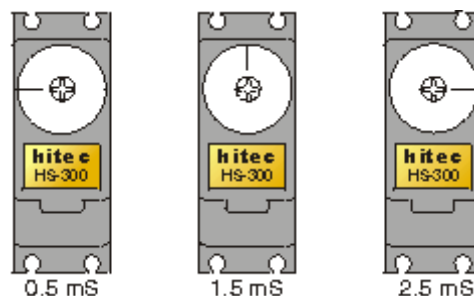


Figura 2.18. Giro del servo al variar el ancho de pulso de la señal de control.

## 2.6 Métodos de control, el PID

Tras obtener la planta, que simboliza el proceso o elemento a controlar, el objetivo es lograr que la salida, el ángulo de cabeceo en el caso de un sumergible, sea lo más parecido posible a la referencia que se le indique. Para ello es necesario implementar una de las numerosas técnicas de control que existen. Al tratarse de un control cuyo fin último es la estabilidad del submarino, debe tener una salida rápida y sin error [9].

A pesar de que existen diversas técnicas de control, más sencillas y más complejas, el PID es sin duda uno de los controles que más se adapta a la prioridad que tiene este proyecto, que el error sea nulo para que el submarino sea estable. De hecho, los controladores PID son los algoritmos de control más comunes, suficientes para resolver la mayor parte de los problemas de la industria siempre y cuando las exigencias no sean muy altas. Según estudios recientes, el 95% de los procesos industriales controlados son PID.

El control Proporcional – Integral – Derivativo permite aunar el efecto de sus tres acciones principales. En primer lugar, la acción proporcional consigue que la acción de control sea proporcional al error. Por otro lado, la acción integral asegura que la salida concuerde con la referencia logrando que el error sea nulo, su inconveniente principal es que tarda bastante tiempo en alcanzar el régimen permanente. En última instancia, la acción diferencial o derivativa al derivar el error tiene en cuenta su tendencia, por lo que es rápido.

## 2.7 Software utilizado

Para realizar las distintas etapas del proyecto es necesario utilizar distintos softwares o programas. A continuación se enumerarán y se explicará muy brevemente que función realiza cada uno de ellos.

### 2.7.1 SolidEdge

Este programa, desarrollado por la empresa Siemens, permite el modelado de piezas y conjuntos de casi cualquier material. Es uno de los sistemas CAD en 2D/3D más completos junto con SolidWorks pues combina la velocidad y la flexibilidad del modelado directo con el control preciso del diseño parametrizado. En la etapa de diseño es necesario un programa que nos permita trabajar con una resolución adecuada y tenga múltiples opciones para diseñar las irregulares superficies del submarino. Entre otras cosas, se ha escogido por su variedad de formatos a la hora de guardar los archivos diseñados, entre ellos el formato stl que es el que detectan las impresoras. Además este programa puede proporcionar datos necesarios para continuar con el proyecto: el peso del sumergible, su volumen, la posición del centro de masas, del centro de flotabilidad y los momentos de inercia.

## 2.7.2 CatalystEX 4.4

Este software es capaz de, partiendo de un archivo diseñado en formato stl, realizar los cálculos necesarios para establecer la orientación de la pieza para ser impresa, las capas en las que se tiene que dividir (véase Figura 2.19) y estimar la trayectoria adecuada que tiene que seguir la boquilla para ir depositando el material. Además, ofrece de antemano la masa de material que se va a usar para imprimir la pieza e incluso la cantidad de material de soporte. Gracias a este dato y conociendo la densidad del material de impresión ABS, se ha podido corroborar el peso del submarino.

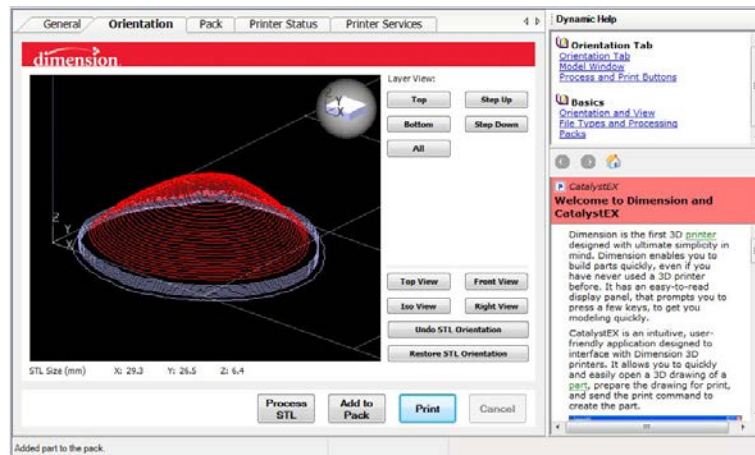


Figura 2.19. Captura del programa CatalystEX, en rojo los hilos de material de impresión y en morado los del material de soporte

## 2.7.3 Matlab y Simulink

Ambos programas son desarrollados por la compañía Mathworks. Matlab es una herramienta de software matemático con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Por otra parte, Simulink es un entorno de programación visual de alto nivel que se basa en bloques y soporta la simulación.

Simulink viene de serie con bloques creados para programar distintas marcas de microcontroladores como Arduino o RaspBerry, pero no tiene los bloques necesarios para el microcontrolador utilizado en este proyecto. Es por eso que se ha tenido que incorporar un blockset de Simulink con todos los bloques adaptados para los controladores ArduPilot Mega (APM), en concreto la versión que se utiliza es el HKPilot Mega 2.7. Estos bloques están pensados para el control de drones, aunque tienen otras aplicaciones como en este caso. De todos estos bloques, los que se van a usar en este proyecto son el de la IMU (unidad de medida inercial), el de los puertos analógicos y digitales, la memoria flash, el de la emisora RC y el del timer. Algunos de ellos se pueden apreciar en la Figura 2.20.

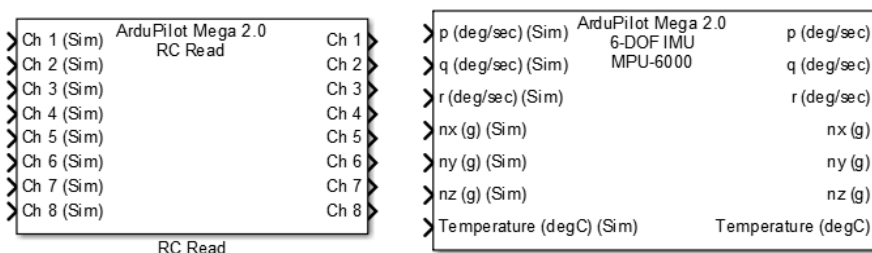


Figura 2.20. A la izquierda el bloque de Simulink de entrada PWM, a la derecha la IMU

Para que el sumergible se comporte de la forma ordenada que se requiera, en Simulink también se ha recurrido a utilizar un bloque que nos permita implementar Máquinas de Estado y así controlar todas las situaciones y establecer el modo de actuación del submarino en cada una de ellas. A modo de ejemplo, la siguiente Figura 2.21 es la máquina de estados que establece el funcionamiento de la bomba de agua, en el Capítulo 5 se verá con detalle.

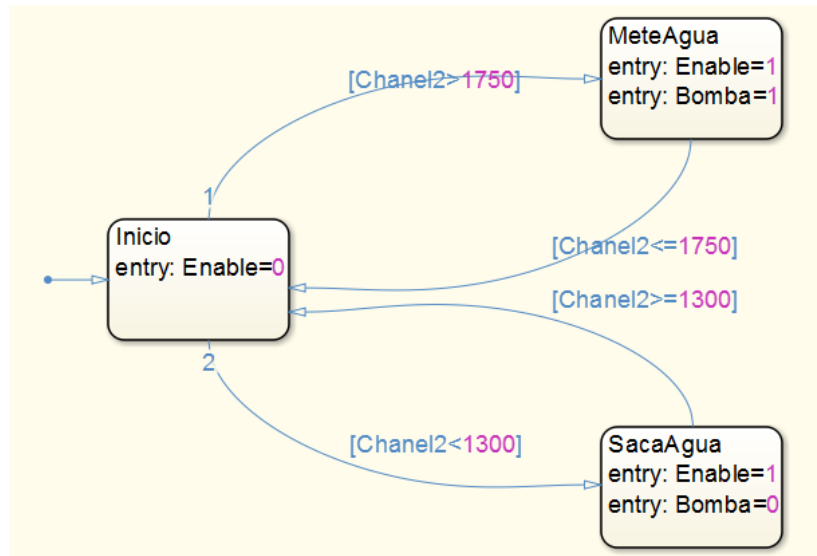


Figura 2.21. Máquina de estados de la bomba de agua usada en el sumergible.

#### 2.7.4 BLHeli Suite

La turbina que impulsa el submarino es movida por un motor brushless, como se detallará más adelante, estos motores necesitan un controlador de velocidad o ESC para funcionar, los ESC funcionan con una señal PWM. El controlador de velocidad usado es de la marca BLHeli y es programable. Con la sencilla interfaz de programación del BLHeli Suite (véase Figura 2.22) se puede configurar el ESC para modificar múltiples parámetros como el ancho de pulso al cual el motor comienza a funcionar, si el frenado es brusco o no e incluso, que el motor sea bidireccional y gire en ambas direcciones [10].

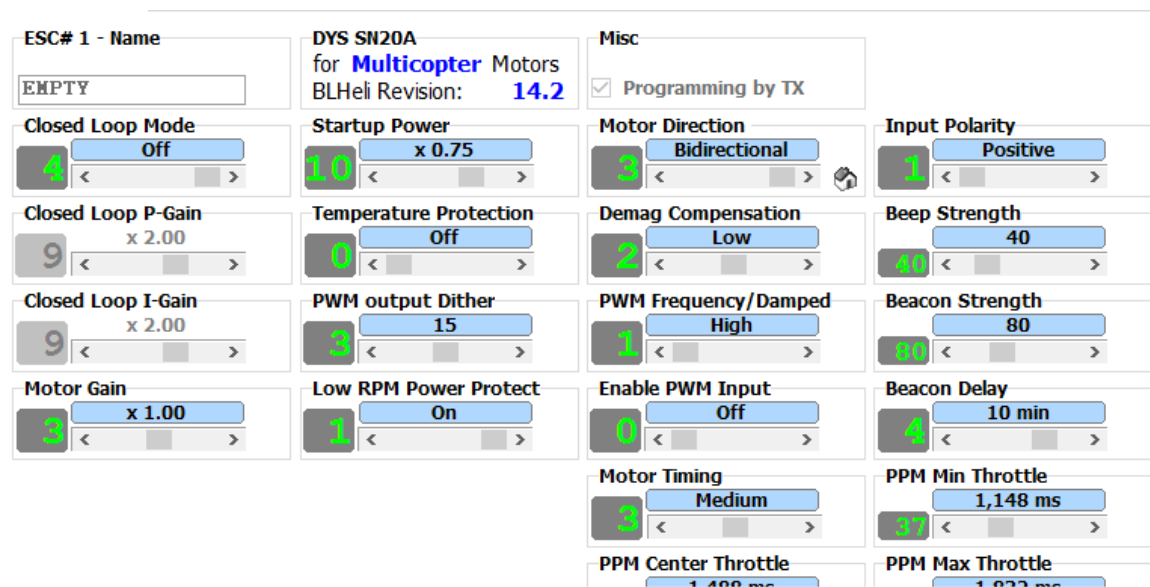


Figura 2.22. Parámetros configurables del ESC mediante BLHeli Suite



# Capítulo 3

## Diseño del sumergible

### 3.1 Consideraciones previas al diseño

Antes de ponerse a diseñar el sumergible en el software de diseño 3D, es necesario tener en cuenta diversos aspectos que garanticen obtener un dispositivo verdaderamente utilizable y no una simple maqueta. Para ello, en este apartado se van a analizar importantes asuntos como: la posibilidad de imprimirlo en 3D, que sea robusto, la posibilidad de hacerlo estanco, que quepan todos los componentes y lo más importante: realizar los cálculos previos necesarios que garanticen una flotabilidad positiva del submarino.

#### 3.1.1 Requisitos de impresión

La impresora que se va a utilizar, que como se ha comentado en el Capítulo 2 es el modelo "Dimension", tiene una gran resolución pues las capas que imprime tienen un espesor de 0,25mm. A efectos prácticos, es necesario un grosor mayor para los espesores de las piezas a imprimir, este espesor tiene que ser, al menos, de 1,6mm [11]. De esta forma se evita fabricar piezas demasiados frágiles, que se puedan llegar a romper.

La plataforma sobre la que se mueve el cabezal de impresión es la parte donde se deposita el material, obviamente tiene que caber el objeto una vez impreso, sus medidas son 200mm de largo, 200mm de ancho y 250mm de alto. Esto significa que si el sumergible era de más de 250mm tendría que ser dividido en piezas, y así resultó.

Las dos consideraciones anteriores se ilustran en la Figura 3.1.

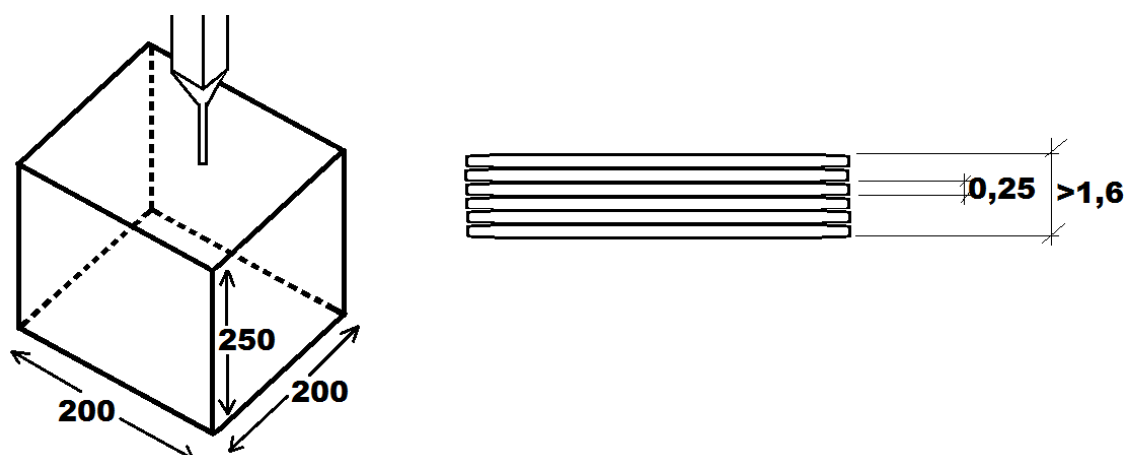


Figura 3.1. Tamaño de la plataforma de impresión (izquierda) y espesor de las capas de material (derecha). Cotas en mm

Normalmente, en el diseño se debe tener en cuenta también que el material de soporte pueda ser retirado una vez finalizada la impresión. Pero el uso de la cuba de ultrasonidos simplifica esta tarea.

### 3.1.2 Estanqueidad

Otro aspecto a tener en cuenta es que para depositar toda la electrónica en el interior del submarino, este tiene que ser completamente estanco. Normalmente en los submarinos RC, se emplean complicados sistemas de varillas por las que se introduce el eje del motor. Estas varillas están llenas de aceite o grasa, gracias a lo cual se permite el giro del eje pero se impide el paso del agua. Como este sistema es complejo y suele dar lugar a muchos fallos, en este proyecto se ha decidido abordar el problema de la estanqueidad de otra forma distinta: empleando componentes electrónicos impermeables.

Gracias a la evolución de la electrónica, en concreto del modelismo naval, es relativamente sencillo conseguir motores brushless y servos resistentes al medio acuático. Aprovechando esta enorme ventaja se decidió abordar el diseño del submarino dejando fuera del compartimento estanco, que es todo el casco del submarino, los ejes de los servos que mueven los timones y el eje del motor que mueve el motor brushless. Esta idea facilitó enormemente el diseño.

Para conocer la resistencia al agua de un componente eléctrico o electrónico existe un estándar conocido como IP o grado de protección. Este hace referencia a la norma internacional IEC 60529 y es un efectivo sistema para clasificar los diferentes niveles de resistencia al agua. Está formado por dos dígitos: el primero describe el nivel de protección ante el polvo, el segundo describe el nivel de protección frente a líquidos (normalmente agua). Este último dígito es el que interesa, en la Tabla 3.1 se muestran los valores que puede tomar [12].

0	Sin protección	
1	Protección ante goteo vertical	
2	Protección ante goteo con una inclinación de 15°	
3	Protección ante pulverización	
4	Protección ante salpicaduras	
5	Protección ante chorros de agua	
6	Protección ante chorros continuos de agua	
7	Protección ante inmersiones temporales	
8	Protección ante inmersiones permanentes	

Tabla 3.1. Estándar IP para la protección ante líquidos

Una vez seleccionados y comprados los componentes electrónicos, se probó su funcionamiento bajo el agua antes de proceder con el diseño. El resultado fue satisfactorio.

Por otro lado también se estimó que el sumergible iba a tener que ser accesible desde el exterior para realizar distintas tareas como introducir los componentes, cargar la batería o programar el microcontrolador. Debido a que estas acciones son frecuentes, se necesita algún sistema para poder abrir y cerrar el compartimento estanco a voluntad del usuario, las veces que haga falta. Esto limita enormemente el tema de la impermeabilización pues ya no se podrán utilizar aislantes permanentes, como la silicona, para cerrar el compartimento. Por tanto, en un principio se pensó en poner una tapa que cerrase el sumergible con un sistema de tornillos, pero debido a la superficie curva del dispositivo iba a resultar casi imposible lograr que la tapa aislase correctamente del líquido.

Para solventar el último problema planteado, se decidió emplear un método muy usado en temas de estanqueidad: las juntas tóricas u O-rings (Véase Figura 3.2). Estas juntas, que habitualmente están hechas de goma, se sitúan en diversos equipos para impedir el intercambio de líquidos o gases en las uniones entre piezas desmontables. Se emplean, entre

otras cosas, en cilindros hidráulicos y cilindros neumáticos, en equipamiento de submarinismo acuático y en tuberías. En el apartado 3.3 se explicará en mayor grado de detalle cómo se ha procedido el diseño del sumergible para poder colocar en este, de forma eficiente, las juntas tóricas y los prototipos que se han impreso hasta llegar a tal conclusión.



*Figura 3.2. Juntas tóricas con distintos diámetros y espesores.*

### 3.1.3 Cámara de vídeo

Como se ha comentado en los objetivos, uno de ellos es que, a la hora diseñar el submarino, se habilite un espacio preparado para colocar en un futuro una cámara de vídeo. Esta permitirá grabar el fondo marino, e incluso, conectándola a un casco de realidad virtual, pilotar el submarino en tiempo real viendo la imagen en directo. Por tanto, en el sumergible diseñado se ha habilitado un espacio reservado para esta futura mejora. En el apartado 3.4, que muestra algunos planos definitivos, se podrá apreciar este recinto.

### 3.1.4 Cálculos previos

*Nota: En este apartado se utilizan los pesos y las dimensiones de los componentes electrónicos empleados. Estos valores se expondrán detalladamente en el Capítulo 4.*

Por último y más importante, antes de comenzar con el diseño, se ha procedido a realizar los cálculos matemáticos necesarios en cuanto a las medidas del sumergible. Estos cálculos se dividen en dos:

- Cálculos de tamaño mínimo:

Sería enormemente frustrante diseñar un compartimento en el que no cupiese la electrónica de la que se dispone. Es por eso que es fundamental tener en cuenta un simple razonamiento: el diámetro interior del submarino tiene que ser mayor que el tamaño del componente más grande que irá dentro. En este caso, el componente más grande es la bomba de agua que, una vez modificada para que ocupe menos, mide 41mm de diámetro. Considerando que se necesitan unos 5mm de holgura para poder trabajar con ella, se obtiene un total de 46mm de ancho mínimo para el interior del sumergible.

Gracias a la realización de prototipos de prueba, que se detallarán en el apartado 3.3, se ha determinado que el espesor de cada lado del sumergible ha de ser de 6mm. Por tanto, el diámetro exterior será de 58mm, tal como muestra la Ecuación 3.1.

$$\begin{aligned}\varnothing_{exterior} &\geq 41 + 5 + 2 \cdot 6 \\ \varnothing_{exterior} &\geq 58mm \\ &\text{(Ecuación 3.1)}\end{aligned}$$

- Cálculos para asegurar flotabilidad positiva:

Una vez conocido que el diámetro exterior del sumergible es 58mm, obtenido en el apartado anterior, se supone un largo de 400mm (a esta medida se ha llegado realizando varias iteraciones con los cálculos que se muestran a continuación).

Como aún no se tiene el sumergible diseñado, se simplificará el cálculo de su volumen aproximándolo a una forma cilíndrica. De esta forma, se calculan los volúmenes de sendos cilindros: uno con el diámetro exterior de de 58mm ( $V_1$ ) y el otro con el diámetro interior de 46mm ( $V_2$ ). Estos valores se obtienen en la Ecuación 3.2 y 3.3, siendo “R” el radio del cilindro y “l” su longitud, en metros ambas.

$$V_1 = \pi \cdot R^2 \cdot l = \pi \cdot 0,029^2 \cdot 0,400 = 1,056 \cdot 10^{-3} m^3 \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

$$V_2 = \pi \cdot R^2 \cdot l = \pi \cdot 0,023^2 \cdot 0,400 = 6,647 \cdot 10^{-4} m^3 \quad \text{(Ecuación 3.3)}$$

Conociendo el dato de la densidad del material con el que se imprime la carcasa, que en el caso del ABS es  $1050 \text{ Kg}/m^3$ , se puede estimar la masa aproximado de la carcasa del submarino. Para ello se resta la masa del cilindro cuyo diámetro es el exterior ( $V_1$ ) entre el otro de diámetro interior ( $V_2$ ) y se multiplica por la densidad del ABS ( $\rho_{ABS}$ ). Este cálculo se refleja en la Ecuación 3.4, donde se ha añadido un factor “k” de corrección de valor 1,05 que se utiliza para compensar el efecto de la cabina superior del submarino.

$$m = \rho_{ABS} \cdot (V_1 - V_2) \cdot k = 1050 \frac{Kg}{m^3} \cdot (1,056 \cdot 10^{-3} m^3 - 6,647 \cdot 10^{-4} m^3) \cdot 1,05 = 0,432Kg \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Si se suma la masa de esta carcasa con la de los componentes electrónicos que se introducen, se obtiene una masa total del sumergible de 857g (véase Ecuación 3.4), multiplicada por la gravedad (g) se obtiene el peso total.

$$P_{total} = (m_{carcasa} + m_{componentes}) \cdot g = (0,432Kg + 0,425Kg) \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 0,857 Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 8,4 N \quad \text{(Ecuación 3.4)}$$

Para calcular el empuje (E) hay que aplicar el principio de Arquímedes: “Un cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido en reposo, recibe un empuje de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja”. Luego sólo es necesario conocer la densidad del agua ( $\rho_{AGUA}$ ) y multiplicarla por el volumen del cilindro con el que se aproxima el submarino, este cálculo se refleja en la Ecuación 3.5.

$$E = \rho_{AGUA} \cdot V_1 \cdot g = 1050 \frac{Kg}{m^3} \cdot 1,056 \cdot 10^{-3} m^3 \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 1,1 Kg \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} = 10,86 N$$

(Ecuación 3.5)

Como el peso total del submarino es menor que el empuje, el sumergible se encuentra en un estado de flotabilidad positiva y, aumentando el peso del sumergible (bombeando agua en su depósito), se podrá hacer que se hunda siempre que se logre que  $P_{total} > E$ . Si se quiere que mantenga el equilibrio a una determinada profundidad, se debe lograr que a esa altura que  $P_{total} = E$ .

### 3.2 Modelos de referencia

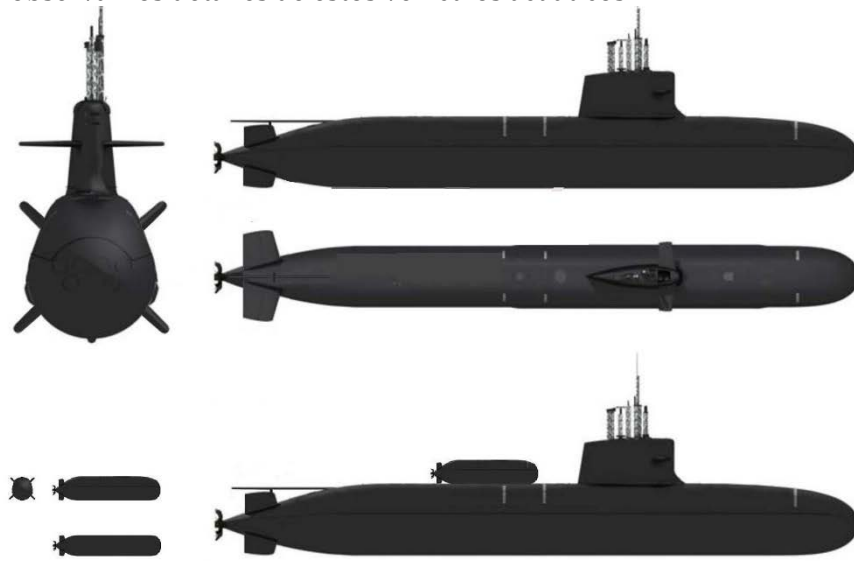
Una vez que se han estimado las dimensiones aproximadas que el sumergible debe tener, es necesario contemplar también la forma que mejor se adapte a nuestras necesidades. Es muy importante este punto, no se trata de un mero asunto estético pues, como se ha visto en el Capítulo 2 sobre la estabilidad, con una construcción apropiada del submarino, este tiene equilibrio natural en la mayor parte de sus grados de libertad, lo que simplificará mucho la tarea a la hora de estabilizarlo.

Para proceder a este análisis se ha decidido basar la forma del sumergible en modelos de submarinos reales de diversas épocas. Estos modelos son muy variados y distintos debido a la multitud de usos para los que se han empleado y las distintas tecnologías que se han usado en su construcción. La Figura 3.3 da una idea de la diversidad de modelos que se pueden encontrar, la mayor parte de ellos, aún se encuentran operativos.

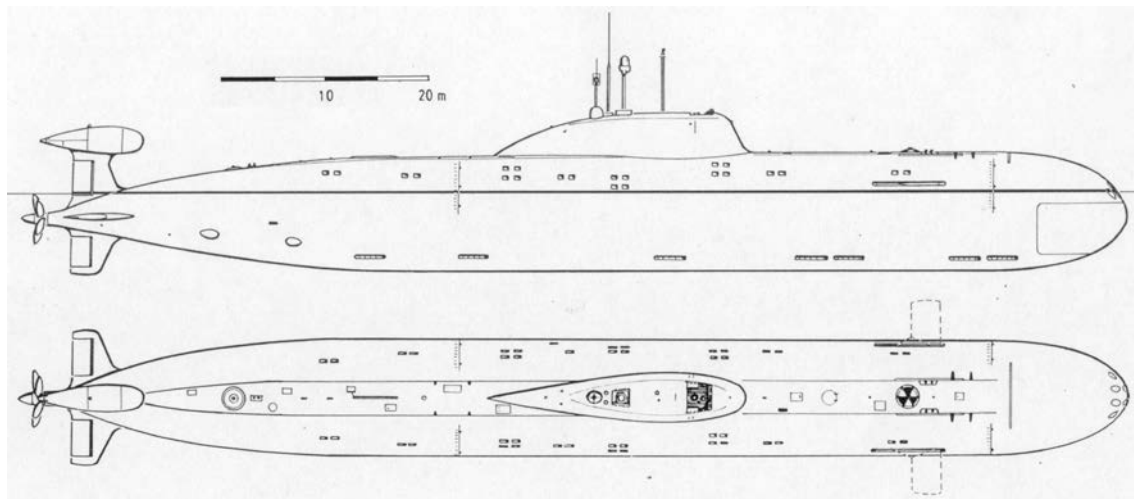


Figura 3.3. Diversos modelos de submarinos SS (de propulsión convencional).

Tras un estudio intensivo de sus perfiles y de sus planos, sobre todo haciendo hincapié en que sean modelos simétricos, se ha hecho un diseño que se basa submarino español S-81 y que incorpora también ideas del Akula ruso. En Figura 3.4y en la Figura 3.5 se pueden observar los detalles de estos vehículos acuáticos.



*Figura 3.4. Vistas del submarino modelo S 81.*



*Figura 3.5. Vistas del submarino modelo Akula.*

### **3.3 Prototipos de prueba**

Como no se dispone de información previa de otros sumergibles que hayan sido diseñados e impresos en 3D y es muy arriesgado y costoso imprimir varias versiones del sumergible, ha sido necesario realizar el diseño y la impresión de diversos prototipos que han servido para comprobar tres cosas fundamentalmente: el espesor necesario de las paredes del casco del submarino y el sistema de juntas tóricas que es necesario implementar en las uniones de las piezas del sumergible. En este apartado se explicará en que ha consistido cada prototipo.

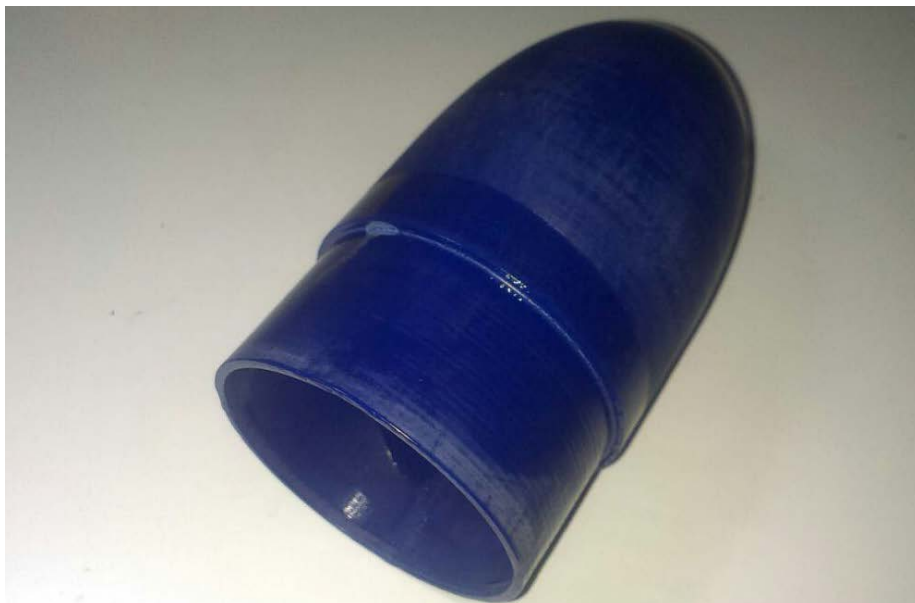
### 3.3.1 Prototipo impermeabilización ABS

Aunque se tratará con más detalle en el Capítulo 4, que aborda el tema de la construcción, en este apartado se dará una pequeña pincelada sobre la impermeabilización del material de impresión utilizado, el ABS.

La impresora 3D, al ir colocando hilo a hilo el material, no puede evitar dejar pequeños espacios entre las distintas capas que configuran la pieza. Esto no presenta ningún inconveniente en la mayoría de usos pero en el requerido para este proyecto sí, el agua puede entrar por cualquier recoveco por pequeño que sea.

Para lograr que este material no sea poroso, se aplicó una ingeniosa idea, aportada por el profesor Mariano Jiménez Calzado de la Universidad Pontificia de Comillas, que consiste en bañar la pieza impresa en acetona para que esta reaccione con el ABS fundiendo sus hilos, eliminando los huecos y dejando una superficie pulida y completamente estanca.

Para probar que este baño en acetona era eficaz en una pieza con el espesor para el que se estaba diseñado el submarino, se diseñó un prototipo de pequeño tamaño para realizar este experimento. En la Figura 3.6 se puede apreciar como la parte inferior de la pieza, que es la parte con mínimo espesor: 2mm, se sometió a un baño de acetona pues tiene un acabado distinto y más pulido.



*Figura 3.6. Prototipo utilizado para impermeabilizarlo. Nótese que la parte más pulida es la que estuvo en contacto con acetona.*

El experimento fue un éxito y se concluyó que con un espesor mínimo de 2mm no debería haber ningún problema a la hora de impermeabilizar el submarino.

### 3.3.2 Prototipos: juntas tóricas y espesores

Una vez determinado que el ABS se puede impermeabilizar y el espesor mínimo para que esto suceda, llega al momento de probar el sistema que logra que el submarino sea estanco: las juntas tóricas.

Como se ha explicado anteriormente, estas juntas de goma son uno de los sistemas más usados para aislar todo tipo de dispositivos del agua, eso sí, siempre y cuando se coloquen en una ranura o compartimento determinados. El efecto hermetizante de la junta tórica, se basa en la deformación axial o radial de su sección. Esta deformación se obtiene por un diseño adecuado del espacio de montaje [13]. La fuerza de reacción así producida, proporciona la presión de apriete necesaria para lograr que el compartimento sea estanco (véase Figura 3.7).



Figura 3.7. Funcionamiento de una junta tórica ante la presión  $P$  ejercida por un fluido.

Para dimensionar las medidas que tienen que tener estas ranuras se consultó a un catálogo industrial realizado por la Sanmetal S.A. que se dedica a la fabricación de anillos tóricos [14]. Para usar esta tabla, en primer lugar había que distinguir si se trataba de una junta tórica que estaba sometida al esfuerzo de un fluido estático o dinámico, como el sumergible va a estar siempre en movimiento, aun cuando este dentro de agua inmóvil, se supuso dinámico. Conociendo el diámetro de las juntas tóricas que se compraron (1.6mm), se consulta la fila específica, de la que se obtienen las medidas de anchura ( $C$ ) y altura ( $L$ ) que fueron 2.1mm y 1.2mm respectivamente, valores que finalmente se usaron en el diseño (véase la Tabla 3.2).

Sección $s$	$L$	$C$
1,5	1,1	1,9
1,6	1,20	2,10
1,78	1,40	2,50
1,90	1,50	2,55
2	1,60	2,70
2,40	2	3,20
2,62	2,20	3,50
3	2,50	3,80
3,53	2,90	4,50

Tabla 3.2. Dimensiones de la ranura rectangular en la que posicionar una junta tórica para fluidos dinámicos.

Para asegurar el sistema y evitar posibles fugas, se decidieron poner dos juntas tóricas consecutivas, la primera con que se encajase de forma más ligera y la segunda con un apriete mayor.



Además, se decidió aprovechar este prototipo, para probar si un espesor de 2mm era suficiente para soportar la fuerza de fricción que produce la junta tórica al abrir y cerrar el sumergible. Para ello se realizó el diseño que se ilustra en la Figura 3.8 y en la Figura 3.9. En la que a la izquierda se usó un espesor mínimo de 2mm (espesor total de la pared de 4mm) y la derecha se usó un espesor mínimo de 3mm (espesor total de la pared 6mm).

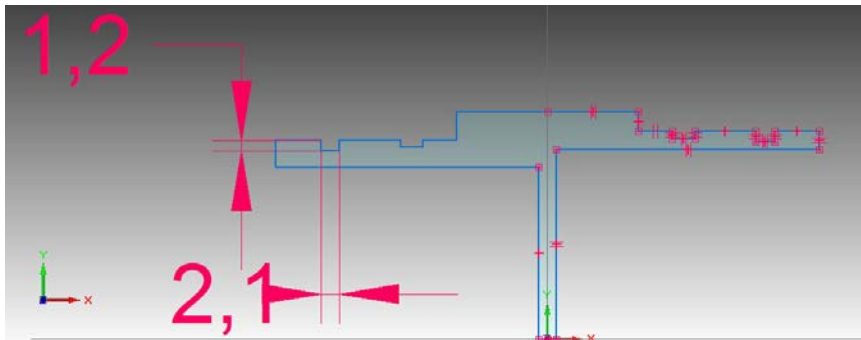


Figura 3.8. Boceto del perfil de diseño de la ranura para juntas tóricas. Nótese que las medidas (1,2mm y 2,1mm) coinciden con las obtenidas en la tabla anterior.

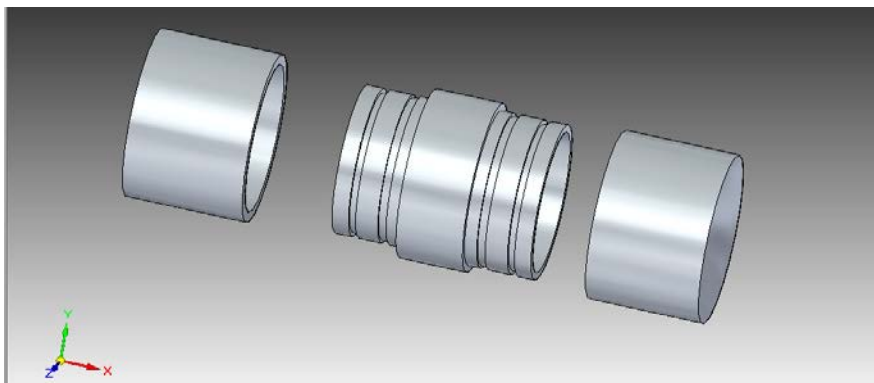


Figura 3.9. Vista en 3D del prototipo para juntas tóricas. Parte izquierda con espesor de 2mm y derecha con 3mm.

Una vez impreso el prototipo se bañó en acetona (como se ha visto en el apartado anterior) e hicieron varias pruebas, metiéndolo en el agua, para ver si era estanco. El resultado fue positivo y se comprobó que era frenaba el paso del agua. De hecho, fue muy útil el experimento, puesto que el borde de 2mm se rompió y, por culpa de la junta tórica, no resistió el esfuerzo de tracción a la hora de abrirse (ver detalle de la Figura 3.10), mientras que el de 3mm sí que lo soportó. Es aquí donde se deduce que el espesor del submarino será de 6mm (3+3), tal como se adelantó en el apartado 3.1.



Figura 3.10. Prototipo de juntas tóricas impreso. Nótese la rotura en la parte izquierda.

### 3.3.3 Diseños 3D para comprobar cálculos

Antes de proceder con el diseño definitivo, se hicieron diversos diseños con otras medidas. Con ellos se pudieron comprobar que los cálculos hechos en las distintas iteraciones del apartado 3.1 habían sido realizados de manera correcta y se trataban de una aproximación correcta. Esto fue realizado gracias a la herramienta de SolidEdge de calcular la masa y el volumen de la pieza diseñada de forma directa, sin cálculos de por medio. Con esto se volvió a comprobar que con las medidas apropiadas (longitud de 400mm y diámetro de 58mm se garantizaba un estado de flotabilidad positiva.

## 3.4 Planos definitivos

Gracias a todo el análisis previo al diseño final, se consiguió modelar en la herramienta SolidEdge un sumergible que cumplía todas las especificaciones necesarias para su función. A continuación se enumera una lista con las conclusiones, a las que se ha llegado en los apartados anteriores, que se tuvieron en cuenta:

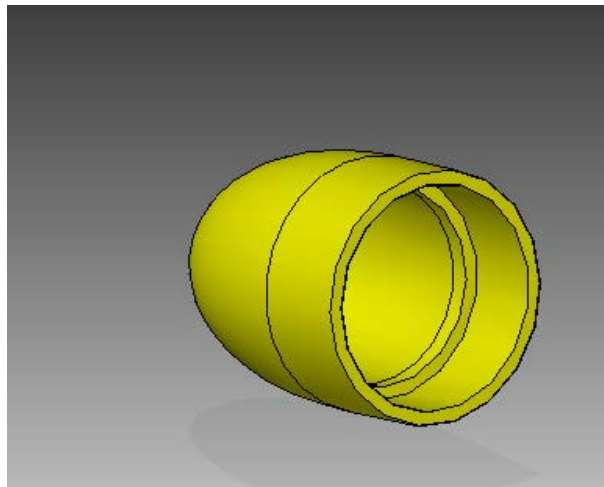
- El diámetro interior del submarino debe ser de 46mm, el espesor debe ser de 6mm en cada pared y por tanto, el diámetro exterior es de 58mm.
- La longitud del submarino debe ser de 400mm. Por tanto, como el tamaño de la plataforma de impresión es de 200mm, y considerando que entre las piezas tiene que haber solapes, se debe dividir el sumergible en tres partes desmontables que se puedan encajar. Además, una de ellas albergará espacio suficiente en su interior para colocar una futura cámara.
- Con las medidas anteriores se garantiza una flotabilidad positiva.
- Para unir estas piezas se recurrirá al uso de juntas tóricas. Para asegurar se pondrán dos juntas en cada unión y las medidas de sus compartimentos serán 1,2mm de alto y 2,1mm de ancho. (El hueco de la segunda junta tórica será ligeramente más pequeño para que esta haga más apriete).
- En las uniones entre piezas se dejará además una holgura de 0,1mm.
- El contorno o forma del sumergible se basará en diseños de submarinos reales: el S-81 Español y el Akula Ruso. Gracias al uso de planos de estos modelos, se logrará una estabilidad natural.

Cumpliendo estas especificaciones y, tras varias versiones y retoques diversos, se llegó por fin al modelo 3D definitivo, el cual está preparado para ser impreso en tres dimensiones y poder ser navegado.

A continuación se enumeran todas las partes del sumergible que fueron diseñadas en 3D y, con la finalidad de hacerse una idea de cómo será el prototipo una vez impreso, se añadirá una captura 3D o plano sin acotar de cada pieza. De todas formas, en el anexo A, se adjuntan los planos completos de cada parte, con todas las vistas y cotas.

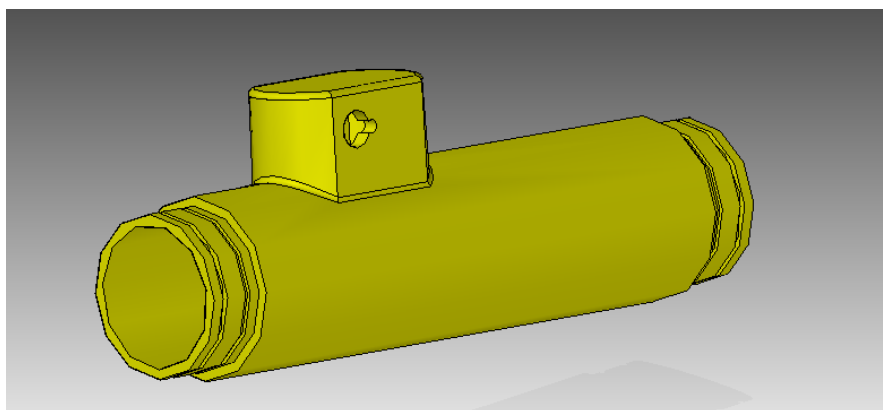
Lista de piezas diseñadas:

- Parte delantera: Forma ovalada para no ofrecer excesiva resistencia a la presión del agua. Tiene espacio interior suficiente para la instalación de una futura cámara. En el momento de instalar esta cámara, se imprimirá con las mismas medidas la pieza pero con material transparente, de esta forma no es necesario que la cámara sea resistente al agua. Véase Figura 3.11.



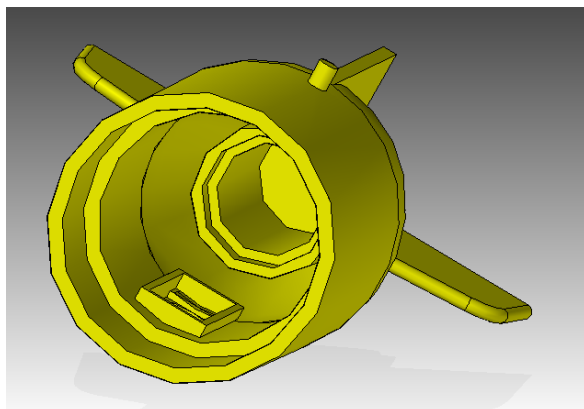
*Figura 3.11. Diseño de la parte delantera del sumergible.*

- Parte Media: Incluye las ranuras necesarias para insertar las juntas tóricas. Debido a esto, sirve de unión entre la parte delantera y la trasera que se pueden encajar en ella para formar, entre las tres, la totalidad del casco. Incluye además la cabina o parte superior del sumergible, en ella se encuentra una apertura por la que se puede sacar el eje de un servo, en este eje se conectarán los timones de horizontales o de proa. Por último, se ha añadido también un agujero circular en la parte inferior, por el que saldrá y entrará el agua, mediante el uso de una manguera de acuario conectada a la bomba. Véase Figura 3.12.



*Figura 3.12. Diseño de la parte media del sumergible.*

- Parte Trasera: Incluye en su interior un compartimento en el que se introduce el motor brushless impermeable. Se saca por un agujero el eje del motor y se cierra el compartimento con una tapa, que solo permite el paso de los cables. Incluye además, una apertura en la que se puede encajar un servo y sacar su eje al exterior, en este eje se conectarán los timones de verticales o de popa (timones de dirección). Véase Figura 3.13.



*Figura 3.13. Diseño de la parte trasera del sumergible.*

- Tapa para el compartimento del motor: En ella también se ha dejado una ranura para colocar una junta tórica. Tiene también un tope para poder sacar la tapa cómodamente.
- Timón de Proa (2 unidades): Este timón horizontal tiene una superficie suficiente para provocar una fuerza que desplaza el sumergible hacia arriba o hacia abajo, dependiendo de la orientación del timón. Incluye dos agujeros: uno para engancharse al eje del servo y girar solidario a él y otro para transmitir el movimiento al otro timón mediante una barra. Así se logrará que los timones se muevan de forma simétrica.
- Timón de Popa (2 unidades): Este timón vertical tiene una superficie suficiente para provocar una fuerza que desplaza el sumergible a izquierda o derecha, dependiendo de la orientación del timón. Incluye tres agujeros: uno para engancharse al eje del servo y girar solidario a él y otros dos para transmitir el movimiento al otro timón mediante sendas barra. Así se logrará que los timones se muevan de forma simétrica.

*Nota: Aunque las barras que unen los timones fueron impresas también, debido a su fragilidad fueron sustituidas por barras metálicas.*

Seguidamente, una vez diseñadas las piezas por separado, se procedió a ensamblarlas como un conjunto para poder visualizar el formato que tendría el sumergible. Este conjunto se puede apreciar en la Figura 3.14.

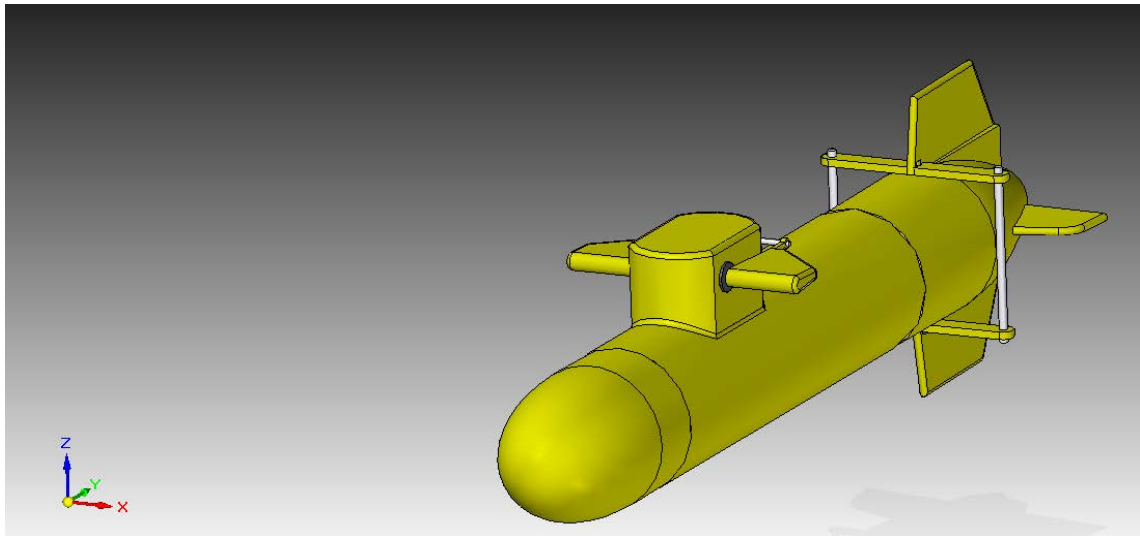


Figura 3.14. Ensamblaje del diseño completo del sumergible.

Llegado a este punto, una vez ensamblado todo el casco, fue necesario diseñar en 3D los componentes que van dentro del sumergible pero que no iban a ser impresos (bomba de agua, servos, motor brushless, batería,...) para simular su efecto. Se introdujeron sus pesos y se ensamblaron al conjunto. De esta forma se pudieron ir moviendo y recolocando estos componentes hasta conseguir bajar lo más posible el centro de masas y alinearlos con el centro volumétrico, tal como se aprecia en la Figura 3.15. Estos componentes son: dos servos, motor brushless, bomba de agua, microcontrolador y batería. Su colocación correcta se observa en la Figura 3.16.

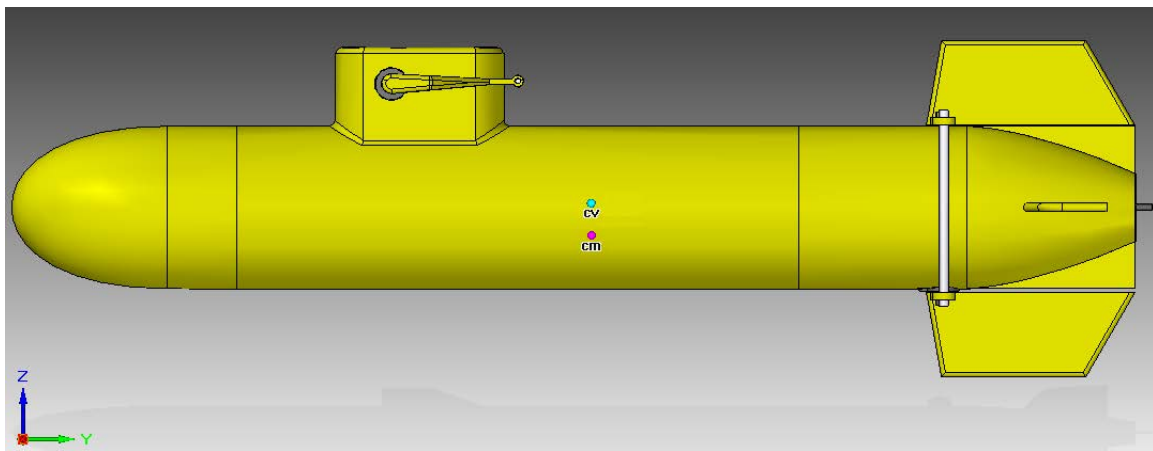


Figura 3.15. Posición del centro de masas (cm) y del centro volumétrico (cv) del conjunto.

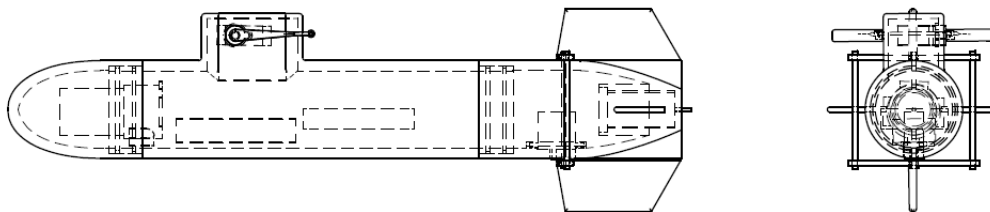


Figura 3.16. Disposición interior de los componentes electrónicos del sumergible.



# Capítulo 4

## Construcción del sumergible

En este capítulo se van a exponer todas las tareas que se realizaron hasta que se consiguió construir por completo el sumergible y habilitarlo para su funcionamiento. Este proceso va desde la impresión del casco hasta la instalación de todos los componentes electrónicos, pasando por diversos métodos de impermeabilización. Además, se detallarán todos los elementos presentes en el submarino.

### 4.1 Impresión 3D y construcción del casco

Tras realizar el diseño en tres dimensiones de todas las piezas, se pasaron a formato stl y, en diversas tandas, se fueron introduciendo en el programa CatalystEX 4.4, cuyo funcionamiento se explicó en el Capítulo 1. Este programa ofrece varias opciones para orientar las piezas e imprimirlas, se decidieron aquellas orientaciones que situaban los hilos de la forma más resistente a los esfuerzos. Además se tuvo en cuenta las orientaciones que gastaban menos material de soporte.

Tras un tiempo, aproximadamente 9 horas para cada una de las piezas grandes, se fueron sacando las piezas de la impresora y colocando en la disolución de sosa de la cuba de ultrasonidos. Gracias a este proceso, explicado en el apartado 2.4.1, se logra eliminar la totalidad del material de soporte sin dañar la pieza. Tras ello, las piezas se lijaron y se bañaron con sumo cuidado en una disolución de acetona, la acetona fundió los hilos y dejó una superficie impermeable, sin poros y con un acabado pulido, tal como se había comprobado gracias al prototipo que se explicó en el Capítulo 3. Para dotar al sumergible de mayor grado de realismo, se pintó de color negro con una capa de imprimación y un esmalte especial para plásticos.

El siguiente paso consistió en colocar las juntas tóricas. Como el diámetro de las ranuras del sumergible no es una medida estándar, no existen juntas fabricadas con el diámetro exacto. Por tanto, se compró un rollo tórico, gracias al cual se pueden cortar trozos de goma a la medida deseada y pegarlos para construir tu propia junta tórica. Esto se realizó para las cuatro ranuras disponibles en el casco del sumergible y para la ranura del compartimento del motor brushless.

### 4.2 Instalación de los componentes y habilitación para la navegación

Una vez construido el casco, se debe proceder a colocar los componentes electrónicos en los lugares que se han habilitado para tal efecto.

En primer lugar se situó el motor brushless en su compartimento. Se introdujo el eje del motor por el hueco habilitado hacia el exterior del sumergible y se cerró la tapa del

compartimento. Una vez sacados los cables del motor brushless se selló el espacio sobrante con una gran cantidad de silicona. De esta forma todo el motor estará en un compartimento en el que puede entrar agua debido a la holgura del eje. En cambio, los cables del motor estarán en el compartimento estanco.

A continuación, los servos se encajaron en los espacios diseñados para ellos, dejando su eje en el exterior del sumergible. El resto del servo y sus cables, se sitúan en el compartimento estanco.

Como es caro y no es fácil encontrar servos impermeables, se decidió impermeabilizar los servos de forma manual [15]. Para ello es necesario desarmarlos y cebarlos de grasa, una vez llenos de grasas se vuelven a montar y se recubren de cinta aislante. De esta forma, la grasa impide el paso del agua al interior del servo y al ser semilíquida, no impide el movimiento de los engranajes. Además, como la grasa no es conductora, no se producen cortocircuitos. En la Figura 4.1 se muestra un servo impermeabilizado con grasa. Aunque los servos encajaron de forma precisa, para evitar que entrasen gotas de agua, se recubrió el borde de silicona.



*Figura 4.1. Servo impermeabilizado mediante grasa.*

En cuanto a la bomba de agua, se situó en el interior del compartimento estanco junto a un globo que hace de depósito. Se conectó un lado de la bomba al globo usando silicona y el otro lado a una manguera que se sacó al exterior por el agujero habilitado para tal efecto. Los aislamientos se hicieron con silicona.

Una vez situados y pegados los componentes fijos del interior del sumergible, se situó un timón horizontal y otro vertical en los ejes de los servos y mediante el uso de barras metálicas, se conectaron el resto de timones.

Este es el momento en el que ya, por fin, se tiene construido todo el casco del sumergible y sus actuadores electrónicos están instalados, tal como se muestra en la Figura 4.2 y la Figura 4.3. A partir de este momento ya se comenzó con las pruebas de estanqueidad, gracias a la cuales se encontraron los recovecos por donde el agua entraba aún y se sellaron para no dañar el resto de la electrónica que será introducida.





*Figura 4.2. Vista lateral del sumergible completo.*



*Figura 4.3. Vista frontal del sumergible completo.*

### 4.3 Elementos del submarino

Después de finalizar la instalación de los actuadores, es el momento indicado para exponer los elementos electrónicos que hay dentro del sumergible y todos los que se han usado para el desarrollo de este proyecto.

#### 4.3.1 Servos

Para lograr el movimiento de los timones horizontales y verticales, como es necesario controlar su ángulo de giro, se han decidido emplear dos servos de pequeño tamaño o microservos. Se aprecian en la Figura 4.4.



*Figura 4.4. Microservo empleado para el giro de timones*

Los dos servos, cuyo funcionamiento se explicó en el Capítulo 2, son el modelo MG90D de la marca Towerpro, Tienen una gran fuerza de 2,4 Kg de torque a pesar de su pequeño tamaño (30 mm de largo) y de tan solo pesar 13g. Su giro máximo es de 90º pero se truca para que sea de 180º.

Su conexionado es sencillo: se alimentará con 5V y su señal de control se enviará desde una salida PWM del microcontrolador. En realidad, la señal se manda desde una emisora, pero para poder controlar con este mando el giro del timón de forma precisa y ajustarlo a un movimiento realista, se necesita modificar la señal PWM proveniente de la emisora en el microcontrolador. En el Capítulo 5 se explicará cómo se ha modificado esta señal, programándolo en Simulink y cargándolo al micro.

#### 4.3.2 Motor brushless

Este tipo de motor se caracteriza por, tal como su nombre indica, carecer de escobillas y de colector. Aunque se suele clasificar como un tipo de motor de corriente continua por funcionar con imanes permanentes, en realidad funciona con corriente alterna:

Los imanes son atraídos por la polaridad del campo magnético generado en las bobinas. Dichas bobinas deberían recibir una señal sinusoidal, pero en la práctica son pulsos. De esta forma se logra que la señal sea continua pulsante (o bien una continua con una gran cantidad de componente alterna), es por ello que se dicen que están alimentados con una señal trifásica. Si se quiere que gire más rápido, se aumenta la frecuencia de los pulsos para así hacer girar el campo magnético a mayor velocidad. Para modificar sus pulsos es necesario un controlador de velocidad o ESC.

Estos motores poseen la gran ventaja de, al no tener escobillas, evitar las pérdidas por rozamiento. Esto facilita enormemente su mantenimiento y alarga su vida útil.

El modelo que se ha usado en este proyecto (véase Figura 4.5) es el modelo Turnigy XK2040, con 4500 KV, una corriente máxima de 32 A, un voltaje máximo de 8,4V y una potencia de 168W.



*Figura 4.5. Motor brushless Turnigy XK2040.*

### 4.3.3 Controlador de velocidad (ESC)

Un Controlador de velocidad electrónico o ESC (Electronic Speed Control), es un dispositivo que controla la frecuencia de los pulsos PWM que recibe el motor brushless. Para ello tiene tres conexiones distintas:

- Dos cables por los que viene la alimentación de la batería.
- La señal de control que reciben de los PWM (entre 1 y 2ms) del microcontrolador, con esta señal ajustan la frecuencia de alimentación del motor brushless.
- Tres cables (trifásico) con la que alimentan al motor brushless según la señal de control recibida.

Cabe destacar que los ESC se pueden reprogramar para que el motor brushless se comporte exactamente como quiera el usuario. La mayor parte de ESC del mercado están pensados para dos usos principales: para cuadricopteros o para coches [16]. Es por eso que en este proyecto ha sido necesario reprogramar el ESC. Para ello se ha usado el programa BLHeli Suite y se han cambiado los parámetros que se han considerado que distinguen el vuelo de un cuadricopteros con la navegación del submarino: El arranque y la detención no tienen que ser bruscos, si no suaves; la velocidad del sumergible no tiene que ser tan rápida y cambiar tan bruscamente como la de un cuadricopteros, sino más lenta y constante; por último, se ha añadido la opción de que el motor pueda girar en los dos sentidos y así el sumergible pueda avanzar o retroceder.

El controlador de velocidad que se ha usado es el modelo BLHeli 30 A.

#### 4.3.4 Bomba de agua peristáltica

Tal y como se comentó en el Capítulo 2, el sumergible va a tener un método de inmersión o lastre estático, pues el sistema que más se aproxima a la realidad. Esto quiere decir que es necesario hacer uso de un sistema de bombas de agua para variar el peso y así poder pasar de flotabilidad positiva a negativa y viceversa.

En un primer momento se intentaron usar dos bombas de acuario, una para sacar el agua y otra para expulsarla, pero el experimento fue un fracaso debido a que estas bombas para funcionar tienen que estar cebadas ya de agua o sumergidas en ella. Después de investigar, se llegó a la conclusión de que la que más encajaría en el uso que se le va a dar es la bomba de agua peristáltica.

Las bombas peristálticas basan su funcionamiento en tres rodillos que van apretando un tubo por el que hay un fluido determinado, como si se tratase de un tubo de pasta de dientes. (Véase Figura 4.6). Gracias a este sistema de impulsión del agua se logran cuantiosas ventajas: que la bomba sea reversible si se invierte el sentido de giro de los rodillos, que no necesiten estar cebadas para funcionar y que no requieran de válvulas antirretorno para impedir el retroceso del agua.

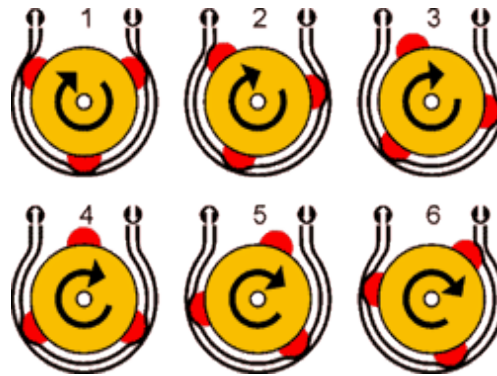


Figura 4.6. Funcionamiento de las bombas de agua peristálticas.

Se buscó entonces una bomba que cupiese en el interior del submarino y se obtuvo un modelo de bomba peristáltica de pequeño tamaño. Esta bomba, que se muestra en la Figura 4.7, está pensada para la dosificación de fluidos, por ejemplo en hospitales. Es apropiada para el uso que se le va a dar pues, al hacer girar sus rodillos con un motor de corriente continua de 12V, se puede controlar desde el microcontrolador mediante un circuito, basado en un puente en H [17], que se explicará en el próximo apartado 4.4.



Figura 4.7. Bomba de agua usada con el depósito ya conectado a ella.

## *Sobre los motores DC*

Los motores de continua, al contrario que los brushless, utilizan escobillas para realizar una conmutación mecánica de la corriente y generar el par necesario gracias a unos imanes permanentes. Sólo se permite el paso de corriente por algunas de las bobinas, aquellas que están en contacto con las escobillas. De este modo, a medida que va girando el rotor, se produce una conmutación mecánica, y se mantiene fijo su campo magnético para así ser siempre perpendicular al del estator.

### **4.3.5 Tarjeta de control HKPilot**

Uno de los objetivos del proyecto es implementar un control, tanto remoto como automático, para que el sumergible navegue en la superficie y en el interior del agua. Para ello, es necesario una tarjeta de control desde donde ejecutarlo.

A lo largo del documento, se ha estado mencionando continuamente “microcontrolador”, pero no se ha especificado cual. El mercado ofrece muchas opciones de microcontroladores pero finalmente se ha elegido el HKPilot, una versión del más conocido ArduPilot. Esta tarjeta, aunque está pensada en concreto para drones y coches, es perfecta para el sumergible pues incorpora entradas PWM para conectar el receptor de la emisora, las salidas PWM que van a los servos y al ESC y las salidas digitales donde se conecta el puente en H que permite controlar la bomba de agua. Por si fuera poco, incluye una IMU y una memoria flash interna:

- La IMU (Unidad de Medida Inercial) incluye una serie de giróscopos gracias a los cuales se puede conocer en todo momento la orientación del sumergible y unos acelerómetros que detectan si el submarino esta quieta o su aceleración si se está moviendo (si se integra esta medida se podrá obtener la velocidad del sumergible).
- La Memoria Flash permite guardar los datos cualquier dato que registre la tarjeta. De esta forma se pueden guardar distintas variables para el modelado de plantas mediante ensayos, por ejemplo PRBS, o variables de control. Los datos se registran en una matriz por filas, la primera indica el nombre de la variable y las siguientes almacenan los datos de esa variable en los instantes de tiempo que se especifiquen.

### **4.3.6 Regulador de tensión (U-BEC 5V)**

Dado que tanto la tarjeta HKPilot como los servos trabajan con una tensión de 5V, es necesario disponer de un regulador de tensión o U-BEC, que se trata de un regulador de tensión que convierte una tensión continua en otra distinta, de esta forma transforma los 7,4V provenientes de la batería en 5V. La conexión entre los pines de salida y la alimentación de la tarjeta se puede habilitar y deshabilitar con un jumper, por tanto, para que los servos estén alimentados, se cuándo lo esté la tarjeta, se habilita la conexión.

### 4.3.7 Batería LiPo y cargador

Como para cualquier vehículo radio control, uno de los principales objetivos del sumergible es conseguir una autonomía suficiente para poderlo manejar en exteriores. Es por eso que es necesario encontrar una batería potente, de pequeñas dimensiones y poco pesada. Estas características son primordiales pues, como se ha visto en los cálculos previos, hay que lograr que los componentes del sumergible sean ligeros para lograr flotabilidad positiva.

Hay una gran variedad de baterías que se usan en el mundo del radio control: las Ni-Cd (Níquel Cadmio), las Ni-MH (Níquel Metal hidruro), las Li-ion (Ion Litio) y las Li-Po (Polímero de Litio). Pero de entre todas ellas, debido a tener ventajas como la ligereza y su mayor potencia, se ha elegido la batería LiPo.

Esta batería basa su funcionamiento en que a través de su electrolito no circulan electrones, sino iones. Está formado por un determinado número de elementos o celdas de 3,7 V cada uno. Debido a ello, tiene una densidad de energía unas diez veces mayor al resto de baterías del mismo tamaño. Por tanto, gracias a que la relación energía-peso es magnífica, resulta muy ventajosa para el desarrollo de este proyecto.

A pesar de ello posee ciertos inconvenientes como su baja velocidad de carga, que si se descarga demasiado se puede estropear, o que no puede tolerar picos de tensión demasiado altos. Se tiene que tener un cuidado excesivo con ella, pues son muy frecuentes las explosiones de este tipo de batería sobre todo en delicados momentos como su carga. Eso sí, gracias a no tener efecto memoria, con un buen cuidado, la batería puede llegar a tener una vida útil bastante elevada.

En este proyecto se ha usado una batería de dos celdas (2S) y 950 mAh (miliamperios hora), tal como se puede apreciar en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Batería LiPo de 2 celdas y 950 mAh.

#### Cargador balanceador

Debido a lo delicada que es una batería LiPo, para cargarla es imprescindible utilizar

un cargador–balanceador, el cual presenta la ventaja de que, además de ir cargando cada una de las celdas por separado, va estabilizando su tensión para mantener exactamente la misma carga en cada una de ellas. En este proyecto se ha utilizado el modelo IMAX B6.

#### 4.3.8 Sistemas de comunicaciones

En primer lugar, para descargar el código programado en Matlab y Simulink en la tarjeta de control, es necesario usar un cable USB – micro USB que permita tal acción. Además a través del puerto serie del ordenador y un programa como el PUTTY, es posible intercambiar información con la memoria flash del HKPilot.

Por otro lado, para dar las órdenes de navegación (manejar todos los actuadores) y para accionar el calibrado de los giróscopos y los acelerómetros, es necesaria una emisora radiocontrol que esté conectada al microcontrolador por medio de un receptor. Debido a que submarino tiene que poder manejarse cuando está sumergido en el agua, el tema de las comunicaciones inalámbricas es un tema sumamente delicado: al traspasar el medio acuático las ondas se atenúan más cuanto mayor sea su frecuencia. Hoy en día, las emisoras más estandarizadas en las actividades radiocontrol son las de 2,4 GHz, una emisora de estas características no podría comunicarse con el submarino en cuanto estuviera mínimamente sumergido. Pero, al disminuir la frecuencia, aumenta la longitud de onda y, por tanto, su profundidad de penetración en el agua. Es por eso que se deben usar rangos de frecuencias muy bajos para enviar ondas a este tipo de dispositivos sumergidos.

En los últimos años, debido a la gran cantidad de interferencias que se producían con las emisoras de radio control de 35 MHz, se ha migrado a las de 2,4 GHz. Las emisoras de 35 MHz ya no se fabrican y es por eso que, en este proyecto, se ha tenido que comprar una emisora antigua: el modelo Racon x6 de 35 MHz. Esta frecuencia, aunque no es baja del todo, da mucho mejor resultado que cualquier otra del mercado pues tiene la capacidad de penetrar unos 5 metros en agua dulce. (En agua salada 2 metros). En la Figura 4.9 se muestra la emisora que se comunica al receptor que se conecta al microcontrolador, ambos con el mismo cristal.



Figura 4.9. Emisora de 35 MHz

Gracias a los 6 canales (sticks, pots y switches) que tiene esta emisora, es posible controlar todos los actuadores del sumergible e incluso establecer interruptores para que hagan distintas tareas.

## 4.4 Circuito de funcionamiento bomba (Puente en H)

Tal como se ha comentado en el apartado 4.3.4, los rodillos que impulsan el agua en la bomba peristáltica son movidos por un motor de continua de 12V. Se trata de una bomba cuyo caudal es proporcional a la tensión aplicada y a su polaridad, es decir, si se aplica una tensión de 3V, sacará agua a poca velocidad, si la tensión es de 12V sacará agua a su velocidad máxima y si es a -12V introduce agua en el depósito a velocidad máxima. Como se trata de una bomba dosificadora y no se quiere dosificar el agua, sino meterla o sacarla del depósito del sumergible a la máxima velocidad posible, se utilizará siempre la máxima tensión disponible, en valor absoluto, proveniente de la batería. Eso sí, se tiene que poder invertir la polaridad en el motor de corriente continua para invertir también su sentido de giro y así poder revertir el efecto de la bomba en el depósito, de sacar agua a meterla y viceversa. Además, la mayor parte del tiempo la bomba tendrá que estar desactivada.

Por todas estas razones, no es suficiente con conectar el motor de DC todo el tiempo a la batería y que esté funcionando continuamente, pues será necesario poder cambiar su polaridad y poder detenerlo. Para ello es necesario un circuito de control que le haga funcionar de forma apropiada. En un principio se probó con un sistema, que se puede visualizar en la Figura 4.10, que se basaba en 2 relés que conmutaban cuando se les aplicaba una señal de 3,3V desde el microcontrolador. Aunque se logró implementar y que funcionase en determinadas ocasiones, se provocaban cortocircuitos al no ser exacta el momento de conmutación de los 2 relés y no tener diodos que los protegieran en este transitorio.

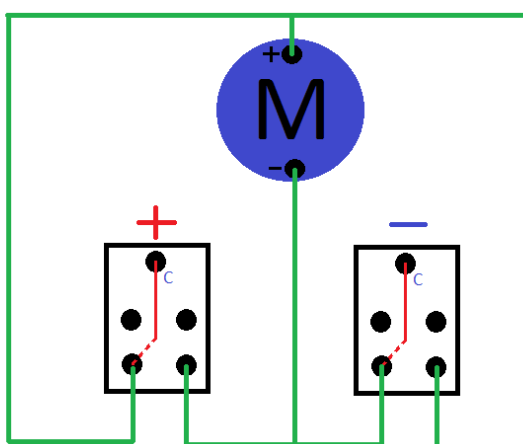


Figura 4.10. Circuito inversor de polaridad basado en relés.

El circuito que mejor consigue invertir la polaridad mediante un microcontrolador es el puente en H. Este circuito, está formado por una serie de transistores que se comportan como interruptores, pues conmutan cuando la tensión de su base se lo indica (controlada con el microcontrolador). Estos transistores son acompañados de un diodo conectado a ellos en paralelo que permite circular la corriente en sentido contrario en el transitorio en el que conmuta la tensión. En la Figura 4.11, si S1 y S4 están cerrados y S2 y S3 abiertos el motor gira en una dirección, de forma opuesta, si S2 y S3 están cerrados y S1 y S4 abiertos el motor gira en la dirección inversa.



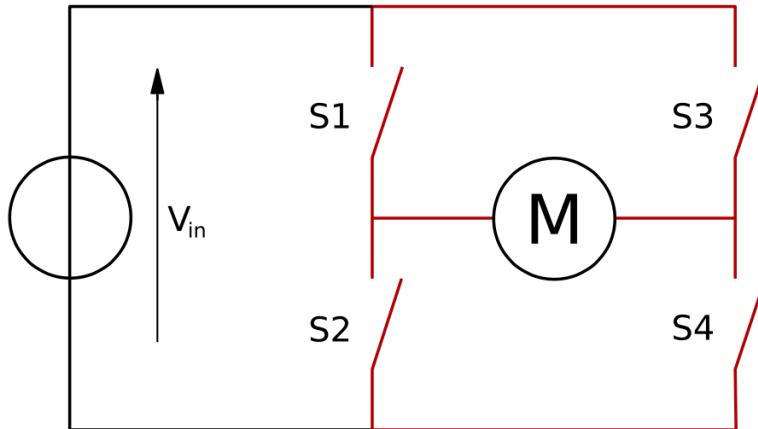


Figura 4.11. Funcionamiento puente H. Cada interruptor "S" representa un transistor y un diodo.

Que el motor de corriente continua esté conectado al cabezal de una bomba peristáltica es un inconveniente pues, a parte de la resistencia interna propia del motor, se tiene la resistencia que ponen los rodillos que van deslizando el tubo para que el fluido avance. Es por este motivo que el primer driver de puente en H que se obtuvo, no suministraba la intensidad suficiente para mover la bomba, pues la gran resistencia hacía caer enormemente la tensión. Este driver se basaba en el circuito integrado l293d, cuya intensidad máxima es de 1A y no es suficiente, se muestra a la izquierda de la Figura 4.12. Es por eso que finalmente se utilizó otro driver distinto basado en el circuito integrado l298n, que permite una intensidad máxima de 2A y es ideal para el funcionamiento de la bomba usada. Se puede apreciar a la derecha de la Figura 4.12.

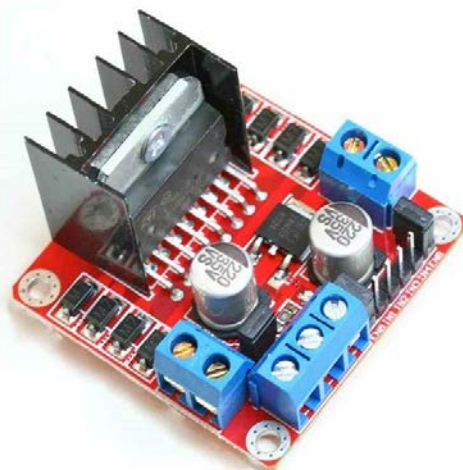


Figura 4.12. A la izquierda el driver de puente en H l293d y a la derecha el 298n

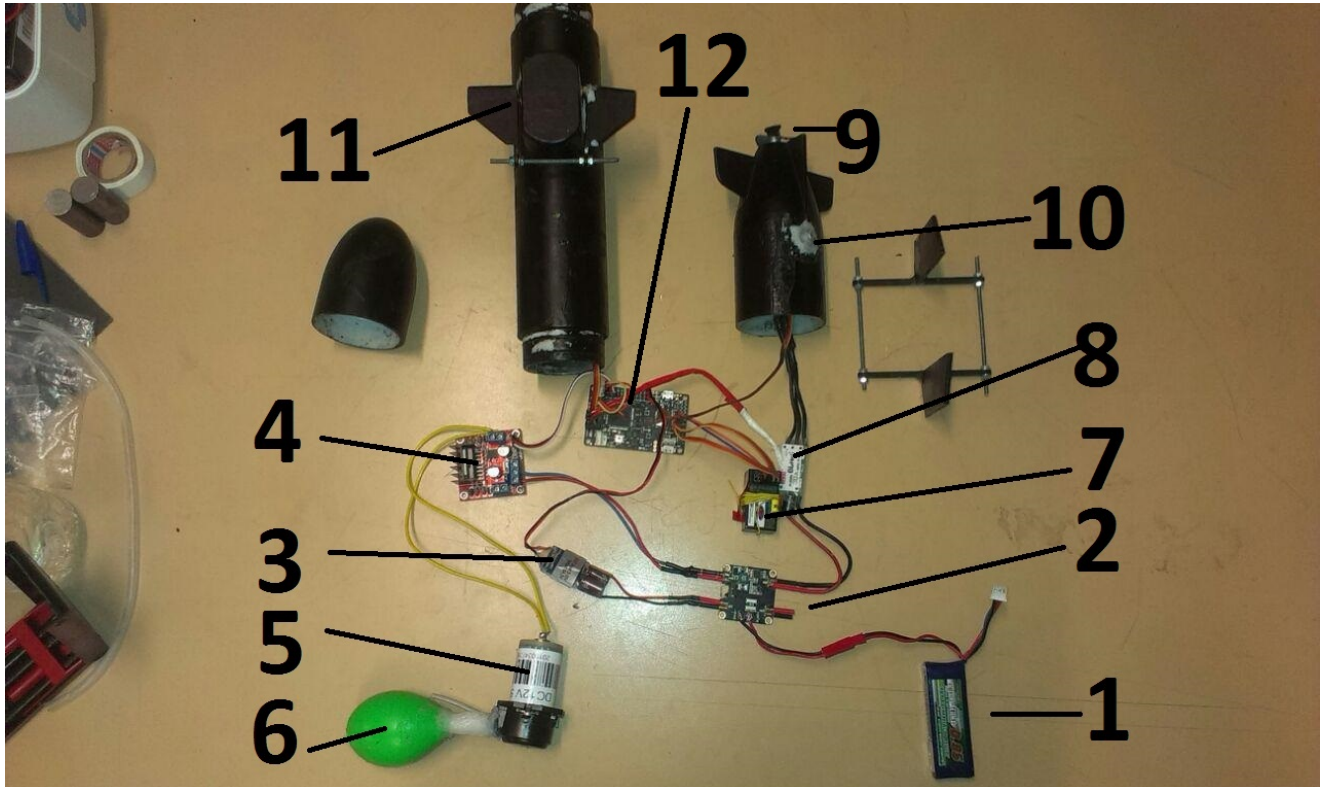
Este puente en H se puede conectar a una tensión de alimentación, que llevará al motor DC, de 5 entre 5 y 35V. Para controlarlo con el microcontrolador se disponen de 3 pines de control. Por un lado un "enable", que tendrá que estar activado cuando se quiera

que la bomba funcione y desactivado cuando se quiera que esté en reposo. Por el otro lado, dos señales PWM de las cuales una es la inversa de la otra. Dependiendo del ancho de pulso del PWM, el puente en H pondrá más o menos tensión a la salida a la que se conecta el motor DC (dicha tensión es proporcional a la tensión de alimentación del puente en H). Si se invierten ambas señales PWM, se cambiará la polaridad a la salida y el motor, y por tanto la bomba, invertirán su giro. Como es necesario que el PWM tenga el mayor ancho de pulso posible para poner siempre la máxima tensión a la salida (en valor absoluto), finalmente se han conectado estas dos entradas de control a dos salidas digitales, pues el máximo ancho de pulso serán los 5V continuos que estas entradas recibirán de la salida digital si están activadas. El "enable" por su parte, también se conectará a otra salida digital que se habilitará cuando se quiera que funcione la bomba y se deshabilitará cuando no se requiera.

En el próximo capítulo se explicará con más detalle el control de estas señales y la máquina de estados que se ha desarrollado para su correcto funcionamiento.

## 4.5 Conexión final de los elementos

En este último apartado, se explica de forma esquemática la conexión de todos los componentes electrónicos del sumergible. Para facilitararlo se puede observar la Figura 4.13, que muestra todos los componentes de forma numerada en su conexionado definitivo.



*Figura 4.13. Conexión interna de todos los componentes electrónicos del sumergible.*

- En primer lugar se parte de la batería LiPo (1) que se conecta a un módulo de alimentación (2) que se encarga de distribuir la tensión de la batería de forma uniforme: al puente en H (4) de la bomba, al regulador de tensión (3) que alimenta la tarjeta de control y al ESC (8) del motor.
- Al puente en H (4) le suministra tensión a su entrada el módulo de alimentación (2) y la señal de control la recibe en 3 cables (Un enable y dos entradas) de las salidas digitales de la tarjeta de control (12). Su salida está conectada a la bomba de agua peristáltica (5), que tiene una salida al depósito (6) y otra al exterior del sumergible.
- Al ESC (8) le suministra tensión el módulo de alimentación (2) y su señal de control está conectada a una salida PWM de la tarjeta de control (12). Su salida trifásica está conectada al motor brushless (9) cuyo eje está pegado a una turbina.
- Los servos (10 y 11) que mueven a los timones, son alimentados desde la tarjeta de control (12) y su señal también la reciben de ella mediante salidas PWM.

- El receptor de la emisora (7) está alimentado por la tarjeta de control y sus canales se conectan a las entradas PWM de la tarjeta de control (12).
- Finalmente, la tarjeta de control HK Pilot (12) está alimentado mediante el regulador de tensión o UBEC (3) que le suministra 5V. Sus salidas digitales van al puente en H (4), sus salidas PWM al ESC (8) y a los servos (10 y 11) y sus entradas PWM al receptor de la emisora (7).

A continuación se adjunta un detalle de la conexión interior del sumergible donde se puede apreciar el puente en H y sus conexiones y al fondo el depósito (globo) de la bomba, que provoca que varíe el peso del sumergible. Véase en la Figura 4.14.



*Figura 4.14. Interior del sumergible donde se aprecia el puente en H y, detrás de él, el depósito de agua.*

# Capítulo 5

## Control remoto del sumergible.

### 5.1 Uso de un microcontrolador en el radio control

En este capítulo se va a tratar de exponer el proceso que se llevó a cabo para que el sumergible fuese capaz de ser controlado de forma remota desde una emisora. Tal como se ha comentado en el Capítulo 1, la mayor parte de sumergibles radio controlados, se limitan a establecer una conexión directa entre la emisora y los actuadores, conectando estos directamente al receptor. De esta forma, se consigue un control remoto brusco y poco preciso que se limita a obedecer ciegamente las señales que la emisora manda, pudiéndose usar este método sólo en submarinos para aficionados. Para solventar este inconveniente, los profesionales del modelismo naval disponen de potentes emisoras altamente configurables, que les permiten ajustar las señales mandadas por la emisora para conseguir un manejo más preciso del sumergible. El inconveniente de este método, a parte del elevado coste que tienen estas emisoras, es que configurarlas no siempre es posible, debido a que algunos submarinos, como el usado en este proyecto, tienen actuadores que, aun así, no pueden ser controlados por una simple emisora, si no que necesitan un método más potente de control que sea capaz de recibir las señales de la emisora e interpretarlas para actuar en consecuencia, es decir, se requiere un microcontrolador.

La conclusión de usar un microcontrolador para el control remoto es un punto muy importante en el desarrollo de este proyecto pues, no es comparable la dificultad que supone usar un microcontrolador con no usarlo y conectarlo todo al receptor de la emisora. Es por esta razón por la que se ha decidido dedicar un capítulo completo al control remoto del sumergible.

Un ejemplo que justifica el uso de microcontrolador es que el sumergible posee actuadores que no se comportan de forma lineal, por ejemplo, los timones horizontales de proa no se mueven de forma simétrica: si bajan demasiado chocan con el casco del submarino y se pueden romper, es necesario algo que, a pesar de que la emisora esté enviando la señal PWM a los servos de que bajen más, filtre esta orden y les haga detenerse en el punto más bajo en el que no chocan.

Pero el ejemplo más claro que justifica el uso del microcontrolador es el empleo de un sistema de lastre estático, es decir, de la bomba de agua peristáltica. Tal como se ha explicado en el Capítulo 4, la bomba de agua funciona con un motor de continua de 12V. Para controlar este motor, se ha decidido emplear un circuito de puente en H, que es capaz de regular tanto la velocidad de la bomba como su dirección de giro (si gira hacia un sentido expulsará el agua y si gira hacia el opuesto la introduce, véase en el Capítulo 4 sobre el funcionamiento de la bomba). Este puente en H tiene 3 pines de control, uno de ellos es el "enable" que tiene que estar activado cuando se quiera que la bomba este funcionamiento, los otros dos reciben cada uno una señal PWM en la que, una es la inversa de la otra. Con estas señales se controla el sentido de giro. Debido a esto, es imposible controlar el puente en H con una emisora, porque aparte de no tener suficientes canales para conectar todos los

pinos, es imposible mandar de forma sistemática una señal PWM invertida a otra y, por tanto la bomba de agua peristáltica no se podría usar. Luego es por esta razón que el microcontrolador pasa de ser útil y recomendable a ser imprescindible.

Para configurar este eficaz control remoto en el microcontrolador es necesario hacer uso, en la mayor parte de los actuadores, de diversas máquinas de estado que indiquen en cada momento al sumergible que hacer, de acuerdo con las señales recibidas por el piloto.

## 5.2 Frecuencia de emisión

Antes de comenzar explicando cómo se ha conseguido el radio control de cada actuador, ya sea mediante una máquina de estados u otro método distinto, es importante saber porque se ha decidido usar una emisora de radio y, en concreto, de 35 Mhz.

El medio acuático poco tiene que ver con otros medios, es por eso que en el agua, mientras más alta sea una frecuencia más se atenúa, y mientras más baja sea, al tener una longitud de onda mayor, menos se atenúa y a más distancia llega.

Es por eso que para comunicarse de forma eficiente con objetos sumergidos, la forma más eficaz es usando frecuencias lo más pequeñas posibles. El sonar (del inglés, Sound Navigation And Ranging) es la técnica más usada para la propagación del sonido debajo del agua pues emplea impulsos sonoros de muy baja frecuencia. Este método de localización acústica utiliza frecuencias con un rango de entre 20 Hz y 20 KHz. En un principio simplemente se usaba para que los barcos de guerra localizaran submarinos cercanos funcionaban, tal como muestra la Figura 5.1 enviando una señal y esperando a recibirla de vuelta si la fuente de sonido (submarino) se acerca al barco, las ondas llegan más juntas (Ping alto), cuando la fuente de sonido se separa, las ondas llegan más separadas (Ping bajo) [18].

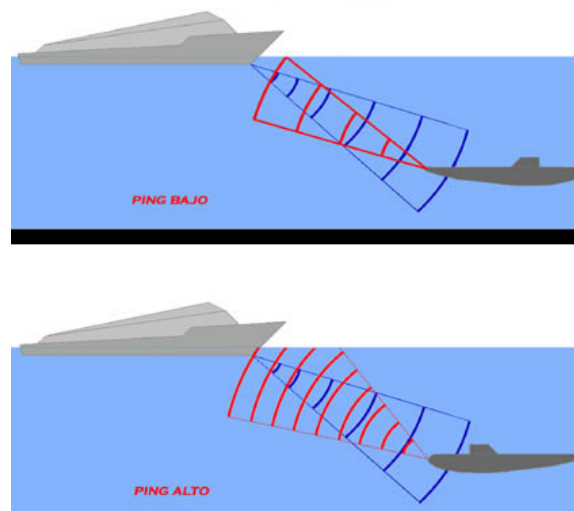


Figura 5.1. Primeros usos del sónar para detectar submarinos

Como este método es difícilmente aplicable en un modelo de submarino a escala con dimensiones tan reducidas, se ha decidido utilizar una emisora de radio de baja frecuencia que, aunque no alcanza las frecuencias del sónar de 20KHz, es lo más cercano que se dispone en el mercado para ello: 35MHz. Con esta emisora y su receptor, se puede lograr

comunicarse con el sumergible a unos 5 metros en el agua dulce, profundidad suficiente para hacer las pruebas necesarias con el prototipo usado en este proyecto.

La emisora usada en este proyecto consta de 6 canales que no son apenas configurables, envían al receptor señales PWM con un valor que oscila entre 1850 y 1150 ms de ancho de pulso y es el modelo Racon X6. Como hoy en día se usan en su mayoría emisoras con una frecuencia de 2,4 GHz debido a las pocas interferencias que reciben, resulta bastante complicado encontrar modelos de emisoras de 35 MHz, es por eso que la emisora usada se tuvo que comprar de segunda mano.

Para recibir en el microcontrolador las señales recibidas por la emisora en pines de entrada PWM, es necesario hacer uso del *blockset* de Simulink diseñado expresamente para tarjetas de control Ardupilot. A parte de este bloque de lectura, también se usó un bloque de escritura en los pines PWM del microcontrolador para enviar al receptor las señales de salida, una vez realizados los cambios pertinentes a las señales procedentes de la emisora. Estos dos bloques se muestran en la Figura 5.2

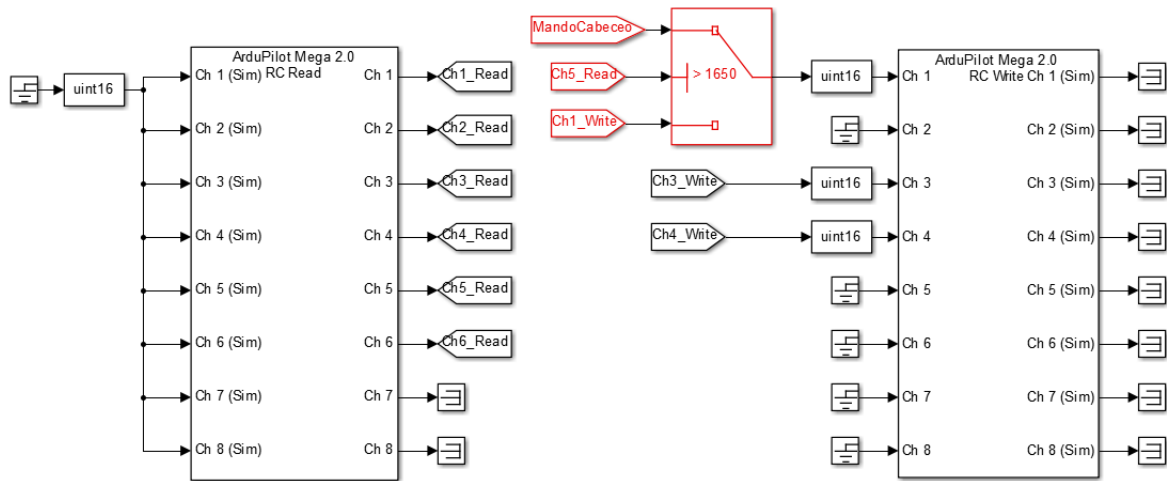


Figura 5.2. Bloque de escritura y de lectura PWM usados al programar la tarjeta de control.

Todos los cambios pertinentes a estas señales de entrada de la emisora se metieron en su mayoría en subconjuntos con máquinas de estado que reajustaban el comportamiento del actuador. Estos subconjuntos se pueden apreciar en la Figura 5.3

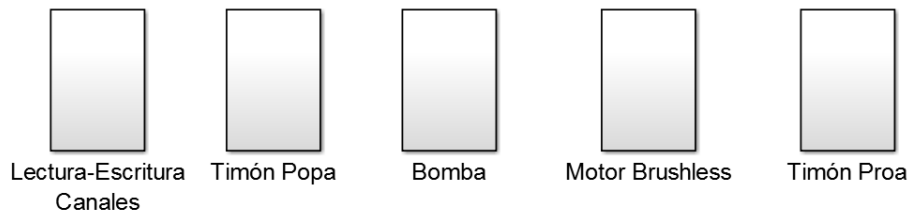


Figura 5.3. Subconjuntos necesarios para el radio control.

### 5.3 Control remoto de los timones verticales de popa

Para controlar el giro de los timones verticales de popa o de la parte trasera, es necesaria una sencilla máquina de estados debido a que la emisora no ofrece el PWM suficiente para que el timón se mueva de un extremo a otro. Es por eso que en el microcontrolador se programa la pequeña máquina de estados que se muestra en la Figura 5.4. En esta máquina de estados se multiplica la señal PWM de entrada por 1.2 o por 0.8 dependiendo si se quiere aumentar el rango máximo de giro del servo o disminuir el mínimo lográndose así un giro más realista.

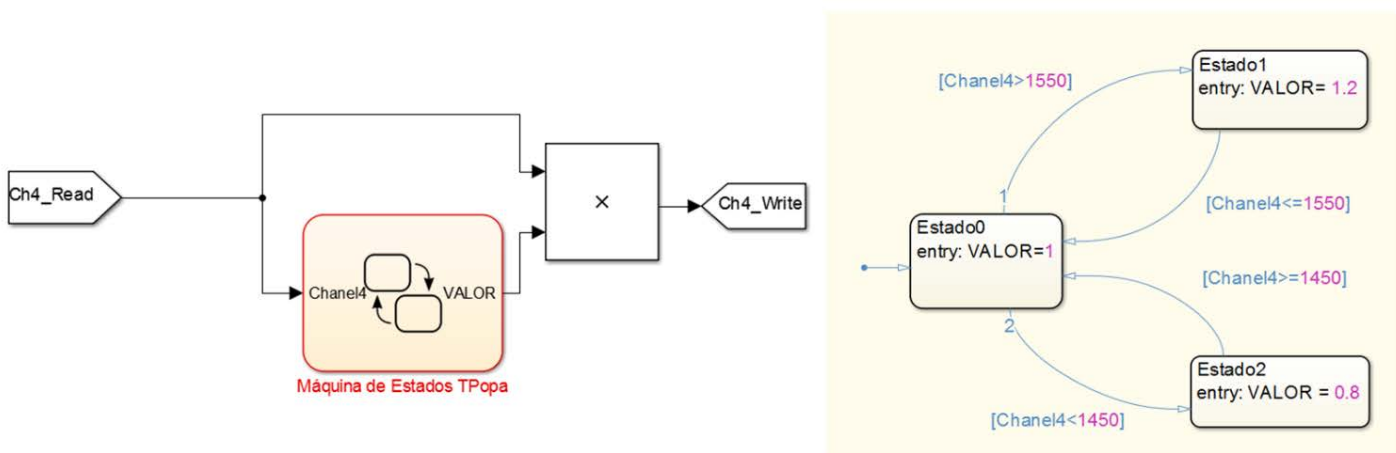


Figura 5.4. Máquina de estados de los timones verticales de popa.

### 5.4 Control remoto de los timones horizontales de proa

Aunque, como se ha explicado en el Capítulo 2, los timones horizontales de proa se controlan de forma automática pues tienen que ser sometidos a continuas correcciones dependiendo de la inclinación de la proa del sumergible o de su cabeceo. También se le va a añadir una opción para controlarlo de forma remota con la emisora y así poder pasar a control manual en situaciones de emergencia. Para elegir entre control remoto o control automático se va a usar el sexto canal de la emisora, dependiendo de su posición el control será de una forma u otra.

El funcionamiento de los timones de proa es similar al de los de popa, es necesaria una máquina de estados que reajuste la escala de la señal de entrada de la emisora para poder ampliar el rango de movimiento del servo. Eso sí, en este caso como el casco se encuentra muy próximo, los servos no podrán bajar demasiado pues chocarían con él y podrían llegar incluso a romperse. Debido a esto se procede a la máquina de estados se le impone que la señal mínima que pueda enviarse al servo no sea inferior a 1285 ms (de ancho de pulso PWM), de esta forma se evitará la rotura de los timones. La máquina de estados empleada se muestra en la Figura 5.5.



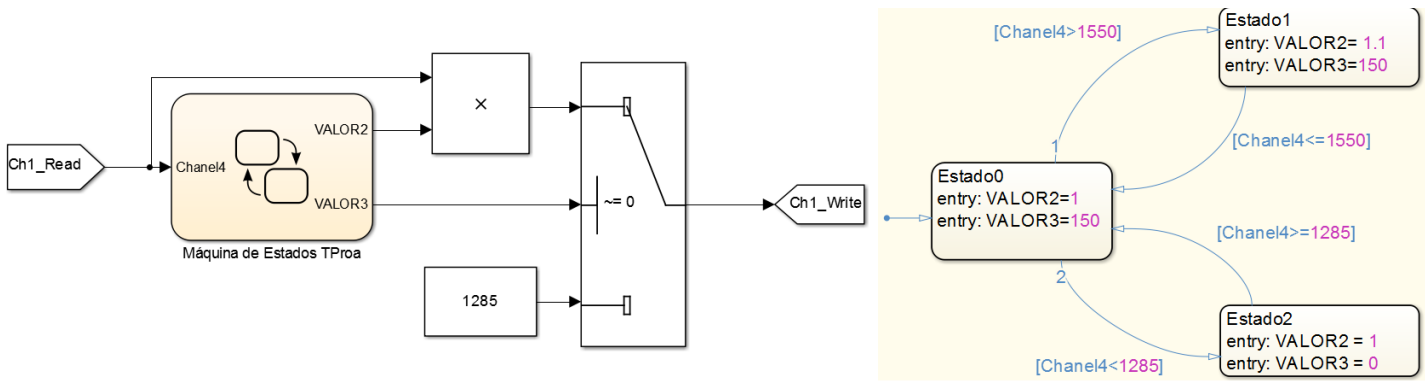


Figura 5.5. Máquina de estados de los timones horizontales de proa.

## 5.5 Control remoto de la bomba de agua

Una vez que se pueden manejar de forma precisa los timones del sumergible y sus distintos giros, llega el momento de usar el microcontrolador para controlar con la emisora la bomba de agua. La bomba de agua es accionada por un motor de corriente continua de 12V, el cual según el sentido en el que gire logrará que la bomba meta o saque agua del depósito del submarino y por tanto, cambiar su flotabilidad positiva a negativa o viceversa, logrando así que el submarino salga a la superficie o se hunda a la profundidad deseada.

El motor de 12V de corriente continua, está conectado a un circuito de puente en H, el cuál es capaz de cambiar la polaridad de alimentación del motor, cambiando así su sentido de giro, y también, es capaz de regular su velocidad:

El pin "Enable" recibe una señal PWM, si su ancho de pulso es 0, el enable estará desactivado y la bomba de agua no funcionará. Si su ancho de pulso es máximo, la bomba irá todo lo rápido que pueda con la tensión de alimentación dada. Cualquier valor de ancho de pulso entre esos dos extremos regulará la velocidad del motor. Por tanto, como la bomba ya es lenta de por si al ser una bomba destinada a la dosificación, en todo momento se quiere que este bombeando a la máxima velocidad, y por tanto, se conectará a una salida digital que sólo la permitirá situarse entre los dos extremos: si la salida digital está a 0, la bomba estará parada y si la salida digital está a 1 (5 V todo el tiempo), equivaldrá a una señal PWM de ancho de pulso infinito y, por tanto, la bomba estará en funcionamiento y a máxima velocidad.

Las otras dos señales de control sirven para indicar el sentido de giro del motor, una señal es la inversa de la otra. Por simplificar, las también se conectarán a dos salidas digitales del micro pues, de esta forma, se conseguirá fácilmente invertirlas para provocar que el giro se haga en sentido contrario. En la Figura 5.6 se puede apreciar la máquina de estados que se ha utilizado para establecer la lógica del funcionamiento de la bomba, nótese el uso de puertas lógicas NOT para lograr tal fin.

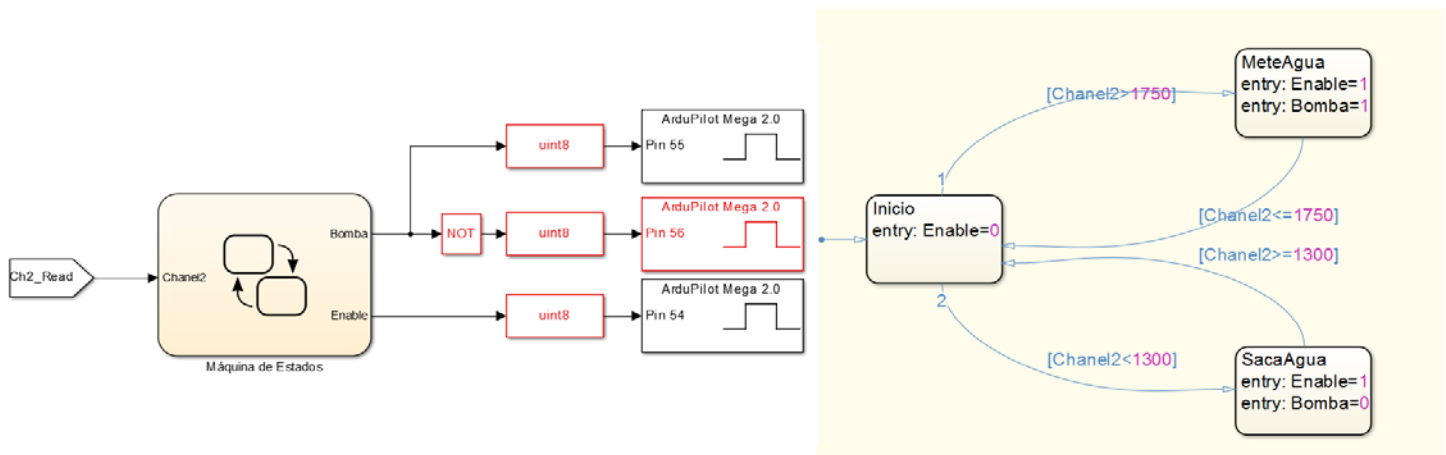


Figura 5.6. Máquina de estados de la bomba peristáltica de agua.

## 5.6 Control remoto del motor brushless

Por último, para lograr totalmente el control remoto del sumergible queda regular el manejo del motor brushless. Al contrario que los timones y la bomba de agua, este tipo de motores está pensado para que se puedan controlar desde una emisora sin necesidad de ningún tipo de microcontrolador.

Los motores brushless funcionan conectados a un regulador de velocidad o ESC (Electronic Speed Controller), el cual posee integrado un pequeño sistema de control que le permite interpretar la señal de la emisora para configurar a su salida una onda PWM que se hace pasar por una senoidal. A esta senoidal se conectan los tres cables (trifásico) de este pequeño motor.

Pero no todos los motores brushless y sus ESC se utilizan para los mismos fines. Unos se usan para coches de carreras y necesitan una velocidad de arranque muy grande, otros se usan para cuadricopteros y requieren de una alta precisión pero para los submarinos es distinto. Un submarino necesita un arranque suave, así como llevar una velocidad de crucero estable. Además necesitan poder oírse los sonidos de armado del motor de forma más alta al encontrarse dentro del agua. Para todo esto, los ESC son configurables y existen dos métodos fundamentales para llevar a cabo tal tarea:

- Poseer una tarjeta de programación. Estos modelos de ESC vienen con una tarjeta que les permite cambiar sus distintos parámetros. Esta tarjeta se utilizó a modo de prueba y se muestra en la Figura 5.7.



Figura 5.7. Tarjeta de programación de ESC.

- Utilizar un programa de ordenador adecuado. Este método fue el que se empleó para programar el ESC empleado en este proyecto. Se configuraron varios parámetros para que el funcionamiento del motor fuese similar al de la turbina de un sumergible además se añadió la opción de que fuese bidireccional. Todos los cambios realizados se pueden apreciar en la Figura 5.8.

ESC# 1 - Name EMPTY		DYS SN20A for Multicopter Motors BLHeli Revision: 14.2		Misc <input checked="" type="checkbox"/> Programming by TX	
Closed Loop Mode 4 Off	Startup Power 10 x 0.75	Motor Direction 3 Bidirectional	Input Polarity 1 Positive		
Closed Loop P-Gain 9 x 2.00	Temperature Protection 0 Off	Demag Compensation 2 Low	Beep Strength 40 40		
Closed Loop I-Gain 9 x 2.00	PWM output Dither 3 15	PWM Frequency/Damped 1 High	Beacon Strength 80 80		
Motor Gain 3 x 1.00	Low RPM Power Protect 1 On	Enable PWM Input 0 Off	Beacon Delay 4 10 min		
		Motor Timing 3 Medium	PPM Min Throttle 37 1,148 ms		

Figura 5.8. Interfaz de programación del ESC mediante el BLHeli Suite.



# Capítulo 6

## Control automático del sumergible.

### 6.1 Desequilibrio en el ángulo de cabeceo.

El objetivo último de este proyecto es conseguir la navegación estable del sumergible en todos los grados de libertad del espacio, de tal forma que este pueda ser empleado en tareas delicadas como la espeleología marina. Tal como se ha comentado en el Capítulo 2, si la construcción del sumergible es correcta, cinco de los seis grados de libertad del submarino poseen estabilidad natural. Es por eso que la primera etapa del proyecto, la construcción y el diseño, han sido fundamentales a la hora de lograr un comportamiento estable en la mayor parte del sumergible. Además, para tener aún una navegación más precisa, a todos los grados de libertad con estabilidad natural se le han añadido distintas mejoras en sus técnicas de manejo control remoto, tal como se explicó en el Capítulo 4.

Pero hay un grado de libertad en el que no se puede lograr la estabilidad de forma natural: el ángulo de cabeceo. La resistencia hidrodinámica que el agua produce en la parte delantera del submarino (la vela o quiosco) produce, tal como se explica en el Capítulo 2, un par de desequilibrio que tiende a subir continuamente la proa del modelo. La existencia de este desequilibrio obliga a hacer continuas correcciones en el posicionamiento de los timones horizontales de proa, para así llevar de nuevo al sumergible a una posición correcta y equilibrada [19].

Los aficionados del modelismo naval realizan estas continuas correcciones controlando de forma manual los timones y contrarrestando así el efecto de la resistencia del agua. Este método resulta poco fiable y rudimentario, pues se basa únicamente en la habilidad que el "piloto" tiene para corregir este movimiento. Además, esto se suma a los problemas de visibilidad de la nave bajo el agua y, por tanto, se llega a unos resultados muy pobres en cuanto a su navegación. De este modo, el sumergible no se puede utilizar de forma profesional, quedando su uso reducido al entretenimiento.

Para solventar este inconveniente y conseguir realizar estas correcciones de la mejor forma posible, en este proyecto, se decide abordar este problema implementando un control automático en este grado de libertad, en el cabeceo del sumergible. La gran ventaja de este método es que ahora, el piloto del submarino se puede desentender en todo momento del control de estos timones pues, de forma automática se situarán para mantener a la misma altura todos los puntos del sumergible en navegación.

En el siguiente apartado se expondrá paso por paso como se ha realizado este control automático del cabeceo del sumergible.

## 6.2 Modelado matemático del sumergible

Siempre que se quiere diseñar un control automático, en cualquier caso, hay que obtener el modelo matemático de aquello que se quiere controlar. Gracias a ello, se podrán obtener los parámetros pertinentes de la técnica de control que se emplea. Además, esta planta servirá para simular la respuesta de este modelo en un entorno de programación, para así ir reajustando los parámetros de control hasta obtener los mejores.

Existen diversas técnicas para obtener la planta de un modelo. Una de ellas podría haber sido obtenerla de forma empírica. Para ello habría hecho falta calcular todas las ecuaciones mecánicas e hidrodinámicas que rigen el comportamiento de este prototipo y, en el caso de que algunas de ellas no fueran lineales, linealizarlas en torno a un punto de operación. De todas formas, esta planta modelaría el comportamiento del sumergible completo, no de tan sólo el ángulo de cabeceo.

En este caso en concreto, se quiere obtener la planta que modela el comportamiento que tiene el ángulo de giro del cabeceo del sumergible (pitch) en función de la posición en la que se encuentren sus timones horizontales o de proa (servos).

Por tanto, para el desarrollo de este proyecto, se ha empleado el método PRBS para la obtención de la planta. Este método, que se ha explicado en el Capítulo 2, consiste en introducir una señal aleatoria (la señal PRBS en sí) al mando que controla los timones mediante un servo. Mientras esta señal está moviendo de forma aleatoria los timones, se mide con el giróscopo del acelerómetro los ángulos de giro que se producen en cada momento y, tanto los valores de la señal PRBS de entrada al mando como los valores del ángulo de cabeceo, se van guardando en la memoria flash del microcontrolador.

Para realizar este ensayo es necesario introducir el sumergible en el agua y, en primer lugar, calibrar los giróscopos. Una vez hecho esto, se sumerge el sumergible con la bomba de agua a una profundidad constante y se pone a avanzar a una velocidad moderada. En ese momento se empieza a aplicar la señal PRBS que mueve los timones horizontales de forma aleatoria y brusca y se comienzan a guardar en la memoria flash, de la tarjeta de control, los distintos ángulos del cabeceo del sumergible en cada momento. Tras un minuto aproximadamente se saca el sumergible del agua y se conecta su tarjeta de control al ordenador para descargar todos los datos.

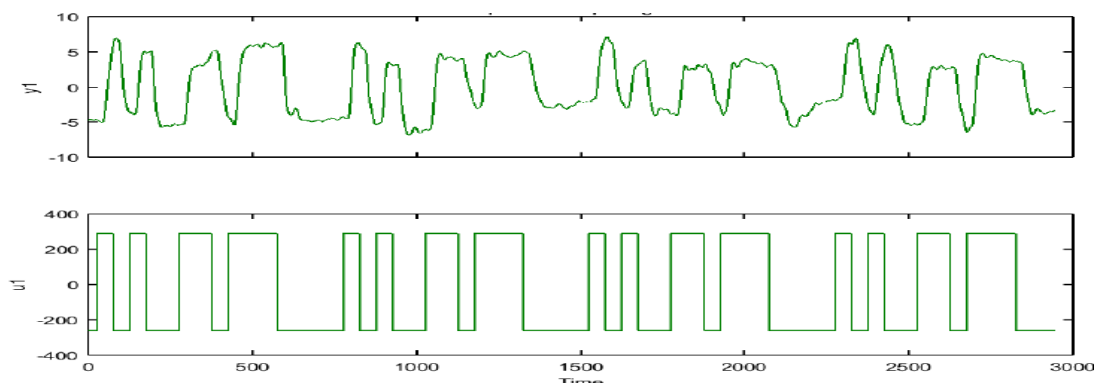


Figura 6.1. Gráfica de los ángulos de cabeceo medidos en el sumergible (superior) en función de la señal de entrada PRBS (inferior) aplicada en los timones a lo largo del tiempo

Una vez descargados los datos de la amplitud de la señal PRBS, de los ángulos de cabeceo y de los instantes en los que se registran ambas cosas, se introducen en el software matemático matlab y se obtiene la gráfica de la Figura 6.1, que muestra, a lo largo del tiempo,

como ha ido girando el ángulo (en grados) de cabeceo del submarino a medida que se le aplicaba una señal PRBS a la entrada (en ms de ancho de pulso PWM). Como se puede observar también, la señal PRBS es periódica y se ha repetido cuatro veces.

Si se hace uso ahora del comando “*ident*” en matlab, se entrará en una interfaz gráfica que está diseñada para estimar la función de transferencia de una planta si se introducen los datos previamente mencionados [20]. Este pequeño programa va iterando los datos anteriores hasta que consigue aproximar con una función de transferencia la respuesta, en este caso el giro. Para ello es muy importante haber tomado datos de cuatro ciclos de la señal PRBS, de esta forma puede hacer una media entre los cuatro ensayos y sacar un resultado más fiable. En la Figura 6.2 se muestra el ajuste que se consiguió hacer del ángulo de cabeceo del sumergible con el que se obtuvo la función de transferencia de la planta, en negro está representada la medida real y en azul, la estimada.

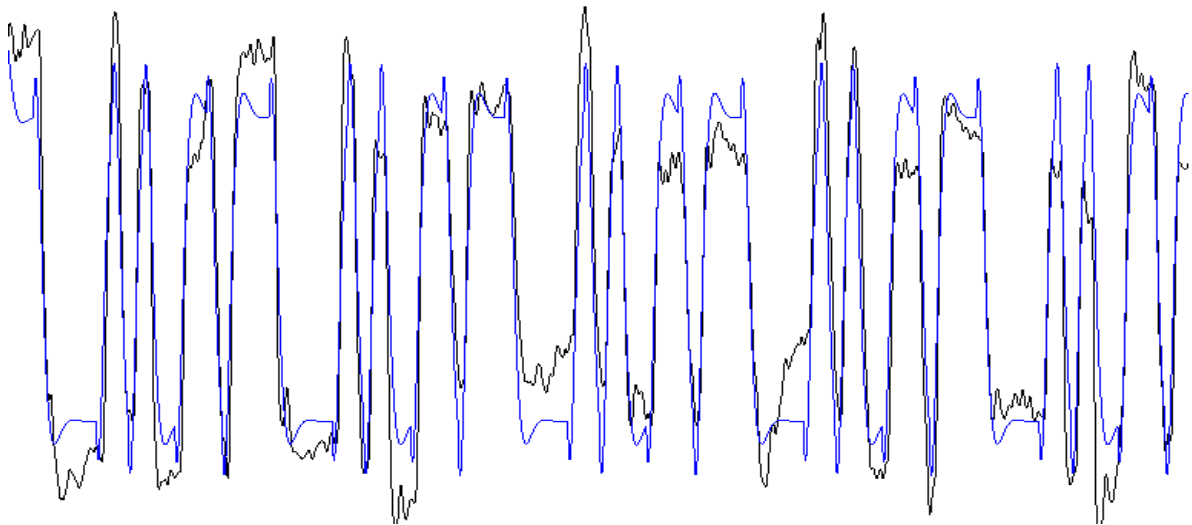


Figura 6.2. Ajuste del ángulo de cabeceo para obtener la función de transferencia.

Una vez realizado este ajuste, el programa ofrece la función de transferencia de la planta del ángulo de cabeceo que se refleja en la Ecuación 6.1. El porcentaje de ajuste que otorga esta función de transferencia es del 67%, en un principio puede parecer un porcentaje poco fiable pero, si se tienen en cuenta las difíciles condiciones en las que se realizó el ensayo PRBS, resulta un ajuste óptimo y difícilmente mejorable.

$$\frac{-0.0006456 \cdot s + 6.231 \cdot 10^{-5}}{s^2 + 0.08092 \cdot s + 0.004559}$$

(Ecuación 6.1)

### 6.3 Diseño del control automático y simulación.

Una vez obtenido el modelo de la planta, es el momento de utilizar diversas técnicas de control para establecer cuál de ellas se ajusta mejor al comportamiento del sumergible. Para ello, se probaron distintos métodos de control, un control proporcional, uno integral y un control PID, que aúna las tres acciones principales: proporcional, integral y derivativa.

Para realizar estos controles se utilizó el entorno de programación de Matlab y Simulink, empleando el PID genérico que se muestra en la Figura 6.3. Gracias a este modelo se pudieron probar las diferentes técnicas de control pues si se quiere, por ejemplo, probar un control proporcional, simplemente basta con anular los parámetros de la acción derivativa e integral del PID genérico.

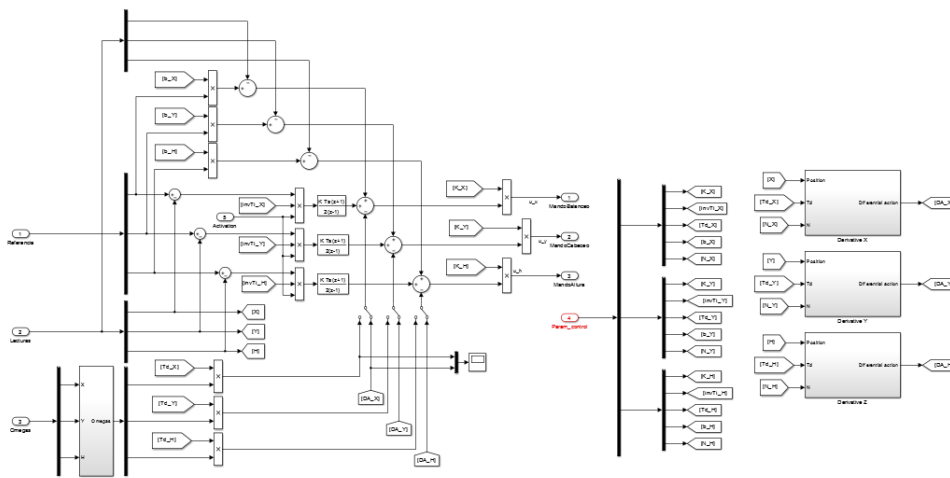


Figura 6.3. Control PID genérico utilizado para probar las distintas técnicas de control.

Para estimar que parámetros eran los mejores antes de descargarlos en la tarjeta de control, se procedió a su simulación. En la Figura 6.4 se muestra la respuesta simulada del sistema ante un escalón de amplitud 1 a la entrada. En la gráfica superior se observa como mediante un control PI, aunque se logre anular el error en régimen permanente, la velocidad de respuesta es muy lenta, tiene algo de sobrepaso y oscila bastante. En cambio, en la parte inferior, se puede ver como si se usa un control PID, la respuesta es mucho más rápida, no oscila y apenas utiliza sobrepaso. Estos parámetros del PID son los que se descargarán finalmente en la tarjeta de control y se utilizarán en el sumergible.

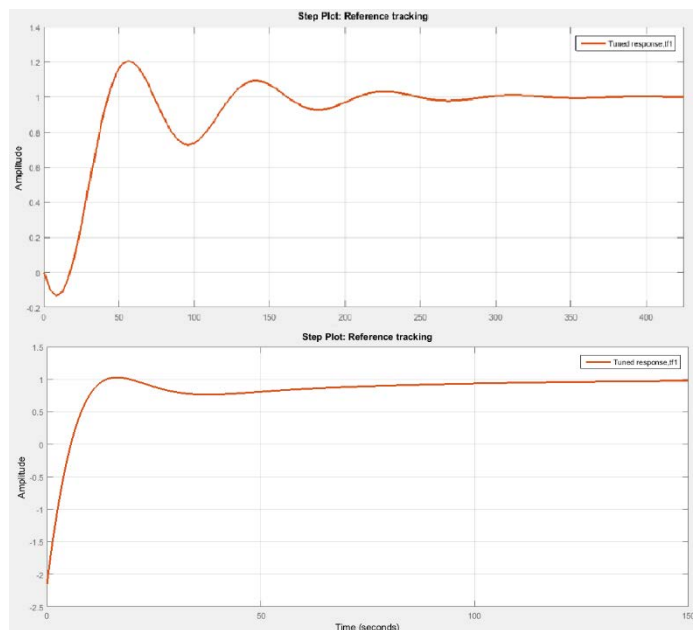


Figura 6.4. Respuesta simulada del sistema ante un escalón de amplitud uno. Arriba con un control PI y abajo con un control PID.



# Capítulo 7

## Conclusiones y resultados

Este último capítulo del proyecto, se tratarán de exponer de forma ordenada los resultados a los que se ha llegado en este proyecto y, a partir de ellos, emanarán las conclusiones obtenidas.

Para comprobar el funcionamiento radio control del sumergible, en todo momento se realizaron ensayos, bajo el agua y en superficie. Con ellos se probó que funcionaban correctamente todos los actuadores: servos, motor brushless y la bomba de agua. Además se comprobó que, a pesar de distribuir los pesos de la forma que se había calculado para que estos estabilizarán de forma natural al submarino, era necesario añadir contrapesos en el exterior del sumergible para alcanzar una estabilidad mejor. En la Figura 7.1 se puede ver la distribución de pesos exteriores del sumergible. Estos ensayos de inmersión fueron realizados en el interior de un depósito del laboratorio de Fluidos de ICAI.



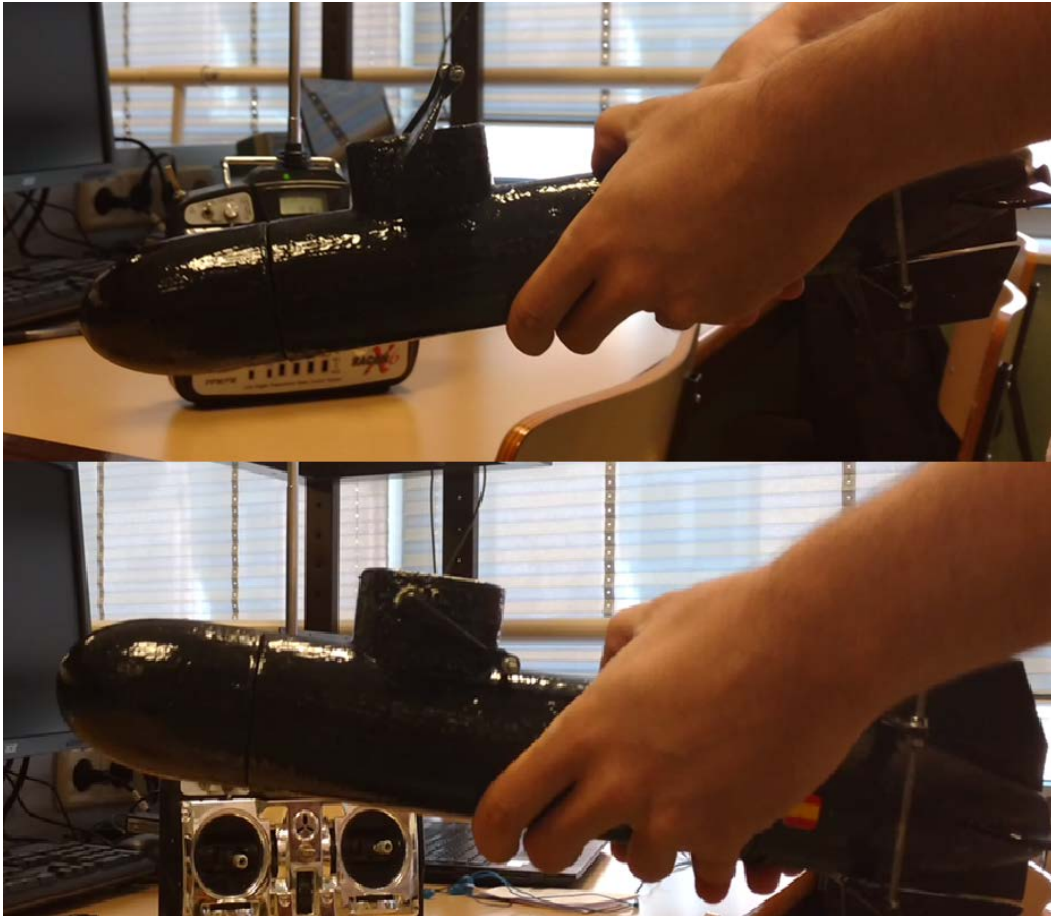
*Figura 7.1. Foto real del sumergible navegando en el interior de un depósito de agua.*

En estas pruebas se llegó a la conclusión de que la velocidad de llenado / vaciado de la bomba peristáltica era demasiado lenta. Al tratarse de una bomba de dosificación, en llenar o vaciar el depósito tardaba en torno a 4 minutos, lo que se traduce en un tiempo necesario para sacar a flote o hundir el sumergible de 2 minutos, lo que se considera excesivo.

Es por eso que para futuros diseños se plantea la posibilidad de realizar el sumergible con un método de inmersión dinámico, basado en el posicionamiento correcto de los planos de profundidad o timones. De esta forma se lograría suprimir la necesidad de utilizar una bomba de agua y evitar, además, el difícil aislamiento del agua que provoca tener este sistema de inmersión. De hecho, posteriormente a la realización del ensayo PRBS para obtener el modelo matemático del sumergible, falló un diodo del puente en H que maneja la

bomba, imposibilitando el funcionamiento de esta.

Una vez diseñado el control automático se realizaron pruebas en las que se comprobó que funcionaba de forma óptima, rápida y muy precisa. Tal como se aprecia en la Figura 7.2 cuando se inclina ligeramente el submarino hacia abajo, los timones se sitúan de tal forma que, gracias a la resistencia del agua, provocan un par que estabiliza el submarino y lo sitúa de nuevo en posición recta. A la inversa sucede si se inclina el submarino hacia arriba.



*Figura 7.2. Foto real de un ensayo en seco del control automático del sumergible. Nótese como al inclinar el sumergible los timones horizontales se posicionan para estabilizarlo.*

Cabe destacar que en la emisora se habilitó un interruptor que, según su posición, permite utilizar el control automático en los timones de proa, o bien, manejarlo de forma manual.

Finalmente, el resultado del proyecto fue satisfactorio pues, a pesar de las dificultades principalmente provocadas por la penetración del agua y lo difícil que fue lograr la estanqueidad, se llegaron a resultados muy satisfactorios en cuanto al manejo del sumergible y su objetivo primordial: el control automático.

Además, gracias al desarrollo de este proyecto, se ha demostrado la interconexión y la importancia de todas las asignaturas del grado Ingeniería Electromecánica de la Universidad Pontificia de Comillas pues, aunque en un principio se estudien por separado, en los proyectos reales se solapan y han de emplearse de forma conjunta.

# REFERENCIAS

- [1] Ministerio de defensa, «Vehículos submarinos no tripulados, nuevo dominio del mar» [En línea] Available in: <http://www.defensa.com/frontend/defensa/vehiculos-submarinos-no-tripulados-nuevo-dominio-mar-vn11039-vst169>.
- [2] Healey, Anthony J, «Dynamics of Marine Vehicles», course notes, Naval Postgraduate School, Monterey California, Fall 1992.
- [3] Abkowitz, Martin A. «Stability and Motion Control of Ocean Vehicles» MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1969.
- [4] Jesús Fernández Ibarz, «Modelo de simulación y control dinámico para un catamarán submarino con seis grados de libertad».
- [5] Antonio Galo Ruiz Ortega, «Diseño de un sistema de control autónomo para un vehículo submarino AUV».
- [6] Héctor Alonso Moreno Ávalos, «Modelado, control y diseño de robots submarinos de estructura paralela con impulsores vectorizados».
- [7] Robison, B. H. «Midwater research methods with MBARI's ROV». Marine Technology Society Journal, 1992.
- [8] Dr. Álvaro Sánchez Miralles, «Libro de la asignatura de Sistemas Electrónicos Digitales de la Universidad Pontificia de Comillas».
- [9] Mauricio Améstegui Moreno, «Apuntes control PID»
- [10] Yoon, M. «On Driving Signal of Electronic Speed Controller for Small Multi-Rotor Helicopter» International Journal of Engineering Research and Technology, 4(11), 456-459.
- [11] Stratatsys, «BST 768 & SST 768, Dimension Elite User Guide»
- [12] International Electrotechnical Commission, Geneva. «Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) »
- [13] Epidor, «Manual sobre juntas tóricas EQ»
- [14] Sanmetal S.A. «Catálogo sobre juntas tóricas»
- [15] «Impermeabilización del coche en agua» [En línea] Available in: <http://www.cochesrc.com/impermeabilizacion-del-coche-agua-a253.html>
- [16] I., Corredor, J. M. C., & Pineda, A. F. M. «Diseño de control robusto de velocidad de motores brushless para robótica aérea»
- [17] «Uso del driver dual L298n para motores DC en arduino» [En línea] Available in: <http://electronilab.co/tutoriales/tutorial-de-uso-driver-dual-l298n-para-motores-dc-y-paso-a-paso-con-arduino/>

[18] Saiz, R. Gonzalez. «Software para procesado de imágenes procedentes de un sonar de barrido lateral en exploración submarina», 2010.

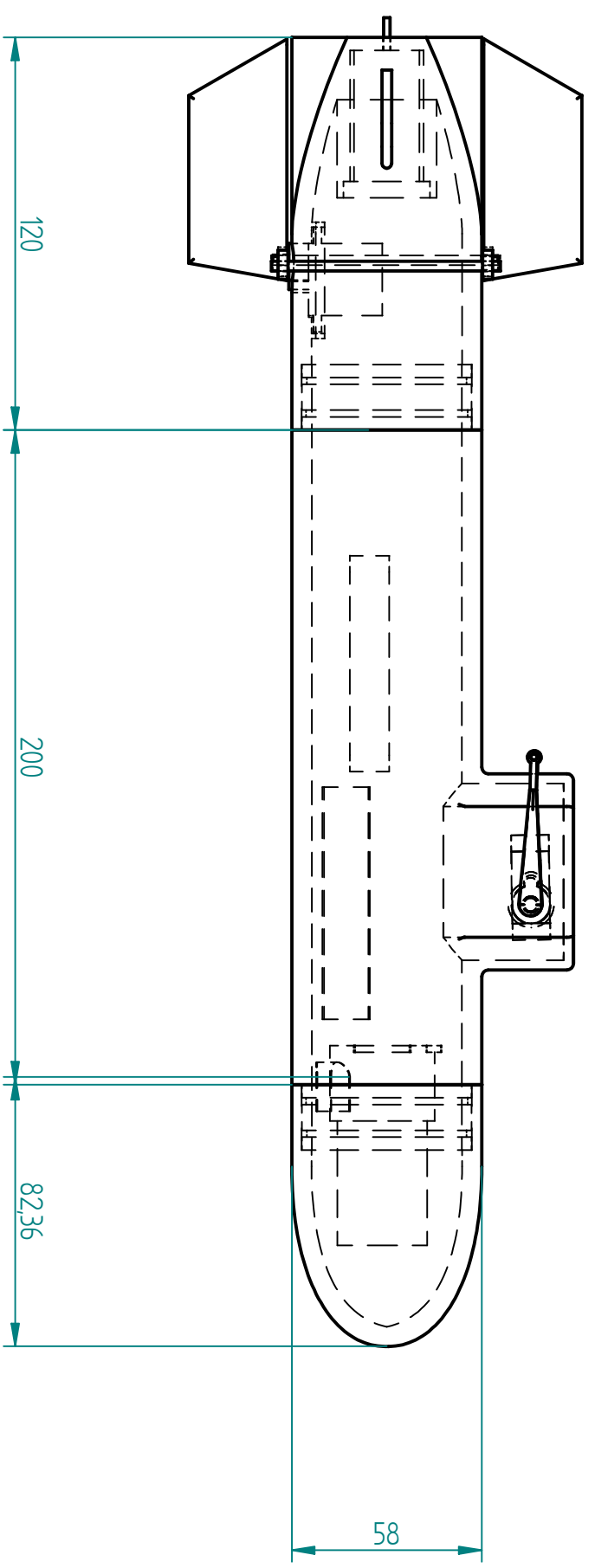
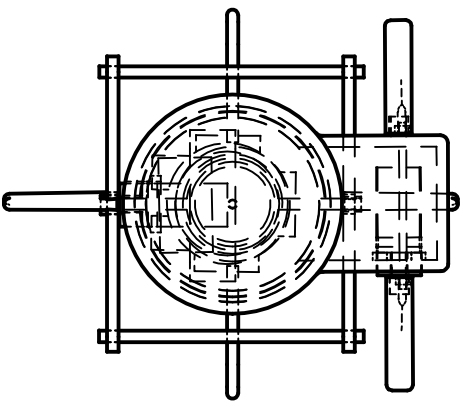
[19] Jesús, M., Joaquín Aranda Almansa, and José M. Girón Sierra. «Automática marina: una revisión desde el punto de vista del control» Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI 9.3: 205-218, 2012

[20] María Elena López Guillén «Identificación de Sistemas. Aplicación al modelado de un motor de continua»

# **ANEXO A**

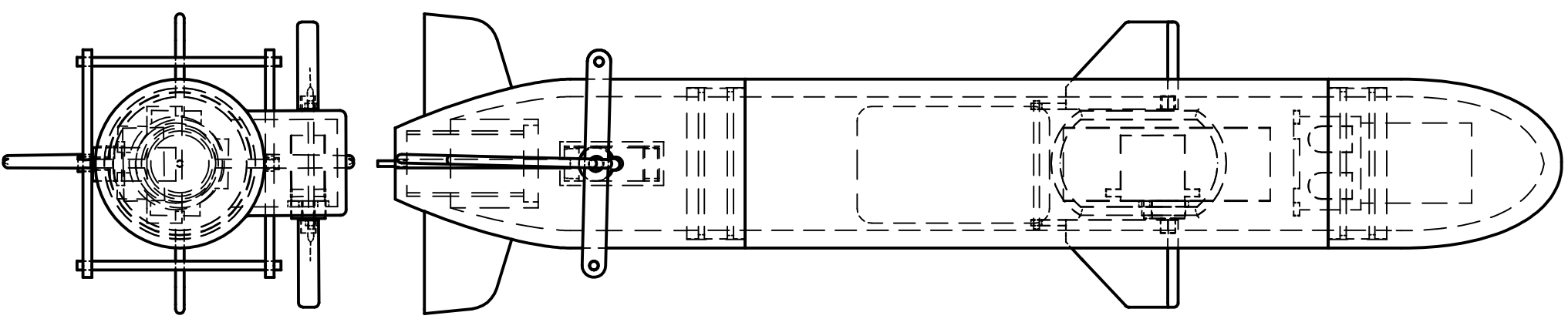
## **PLANOS**

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



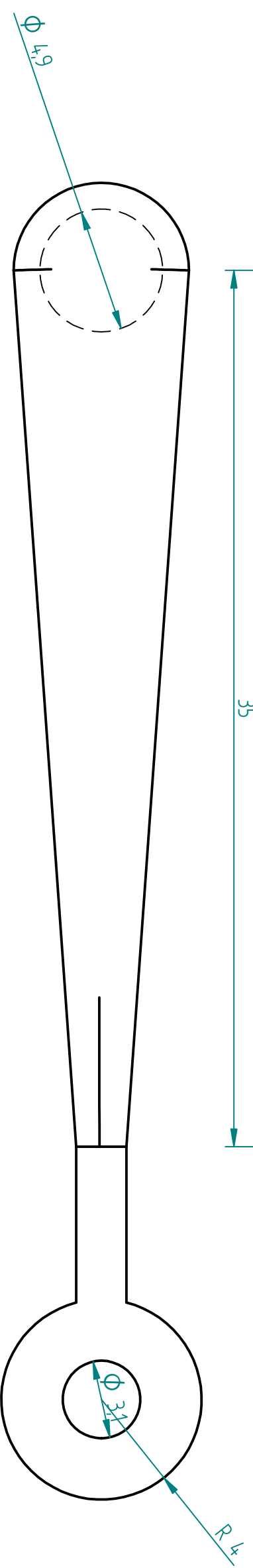
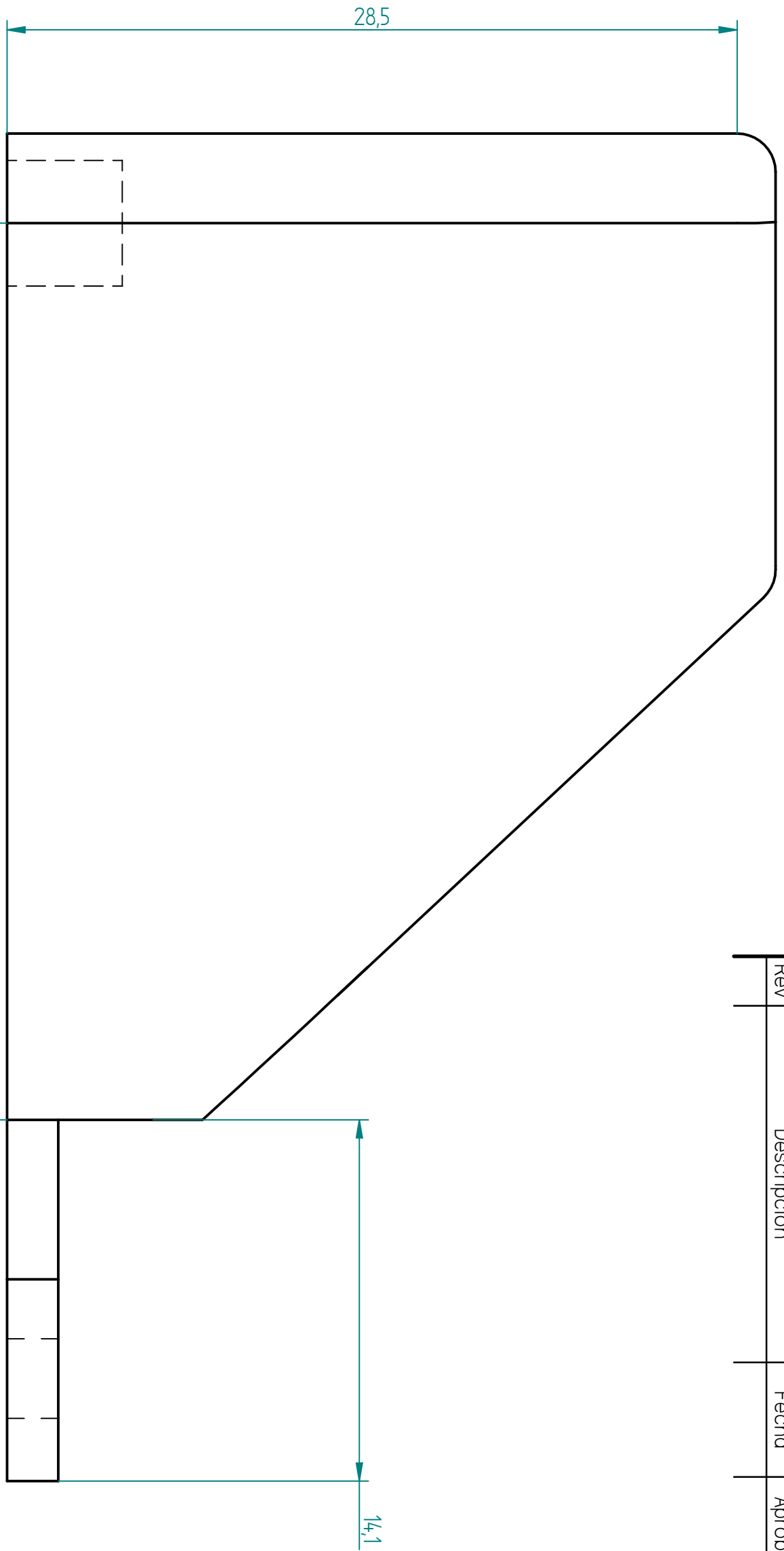
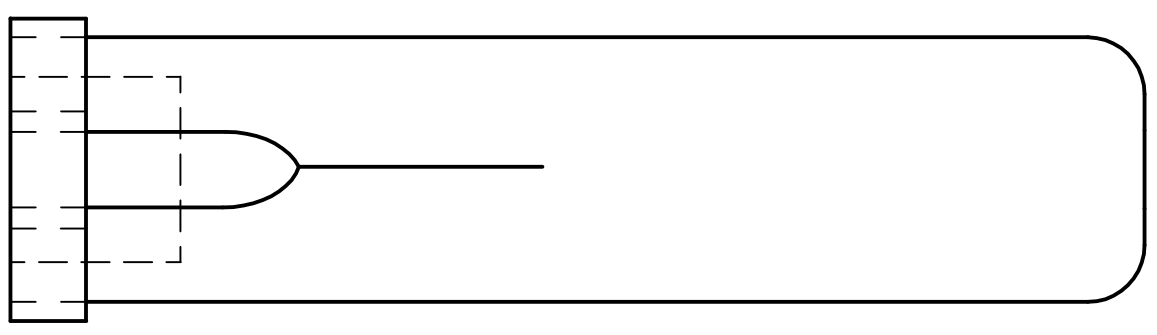
Nombre		Fecha		<b>ICAI</b>		
Dibujado	ANGEEL	1/01/01				
Comprobado						
Aprobado 1						
Aprobado 2				Título		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1º				A3	Plano	Rev
				Archivo: Plano2		
				Escala	Peso	Hoja 1 de 1

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre		Fecha		<b>ICAI</b>		
Dibujado	Angel	1/01/01				
Comprobado						
Aprobado 1						
Aprobado 2				Titulo		
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1º				A3	Plano	Rev
				Archivo: Plano2		
				Escala	Peso	Hoja 1 de 1

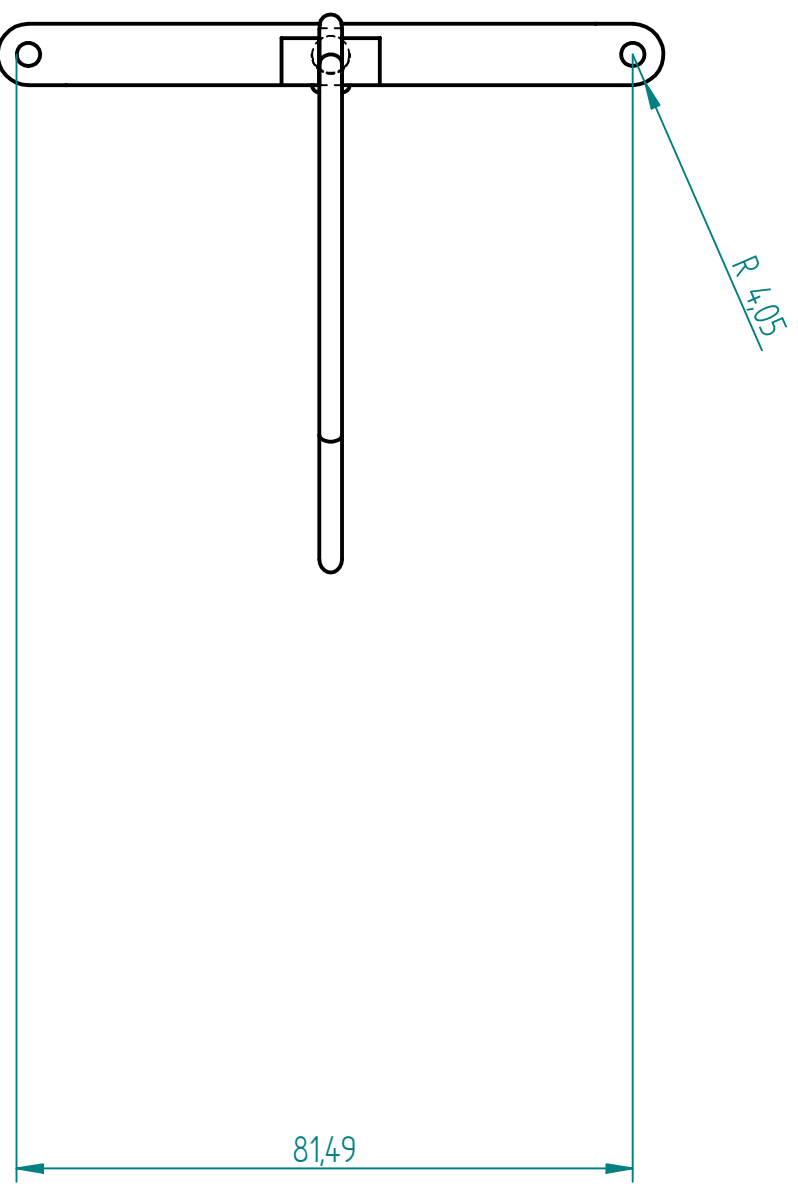
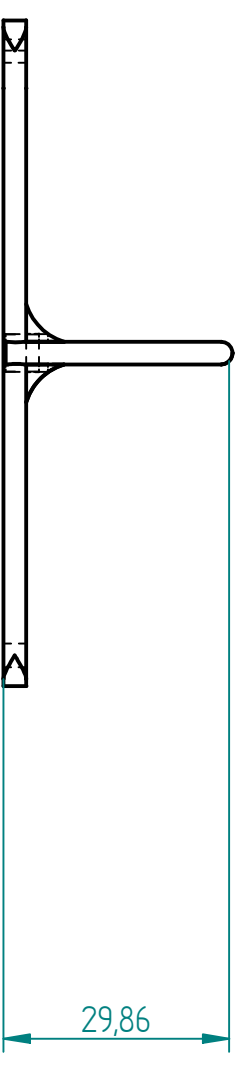
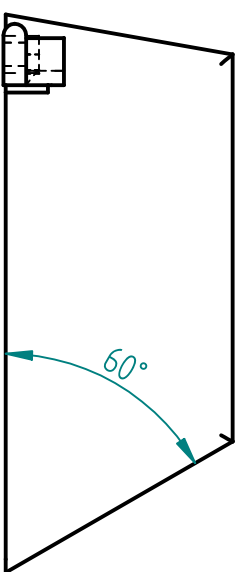
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



<b>ICAI</b>		Nombre	Fecha
		Dibujado	1/01/01
		Comprobado	
		Aprobado 1	
		Aprobado 2	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$		Título	
A3		Plano	Rev
Archivo: Plano2		Escala	
Peso		Hoja 1 de 1	

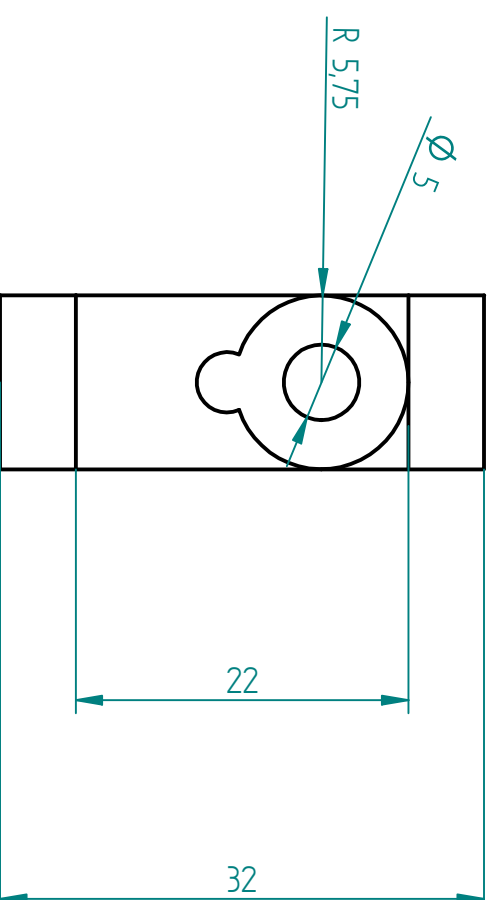
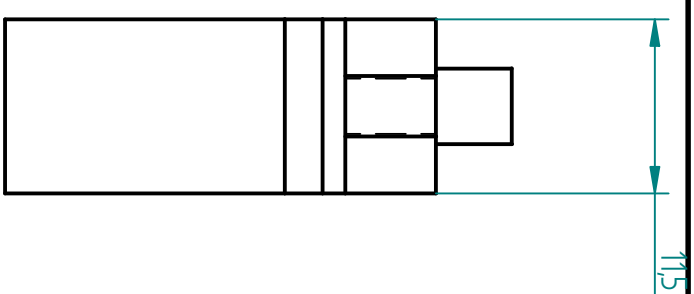
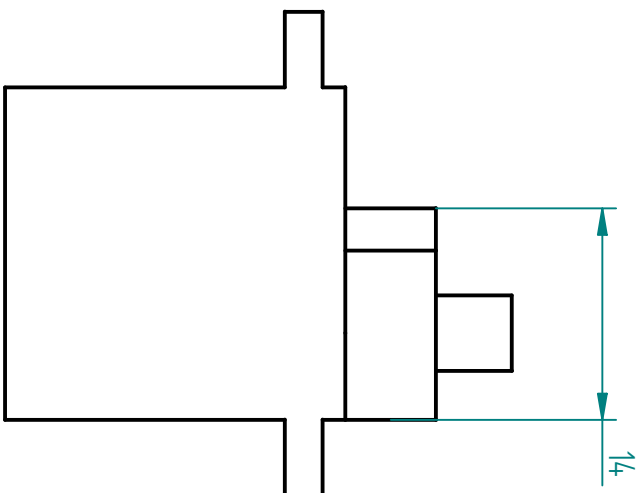


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



Nombre		Fecha		<b>ICAI</b>
Dibujado	ANGEL	1/01/01		
Comprobado				
Aprobado 1				
Aprobado 2				
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°				Título
A3		Plano		Rev
Archivo: Plano2				
Escala	Peso	Hoja 1 de 1		

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

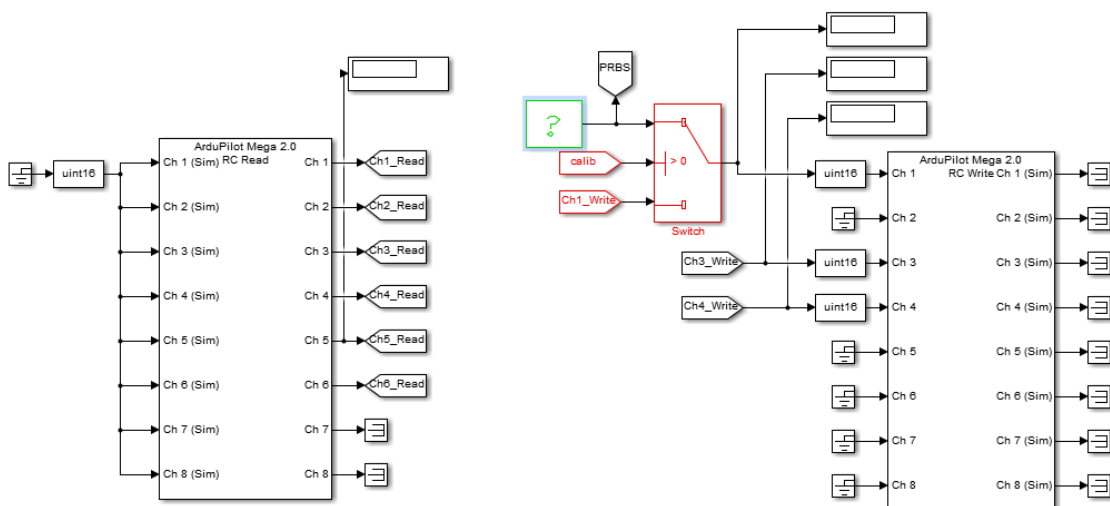


Nombre	ÁNGEL	Fecha	1/01/01
Dibujado			
Comprobado			
Aprobado 1			
Aprobado 2			
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1º			
Título		ICAI	
A3	Plano		Rev
Archivo: Plano2			
Escala	Peso	Hoja 1 de 1	

# ANEXO B

## CÓDIGO DE MATLAB Y DIAGRAMAS DE BLOQUES DE SIMULINK

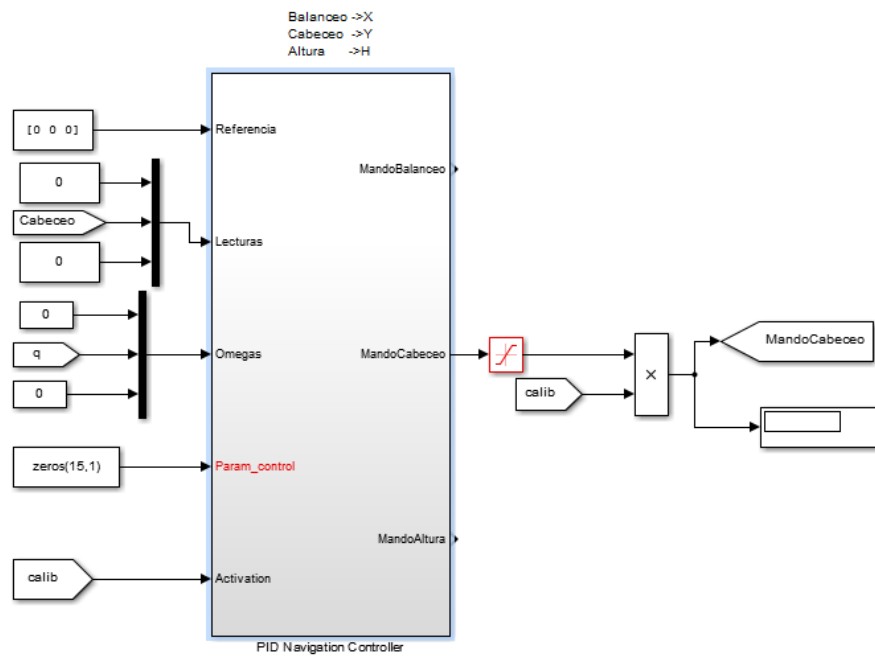
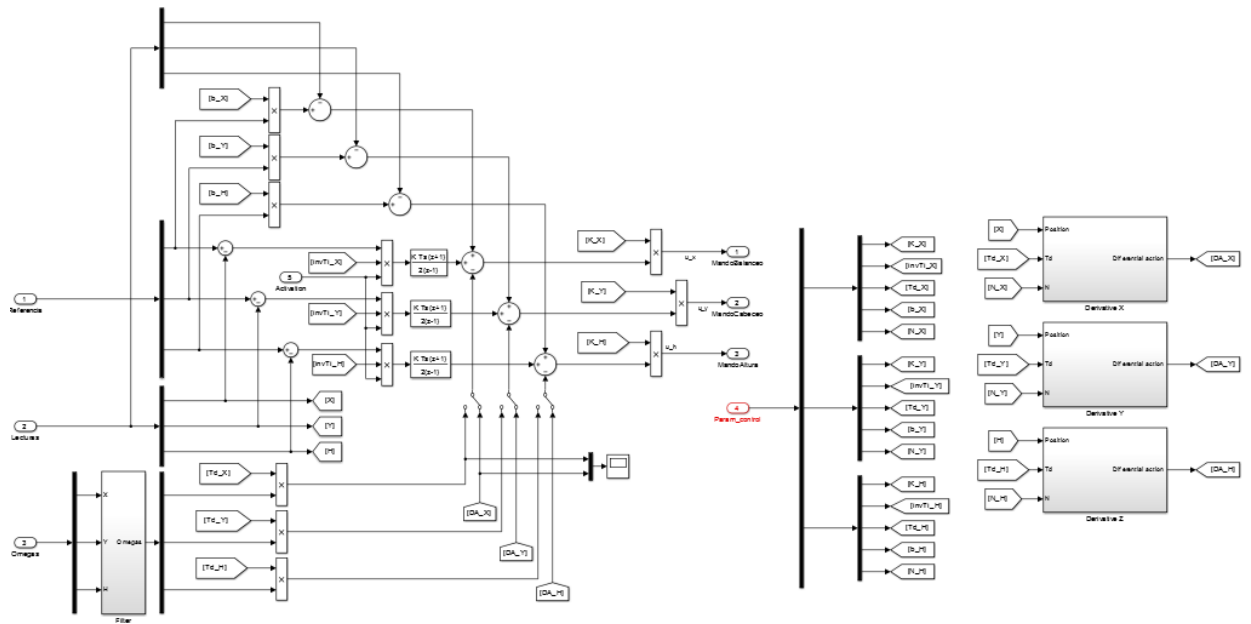
### Diagrama bloques ensayo PRBS



### Código señal PRBS

```
%% Ensayos de un prbs
ts=0.02;
tr=0.02;
uensayo=idinput(750,'prbs',[0 0.02],[1300 1850]);
t=(0:tr:511*tr)';
alfa_CAL_IMU=0.99;
```

# Diagrama bloques PID genérico



## Código control PID genérico

```
ts=0.02;
s=tf('s');
z=tf('z',ts);

model='PID'; %determinar cual es el modelo a meter en el programa.
              %SOLO PD o PID
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Modelo de la planta de distancia
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Tfcabeceo=zpk((-0.0006456*s+6.231e-05)/(s^2+0.08092*s+0.004559));
Pd=Tfcabeceo;

Fm=110; %ideal 70(fmax)110(f=0.15)

wo_pd=2;
wo_pid=11; %ideal 8(fmax),11(f=0.15)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Control PD de posicion
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Margen de fase

er_min_pd_d=10000;
er_min_pid_d=10000;

%Ganancia de la planta en wo
Apd=abs(freqresp(Pd,wo_pd));
% Ganancia del control
Kd_pd=1/Apd;

%Fase que aporta el control en radianes
phi_c= (-180+Fm)*pi/180 - angle(freqresp(Pd,wo_pd));
if (phi_c<0)
    phi_c=phi_c+2*pi;
end

%Filtrado maximo
f=(1-sin(phi_c))/(1+sin(phi_c));
D= 1/wo_pd/f^.5 ;
Kpd= 1/(abs(freqresp(Pd,wo_pd)))*f^.5;

%%AL ERROR%%
%Control
Cpd= Kpd * (1+D*s)/(1+f*D*s);

% Funcion de lazo abierto
Gd_pd=minreal(Cpd*Pd);
% Funciones de tranferencia de lazo cerrado
Fd_pd=minreal(Gd_pd/(1+Gd_pd)); %entrada salida
Fd_ru_pd=minreal(Cpd/(1+Gd_pd)); %entrada mando
Fd_dy_pd=minreal(-Pd/(1+Gd_pd)); %perturbacion salida
Fd_du_pd=minreal(Pd*Cpd/(1+Gd_pd)); %perturbacion mando

%%A LA SALIDA----mejor incluso que el pid en salida
%Control de dos grados de libertad
Cr=Kpd;
```

```

C=Kpd*(1+D*s)/(1+f*D*s);

%Funcion de transferencia del lazo abierto
Gd_pds =C*Pd;
%Funciones de tranferencia de lazo cerrado
Fd_pds= minreal(Cr*Pd/(Gd_pds+1));
Fd_ru_pds=minreal(Cr/(1+Gd_pds));
Fd_dy_pds=minreal(-Pd/(1+Gd_pds));
Fd_du_pds=minreal(Pd*C/(1+Gd_pds));

%Conversion a formato paralelo
Td_d=D*(1-f);
Nd_d=(1-f)/f;
Kpd_d=Kpd;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Control PID
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Ganancia de la planta en wo
Apid=abs(freqresp(Pd,wo_pid));
% Ganancia del control
Kd_pid=1/Apid;

%Ponderacion----->ajustar
b=1.15;

%Fase que aporta la parte integral en radianes
phi_i=-20*pi/180; %parece que a mayor
retraso mejor. KI max para -14 grados; sin embargo con -15 da menos
error a step

%Fase que aporta la parte diferencial en radianes
phi_d= (-180+Fm)*pi/180 - angle(freqresp(Pd,wo_pid)) - phi_i;
if (phi_d<0)
    phi_d=phi_d+2*pi;
end

% Filtro %parece que a mayor f menor
es error de seguimiento. Lo siguiente esta en base a f 0.15
f=0.15
%f=(1-sin(phi_d))/(1+sin(phi_d)); %error

I_pid= -1/(tan(phi_i)*wo_pid);

subid1 = (f^-1 -1)/(2*tan(phi_d)); %Variable auxiliar
subid2 = (((f^-1 -1)/(2*tan(phi_d)))^2 -f^-1)^.5;
D_pid= (subid1 - subid2*0)/wo_pid;

Kpid=1/(Apid*((1+(D_pid*wo_pid)^2)/(1+(f*D_pid*wo_pid)^2))^0.5*((1+(I_p
id*wo_pid)^2)^0.5/(I_pid*wo_pid)));

%%AL ERROR%%
%Control de dos grados de libertad
C_pid= Kpid * (1+D_pid*s)/(1+f*D_pid*s) * (1+1/(I_pid*s));
Cr_pid=Kpid * (1+D_pid*s)/(1+f*D_pid*s) * (b+1/(I_pid*s));

Control_d_cabeceo=c2d(C_pid,ts);

```

```

%Funcion de transferencia del lazo abierto
Gd_pid=C_pid*Pd;
%Funciones de tranferencia de lazo cerrado
Fd_pid=minreal(Cr_pid*Pd/(1+Gd_pid));
Fd_ru_pid=minreal(Cr_pid/(1+Gd_pid));
Fd_dy_pid=minreal(-Pd/(1+Gd_pid));
Fd_du_pid=minreal(Pd*C_pid/(1+Gd_pid));

%%A LA SALIDA%%%%%%%%%
%Control de dos grados de libertad
C_pids= Kpid * (1+D_pid*s)/(1+f*D_pid*s) * (1+1/(I_pid*s));
Cr_pids=Kpid * (b+1/(I_pid*s));

%Funcion de transferencia del lazo abierto
Gd_pids=C_pids*Pd;
%Funciones de tranferencia de lazo cerrado
Fd_pids=minreal(Cr_pids*Pd/(1+Gd_pids));
Fd_ru_pids=minreal(Cr_pids/(1+Gd_pids));
Fd_dy_pids=minreal(-Pd/(1+Gd_pids));
Fd_du_pids=minreal(Pd*C_pids/(1+Gd_pids));

%Conversion a formato paralelo
mu=1+(1-f)*D_pid/I_pid;
Kpid_d=mu*Kpid;
Ti_pid_d=mu*I_pid;
Td_pid_d=(1/mu-f)*D_pid;
N_pid_d=1/mu/f-1;
b_d=b;

%%MODELO ESCOGIDO
switch (model)
    case 'PD'
        Kd=Kpd_d;
        Tdd=Td_d;
        Tid=inf;
        Nd=N_d;
        bd=1;
    case 'PID'
        Kd=Kpid_d;
        Tdd=Td_pid_d;
        Tid=Ti_pid_d;
        Nd=N_pid_d;
        bd=b_d;
end
K_Y=Kd;
Td_Y=Tdd;
invTi_Y=1/Tid;
N_Y=Nd;
b_Y=bd;

sa=2/ts*(z-1)/(z+1);
C_Y=minreal((K_Y*(1+Td_Y*sa/(Td_Y/N_Y*sa+1)+1/invTi_Y/sa)));

%RESPUESTAS A ESCALON REFERENCIA

```

```

t=0:0.005:1; %desde 0 a 1 de 0.005 en 0.005. Matriz
fila

respd_pd=step(Fd_pds,t);
respd_pid=step(Fd_pids,t);

for i=1:201
    t2(i,1)=0.005*i-0.005; %variable tiempo para respuestas.
Matriz columna
end

respuestas_d=[respd_pd respd_pid t2];

%ERROR A ESCALON REFERENCIA

errd_pd=abs(1-respd_pd);
errd_pid=abs(1-respd_pid);

errd_respuestas=[errd_pd errd_pid t2];

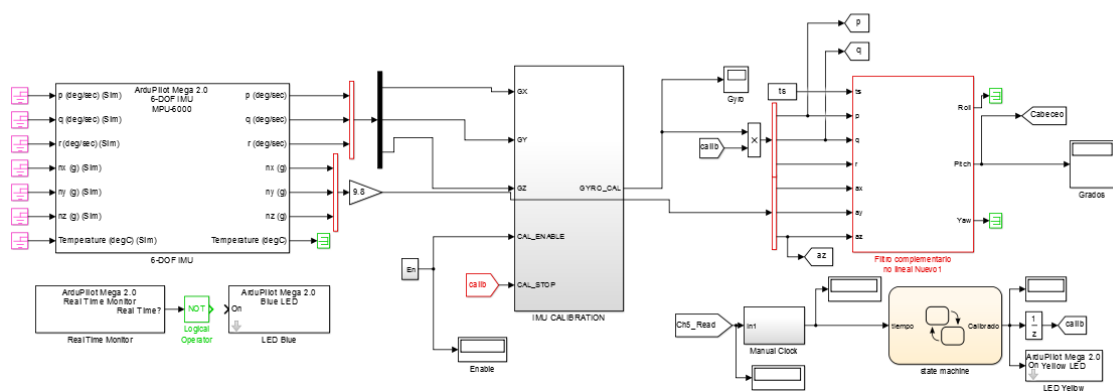
%%ERROR ACUMULADO
for i=1:201
    if (i>1)
        ed_ac_pd(i,1)=errd_pd(i)+ed_ac_pd(i-1,1);
        ed_ac_pid(i,1)=errd_pid(i)+ed_ac_pid(i-1,1);

    else
        ed_ac_pd(i,1)=errd_pd(i);
        ed_ac_pid(i,1)=errd_pid(i);
    end
end

ed_ac_respuestas=[ed_ac_pd ed_ac_pid t2];

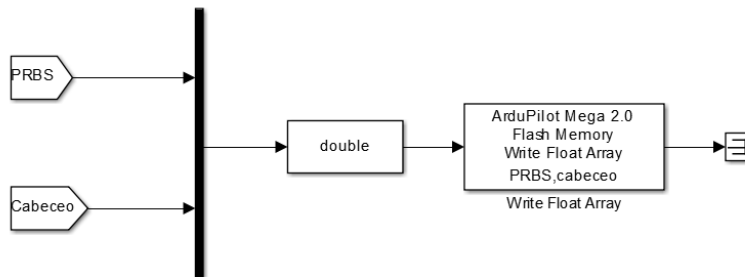
```

## Diagrama bloques Calibración de la IMU





## Diagrama bloques memoria FLASH





# CONSTRUCCIÓN, MODELADO Y CONTROL DE UN SUMERGIBLE A ESCALA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

## PRESUPUESTO

---

*Autor:*

Ángel Salgado Iturrino

*Directores:*

Juan Luis Zamora Macho

Luis Mochón Castro

Julio de 2016



# Índice

1	Recuento de recursos .....	5
1.1	Componentes .....	5
1.2	Mano de obra.....	5
1.3	Herramientas .....	5
2	Costes unitarios .....	7
2.1	Componentes .....	7
2.2	Mano de obra.....	7
2.3	Herramientas .....	7
3	Sumas parciales.....	9
3.1	Componentes .....	9
3.2	Mano de obra.....	9
3.3	Herramientas .....	9
4	Presupuesto total .....	11



# 1 Recuento de recursos

## 1.1 Componentes

Componentes	Cantidad
Plástico ABS alto impacto – material soporte	1 (450g)
Plástico ABS bajo impacto – material relleno	1 (50g)
Microservo	2
Bomba agua peristáltica	1
Motor brushless inrunner	1
Controlador de Velocidad ESC	1
Batería LiPo 950 mAh	1
Transformador tensión UBEC 5V	1
Emisora RC 6 canales 35 Mhz	1
Receptor 6 canales 35 Mhz	1
Tarjeta de control Mini HKPilotMega 2.7	1
Silicona	2
Cinta aislante	2
Depósito expandible	1
Junta Tórica	4

## 1.2 Mano de obra

Actividad	Horas
Diseño y construcción	100
Control remoto	200
Modelado y control automático	200
Redacción de documentos	80

## 1.3 Herramientas

Elemento/Programa	Horas de uso en el proyecto	Horas de uso al anuales
Matlab	150	300
SolidEdge	100	200
Simulink	150	300
Cargador de baterías	10	30
Microsoft Office	100	300
Ordenador	500	2000





## 2 Costes unitarios

### 2.1 Componentes

Componentes	Coste unitario (€)
Plástico ABS alto impacto – material soporte	90
Plástico ABS bajo impacto – material relleno	15
Microservo	12
Bomba agua peristáltica	14
Motor brushless inrunner	16
Controlador de Velocidad ESC	9
Batería LiPo 950 mAh	12
Transformador tensión UBEC 5V	10
Emisora RC 6 canales 35 Mhz	40
Receptor 6 canales 35 Mhz	10
Tarjeta de control Mini HKPilotMega 2.7	70
Silicona	7
Cinta aislante	5
Depósito expandible	2
Junta Tórica	1

### 2.2 Mano de obra

Actividad	Coste (€/hora)
Diseño y construcción	20
Control remoto	30
Modelado y control automático	30
Redacción de documentos	35

### 2.3 Herramientas

Elemento/Programa	Precio (€)
Matlab	76
SolidEdge	87
Simulink	23
Cargador de baterías	12
Microsoft Office	31
Ordenador	750



### 3 Sumas parciales

#### 3.1 Componentes

Componentes	Cantidad	Coste (€/ud)	Coste total (€)
Plástico ABS alto impacto	1 (450g)	90	90
Plástico ABS bajo impacto	1 (50g)	15	15
Microservo	2	12	24
Bomba agua peristáltica	1	14	14
Motor brushless inrunner	1	16	16
Controlador de Velocidad ESC	1	9	9
Batería LiPo 950 mAh	1	12	12
Transformador tensión UBEC 5V	1	10	10
Emisora RC 6 canales 35 Mhz	1	40	40
Receptor 6 canales 35 Mhz	1	10	10
Tarjeta de control HKPilotMega 2.7	1	70	70
Silicona	2	7	14
Cinta aislante	1	5	5
Depósito expandible	1	2	2
Junta Tórica	4	1	4
		<b>Total</b>	<b>335</b>

#### 3.2 Mano de obra

Actividad	Horas	Coste (€/hora)	Coste Total (€)
Diseño 3D submarino	100	20	2.000
Habilitación de navegación	200	30	6.000
Pruebas inmersión	200	30	6.000
Modelado y control	80	35	2.800
Redacción de documentos	100	20	2.000
			<b>Total</b>
			<b>18.800</b>

#### 3.3 Herramientas

$$C_T = C_u \cdot n \cdot \frac{t_p}{t_a} \cdot a \quad ()$$

Siendo  $C_T$  el coste total,  $C_u$  el coste unitario,  $n$  la cantidad,  $t_p$  el tiempo dedicado al proyecto,  $t_a$  el tiempo anual de uso, y  $a$  la amortización, en tanto por uno.



Elemento/Programa	Cantidad	Horas de uso en el proyecto	Horas de uso al año	Amortización anual	Coste (€/ud)	Coste total (€)
Matlab	1	150	300	50%	76	38
SolidEdge	1	100	200	50%	87	43,5
Simulink	1	150	300	50%	23	16,5
Cargador de baterías	1	10	30	30%	12	4
Ordenador	1	500	2000	25%	750	187,5
					<b>Total</b>	<b>289,5</b>

## 4 Presupuesto total

Recurso	Coste (€)	Porcentaje
1. Componentes	335	1,7%
2. Herramientas	289,5	1,4%
3. Mano de obra	18.800	96,9%
<b>Total</b>	<b>19.224,5 €</b>	<b>100%</b>

