



Universidad
Politécnica
de Cartagena

Diseño, modelización y simulación mecánica de un robot submarino controlado remotamente

Trabajo Fin de Máster

Autor: Enrique González Sancho

Titulación: Máster en Ingeniería Industrial

Director: José Luis Aguirre Martínez

Departamento: Departamento de Ingeniería Mecánica

Índice

CAPÍTULO 1	- 1 -
INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 Introducción	- 1 -
1.2 Objetivos	- 2 -
1.3 Descripción de la memoria	- 2 -
1.3.1 Capítulo 1 – Introducción.....	- 2 -
1.3.2 Capítulo 2 – Estado del arte	- 2 -
1.3.3 Capítulo 3 – Selección de componentes.....	- 2 -
1.3.4 Capítulo 4 – Diseño mecánico	- 2 -
1.3.5 Capítulo 5 – Simulación	- 3 -
1.3.6 Capítulo 6 – CFD	- 3 -
1.3.7 Capítulo 7 – Conclusión y trabajos futuros	- 3 -
CAPÍTULO 2	- 5 -
ESTADO DEL ARTE	- 5 -
2.1 Introducción	- 5 -
2.2 Intervention-Class ROVs	- 6 -
2.3 Inspection-Class ROVs	- 7 -
2.4 Aplicaciones de los Inspection-Class	- 8 -
2.5 Subsistemas utilizados en los ROVs	- 9 -
2.6 Modelos relevantes en el mercado	- 10 -
2.6.1 Seabotix	- 10 -
2.6.2 VideoRay.....	- 11 -
2.6.3 Deep Trekker	- 11 -
2.6.4 Saab Seaeye	- 12 -
2.6.5 Aquabotix.....	- 13 -
2.6.6 Outland Technology	- 13 -
2.6.7 Oceaneering.....	- 14 -
2.6.8 OpenROV.....	- 15 -
2.6.9 Blue Robotics	- 15 -
2.7 Conclusiones sobre el estado del arte	- 16 -
CAPÍTULO 3	- 17 -
SELECCIÓN DE COMPONENTES	- 17 -

3.1	Introducción	- 17 -
3.2	Estructura	- 17 -
3.3	Cerramientos estancos	- 19 -
3.4	Propulsión.....	- 20 -
3.4.1	Propulsores de OpenROV.....	- 21 -
3.4.2	Propulsores de Blue Robotics	- 21 -
3.4.3	Propulsores NM150	- 22 -
3.5	Software	- 25 -
3.6	Electrónica.....	- 25 -
3.7	Cámara.....	- 28 -
3.8	Batería.....	- 29 -
3.9	Cable umbilical	- 31 -
3.10	Conjunto final	- 32 -
CAPÍTULO 4		- 35 -
DISEÑO MECÁNICO.....		- 35 -
4.1	Introducción	- 35 -
4.2	Soporte de la electrónica	- 36 -
4.3	Cerramientos estancos	- 38 -
4.4	Frame principal.....	- 41 -
4.5	Posición de los cerramientos estancos.....	- 46 -
4.6	Soportes de los motores	- 47 -
4.7	Zona de flotación	- 48 -
4.8	Finalización	- 49 -
4.9	Centros de fuerzas.....	- 49 -
4.10	Reajuste de flotación.....	- 52 -
4.11	Diseño en SolidWorks	- 54 -
CAPÍTULO 5		- 59 -
SIMULACIÓN		- 59 -

5.1	Introducción	- 59 -
5.2	Carga estructural.....	- 59 -
5.3	Presión hidrostática de trabajo	- 64 -
5.4	Presión hidrostática de fallo.....	- 68 -
CAPÍTULO 6		- 69 -
CONCLUSIÓN Y TRABAJOS FUTUROS.....		- 69 -
6.1	Conclusión	- 69 -
6.2	Trabajos futuros.....	- 70 -
REFERENCIAS.....		- 73 -

Capítulo 1

Introducción

1.1 Introducción

El océano cubre el 71% de superficie de la Tierra [1]. Determina las condiciones del clima, regula la temperatura y proporciona recursos y energía para la humanidad y el resto de los seres vivos del planeta. Aun así, tan sólo hemos explorado el 5% del mismo [2]. Esto se debe principalmente a la falta de tecnologías asequibles que permitan al ser humano ver e interactuar en profundidades a las que por sí solo no puede bajar.

Desde los años 60, la tecnología de ROV (del inglés, Remoted Operated Vehicle), se he desarrollado para aplicaciones militares y para el sector Oil&Gas. Recientemente, diferentes compañías han comenzado a utilizar los mismos conceptos para crear soluciones escaladas, al alcance de empresas pequeñas o grupos de investigación (incluso particulares), lo cual está abriendo un mundo de posibilidades en multitud de campos de aplicación, tales como la mencionada exploración, inspecciones en trabajos submarinos, monitorización de las condiciones del mar, investigación científica, etc.

El concepto de ROV consiste en un vehículo no tripulado, operado de forma remota, y conectado a la estación de control mediante un cable umbilical. Cuenta con autopropulsión por medio de motores eléctricos, y diferentes sistemas de visión, sensores o actuadores, según la aplicación. El objetivo de este Trabajo Fin de Máster es el diseño y validación de un ROV de pequeñas dimensiones, apto para su utilización en aplicaciones de inspección submarina y exploración. Se tendrán en cuenta los materiales, procesos de fabricación y características deseadas que sean necesarios para alcanzar un coste que haga al sistema accesible para los grupos que utilizarán esta tecnología para dichas aplicaciones.

1.2 Objetivos

Para la consecución del objetivo principal, se plantean los siguientes hitos:

- Recopilar información sobre los modelos actuales y sus características.
- Seleccionar los componentes óptimos para la construcción de un modelo de tamaño reducido.
- Modelado 3D del sistema completo.
- Realizar las simulaciones que garanticen el correcto funcionamiento del sistema y definan sus especificaciones esperadas.
- Comparación de los resultados de las simulaciones realizadas con dos programas diferentes: Autodesk Fusion 360 y SolidWorks.
- Fabricar y construir el vehículo.
- Obtener los parámetros que definen el comportamiento dinámico del sistema.
- Realizar una simulación en un entorno virtual.

1.3 Descripción de la memoria

La presente memoria consta de los siguientes capítulos:

1.3.1 Capítulo 1 – Introducción

En este primer capítulo se presenta el trabajo y sus objetivos, y se describen los capítulos que componen la memoria.

1.3.2 Capítulo 2 – Estado del arte

En el Capítulo 2 se realiza un estudio de la tecnología existente en el mercado de la robótica submarina, así como de los proyectos y estudios relevantes en la materia.

1.3.3 Capítulo 3 – Selección de componentes

El capítulo 3 describe detalladamente cada elemento seleccionado, justificando teórica y experimentalmente, cuando sea necesario, la selección y el ajuste realizados en cada caso.

1.3.4 Capítulo 4 – Diseño mecánico

Se utilizarán dos programas de diseño 3D para el modelado del vehículo, a saber, Autodesk Fusion 360, y SolidWorks. Se pretende comparar los resultados de ambos

programas, con el objetivo de definir la viabilidad de plantear un proyecto de este tipo con herramientas accesibles fuera del entorno educativo, como lo es Fusion 360.

1.3.5 Capítulo 5 – Simulación

En este capítulo se realizarán diferentes simulaciones en los programas de diseño utilizados para el diseño mecánico del vehículo. Se plantean las comprobaciones de resistencia de los materiales para esfuerzos sobre la estructura externa, así como simulaciones de presión sobre los compartimentos estancos, obteniendo la profundidad de trabajo del sistema.

1.3.6 Capítulo 6 – CFD

En esta fase se pretende obtener los parámetros hidrodinámicos del ROV, así como la simulación dinámica del conjunto en un entorno virtual. El alcance de esta etapa del proyecto dependerá del tiempo disponible para su desarrollo.

1.3.7 Capítulo 7 – Conclusión y trabajos futuros

Tras la finalización del proceso de diseño, se plantearán las mejoras realizables sobre el sistema objeto del proyecto, así como las continuaciones que se proyectan para las siguientes fases del desarrollo realizado, ampliaciones del campo de aplicaciones del ROV, etc.

Capítulo 2

Estado del Arte

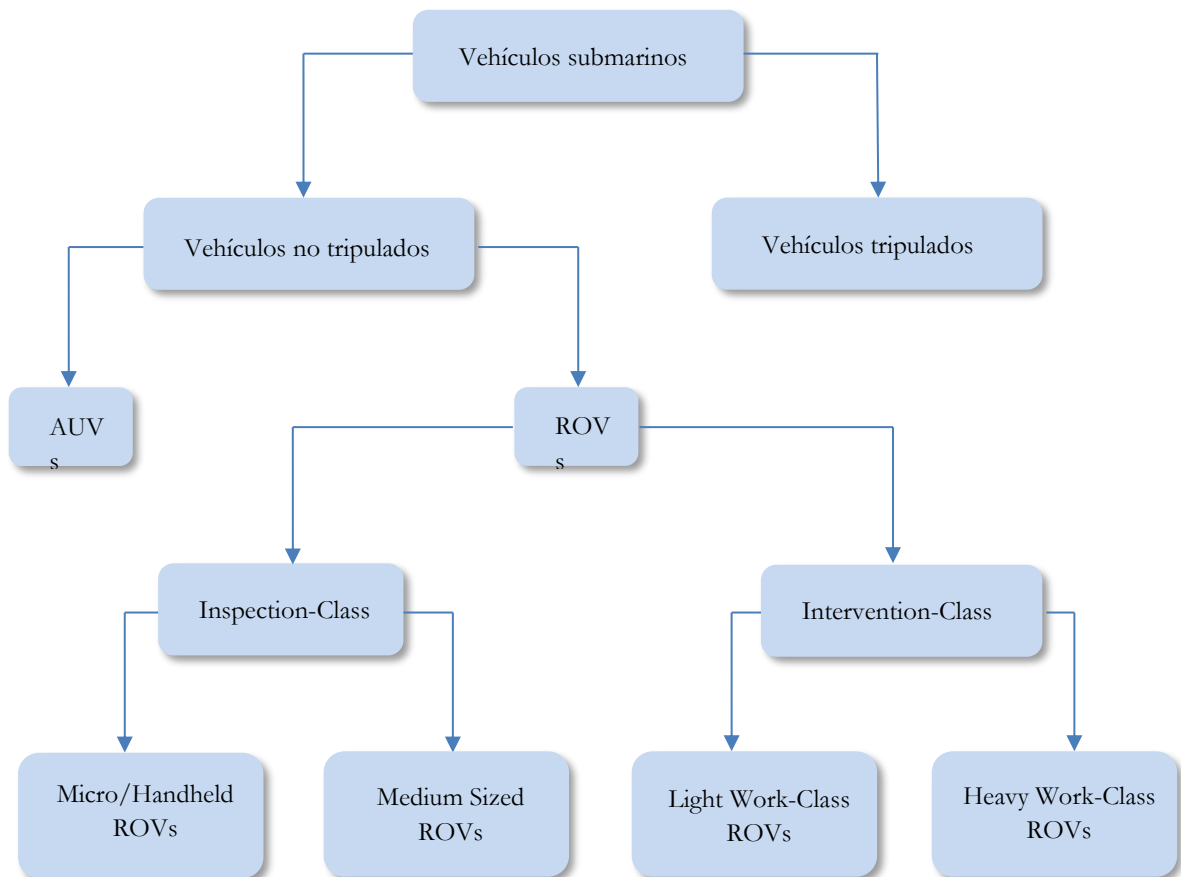
2.1 Introducción

El primer sistema que puede ser enmarcado dentro de la historia de la robótica submarina [3] es conocido como PUV, del inglés, “Programmed Underwater Vehicle”. Dicho sistema consistía en un torpedo, desarrollado por Luppis-Whitehead Automobile en 1864 [4], el cual se programaba para alcanzar objetivos de forma autónoma. Pero el primer ROV con cable umbilical fue desarrollado por Dimitri Rebikoff [5] en 1953, bajo el nombre de POODLE.

Desde entonces, fue la Marina norteamericana la que impulsó el desarrollo de la tecnología hasta un estado funcional, con los modelos CURV, CURV II y CURV III [6], desarrollados para la recuperación de torpedos de prueba y para misiones de rescate. Los logros más destacados de estos modelos fueron la recuperación de una bomba de hidrógeno en la costa de Palomares, España, y el rescate de dos pilotos del submarino PISCES III en la costa de Cork, Irlanda [7].

Más adelante, el desarrollo se focalizó en el sector Oil & Gas [8], extendiendo la profundidad de trabajo y el uso de sistemas de sonar, herramientas y otras cargas de pago.

Podemos clasificar los ROVs siguiendo el siguiente esquema:



A continuación, se describe cada categoría de la clasificación anterior.

2.2 *Intervention-Class ROVs*

Se conocen también como Work-Class ROVs, haciendo la diferenciación entre las categorías “Light” y “Heavy” según la aplicación. Estos sistemas se utilizan sobre todo en el sector Oil & Gas para la realización de trabajos en condiciones de riesgo o a grandes profundidades.

Los vehículos de la categoría Light Work-Class suelen pesar entre 100 kg y 1500 kg. Se trata generalmente de vehículos eléctricos, con subsistemas hidráulicos para los manipuladores. Suelen tener un rango de operación de 3000 m máximo, y se utilizan para trabajos como limpieza, taladrado, o corte en caliente. También se utilizan en aplicaciones de reconocimiento con sistemas de navegación de alta precisión.

Los Heavy Work-Class pueden pesar hasta 5000 kg. Suelen utilizar sistemas hidráulicos tanto para la manipulación como para la propulsión. Pueden trabajar a profundidades de hasta 6000 m, y se utilizan para trabajos más duros que sus hermanos pequeños: Taladrado, corte, construcción, etc.

En cuanto a la propulsión, por lo general utilizan 5 o más motores, siendo 4 de ellos en disposición vectorizada, y el resto como motores verticales.

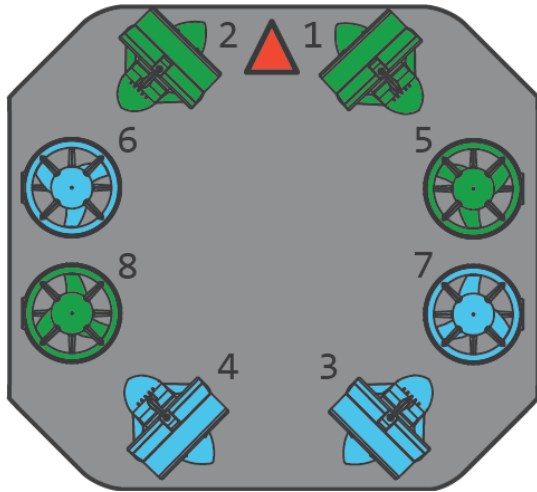


Figura 1 - Configuración 8 motores vectorizados

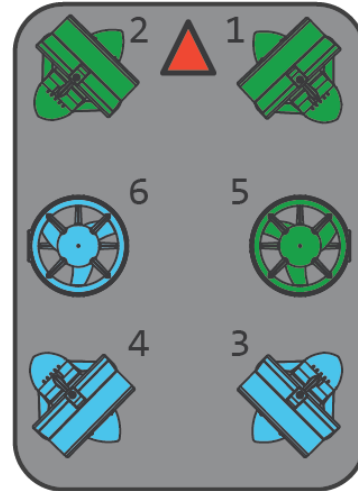


Figura 2 - Configuración 6 motores vectorizados

Debido a su gran peso, su operación requiere de sistemas de lanzamiento y recuperación LARS (Launch And Recovery System), y sistemas de gestión de umbilical (TMS, del inglés Tether Management System). Para la utilización de todos estos sistemas, esta categoría de ROVs suele utilizarse en grandes buques con personal altamente cualificado, lo cual incrementa significativamente los costes operacionales.

En aplicaciones en las que no se requiera una alta capacidad operativa en la realización de trabajos pesados submarinos, este coste deja de tener sentido, por lo que se utilizan los Inspection-Class.

2.3 *Inspection-Class ROVs*

Esta categoría se utiliza generalmente para misiones de inspección visual, toma de datos, o trabajos ligeros con herramientas de menor tamaño que en los Work-Class, o para la recuperación de objetos.

Los Inspection-Class de tamaño medio suelen estar entre los 30 kg y 120 kg. En la mayoría de los casos se pueden desplegar y recoger a mano, pero los modelos más grandes requieren del uso de sistemas LARS, lo cual incrementa sus costes de operación. Es habitual la configuración “Open Frame” o Estructura abierta, lo cual permite la incorporación de sistemas de navegación o medida adicionales, en los casos en los que se realicen trabajos de mapeo del fondo marino, o monitorización de parámetros medioambientales. Los Inspection-Class de medio tamaño suelen estar alimentados por una fuente de alimentación en superficie, la cual provee de tensiones de hasta 600 VDC, a través de umbilicales de fibras de cobre.

En el caso de los Inspection-Class de pequeño tamaño Handheld ROVs (ROVs de mano), están entre los 3 kg y los 20 kg. Se despliegan y recogen a mano, no necesitan de un TMS, y pueden trabajar con menores tensiones, o incluso con baterías, lo cual reduce significativamente los costes en los trabajos realizados con estos equipos. La propulsión suele ser de 3 o 4 motores, dos para avance y giro, y uno o dos para movimientos verticales.

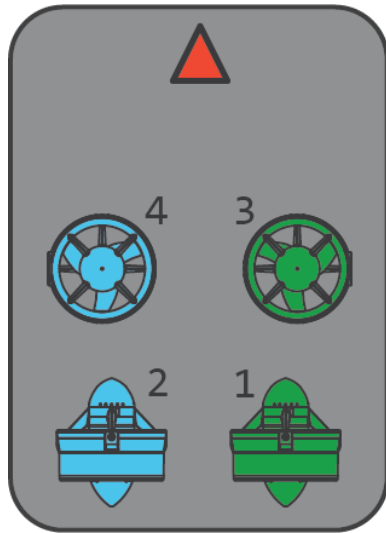


Figura 3 - Configuración 4 motores

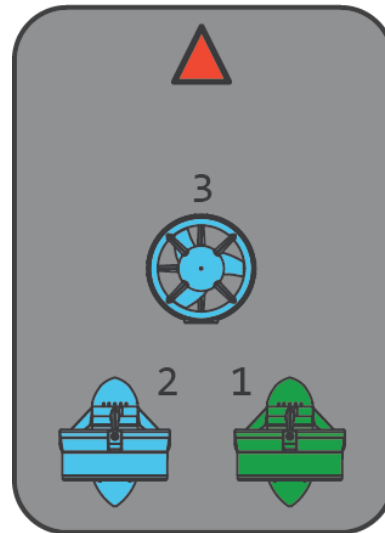


Figura 4 - Configuración 3 motores

En las aplicaciones en las que los Micro-ROVs tienen suficiente potencia/características para realizar el trabajo, resultan muy atractivos debido a la sencillez y el coste de la operación. Por lo general, se utilizan exclusivamente para inspecciones visuales, aunque también se les pueden incorporar pequeños manipuladores para recuperar objetos ligeros, o sistemas de navegación para misiones de mapeo, pero el pequeño tamaño de estos ROVs limita mucho la carga de pago en comparación con sistemas más pesados. La profundidad de trabajo suele ser de hasta 300 m.

2.4 Aplicaciones de los Inspection-Class

Aunque normalmente no vayan equipados con herramientas, los Inspection-Class son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones, tales como:

- Medioambiental: Monitorización de costas y hábitats, control de contaminación.
- Seguridad: Inspección de cascos de barcos, detección de contrabando.
- Energía hidráulica: Inspección de presas, tuberías e instalaciones asociadas.

- Acuicultura: Inspección de redes, retirada de mortalidad.
- Militar: Detonación de minas.
- Ciencia: Investigación del fondo marino, estudios de fauna y flora, recogida de muestras.
- Oil & Gas: Inspección de estructuras y tuberías, detección visual de fugas, acompañamiento a buzos.
- Energías renovables marinas: Inspección de estructuras.
- Nuclear: Inspección en áreas peligrosas para seres humanos.
- Búsqueda y rescate: Misiones de búsqueda o asistencia en el rescate.
- Arqueología submarina: Mapeo del fondo marino, asistencia a buzos.
- Ingeniería civil: Inspección de muelles, puentes y escotillas.

2.5 Subsistemas utilizados en los ROVs

En cuanto a los subsistemas utilizados en el mercado de la robótica submarina, podemos recoger los siguientes elementos:

- **Elementos de flotación:** El material más utilizado para profundidades de hasta 250 m son las espumas de poliuretano. Para profundidades de hasta 700 m, se utilizan espumas de PVC, o espumas sintéticas para las aplicaciones más profundas.
- **Estructura:** Conforme mayor es el tamaño del vehículo, se tiende más a la tipología “Open Frame”.
- **Hidrodinámica:** Por lo general no se le da una gran importancia a la hidrodinámica en los ROVs, ya que la velocidad máxima de desplazamiento no es una característica clave. Algunos vehículos (de pequeño tamaño o los destinados a recorrer distancias grandes) cuentan con formas más hidrodinámicas.
- **Sistemas de alimentación**
 - **Por cable:** Utilizada en los ROVs de mayor tamaño, requiere de una infraestructura en superficie para su funcionamiento, y suelen funcionar a tensiones superiores a los 500VDC.
 - **Por batería:** De utilización más sencilla, pero con limitación autonomía. La duración oscila entre una hora y cuatro, con seis o más en algunos casos.
- **Umbilical:** Se utilizan cables reforzados y normalmente con camisas de poliuretano, ya que ofrece una buena resistencia y reacciona mejor con los adhesivos que el polietileno.

- **Hardware de transmisión de datos:** Se utilizan protocolos como Ethernet o VDSL a través de pares trenzados, o fibra óptica, sobre todo en los Work-Class, dada la inmunidad de esta tecnología a las interferencias producidas por la alimentación en corriente alterna.
- **Propulsores:** Las opciones más extendidas son los motores de continua sin escobillas y los motores acoplados magnéticamente. Los primeros son una opción generalmente más económica, pero los segundos ofrecen una mayor fiabilidad con menos mantenimiento
- **Sistemas de posicionamiento.** Se pueden usar varias alternativas dependiendo de la profundidad de trabajo, de la existencia de vehículo en superficie etc. Son ampliamente utilizados los sistemas LBL, SBL y USBL.

2.6 Modelos relevantes en el mercado

El mercado de los ROVs a nivel internacional tiene una gran inercia, por lo que existen unos pocos modelos protagonistas desde hace años:

2.6.1 Seabotix

[9] Seabotix es una firma norteamericana que trabaja estrechamente con la Marina norteamericana. Ofrecen diferentes modelos de Mini-ROV, que se clasificarían dentro de los Inspection-Class. Las aplicaciones son principalmente militares y de inspección y mapeo del fondo marino.





Figura 5 - Modelos Seabotix

2.6.2 VideoRay

[10] Empresa norteamericana dedicada a la venta de robots de tamaño reducido para uso en inspección de infraestructura sumergida (handhelds). Cuentan con una buena posición en el mercado, con uno de los mayores volúmenes de ventas. Sus ROVs son ampliamente utilizados en la inspección visual y la recuperación de objetos ligeros. Su principal característica es la alimentación a través del umbilical, ya que en ROVs de tan reducidas dimensiones, normalmente se utilizan baterías.



Figura 6 - Modelos VideoRay

2.6.3 Deep Trekker

[11] Empresa canadiense dedicada a la venta de ROVs pequeños (handhelds), con un sistema de Tilt patentado que le da una movilidad característica.



Figura 7 - Modelos Deep Trekker

2.6.4 Saab Seaeye

[12] Con un amplio catálogo de ROVs, según su aplicación, esta empresa sueca se centra en aplicaciones en el sector militar y Oil & Gas. Cuentan con vehículos desde los 60kg hasta los 2100 kg, y profundidades de trabajo hasta los 3000 m. Se enmarcan en los Medium Sized Inspection-Class y los Heavy Work-Class.





Figura 8 - Modelos Saab

2.6.5 Aquabotix

[13] Esta empresa norteamericana cuenta con varios modelos ROVs, y también de UUVs (Unmanned Underwater Vehicles), que se diferencian de los ROVs en que no están operados en remoto por un piloto, sino que realizan misiones de forma autónoma.



Figura 9 - Modelos Aquabotix

2.6.6 Outland Technology

[14] Este fabricante estadounidense dispone de varios ROVs entre 18 kg y 30 kg, en la categoría de Inspection-Class

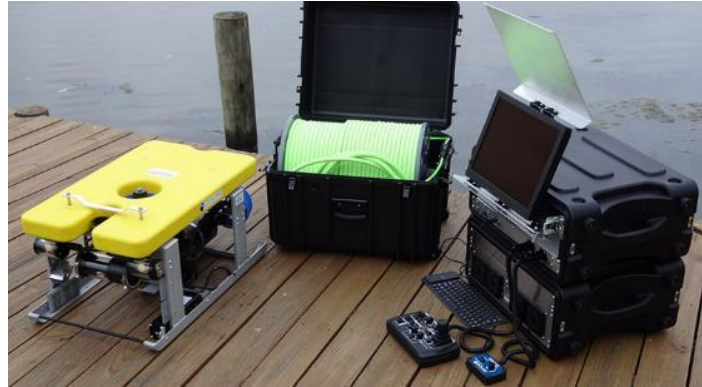


Figura 10 - Modelos Outland Technology

2.6.7 Oceaneering

[15] Fabricante y operador de ROVs más grande del mundo [16]. Dispone de ROVs Work-Class de gran tamaño, enfocados principalmente en el sector Oil & Gas, y de servicios de inspección y trabajos pesados a grandes profundidades.



Figura 11 - Modelos Oceaneering

2.6.8 OpenROV

[17] OpenROV es el primer proyecto relevante de código abierto en el campo de la robótica submarina. Utilizando los mismos principios de diseño de los Micro-ROVs existentes, esta empresa estadounidense redefinió el mercado de dicha categoría de vehículos submarinos, haciéndolos accesibles para empresas pequeñas y particulares. Crearon sucesivas versiones del “OpenROV”, en forma de kits para que el usuario los monte por sí mismo, reduciendo significativamente los costes. El máximo nivel de desarrollo de esta empresa se materializa en su último modelo, el Trident, como un vehículo ensamblado orientado a consumidores más que al mercado profesional.



Figura 12 - Modelos OpenROV y Trident

2.6.9 Blue Robotics

[18] Blue Robotics es otra empresa estadounidense, centrados en la venta de componentes de robótica submarina, incluyendo robots en forma de kits semi-ensamblados. Están más enfocados en el mercado profesional y en la exploración submarina que el caso anterior.



Figura 13 - Modelos Blue Robotics y motor T200

2.7 Conclusiones sobre el estado del arte

Tras la presentación de las diferentes categorías de vehículos submarinos operados remotamente, y los diferentes modelos existentes, retomamos el objeto de este trabajo: el diseño de un ROV Inspection-Class de dimensiones reducidas y bajo coste, orientado a aplicaciones de inspección visual en instalaciones sumergidas. Podemos hacer una recopilación de las características relevantes de los modelos comerciales anteriormente expuestos, los cuales serán de utilidad en el proceso de diseño:

- Nos centraremos en las características propias de la categoría “Micro/Handheld”: entre 3 y 20 kg, sin necesidad de TMS ni LARS.
- Utilizaremos el concepto de “Open Frame” para la estructura, para conseguir una mayor versatilidad y facilidad de fabricación.
- Seleccionamos una configuración de motores vectorizados, para conseguir la maniobrabilidad de un ROV profesional en dimensiones reducidas.
- Utilizaremos alimentación por batería, para simplificar el diseño y la operación del sistema, así como para reducir los costes.

Capítulo 3

Selección de componentes

3.1 Introducción

En este capítulo recopilamos cada componente seleccionado, según las características buscadas para el conjunto final, y siguiendo las premisas descritas en el apartado anterior.

3.2 Estructura

Como se ha establecido en el apartado anterior, se elige la configuración “Open Frame” como formato de estructura. Esto nos permitirá conseguir un diseño versátil, de fácil diseño y fabricación. Además, tras realizar una valoración de los diferentes métodos de fabricación, llegamos a la conclusión que lo óptimo es el mecanizado en un material plástico. A continuación, listamos los diferentes métodos, las características mecánicas del ensamblaje y sus costes estimados:

Tabla 1 - Procesos de fabricación para la estructura

Proceso	Tiempo de fabricación	Material	Coste
Impresión SLA	4 días	Resina	732€
Impresión FDM	7 días	ABS	196€
Impresión FDM	7 días	PETG	355€
Mecanizado CNC	3 días	HDPE	
Molde de silicona	7 días	ABS	

De la tabla anterior, obtenemos que el proceso más económico (sin tener en cuenta el tiempo de fabricación) es la impresión 3D FDM. No obstante, las especificaciones físicas de los filamentos (PLA, ABS o PETG) no es la más recomendable para piezas estructurales

sometidas a esfuerzos elevados y en ambientes exigentes como son los exteriores expuestos al sol y al mar.

La siguiente opción es el mecanizado en HDPE. Este método, además, nos ofrece una mayor flexibilidad en el diseño que utilizando perfiles de aluminio, y eliminamos partes estructurales con contacto entre aluminio y tornillería en acero inoxidable, los cuales serían un punto débil en cuanto a corrosión galvánica.

En cuanto a las dimensiones, fijamos un peso objetivo de 6 kg, siguiendo la premisa de conseguir una fácil manipulación del equipo. Para fijar las dimensiones del equipo, podemos realizar una aproximación del tamaño del Frame apropiado para conseguir un peso final de 6 kg. Todo ROV se diseña para ser neutro en el agua, pero dependiendo de los materiales utilizados, el volumen de agua desalojado puede variar para un mismo tamaño. A partir de los modelos existentes de Micro-ROVs podemos obtener la “densidad” de los mismos, teniendo en cuenta no el volumen de agua desalojado, sino el volumen calculado con las dimensiones de la estructura. Partimos de los tres modelos siguientes:

Tabla 2 - Pesos de dimensiones de micro-ROVs

MODELO	PESO	DIMENSIONES	DENSIDAD
VIDEORAY PRO	6.1 kg	37.5x28.9x22.3 cm	0.252 kg/L
OPENROV	2.6 kg	30x20x15 cm	0.289 kg/L
BLUEROV2	11 kg	47.5x33.8x25.4 cm	0.270 kg/L
MEDIA	-	-	0.270 kg/L

Por tanto, el volumen de la estructura quedaría en 22.19 L. Tenemos que:

$$a \times b \times c = 2.219 \times 10^4 \text{ cm}^3 \quad \text{donde: } \begin{cases} a = \text{largo} \\ b = \text{alto} \\ c = \text{ancho} \end{cases}$$

Con objetivo meramente estético, definiremos la relación entre las aristas de la estructura siguiendo la proporción aurea:

$$\frac{a}{b} = \frac{b}{a-b} \quad \text{de donde: } a = \varphi \times b \quad \text{con: } \varphi = 1.6180339887 \dots$$

Establecemos que el alto y el ancho sean iguales: $b = c$

Por tanto, tenemos el siguiente sistema de 3 ecuaciones y 3 incógnitas:

$$\begin{cases} a \times b \times c = 2.219 \times 10^4 \text{ cm}^3 \\ a = \varphi \times b \\ b = c \end{cases} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} a = 38.73 \\ b = 23.94 \\ c = 23.94 \end{cases} \text{ cm}$$

Utilizaremos estas dimensiones como aproximación para obtener el peso deseado. Evidentemente, estarán sujetas a modificaciones según los elementos seleccionados en adelante, y su disposición en el conjunto.

3.3 Cerramientos estancos

Los cerramientos estancos suelen ser el elemento crítico en cuanto a la profundidad máxima de trabajo de un ROV. Lo habitual es ver cerramientos de acrílico, PVC, aluminio, acero inoxidable o titanio. Por razones de coste, utilizaremos el acrílico o el PVC.

Constructivamente, se suele utilizar un tubo cilíndrico con dos tapas o bridas, las cuales llevan las juntas tóricas que se encargan de sellar el compartimento. La empresa Blue Robotics tiene unos cerramientos de este tipo, con tubo de acrílico, por precios bastante económicos:

Tabla 3 - Especificaciones de cerramientos estancos

MODELO	DIMENSIONES EXTERNAS	ESESOR	PROFUNDIDAD MÁXIMA	COSTE
TUBO 2"	57.2 \varnothing x 322 mm	3.2 mm	100 m	92€
TUBO 3"	88.9 \varnothing x 329 mm	6.3 mm	150 m	123€
TUBO 4"	114.3 \varnothing x 334 mm	6.3 mm	100 m	142€

Utilizaremos dos cerramientos estancos, uno para la electrónica y otro para la batería. La razón de esta separación es la de evitar exponer la electrónica del ROV en el momento de un cambio de batería, operación que puede hacerse en un entorno húmedo. La disposición de cada una de las 3 alternativas anteriores quedaría, en el Frame definido en el apartado 3.2, de la siguiente manera:

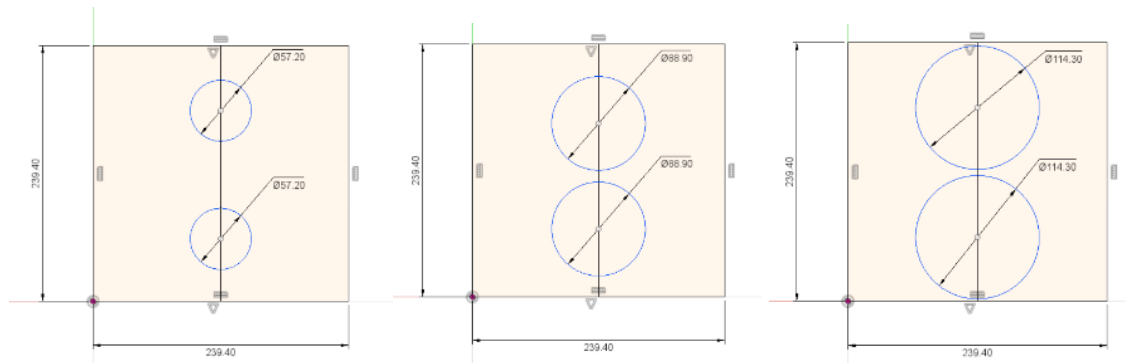


Figura 14 - Tamaño de cerramientos relativos a la estructura

Se descarta la opción de 2 pulgadas, por el poco espacio que aporta para la electrónica del vehículo. En cuanto a las otras dos opciones, la de 4 pulgadas queda muy justa en la estructura, por lo que se evaluará la utilización del tubo de 3 pulgadas. Tras la definición de todos los componentes que deben ir dentro de los tubos, así como del tamaño de la batería, se verificará o no la viabilidad de esta medida, pero por el momento haremos esta preselección.



3.4 Propulsión

En cuanto a la propulsión, tenemos las siguientes opciones en el mercado:

- Motores de continua con escobillas
- Motores de continua sin escobillas
- Motores acoplados magnéticamente
- Motores sin núcleo o de anillo (core-less)

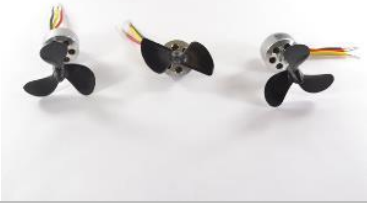
Los motores con escobillas se consideran hoy en día una opción de bajo coste, pero con un mantenimiento complicado y problemático, con un alto riesgo de entrada de agua a través del eje. Por esta razón los motores sin escobillas se utilizan mucho más en los modelos más modernos. Los motores acoplados magnéticamente, también conocidos como motores de rotor externo (outrunner), son una solución ideal para aplicaciones submarinas, debido a la facilidad para sellar las partes sensibles al agua marina (estator). Por último, los motores de anillo consisten en un estator externo y un rotor interno, conectado directamente a la hélice, sin la utilización de eje. Este tipo de motor ofrece mejores características, alto rendimiento, son muy silenciosos, pero son más costosos que los motores sin escobillas, por lo que no los consideraremos como una opción para el presente proyecto.

Por su simplicidad, robustez y coste, elegimos los motores “brushless outrunner” (sin escobillas, de rotor externo).

Las opciones más económicas del mercado dentro de esta categoría son las utilizadas por los micro-ROVs OpenROV y BlueROV2. Los respectivos modelos de propulsor son los siguientes:

3.4.1 Propulsores de OpenROV


Tabla 4 - Propulsor DST-700

	Dimensiones:	Motor: 30.15 ø x 59 mm	Coste:	19€
		Hélice: 56.8 mm ø		
		Empuje: 0.75 kg		
		Potencia: 140 W		
DST-700	Tensión:	7.4 – 14.4 V		

3.4.2 Propulsores de Blue Robotics


Blue Robotics tiene dos propulsores de diferente potencia, pero de unas dimensiones similares. El de menor empuje es el T100:

Tabla 5 - Propulsor T100

	Dimensiones:	Motor: 100 ø x 102 mm	Coste:	119€
		Hélice: 76 mm ø		
		Empuje: 2.36 kg		
		Potencia: 135 W		
T100	Tensión:	6 - 16 V		

La opción de más vatios es el T200:

Tabla 6 - Propulsor T200


	Dimensiones:	Motor: 100 ø x 113 mm	Coste:	169€
		Hélice: 76 mm ø		
		Empuje: 5.1 kg		
		Potencia: 350 W		
T200	Tensión:	6 - 20 V		

Por un lado, los motores de OpenROV han reportado demasiados casos de fallo por corrosión en los bobinados o rotura de los cables, por lo que los descartaremos por falta de fiabilidad. Por otro lado, los motores T100 y T200 supondrían un coste demasiado alto dentro de las restricciones económicas planteadas, además de ser de un tamaño excesivamente grande para conseguir las dimensiones planteadas en el apartado de estructura. Ya que los motores supondrán una gran parte del coste total del ROV, realizamos una búsqueda más exhaustiva. Encontramos un motor brushless outrunner, preparado para uso marino en un proveedor en China.

3.4.3 Propulsores NM150

Las características son las siguientes:

Tabla 7 - Propulsor NM150

	Dimensiones:	Motor: 28 ø x 48.5 mm	Coste:	35€
		Hélice: 68 mm ø		
NM150	Empuje:	3 kg		
	Potencia:	150 W		
	Tensión:	12 - 24 V		

El grado de protección es mucho mayor que el caso del DST-700:

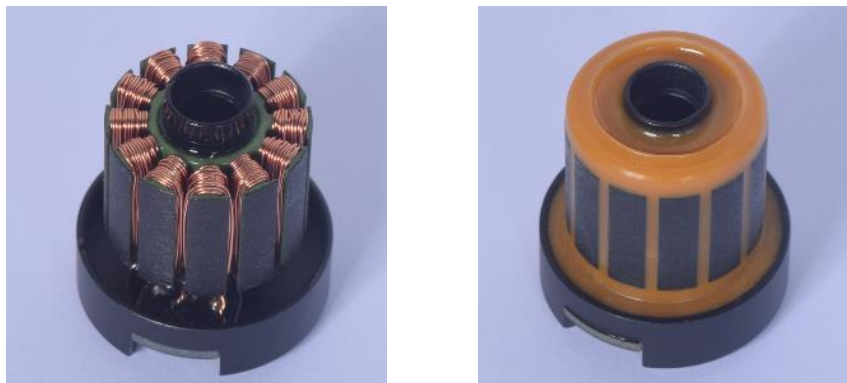


Figura 15 - Protección del bobinado del propulsor NM150

En estas imágenes podemos ver el estator antes y después del proceso de recubrimiento con resina epoxi.

Utilizaremos la muy extendida configuración de 6 motores vectorizados, 4 para propulsión, movimiento lateral y guiñada (yaw), y 2 para el movimiento vertical y la compensación de alabeo (roll).

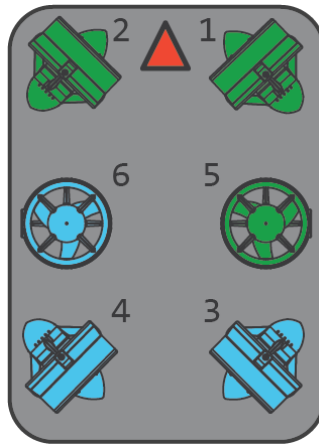


Figura 16 - Configuración de motores seleccionada

Los motores brushless utilizan variadores de velocidad electrónicos (ESCs), para hacer la conmutación que realizan las escobillas en los motores de este tipo. La elección del ESC se realiza únicamente en función de la tensión de funcionamiento, y la relación entre la corriente que el variador puede proporcionar, y la que consumirá el motor para un par determinado, según la hélice que se incorpore. El fabricante nos proporciona la siguiente información:

Tabla 8 - Especificaciones del propulsor NM150

电压 Voltage(V)		No Load 空载		Rated Load 额定负载			Stall 堵转		
Operating Range	Rated	Speed (rpm)	Current (A)	Torque (mNm)	Speed (rpm)	Current (A)	Output P. (W)	Torque (mNm)	Current (A)
3S、4S	12	6300	0.34	170.3	3150	8	56.2	340.5	15.64
3S、4S	14.8	8120	0.38	208	4070	10.54	89	416.8	20.8
3S、4S	16	8951	0.41	226.7	4476	11	106.3	453.4	21.6
3S、4S	24	13000	0.62	329	6500	15.43	224	658.1	30.25

Note: the above rated load is mainly used in underwater

Es recomendable la elección de un ESC cuya corriente nominal sea al menos un 20% superior a la corriente nominal del motor. Siendo la corriente máxima de 15.43 A, podría ser aconsejable la utilización de ESCs de 20 A si trabajamos a 24 V, o de 15 A trabajando a 14.8 V. No obstante, existe el riesgo de que los motores queden bloqueados por diversos motivos (corrosión, bloqueo externo por acción de una red, mal ensamblaje del propulsor, etc.). En tal caso, estaríamos en el caso “Stall” o rotor bloqueado, lo cual supone un aumento de corriente. Ante la posibilidad de que ocurra esto, aunque sea de forma eventual y por un tiempo reducido, debemos ampliar el rango de corriente para que los variadores puedan soportar picos de este calibre: 30 A para 24 V, y 20 A para 14.8 V.

Hemos de tener en cuenta una restricción más a la hora de elegir los variadores, y es el tamaño de estos. Las dimensiones que podemos encontrar para las categorías de 20 y 30 A son:

- ESCs 20 A: 23 x 12.5 mm
- ESCs 30 A: 54 x 26 mm

Tras la elección del tubo de 3" (diámetro interno de 76.2 mm), podemos comprobar rápidamente que el espacio disponible para los variadores es demasiado limitado para ESCs de 30 A:

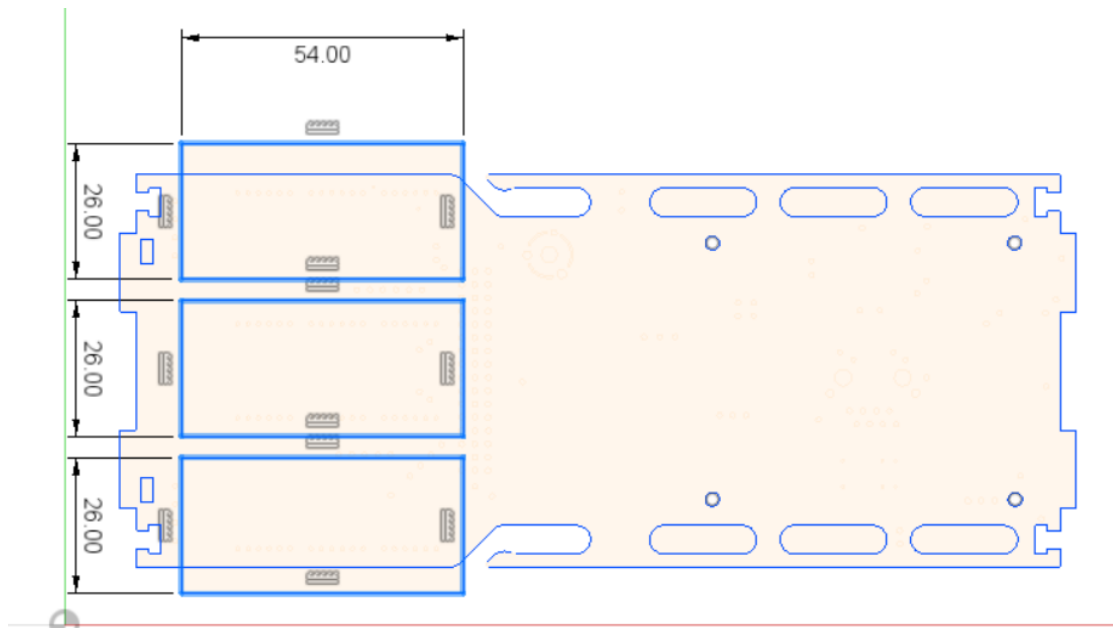


Figura 17 - Disposición de ESCs de 30A

En esta figura se muestra una primera aproximación a la estructura que sostendrá la electrónica dentro del cerramiento superior. Los ESCs irán dispuestos a cada lado de la estructura central, 3 en cada cara. La parte delantera está reservada para la electrónica de control, por lo que el espacio disponible no es suficiente para los variadores de mayor amperaje. Por otro lado, la opción de 20 A se ajusta de sobra al espacio disponible:

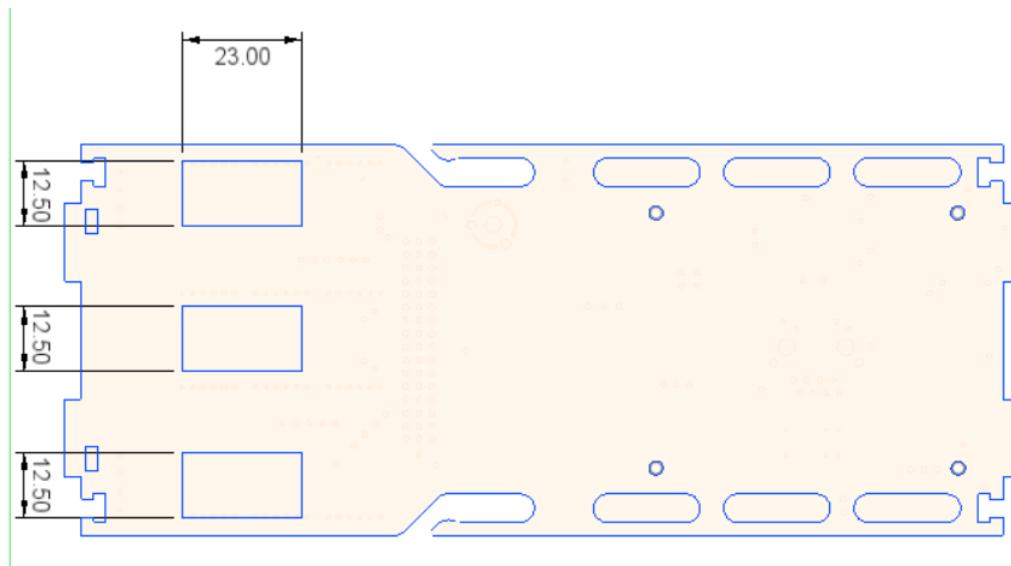


Figura 18 - Disposición de ESCs de 20A

Preseleccionamos por tanto los variadores de 20 A, alimentando con una batería de 14.8 V.

3.5 Software

En cuanto al Software necesario para una navegación estable, definimos las siguientes necesidades:

- Control manual de los motores del vehículo
- Visualización en tiempo real de vídeo
- Visualización de rumbo y profundidad
- Modos de navegación manual y asistido (auto-mantener rumbo)
- Ajuste de parámetros de vídeo para diferentes condiciones de visibilidad
- Visualización de nivel de batería
- Guardado de logs de actividad

El manejo del ROV será muy parecido al de los drones aéreos, por lo que la utilización de plataformas compatibles entre ambos campos es un paso lógico. Existe un proyecto de código abierto llamado ArduPilot [17], el cual cuenta con variantes para una gran variedad de vehículos:

- ArduCopter: Multicópteros
- ArduPlane: Drones de ala fija
- ArduRover: Vehículos terrestres
- ArduBoat: Vehículos marinos de superficie
- ArduSub [18]: Vehículos submarinos

Dicho proyecto consiste en la implementación de todos los elementos de control necesarios para una navegación estable, controlado a través de comandos enviados desde una estación de control en tierra. La transmisión entre ambos nodos se realiza mediante el protocolo MAVLink [19].

Como estación de control existen diferentes programas compatibles con MAVLink, entre los cuales QGroundControl [20] destaca por su amplia comunidad de desarrollo en el campo de los vehículos submarinos.

3.6 Electrónica

En la documentación de ArduPilot podemos encontrar la lista de controladoras compatibles [19]:

- Pixhawk
- The Cube
- Pixracer
- Pixhack v5
- Beagle Bone Blue
- Erle-Brain

- F4BY
- OpenPilot Revolution
- PXFmini RPi Zero Shield
- TauLabs Sparky2

La placa más extendida en ArduSub es la Pixhawk. Implementaremos esta en las fases iniciales, revisando en las fases siguientes las ventajas de utilizar otro hardware, si las hay.

Las características de la Pixhawk son las siguientes:

- **Procesador**
 - 32-bit ARM Cortex M4 core con FPU
 - 168 Mhz/256 KB RAM/2 MB Flash
 - 32-bit failsafe co-processor
- **Sensores**
 - MPU6000 como IMU principal
 - Giróscopo ST Micro 16-bit
 - Acelerómetro / magnetómetro ST Micro 14-bit
 - Barómetro MEAS
- **Alimentación**
 - Controlador de diodo ideal con conmutación automática
 - Rail servo de alta potencia (7 V)
 - Protección de corriente en todas las salidas a periféricos, entradas con protección ESD
- **Conectividad**
 - 5x puertos serie UART, 1 de alta potencia
 - Entrada Spektrum DSM/DSM2/DSM-X
 - Entrada S.BUS Futaba (salida no implementada todavía)
 - Entrada PPM
 - Entrada RSSI (PWM o voltaje)
 - I2C, SPI, 2x CAN, USB
 - Entradas ADC 3.3V y 6.6V
- **Dimensiones**
 - Peso 38 g
 - Ancho 50 mm
 - Altura 15.5 mm
 - Longitud 81.5 mm



Figura 19 - Autopiloto Pixhawk

Estas especificaciones son ideales para nuestra aplicación, ya que nos aportan todas las salidas necesarias para el control de hasta 8 motores, y 6 elementos auxiliares. Nos permite la incorporación de sensores de presión y temperatura, la estabilización a través de las lecturas de inercia de la IMU y capacidad de procesamiento de sobra para ejecutar el Software planteado.

La única carencia de este Hardware es la capacidad de gestión de vídeo. Es por tanto necesario incorporar un ordenador de a bordo capaz de procesar el vídeo y retransmitirlo a la estación de control. La opción más utilizada y con la mayor comunidad de usuarios es sin duda la Raspberry Pi. Con este sistema tenemos multitud de opciones para obtener imágenes, con cámaras nativas de Raspberry o cámaras USB.



Figura 20 - Ordenador embebido Raspberry Pi 3 Model B

El esquema de funcionamiento de ArduSub, comunicando los comandos de MAVLink a través de una Raspberry Pi, sigue el siguiente diagrama:

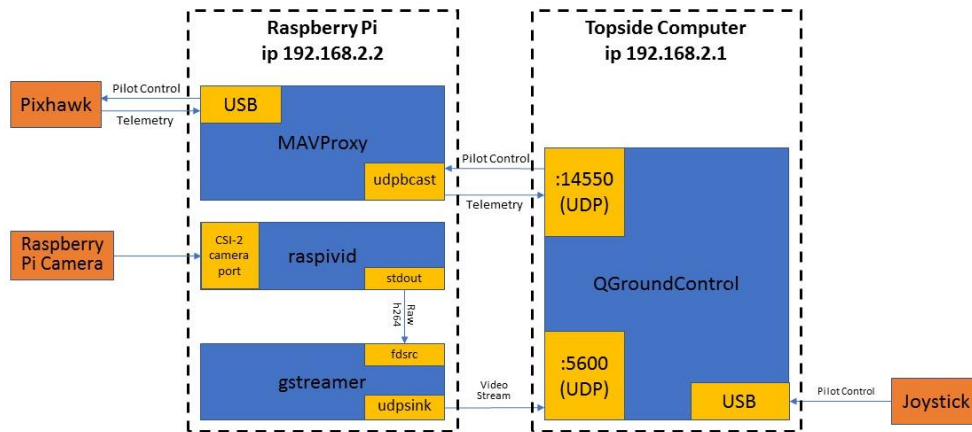


Figura 21 - Diagrama de funcionamiento de los módulos de Software

3.7 Cámara

La cámara de Raspberry es la primera opción que debemos valorar, al ser un accesorio del ordenador de a bordo seleccionado. Las características son las siguientes:

- Precio: \$25
- Dimensiones: 25 x 24 x 9 mm
- Peso: 3 g
- Resolución fotografía: 8 Megapíxeles
- Video: 1080p30, 720p60 y 640×480p60/90
- Sensor: Sony IMX219
- Tamaño de píxel: 1.12 μm x 1.12 μm
- Tamaño de la óptica: 1/4"
- Foco fijo: 1m - infinito
- FOV (horizontal): 62.2°
- FOV (vertical): 48.8°

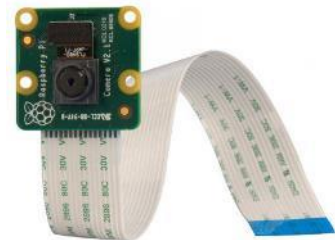


Figura 22 - Raspicam

Esta cámara tiene principalmente dos carencias para nuestro caso de uso: El tamaño de píxel y el ángulo de visión. El tamaño de píxel, junto con la cantidad de los mismo, determina la cantidad de luz que el sensor es capaz de captar, por lo que necesitaremos maximizar este parámetro para poder captar buenas imágenes en ambientes de poca luminosidad. En cuanto al ángulo de visión, con un angular tan reducido, la navegación puede resultar complicada, sobre todo en condiciones de visibilidad reducida.

Evaluamos otra opción: “Blue Robotics’ Low Light Analog Camera”:

- Precio: \$28
- Dimensiones: 38 x 38 x 22 mm
- Peso: 6 g
- Resolución: 700TVL (analógica)
- Sensor: Sony Super HAD 810 CCD
- Tamaño de píxel: 5.00 μm x 7.40 μm
- Sensibilidad: 0.0003 lux
- Tamaño de la óptica: 1/3"
- FOV (horizontal): 128°
- FOV (vertical): 96°



Figura 23 - BR analog camera

Esta cámara encaja con las necesidades planteadas en un ROV. No obstante, dada la baja resolución que ofrece, exploramos una tercera opción:

Blue Robotics’ Low-Light HD USB Camera:

- Precio: \$77
- Dimensiones: 32 x 32 x 23.35 mm
- Peso: 6 g
- Resolución: 2MP, 1080p
- Sensor: Sony IMX322
- Tamaño de píxel: 2.80 μm x 2.80 μm
- Tamaño de la óptica: 1/2.9"
- Foco fijo: 1m – infinito
- FOV (horizontal): 80°
- FOV (vertical): 64°



Figura 24 - BR HD camera

Aunque un poco más cara, esta cámara ofrece una mejor calidad de imagen que las otras dos alternativas, por lo que la preseleccionamos como primera alternativa.

3.8 Batería

Para selección de la batería, necesitamos saber el consumo total del sistema, el cual vendrá caracterizado principalmente por el consumo de los motores. Éstos, tienen un consumo teórico de 10.54 A, con lo cual podemos calcular de forma sencilla el consumo total del sistema:

$$I_{Total} = n \times I_{motor} + I_{elect}$$

$$\text{Donde: } \begin{cases} n = \text{número de motores del vehículo} = 6 \\ I_{motor} = \text{Corriente por motor} = 10.54 \text{ A} \\ I_{elect} = \text{Consumo de la electrónica} = 3 \text{ A} \end{cases}$$

Obtenemos un consumo total de 66.24 A

Suponiendo un uso moderado de los motores durante una operación normal (motores al 10% moviéndose durante un 70% del tiempo), obtenemos un consumo medio aproximado de 7 A. Para conseguir una autonomía de una hora, necesitaremos una batería de unos 7000 mAh. Para poder satisfacer el pico máximo de corriente, con los 6 motores funcionando al máximo al mismo tiempo, la capacidad de descarga debe ser de 10C:

$$I_{Max} = Capacidad \times C \text{ Rating} \rightarrow 66.24A = 7Ah \times C \text{ Rating} \rightarrow C \text{ Rating} \approx 10C$$

Encontramos una batería que cumple con estas especificaciones y cabe dentro del tubo de la batería: **Multistar High Capacity 10000mAh 4S 12C Lipo Pack**



Figura 25 - Batería Multistar LiPo 4S 10Ah 12C

Con las dimensiones que facilita el fabricante es fácil comprobar la compatibilidad con los cerramientos estancos seleccionados:

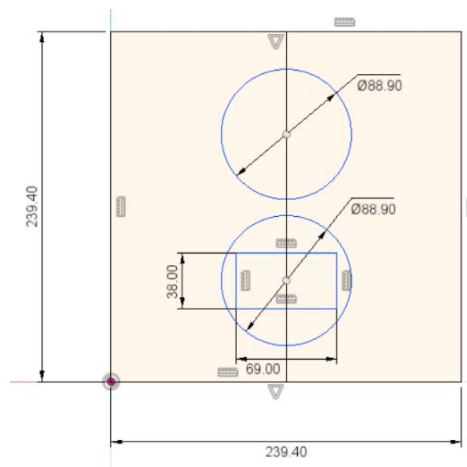


Figura 26 - Disposición de la batería

3.9 Cable umbilical

El cable umbilical debe seleccionarse en función del tipo de transmisión de datos que se vaya a utilizar, teniendo en cuenta otros aspectos como el peso máximo que puede soportar, para poder izar el ROV con el propio cable, o la flotabilidad deseada.

La transmisión del video y la telemetría del vehículo saldrán de la Raspberry Pi con el formato de protocolo Ethernet. Esta transmisión requiere de 4 u 8 hilos de cobre (2 o 4 pares trenzados), en función de la velocidad de transmisión deseada. Esta velocidad es la suma:

- Video: Para transmisión de video en 1080p30, es recomendable un ancho de banda de 6 Mbps
- El protocolo utilizado por los sistemas ArduPilot son muy ligeros, es necesario menos de 1 Mbps

Establecemos entonces un mínimo de 7 Mbps. Esta velocidad puede alcanzarse sin problemas con un cable CAT5E o superior, con una longitud máxima de hasta 100 metros. Tras un estudio de mercado, podemos encontrar diversos proveedores de cable para uso submarino, especialmente enfocados al uso en ROVs. Tenemos opciones de 4 pares de cobre o un único par trenzado:

Tabla 9 - Umbilicales de par trenzado

NOMBRE	PROVEEDOR	DESCRIPCIÓN	COSTE
1P 28AWG	Chaofan Cable	1 par trenzado, neutro, camisa de poliuretano. 4 mm ø	1.00 €/m
4P 28AWG	Blue Robotics	4 pares trenzados, neutro, camisa de polietileno. 7 mm ø	4.30 €/m

El cable de 4 pares trenzados presenta dos problemas respecto al de 2 hilos: uno es el coste, varias veces superior, y otro es el diámetro externo. Con largas longitudes de cable, el efecto del umbilical sobre la dinámica del vehículo puede dificultar mucho el pilotaje. Ambos cables tienen flotabilidad neutra en el agua, lo cual reduce considerablemente este efecto. No obstante, es conveniente minimizar el diámetro externo para reducir tanto el peso, como el arrastre producido por la corriente, llevándonos esto a elegir el cable 1P 28AWG.

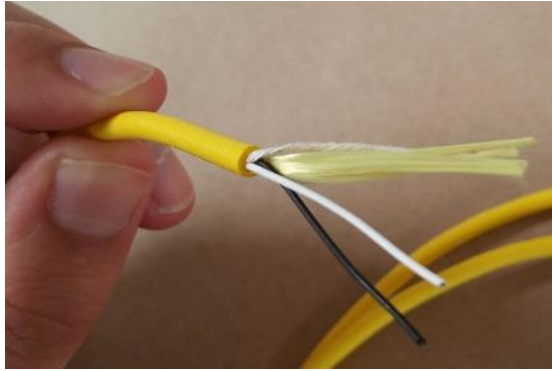


Figura 27 - Umbilical 1P 28AWG

Por otro lado, para transmitir un protocolo Ethernet a través de un único par trenzado, es necesario convertir la señal emitida por la Raspberry Pi utilizando un PLC, del inglés, “Power Line Communication”. Podemos utilizar el siguiente modelo de la empresa RAK Wireless:

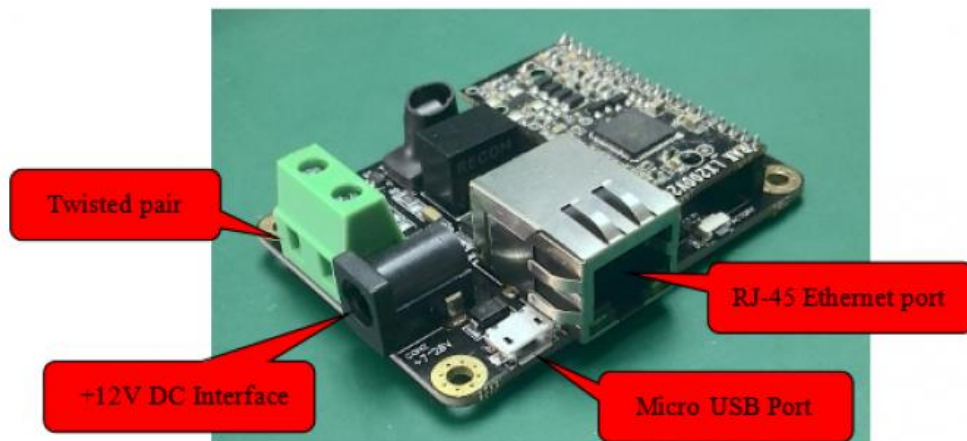


Figura 28 - Power Line Communication

Esta tecnología permite extender el rango máximo del cable umbilical hasta 2 km.

3.10 Conjunto final

En resumen, los elementos seleccionados son:

- **Estructura:** Tipo “Open Frame”, mecanizada en HDPE
- **Cerramientos estancos:** dos tubos de 3” de diámetro interno.
- **Propulsión:** 6 motores NM150 en configuración vectorizada
- **Software:** ArduSub
- **Electrónica:** Controladora Pixhawk + ordenador embebido Raspberry Pi 3 + convertor de señal WisPLC + ESCs de 20 A
- **Cámara:** Low-Light HD USB
- **Batería:** Pack LiPo de 4 celdas (14.8 V), 10000 mAh y capacidad de descarga de 12C (120 A)

- **Cable umbilical:** cable de un par trenzado con refuerzo de Kevlar y fibras anti-agua

La distribución de estos componentes es decisiva para conseguir la estabilidad en el ROV. Como veremos en el siguiente capítulo, debemos conseguir que el centro de flotación del conjunto esté por encima del centro de gravedad, ambos en la misma vertical. Dicha distribución seguirá el siguiente esquema:

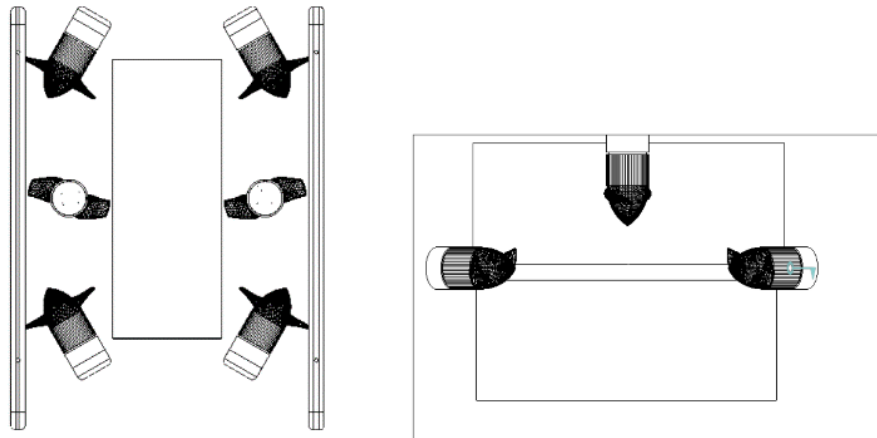


Figura 29 - Disposición de propulsores en la estructura

Respecto a la arquitectura de la electrónica, siguiendo la información de cada uno de los fabricantes podemos concluir en el siguiente esquema:

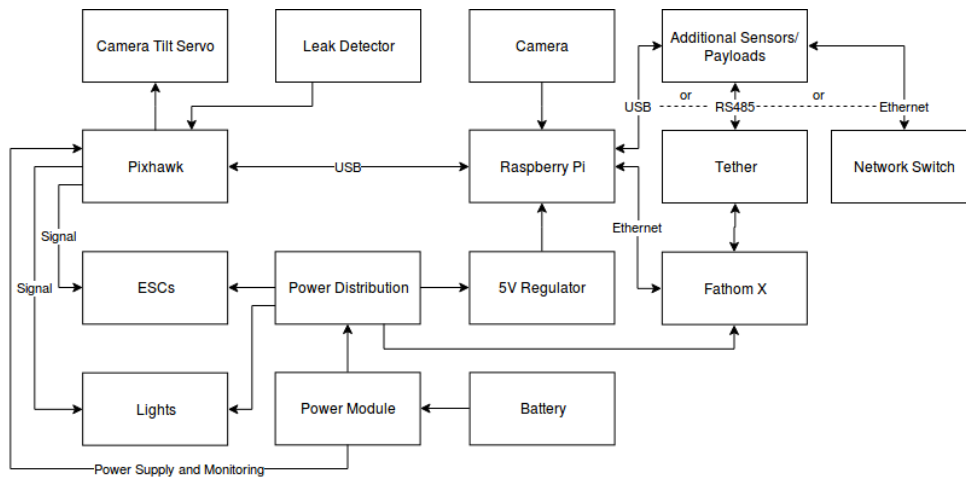


Figura 30 - Arquitectura de la electrónica

Capítulo 4

Diseño mecánico

4.1 Introducción

En este capítulo detallamos el proceso y los resultados del diseño 3D del vehículo. Este proceso consiste en colocar todos los componentes seleccionados en el capítulo anterior dentro de la estructura y los cerramientos definidos. Ordenamos el proceso de diseño en las siguientes fases:

- Colocación de la electrónica dentro del tubo principal (tubo superior)
- Diseño del Frame principal
- Posicionamiento de los tubos estancos en la estructura
- Diseño de los soportes de los cerramientos
- Diseño de los soportes de los motores
- Diseño de zona de flotación
- Reajuste del Frame
- Cálculo del centro de gravedad y centro de flotabilidad
- Reajuste y adición de lastre/flotadores

Como premisa de diseño, hemos de colocar los elementos más pesados en la parte inferior del vehículo, y los más ligeros en la superior, con el objetivo de que el centro de flotabilidad (COB, del inglés, “Center Of Buoyancy”) esté por encima del centro de masas (COM, del inglés, “Center Of Mass”), estando los dos en la misma línea vertical. Siguiendo este principio, el ROV será más estable, y su posición de flotación natural será la posición que se considera correcta a nivel de diseño. Esto reduce la energía necesaria en los motores para estabilizar el vehículo, así como para mantener un nivel fijo de profundidad.

4.2 Soporte de la electrónica

Las consideraciones a tener en cuenta son:

- Placas lo más distribuidas posible, para una mejor distribución del calor generado.
- Placas dispuestas en vertical, para evitar acumulaciones de agua en caso de fallo leve de la estanqueidad del cerramiento.
- Elementos de potencia lo más separados posible de los elementos del PLC, para evitar posibles interferencias.

Diseñamos una estructura interna que servirá de soporte para todas las placas. Dicha estructura está compuesta por una plancha central y dos extremos circulares, unidos con tornillo y tuerca. Este componente no estará sometido a sollicitaciones relevantes, por lo que no es necesario un análisis estructural de ningún tipo. La estructura queda con el aspecto mostrado en la siguiente imagen:

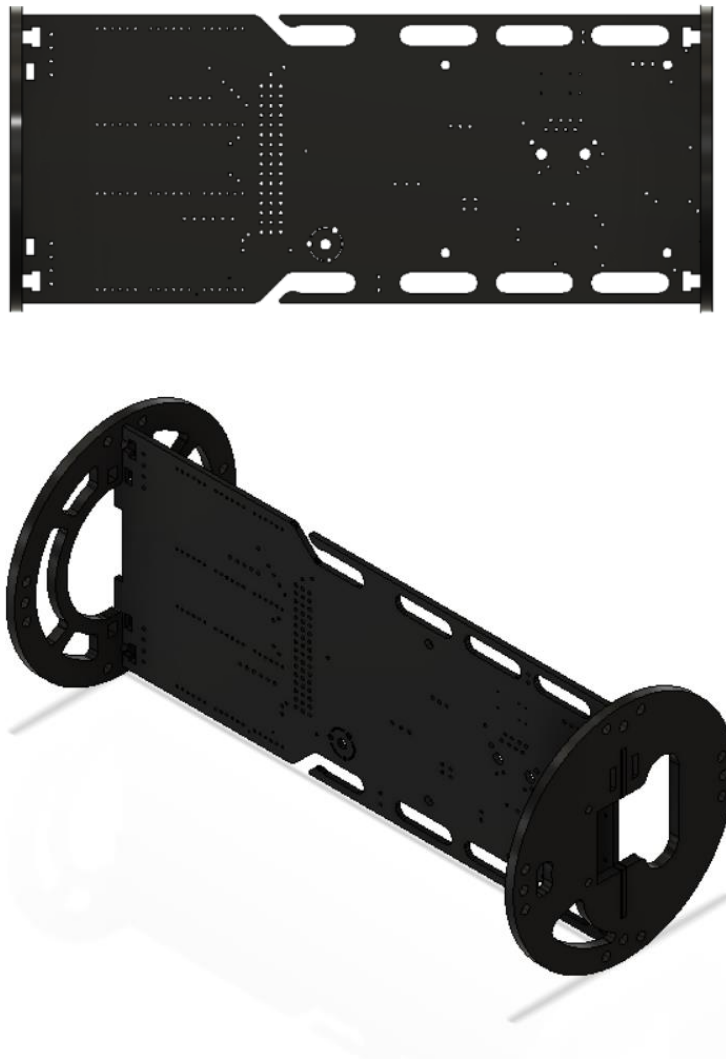
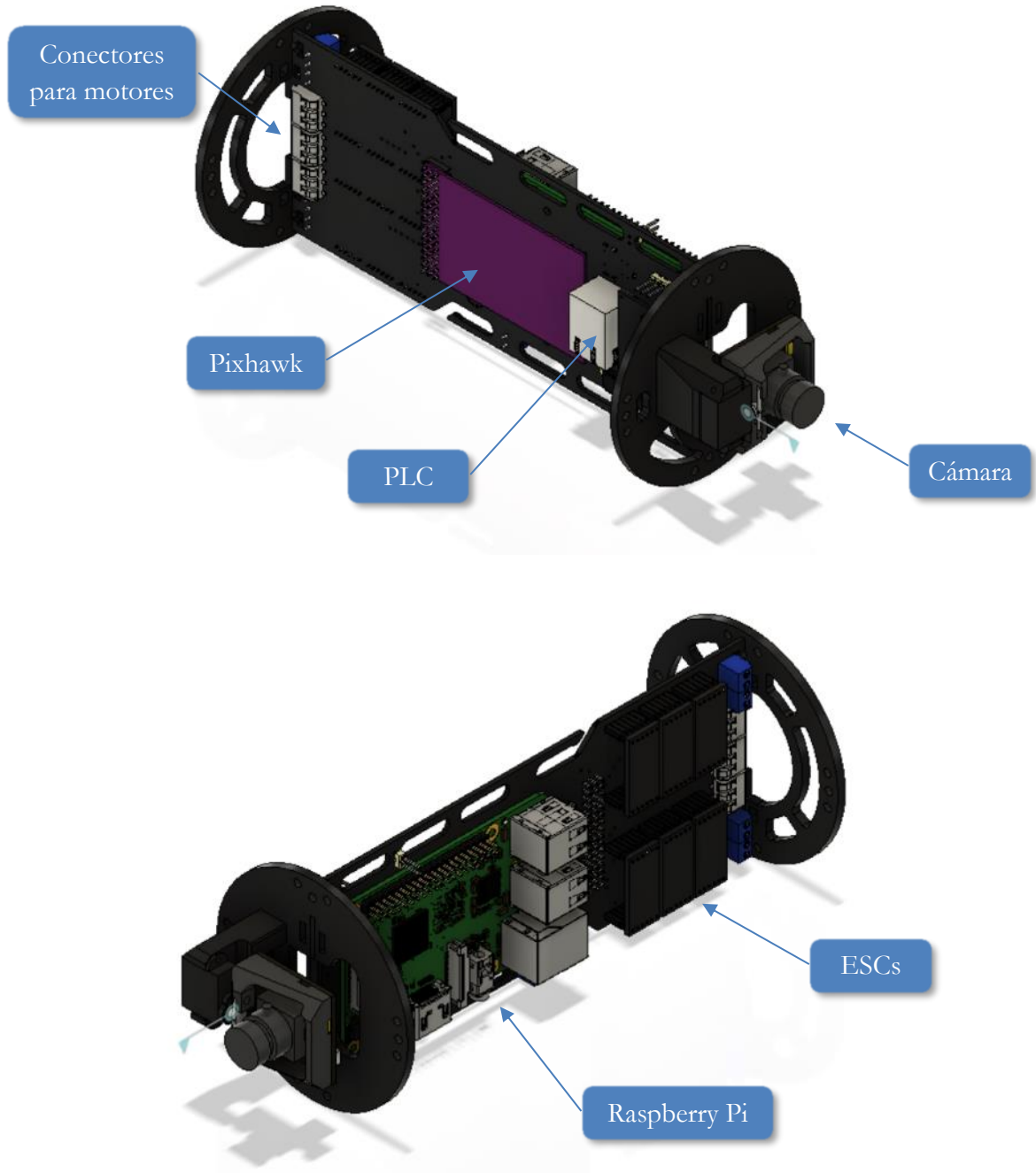


Figura 31 - Estructura de la electrónica

Procedemos a colocar los componentes siguiendo las premisas planteadas más arriba. Para colocar la cámara es necesario diseñar un soporte específico para las piezas que la componen, el cual será fabricado mediante impresión 3D. El aspecto final de la electrónica ensamblada es el siguiente:



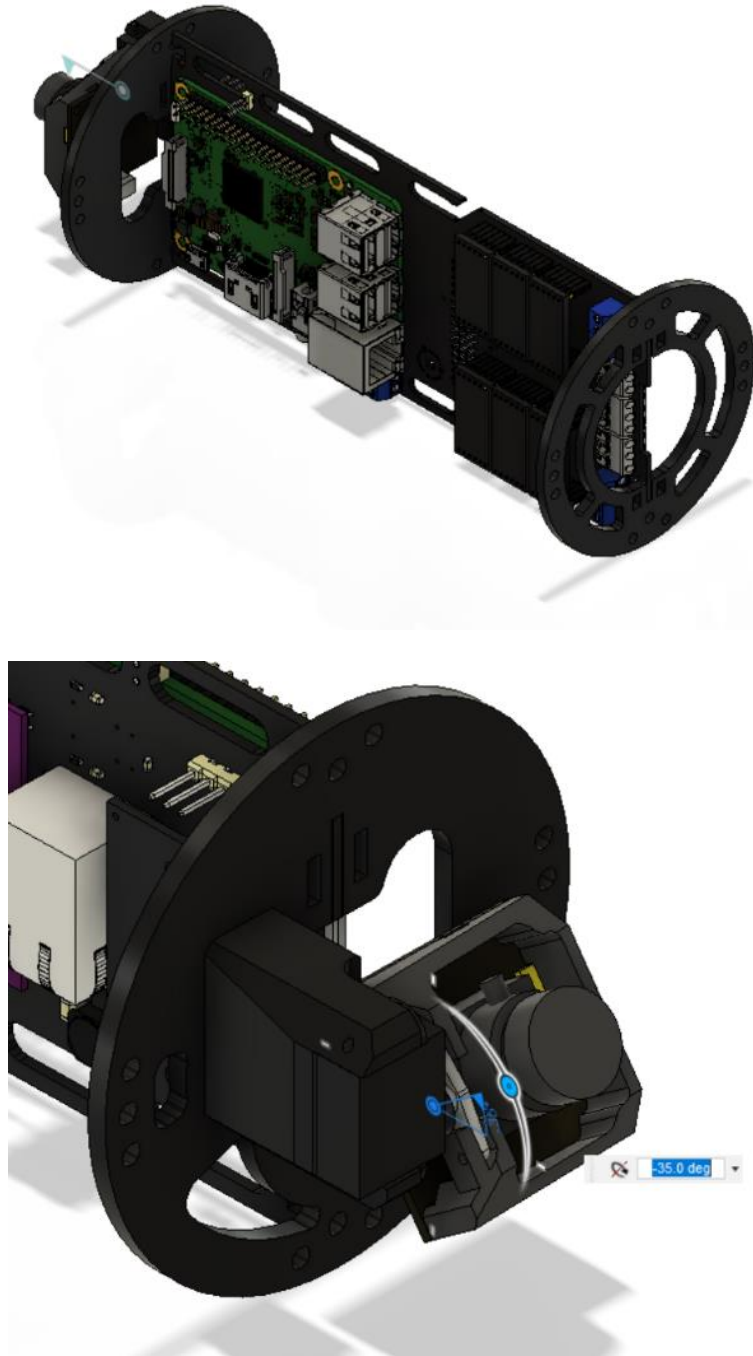


Figura 32 - Disposición de los elementos de la electrónica

4.3 Cerramientos estancos

Si bien los cerramientos estancos seleccionados son un modelo comercial, y están completamente terminados, será necesaria una modificación en los terminales de entrada de los cables, comúnmente conocidos como pasamuros. Los cerramientos del fabricante solo permiten un máximo de 7 pasamuros por tapa, cuando en nuestro caso tenemos los siguientes elementos que requieren de una entrada en el cerramiento de la electrónica:

- Motores: 6 cables de 4 mm
- Cable umbilical: 1 cable de 4 mm
- Cable de batería: 1 cable de 8 mm
- Sensor de presión: agujero de 10 mm
- Tapón de ventilación: agujero de 10 mm

El tapón de ventilación es un requerimiento de diseño de los cerramientos, necesarios para abrir y cerrar los tubos de forma sencilla, y realizar pruebas de estanqueidad. Nos encontramos con un total de 7 cables de 4 mm, y 3 puertos del tamaño de los pasamuros originales.



Figura 33 - Disposición de original de pasamuros

Dado el tamaño de los pasamuros del fabricante, diseñados para cables de 6 mm, hemos de diseñar unos pasamuros de menor tamaño, de forma que podamos hacer una combinación entre ambos formatos para instalar todos los elementos del vehículo.

Partimos de un tornillo de métrica 6 y 22 mm de longitud:

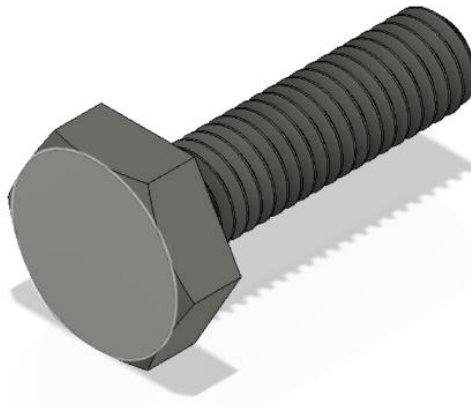


Figura 34 - Pasamuros 4 mm. Diseño de partida

Realizamos un agujero pasante en el tornillo, y acomodamos el cajón donde irá contenida la junta tórica. Agrandamos también la cabeza para que haya espacio suficiente para colocar y sellar el cable.

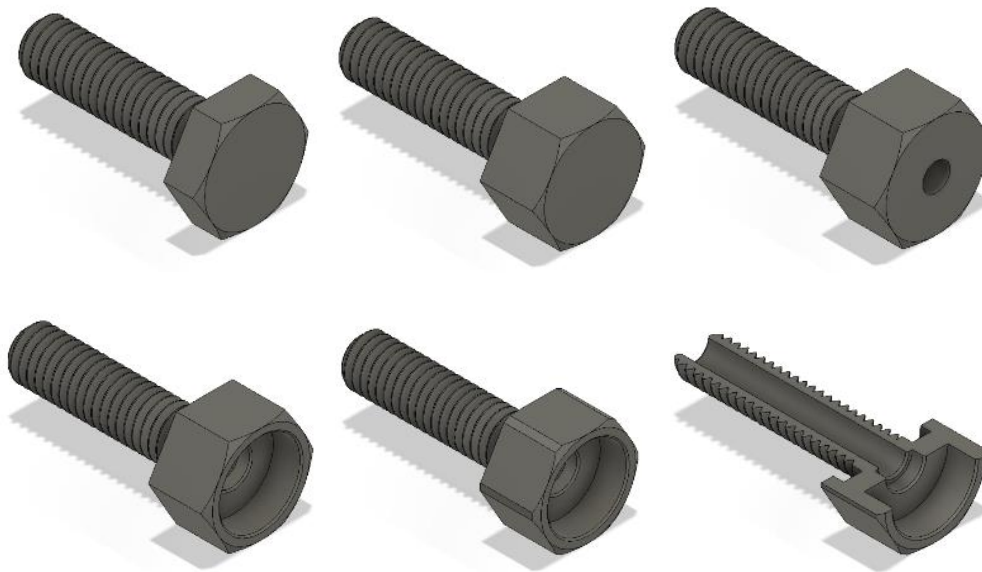


Figura 35 - Pasamuros de 4 mm. Proceso de diseño

El cajón de la junta tórica se dimensiona siguiendo las dimensiones recomendadas por el fabricante TSS, utilizando su herramienta online de cálculo [21]. El cajón tiene unas dimensiones de 6.00 mm de diámetro interno, 10.45 mm de diámetro externo y una profundidad de 1.25 mm.

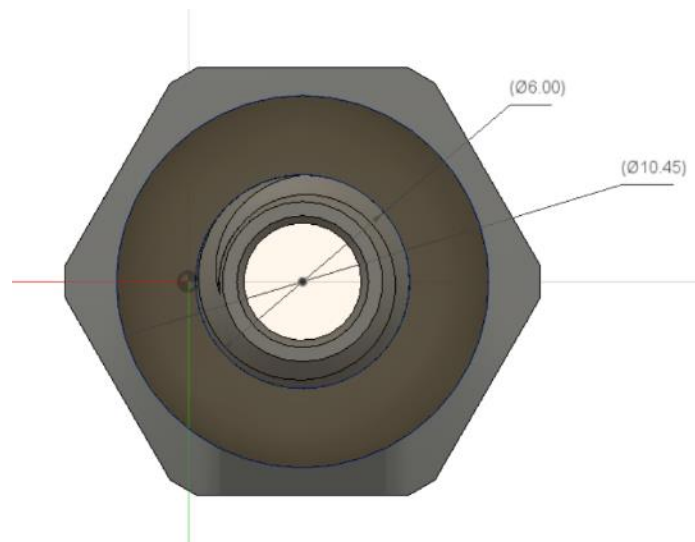


Figura 36 - Pasamuros de 4 mm. Medidas para junta tórica

La distribución en la tapa del cerramiento estanco principal queda como se observa en la siguiente imagen:

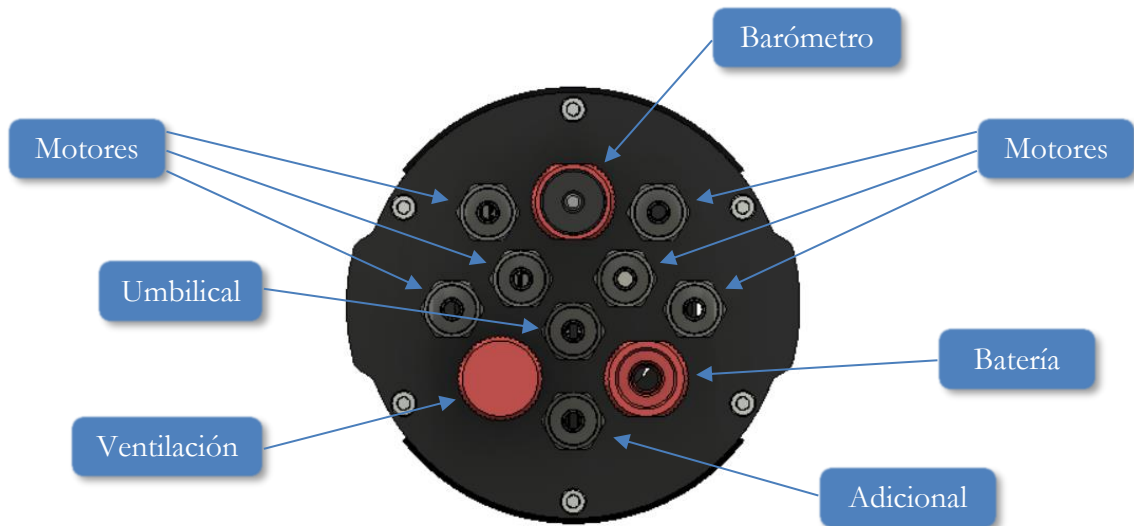


Figura 37 - Distribución de pasamuros de 4 mm

Todos los pasamuros necesarios caben en la tapa del cerramiento estanco. Dispondremos de un pasamuros adicional para la integración de otros elementos como focos o manipuladores.

4.4 *Frame principal*

A continuación, diseñamos el marco principal de la estructura. Comenzamos con el panel lateral, que será la pieza estructural más visible. La idea es hacer un marco, con espacio libre para el paso del agua de los propulsores, y sujeciones para las otras piezas de la estructura. Partimos de las dimensiones marcadas en el capítulo 3 y vamos dando forma. El proceso de diseño en Fusion consiste en la creación de un sketch en 2D, para extruir posteriormente el perfil, creando la pieza 3D que se fabricará:

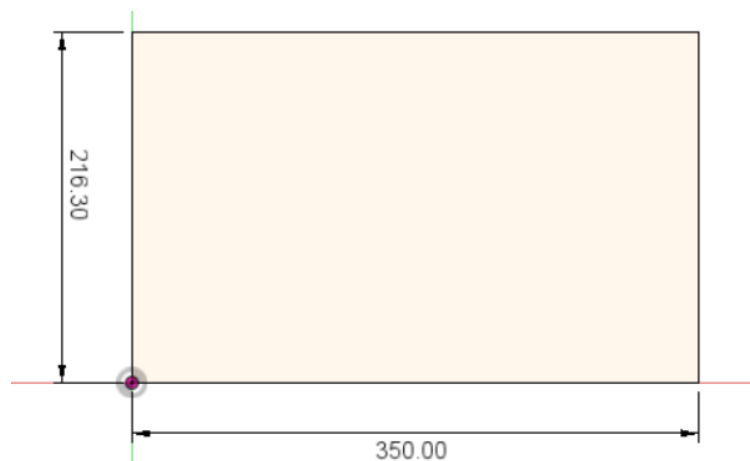
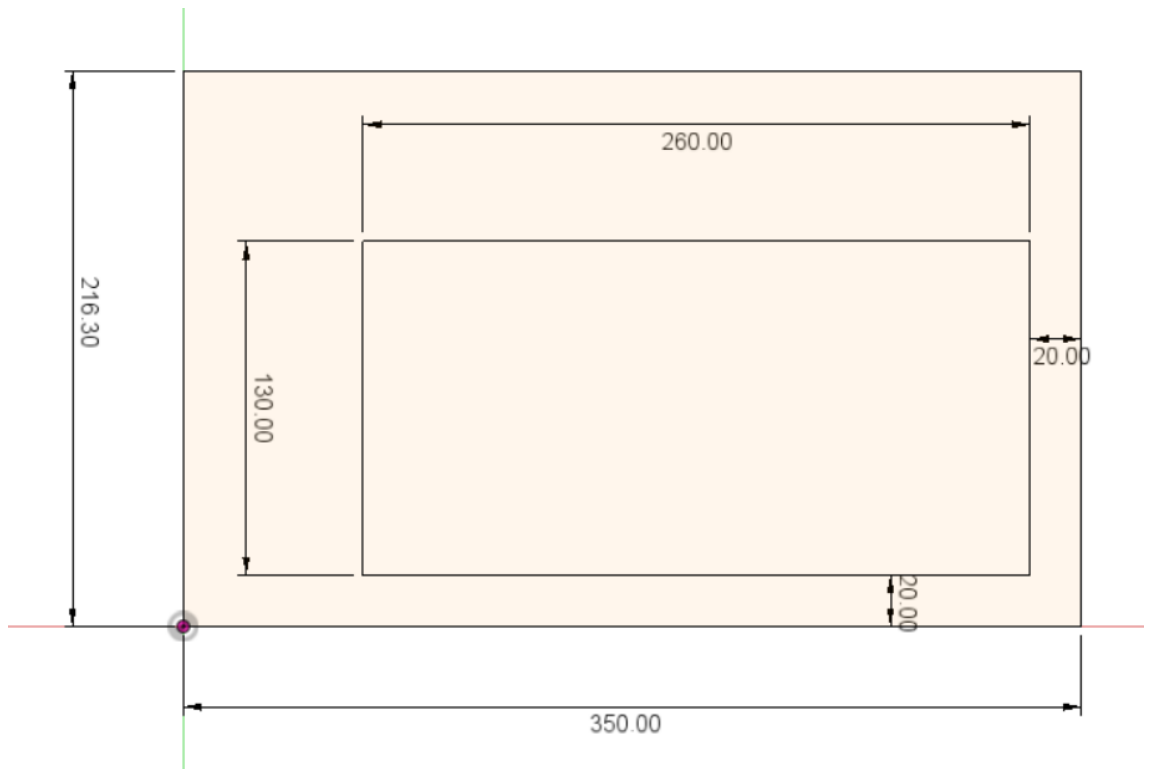
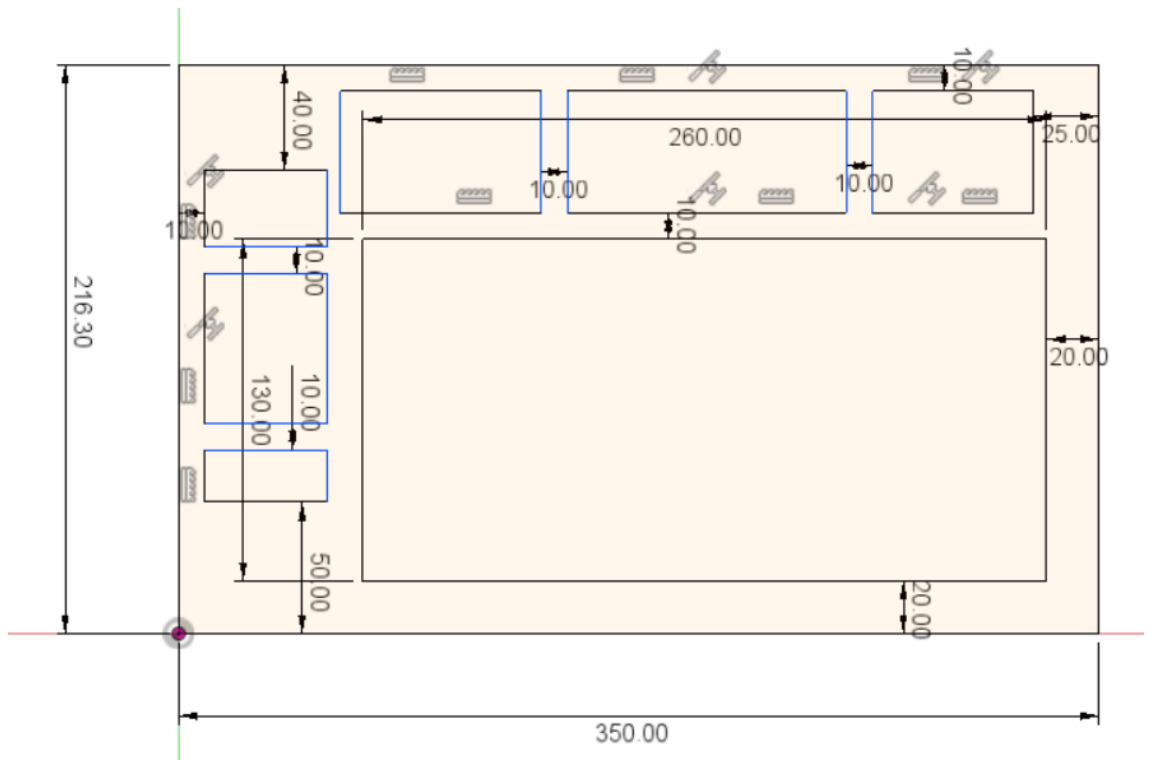


Figura 38 - Panel lateral. Dimensiones de partida

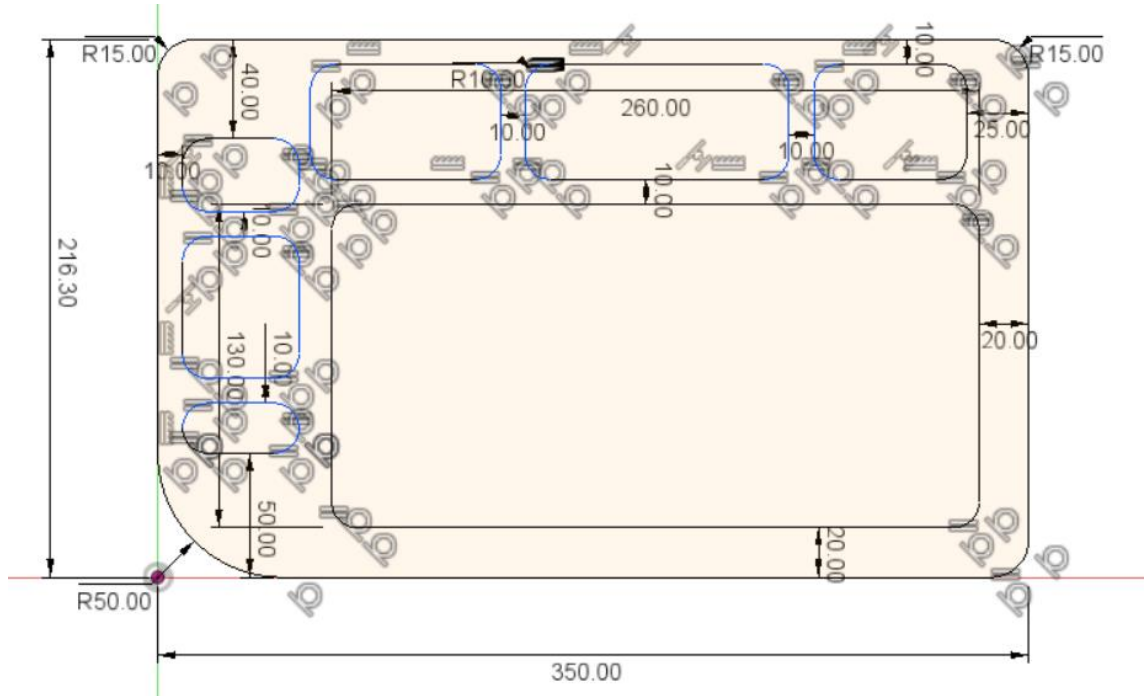
A continuación, vaciamos la zona central del rectángulo inicial, ya que será necesario que el flujo de agua de los propulsores circule libremente a través de la estructura, sin encontrar obstáculos.



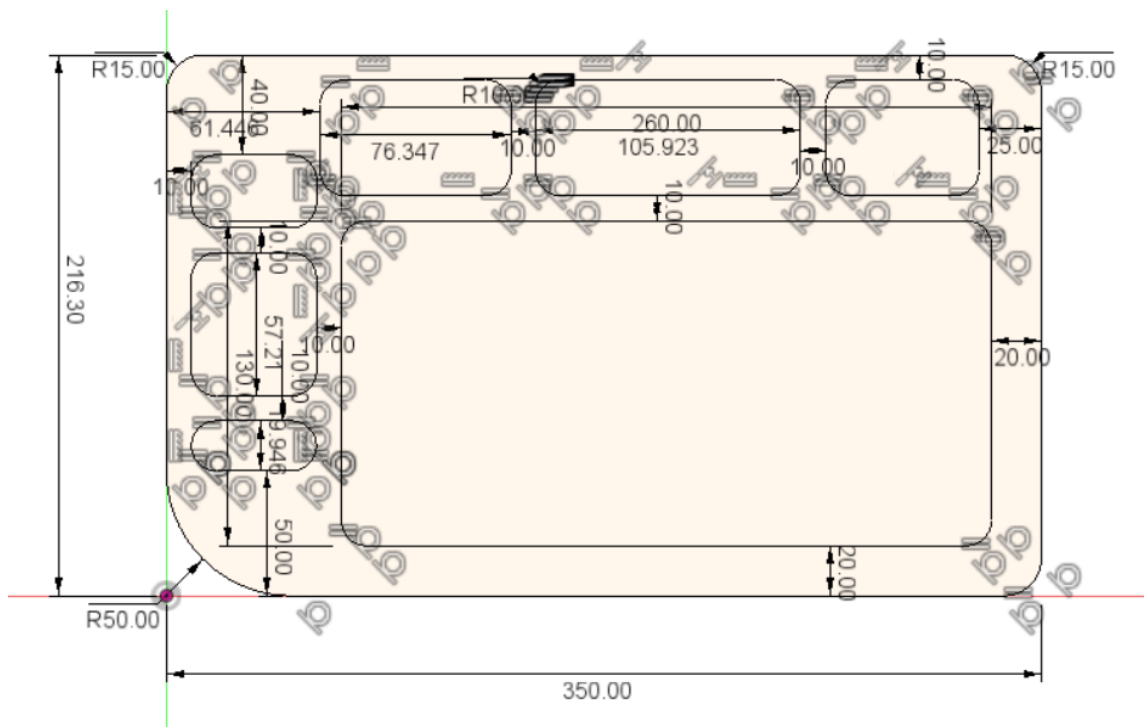
Para aligerar el peso de la estructura, y facilitar zonas por las que asir el robot, dibujamos una serie de vaciados en las áreas restantes de la pieza:



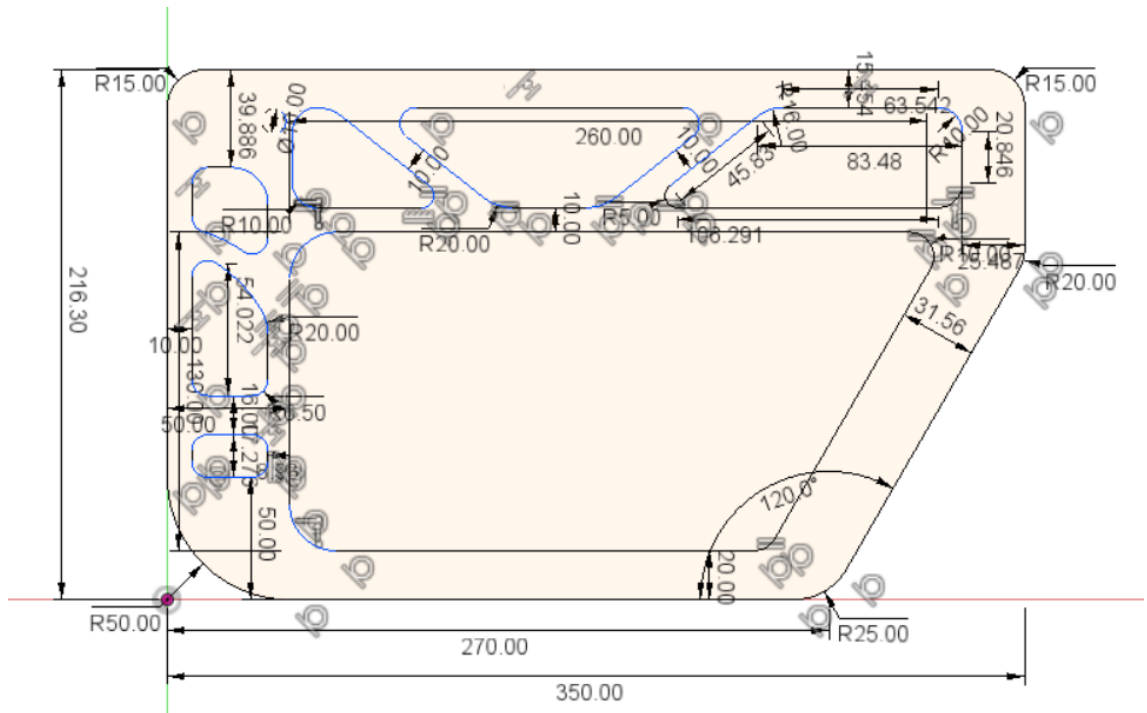
A continuación, redondeamos las esquinas. Esto se realiza para, a parte de las razones estéticas, para asegurar la viabilidad de la fabricación mediante mecanizado, debiendo ser los radios internos de todas áreas mayor al radio de la herramienta. Este valor lo fijamos en 2 mm.



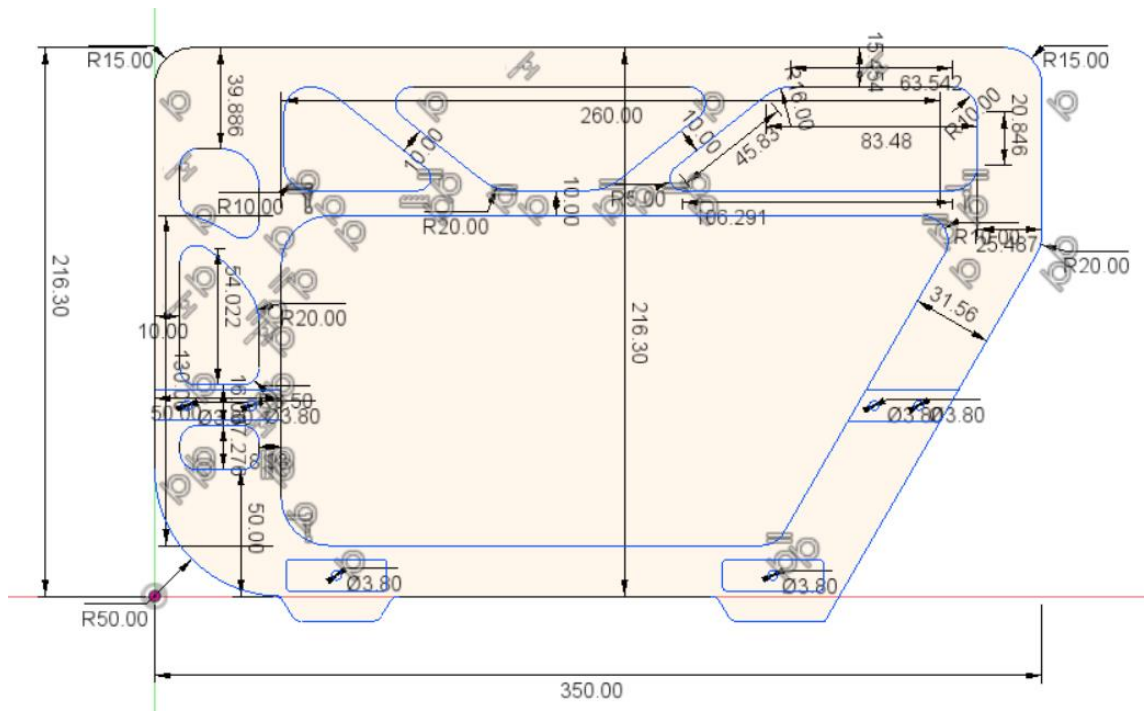
Para que el sketch quede completamente definido, es necesario fijar algunas dimensiones más. Las líneas azules son líneas sin definir, las cuales se pueden mover utilizando el cursor. Es recomendable aplicar restricciones para que todas las líneas del sketch queden completamente definidas, marcadas en negro.



Realizamos algunos cambios adicionales, con fines meramente estéticos, inclinando algunos de los nervios de la pieza, y recortando la esquina inferior de popa.



Por último, añadimos los taladros necesarios para el ensamblaje posterior del resto de piezas de la estructura:



Varias de las líneas pasan a azul de nuevo tras los últimos dos pasos. La funcionalidad de Fusion 360 es limitada a la hora de trabajar con restricciones, sobre todo cuando se trabaja con geometrías más complejas como la utilizada en el diseño final. Es por esto que es

recomendable utilizar las restricciones para fijar las líneas principales del sketch, de forma que las modificaciones posteriores sean más sencillas.

Por último, realizamos una extrusión a partir del perfil generado por las líneas del sketch, obteniendo la pieza final:

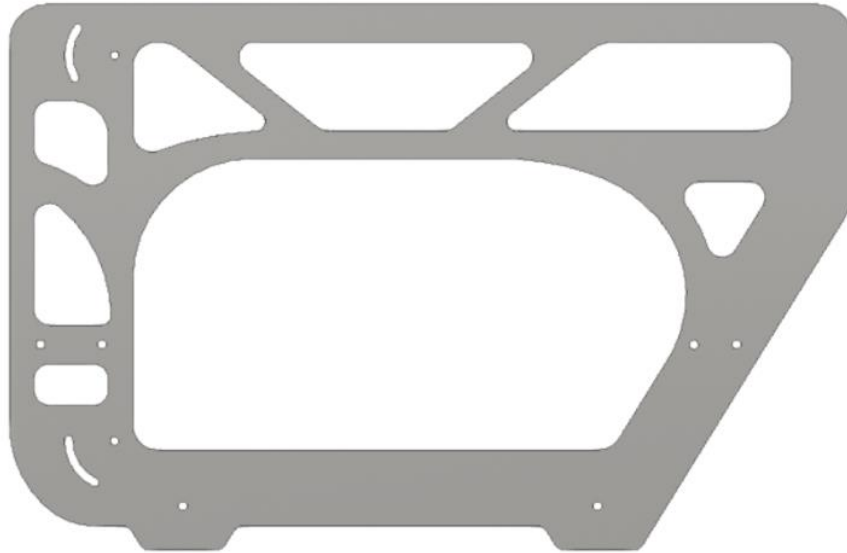


Figura 39 - Panel lateral. Diseño inicial

Creamos a continuación un panel inferior que cierre el Frame por debajo, y sirva de sujeción para el cerramiento de la batería. Siguiendo el mismo proceso utilizado para el diseño del panel lateral, obtenemos la siguiente pieza:

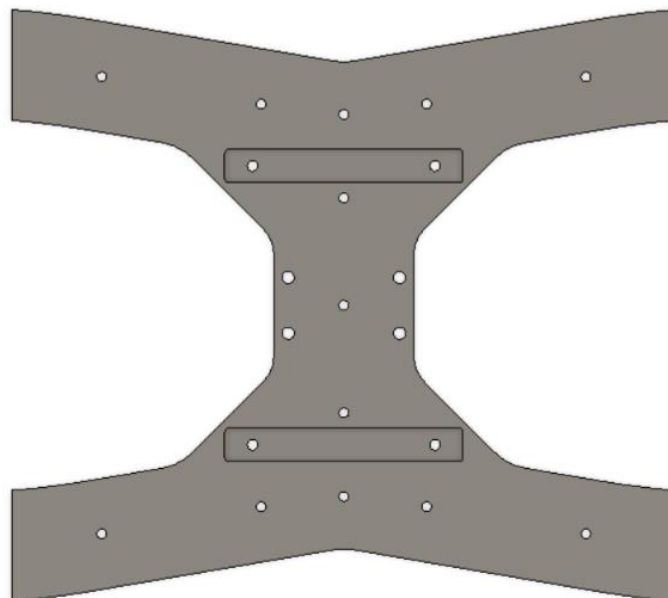


Figura 40 - Panel inferior. Diseño inicial

4.5 *Posición de los cerramientos estancos*

Seguimos con las sujeciones de los tubos. Creamos un sistema de cierre con abrazaderas en “U” atornilladas. Para la unión entre ambos tubos creamos dos piezas en “H”:

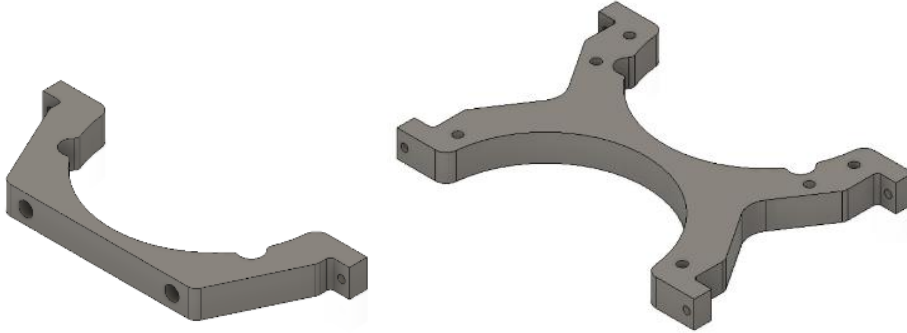


Figura 41 - Sujeciones para cerramientos estancos

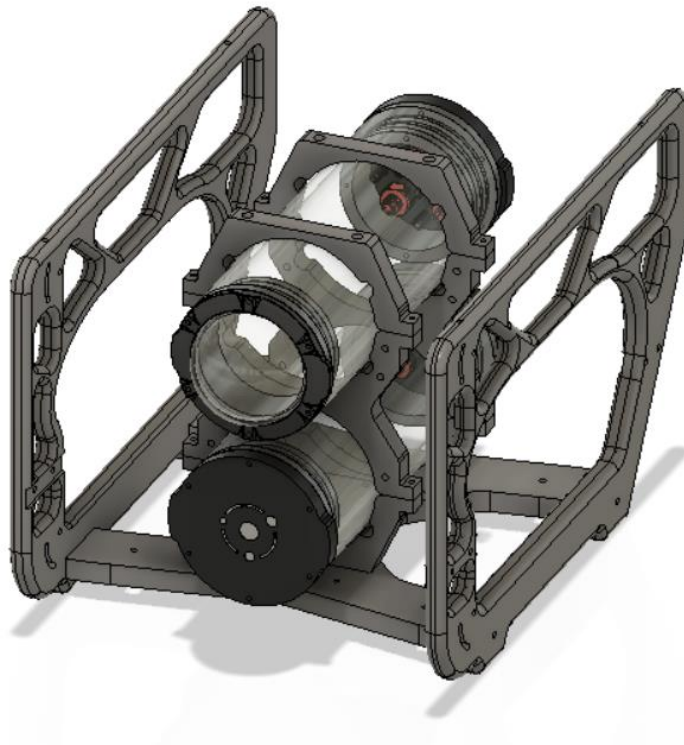


Figura 42 – Semi ensamblado 1. Frame principal

4.6 Soportes de los motores

A continuación, creamos los soportes para los motores vectorizados. La disposición de éstos en ángulo nos obliga a crear una base sobre la que se monta el propio soporte de cada motor:

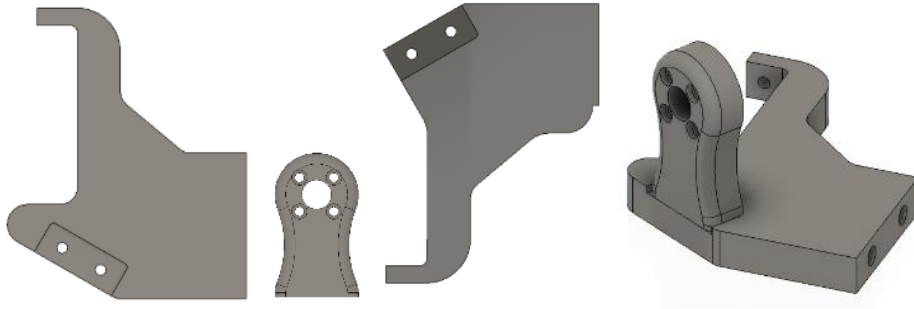


Figura 43 - Soportes de motores

La posición en el conjunto se muestra en la siguiente imagen:

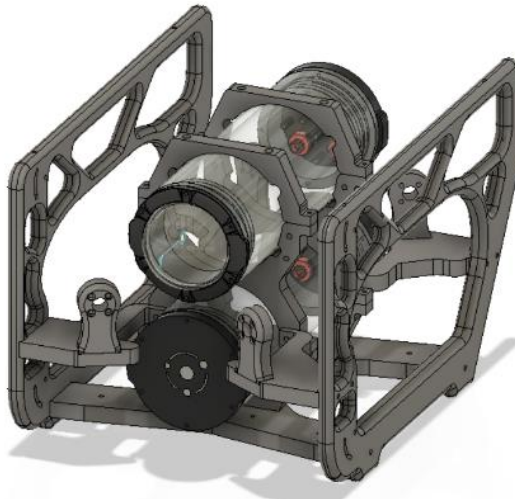


Figura 44 - Semi ensamblado 2. Soportes de motores

A la hora de colocar los motores, hemos de ser cuidadosos con el flujo de agua que estos generan, ya que si la estructura interfiere en estas áreas, estaremos generando turbulencias que afectarán negativamente a la eficiencia de la propulsión. Para conseguir esto, proyectamos el cilindro generado por el área circular de las hélices, y cortamos los paneles laterales con ellos, generando un área en forma de elipse en los paneles que asegurarán el correcto paso del agua.

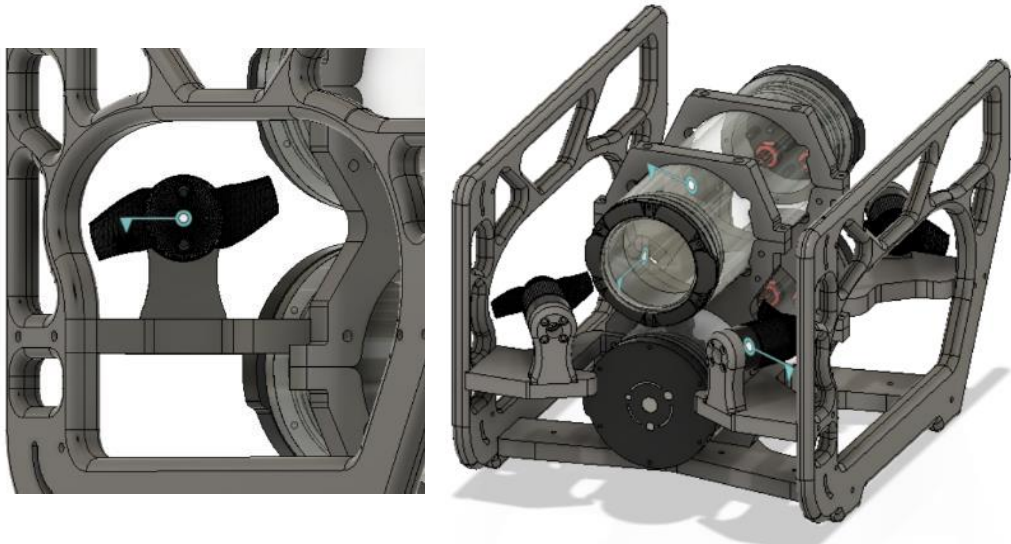


Figura 45 - Semi ensamblado 3. Propulsores

Añadimos esta modificación al diseño de los paneles laterales.

4.7 Zona de flotación

Seguimos con la tapa superior del ROV, que a su vez cumple las funciones de sujetar los motores verticales, y de albergar espumas de flotación, en caso de ser necesarias. Esto último lo analizaremos en el apartado de “Centros de fuerzas”.

La tapa superior se fabricará en HDPE de color amarillo, ya que este es el que más visibilidad aporta en el mar.

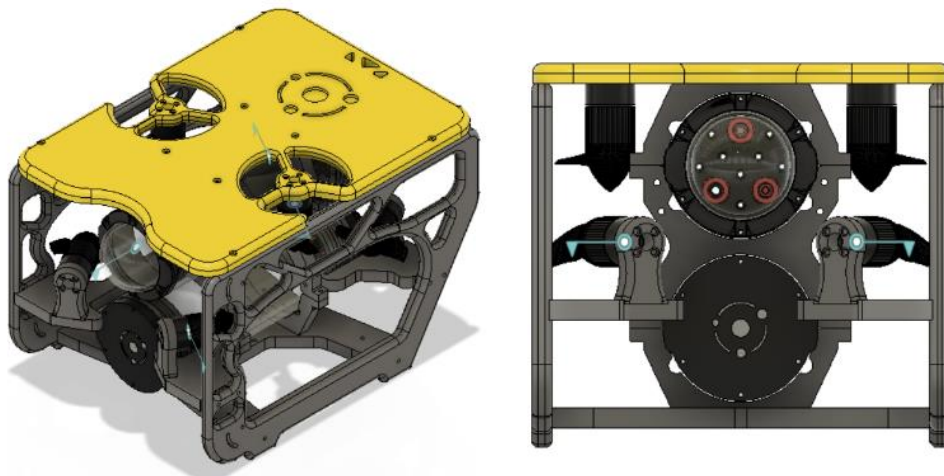


Figura 46 - Semi ensamblado 4. Zona de flotación

4.8 Finalización

Por último, añadimos el modelo de la electrónica del apartado 4.2, y la tornillería. Todos los tornillos se seleccionan en acero inoxidable 316, el cual es especialmente recomendado para aplicaciones marinas.

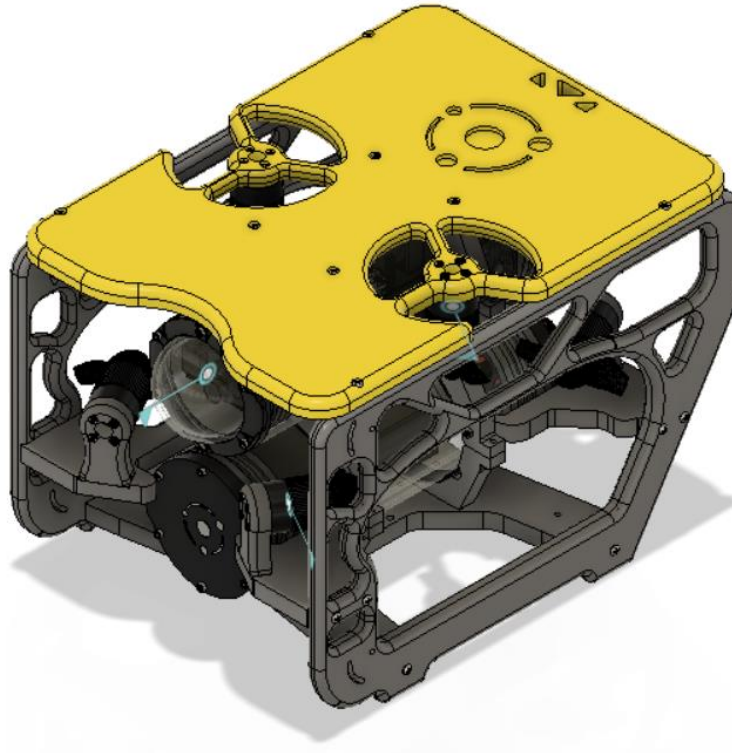


Figura 47 - ROV finalizado

4.9 Centros de fuerzas

Para calcular la posición y la magnitud de los vectores de Centro de Masas (COM) y Centro de Flotación (COB), es necesario definir todos y cada uno de los materiales que conforman los componentes introducidos en el modelo. La librería de materiales de Fusion 360 nos brinda todos los que necesitamos para este estudio:

- Polietileno de alta densidad (HDPE)
- Aluminio 5052
- Acrílico (PMMA)
- Plástico ABS
- Acero inoxidable 316
- Plomo
- Espuma de poliuretano

Tras la asignación de todos los materiales, Fusion 360 nos permite obtener el centro de masas de un conjunto de componentes, simplemente utilizando la herramienta de análisis “Center of Mass” y seleccionando el componente a analizar:

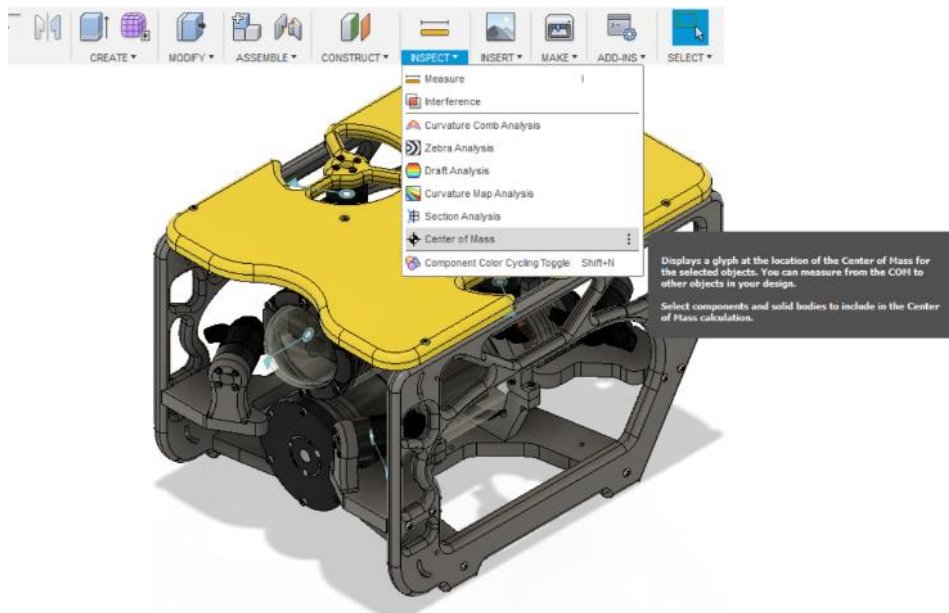


Figura 48 - Cálculo del centro de masas

Ahora tenemos el punto de aplicación del vector del COM:

COM1 | X: -0.107 Y: 2.611 Z: 120.42 mm

Para obtener la magnitud, vamos al cuadro de propiedades del componente principal:

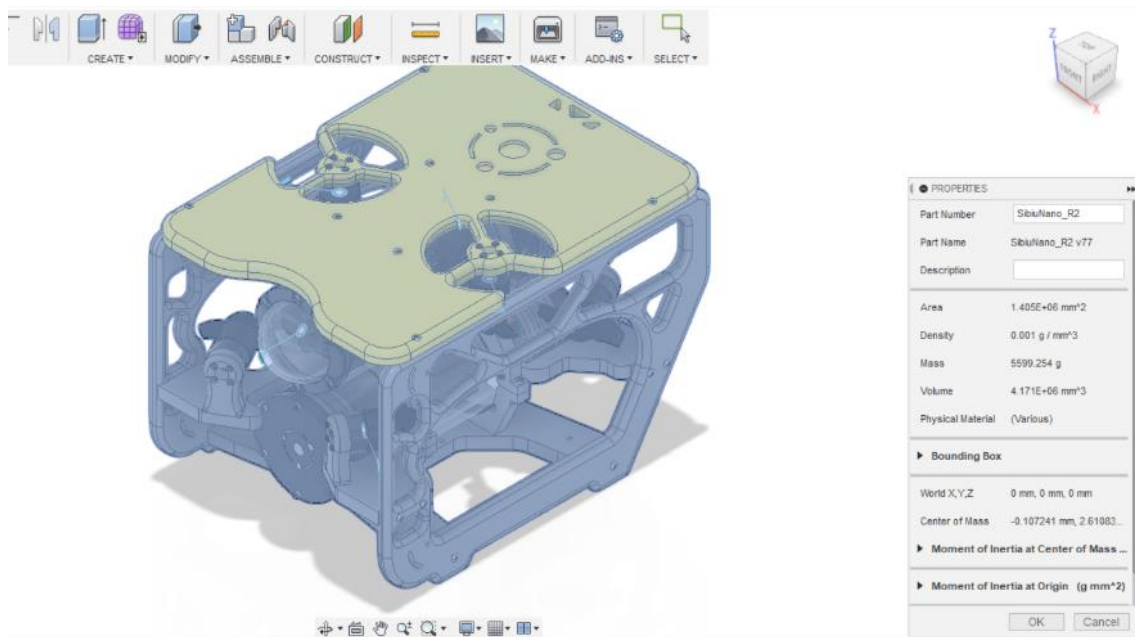


Figura 49 - Magnitud del Centro de Masas

Obtenemos una masa de **5.599 kg**

El volumen que calcula el programa no coincide con el volumen desplazado de agua, ya que los cerramientos estancos no son macizos, sino que tienen un espacio de aire en el interior.

Para el cálculo del COB, procedemos de la misma forma, pero definiendo el material de todos los componentes como agua dulce (densidad $\approx 1.0 \text{ kg/dm}^3$), y rellenando los espacios interiores de los tubos estancos, haciendo que éstos estén formados por un único cuerpo macizo.

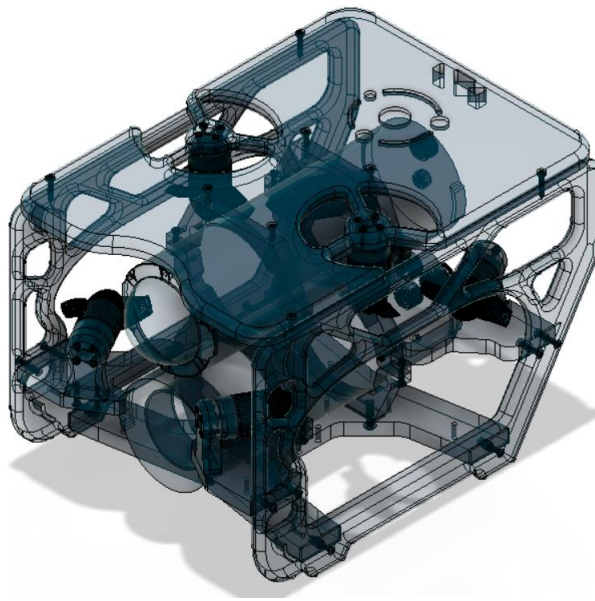


Figura 50 - ROV modelado en agua

Con esta versión del modelo, obtenemos los siguientes resultados:

COB1 | X: -0.188 Y: 4.467 Z: 124.915mm

Peso del volumen de agua desplazado: **5.998 kg**

La posición relativa entre el COM y el COB es:

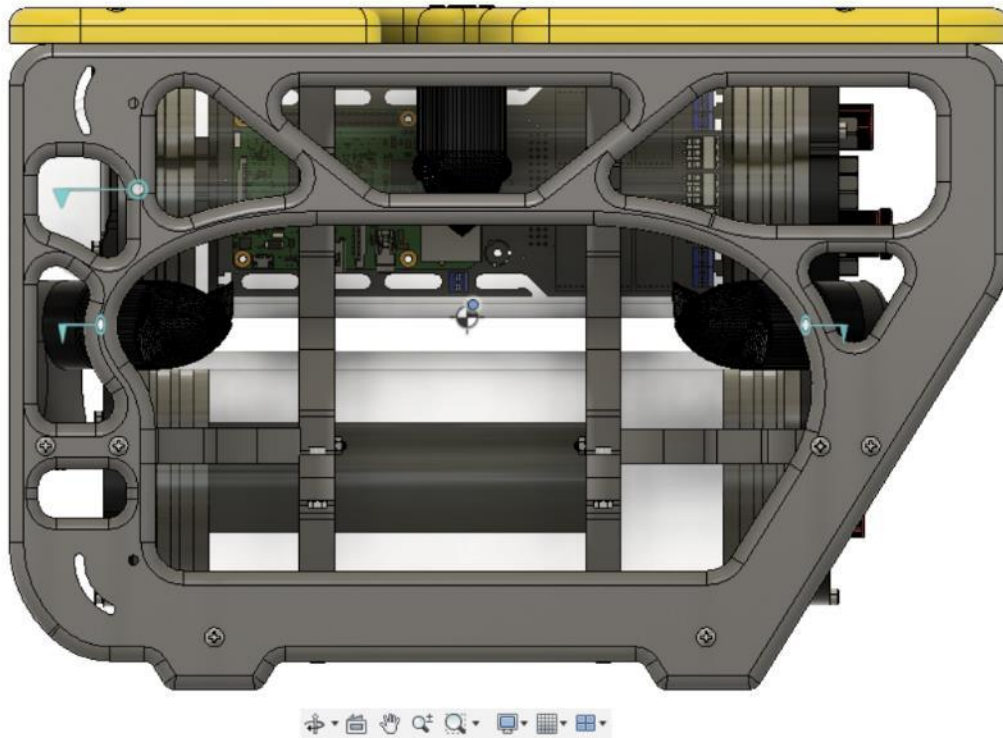


Figura 51 - Posición relativa COM-COB

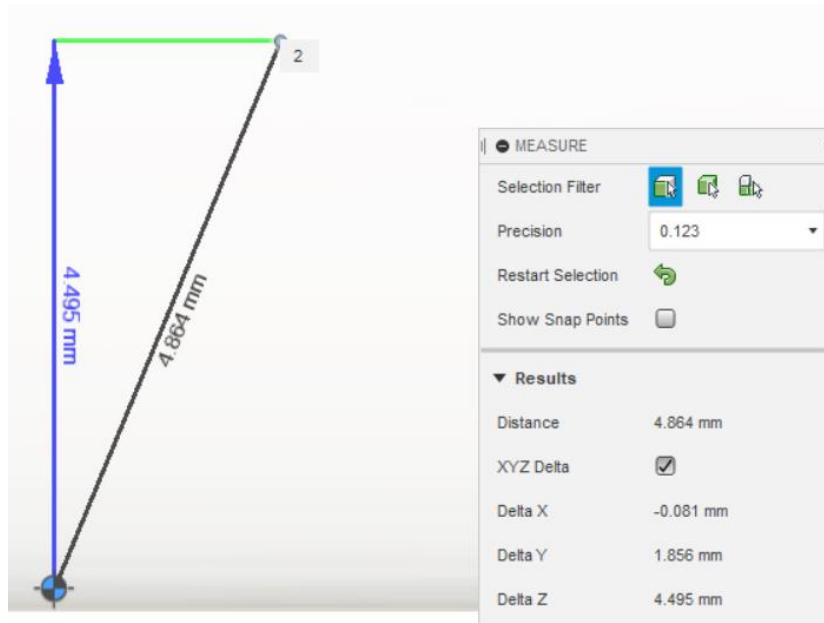


Figura 52 - Vector relativo COM-COB

4.10 Reajuste de flotación

Como podemos observar en los resultados del apartado anterior, ambos centros de fuerzas están muy cerca el uno del otro, pero sin elementos de flotación y lastre, ya estamos en una posición cercana a la validez, con el COB por encima del COM, y la fuerza de

flotación mayor que la de la gravedad. Dicha diferencia viene dada por la sustracción entre la masa del volumen de agua desplazado, y la masa del vehículo:

$$M_{Diff} = M_w - M_{ROV} = 5.998 - 5.599 = 398 \text{ g}$$

Para conseguir la flotación neutra, añadimos dos pesas de plomo de 200 gramos cada una. Las distribuimos en el panel inferior de forma que bajemos el centro de gravedad, y lo desplazemos hasta la vertical del COB:

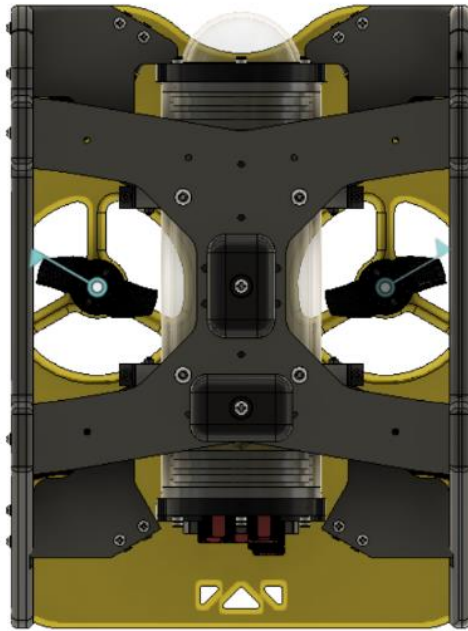


Figura 53 - Disposición de elementos de lastrado

Con esta distribución de pesas, recalculamos el COM y el COB, obteniendo los siguientes resultados:

COM2 | X: -0.10 Y: 4.734 Z: 112.194 mm

Peso del vehículo: **6.002 kg**

COB2 | X: -0.187 Y: 4.826 Z: 124.274 mm

Peso del vehículo: **6.023 kg**

La distancia a lo largo del eje longitudinal del ROV (eje Y) es de 0.092 mm, por lo que el ángulo de cabeceo que se producirá cuando el ROV esté en el agua será de unos 0.04°

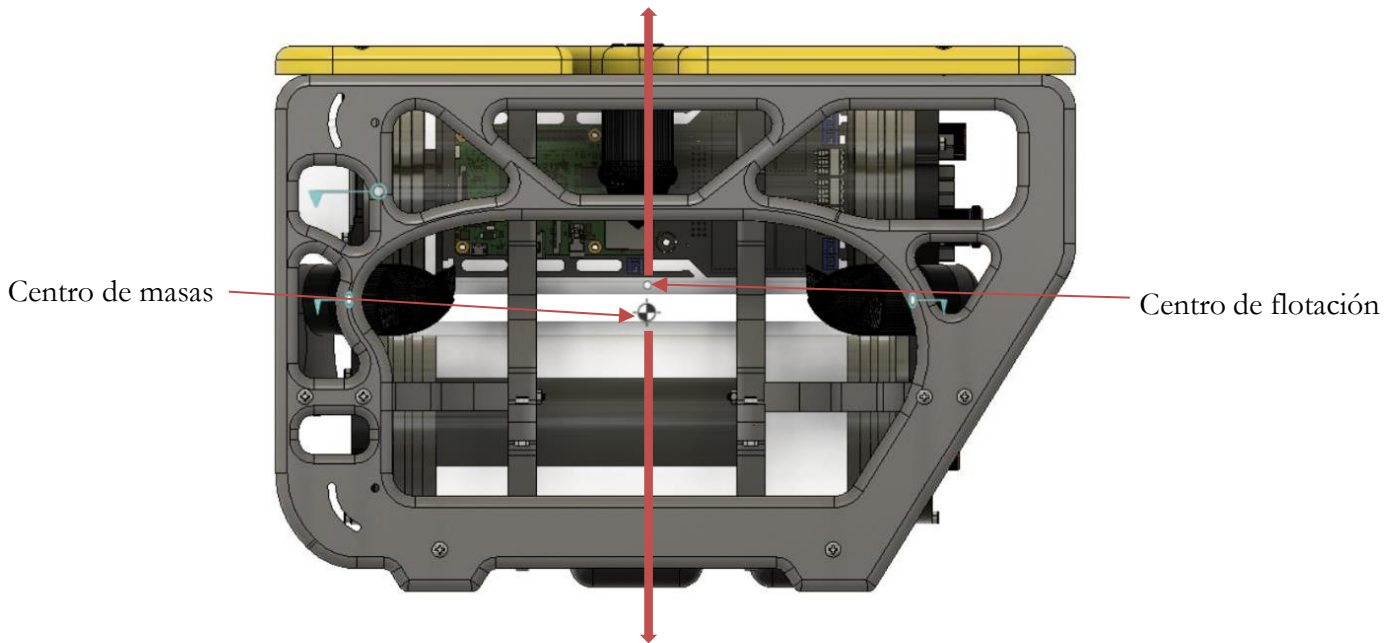


Figura 54 - Posición relativa corregida COM-COB

4.11 Diseño en SolidWorks

Tras la realización del diseño en Fusion 360, procedemos al rediseño de varias de las piezas de la estructura, con el objetivo de realizar una comparativa entre las herramientas de diseño que ofrece un programa frente al otro. SolidWorks es un programa ampliamente utilizado en Ingeniería, por lo que se considera que una comparativa con un programa más accesible como es Fusion 360 es bastante interesante, sobre todo para su uso a nivel académico y para empresas de pequeño tamaño. Tras dicho análisis, se importará el diseño completo a SolidWorks y se analizarán las herramientas que ofrece en cuanto al cálculo de las propiedades físicas del ROV. Las diferencias entre las herramientas de simulación que ofrecen ambos programas serán analizadas en el siguiente capítulo.

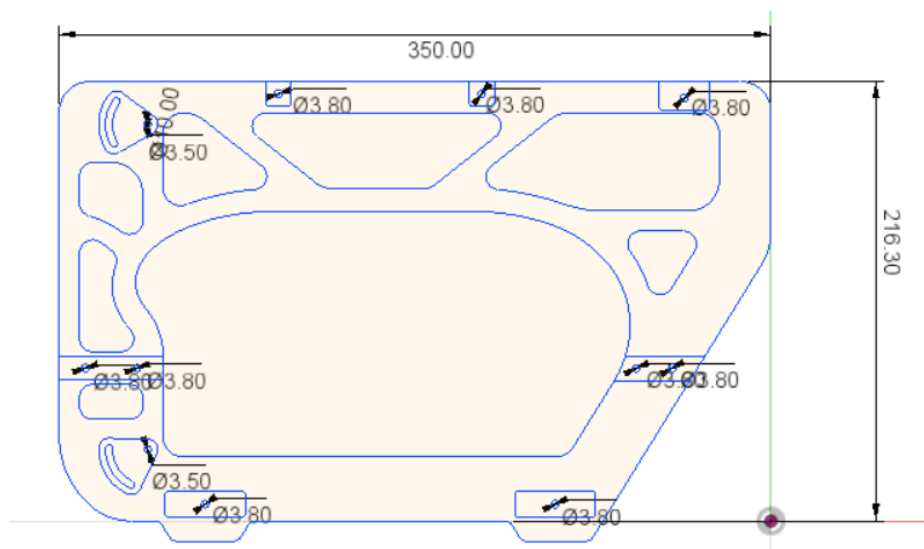


Figura 55 - Diseño realizado previamente en Fusion 360

Partimos del diseño realizado previamente en Fusion 360, con el objetivo de utilizar las mismas dimensiones para obtener una pieza similar a la original. La forma de trabajar en SolidWorks consiste en dibujar formas básicas (rectángulos y círculos), para asignarles restricciones y dimensiones posteriormente. Partimos por tanto de un rectángulo cualquier, y le asignamos las dimensiones totales de la pieza objetivo:

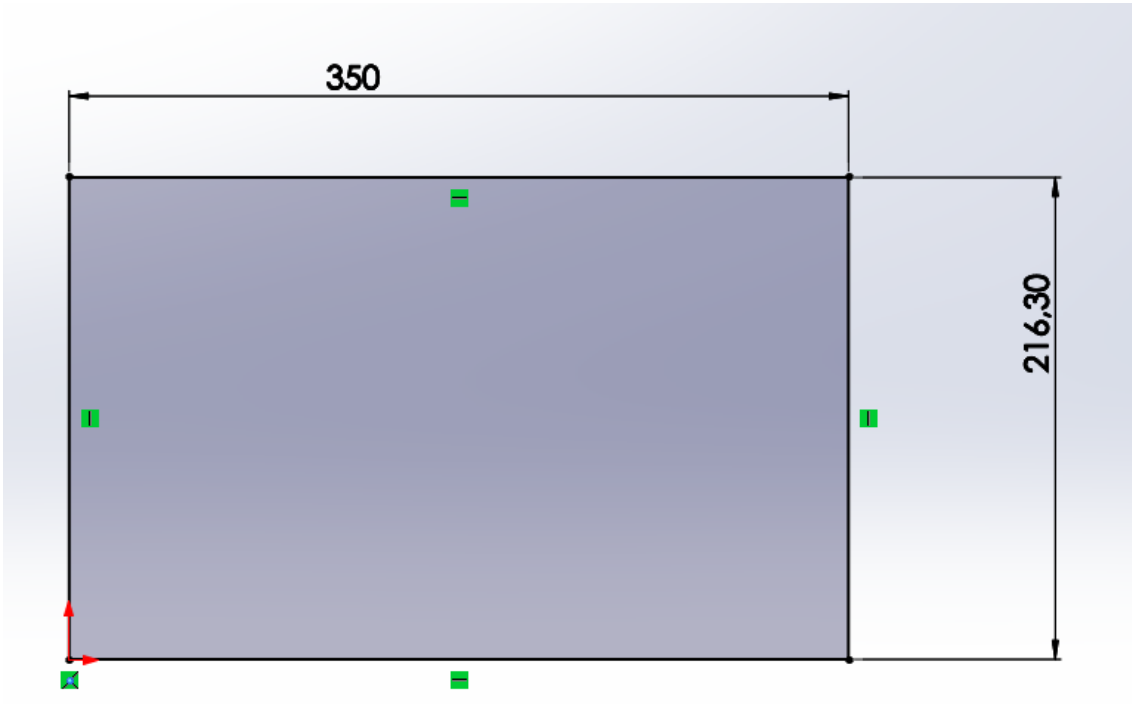


Figura 56 - Rectángulo dimensionado de partida

A continuación, dibujamos rectángulos que conformarán los huecos de la pieza final:

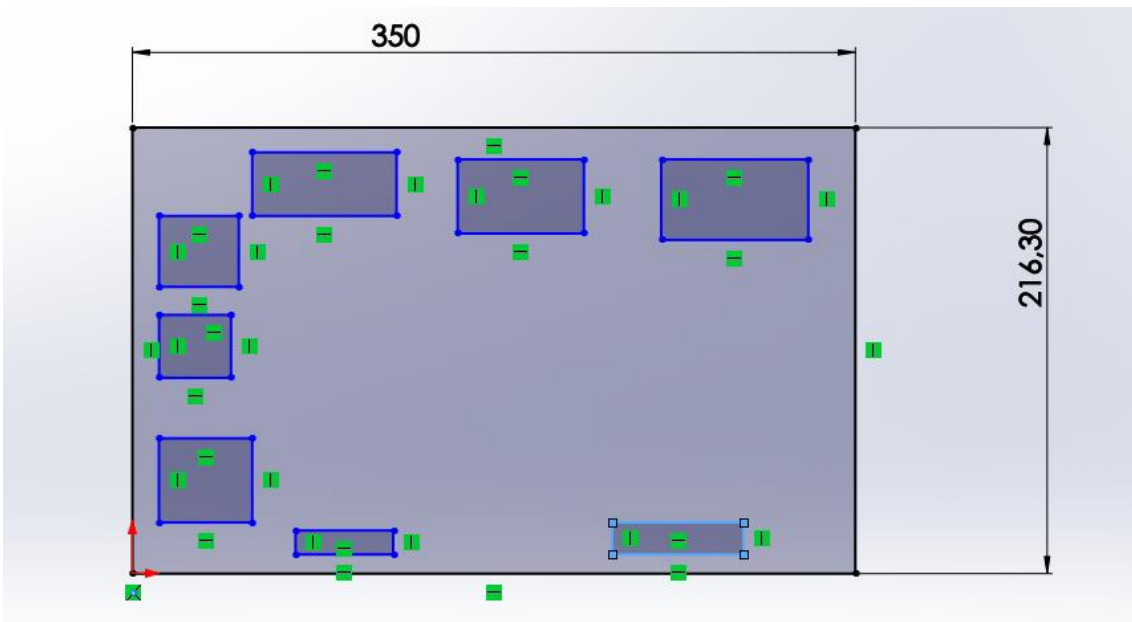


Figura 57 - Disposición de formas internas sin dimensionar

Añadimos todas las restricciones como “Smart Dimension” y realizamos los “Fillet” para redondear las esquinas. Hemos de tener en cuenta al hacer los redondeos el radio mínimo admisible de la herramienta de corte que se utilizará en el proceso de fabricación (fresa de 4 mm).

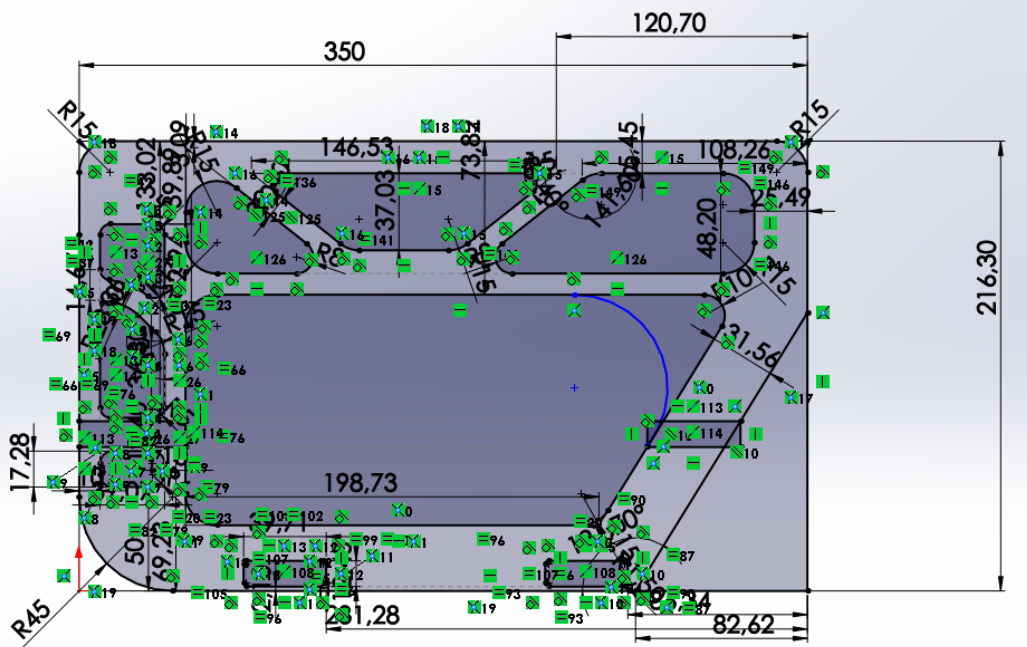


Figura 58 - Asignación de dimensiones y fillets

Hacemos los últimos recortes con la herramienta “Trim”:

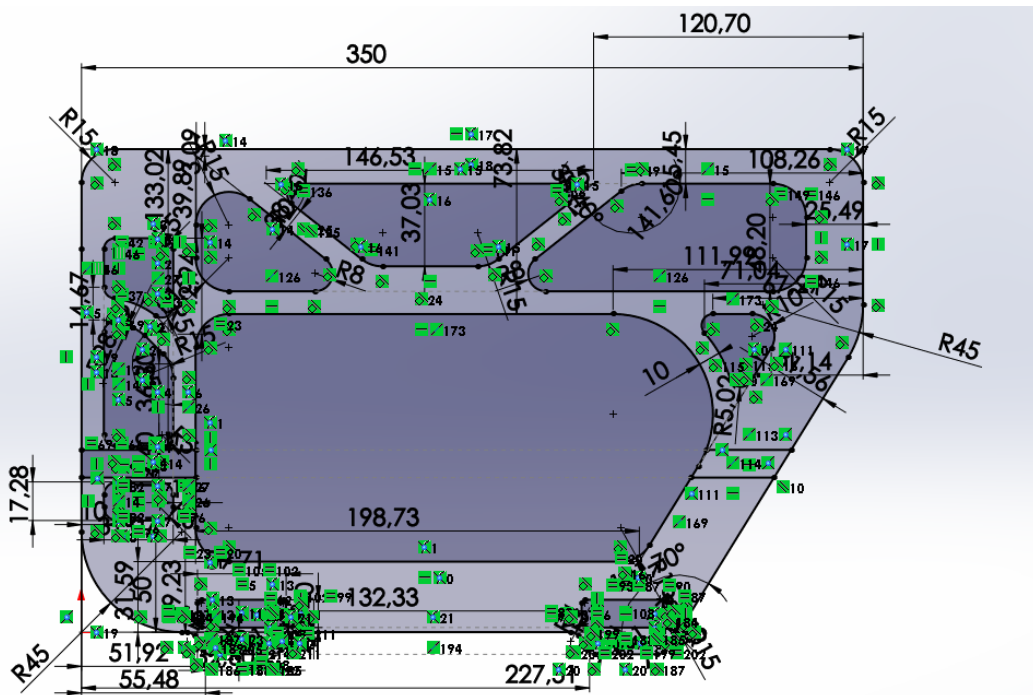


Figura 59 - Recorte de líneas sobrantes

Ya tenemos la forma final del panel. Añadimos los taladros restantes:

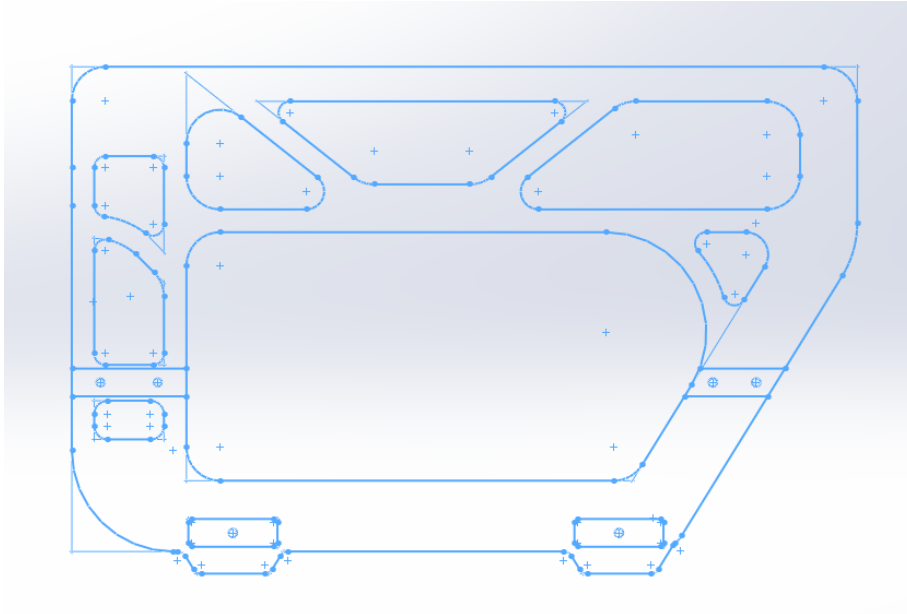


Figura 60 - Sketch terminado en SolidWorks

Con el Sketch terminado, para obtener la pieza tan solo tenemos que realizar una extrusión desde el perfil creado:

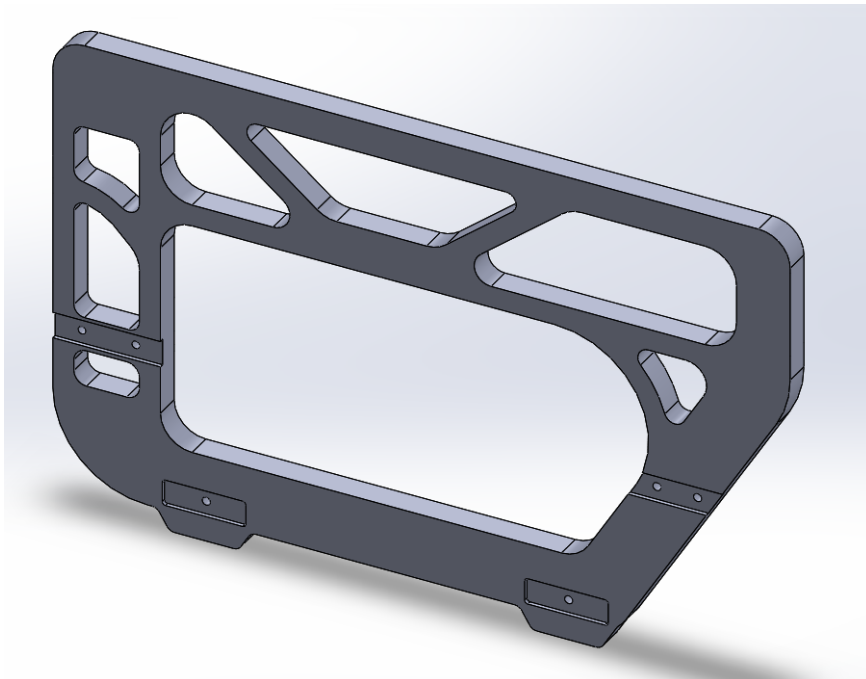


Figura 61 - Pieza extruida en SolidWorks

Comparando el proceso realizado en SolidWorks con el diseño de la misma pieza en Fusion 360, podemos realizar las siguientes observaciones:

- La interfaz de Fusion 360 resulta más intuitiva para el usuario. Es posible realizar formas básicas sin seguir ningún tutorial, mientras que en SolidWorks es necesario pasar por una curva de aprendizaje más pronunciada.
- En SolidWorks la forma de trabajo está más enfocada a trabajar mediante restricciones entre las diferentes entidades del sketch, lo cual se traduce en un resultado más estructurado y fácil de modificar a posteriori. En Fusion 360 también se puede trabajar con restricciones, pero presenta aún algunos fallos cuando se intenta trabajar de esta manera. Esto hace que el usuario tienda a trabajar más “a mano alzada”, dejando varias líneas sin definir por completo.
- Por lo general, para este tipo de diseños en 2D con posterior extrusión, se considera que ambos programas tienen funcionalidad de sobra para acometer el diseño de cualquier pieza. Fusion 360 parece más rápido para diseños sencillos, pero esto es algo que depende del grado de familiaridad con un programa u otro.

Capítulo 5

Simulación

5.1 Introducción

En este capítulo estudiamos la funcionalidad del diseño realizado en el capítulo 4, por medio de herramientas de simulación implementadas en los mismos programas de diseño utilizados hasta ahora. Realizaremos las siguientes simulaciones:

- Simulación de carga estructural.
- Simulación de cerramientos a la presión de trabajo.
- Simulación de cerramientos a la presión de fallo.

Fusion 360 dispone de un Workspace de simulación que permite realizar estudios de estrés estático, variable, térmico, etc. Las simulaciones de carga estructural y de presión se realizan mediante la utilidad “Static Stress”, mientras que para la simulación de impactos se utiliza “Event Simulation”.

A continuación, describimos cada uno de los casos propuestos:

5.2 Carga estructural

El objetivo de esta simulación es la de asegurar que la estructura del ROV resistirá los esfuerzos que pueda experimentar en un ambiente de trabajo normal, como pueda ser el estar en un barco junto con material de trabajo o de buceo, soportar el peso de una persona apoyada sobre el vehículo, apoyar otros equipos encima, etc.

Para la realización de esta simulación, creamos una copia del modelo, eliminando todos los componentes que no sean relevantes para el estudio, sabiendo que sólo tendrán

influencia en los resultados las piezas de la estructura y los cerramientos estancos. Estos, por su disposición, también cumplen una función estructural.

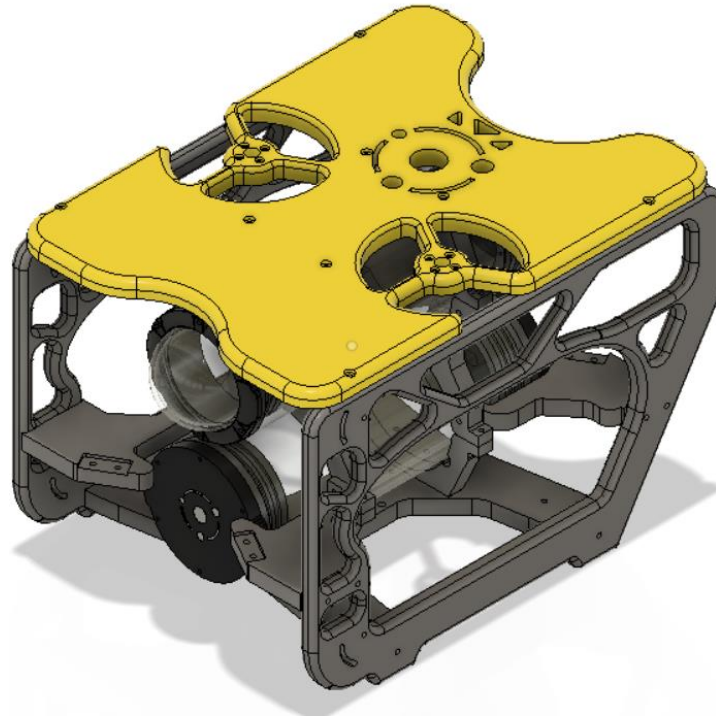


Figura 62 - Simulación de carga. Modelo base

El primer paso es definir las restricciones de la simulación, las cuales fijan en los 6 grados de libertad las patas del vehículo, situadas en la parte inferior de los paneles laterales:

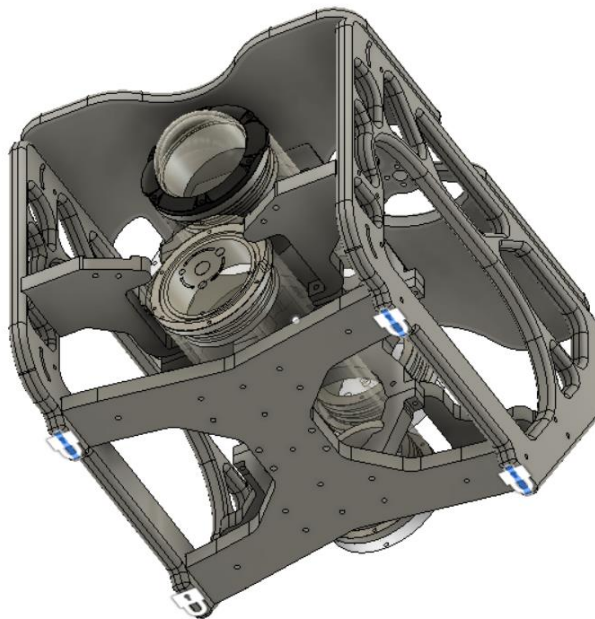


Figura 63 - Simulación de carga. Restricciones

Por otro lado, definimos los contactos entre los diferentes componentes implicados en el diseño. Fusion 360 ofrece una herramienta para generar los contactos de forma automática. Es recomendable hacer una comprobación manual:

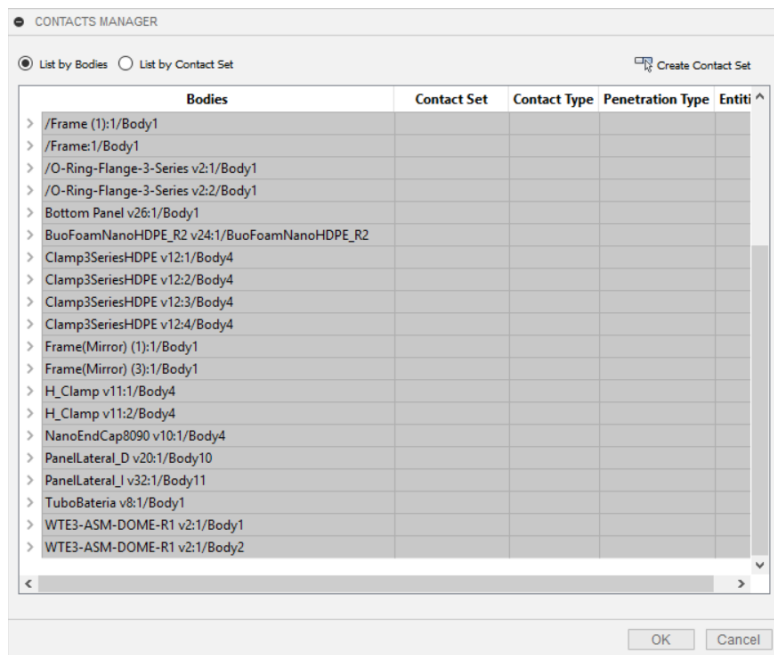


Figura 64 – Simulación de carga. Lista de contactos

Aplicamos una fuerza estructural sobre el panel superior del ROV. Comenzamos con una carga de 70 kg:

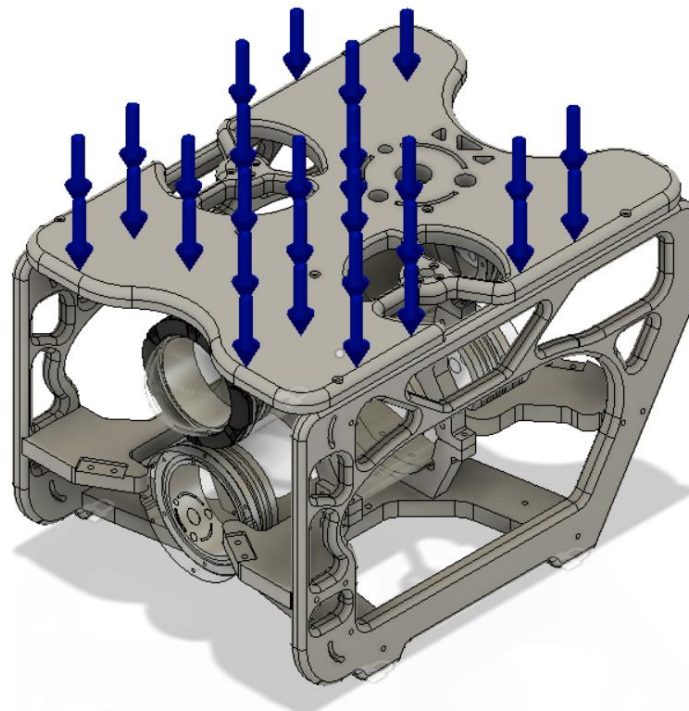


Figura 65 – Simulación de carga. Carga

Con todo definido, utilizamos la herramienta de generación de malla automática. El procedimiento recomendable es resolver la simulación con tamaños de malla sucesivamente más finos, hasta llegar a un estado en el que el hecho de afinar la malla no aporte una diferencia significativa.

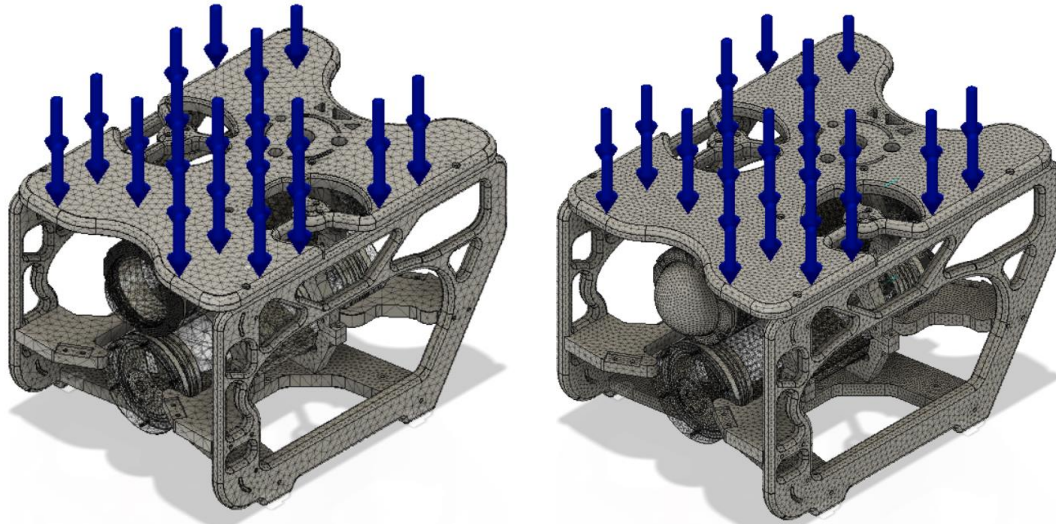


Figura 66 - Simulación de carga. Malla

Por último, resolvemos la simulación. Fusion 360 permite la resolución de forma local o en la nube, para casos en los que el PC no tenga suficiente potencia.

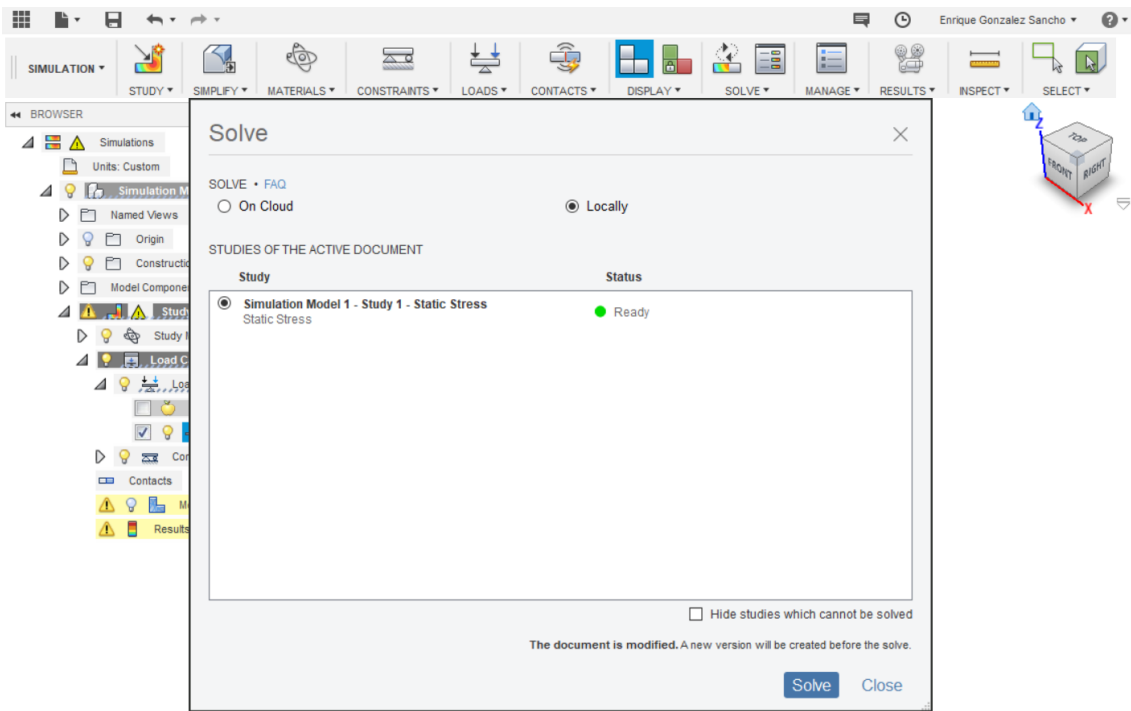
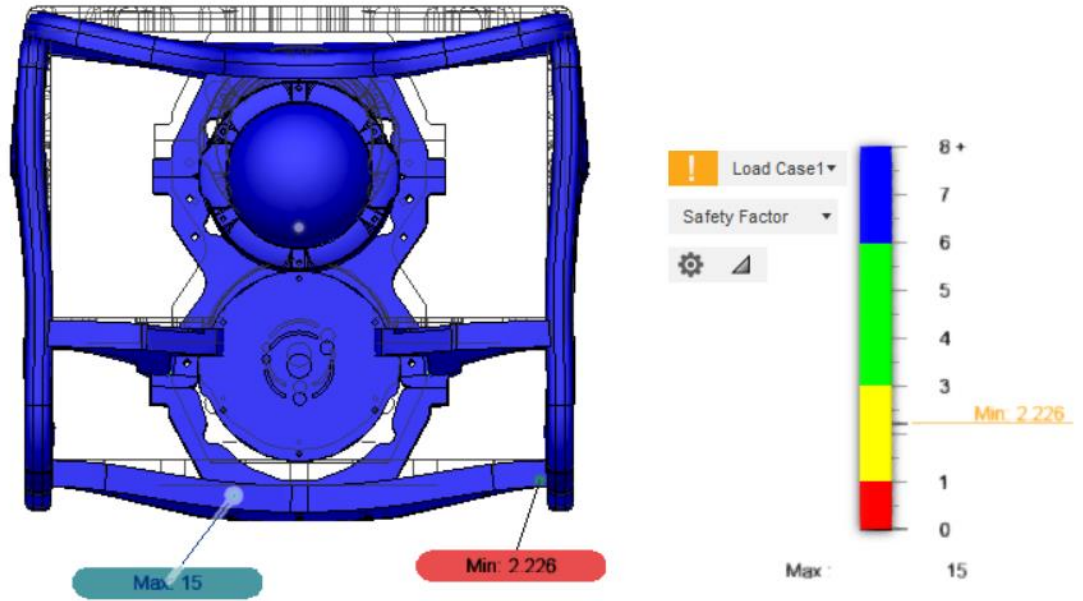


Figura 67 - Simulación de carga. Resolución

En la siguiente imagen podemos ver el resultado de la simulación:



El punto crítico se encuentra en la junta entre el panel inferior y los laterales, teniendo un factor de seguridad mínimo de 2.226 en dicho punto. Concluimos por tanto en que la estructura es suficientemente robusta para el ambiente en el que está destinada a trabajar.

5.3 Presión hidrostática de trabajo

Para realización de este estudio, creamos un nuevo caso de simulación en el que sólo se tiene en cuenta el cerramiento de la electrónica. Seguimos los mismos pasos que en el caso anterior:

1. Definición de restricciones
2. Generación y revisión de contactos
3. Aplicación de cargas
4. Generación de malla
5. Resolución

La malla generada tiene el siguiente aspecto:



Figura 68 - Simulación a presión de trabajo. Malla

Fusion 360 permite definir esfuerzos por presión hidrostática, estableciendo la altura de columna de agua. Definimos dicha presión sobre el cilindro del cerramiento estanco, y sobre las tapas de este.

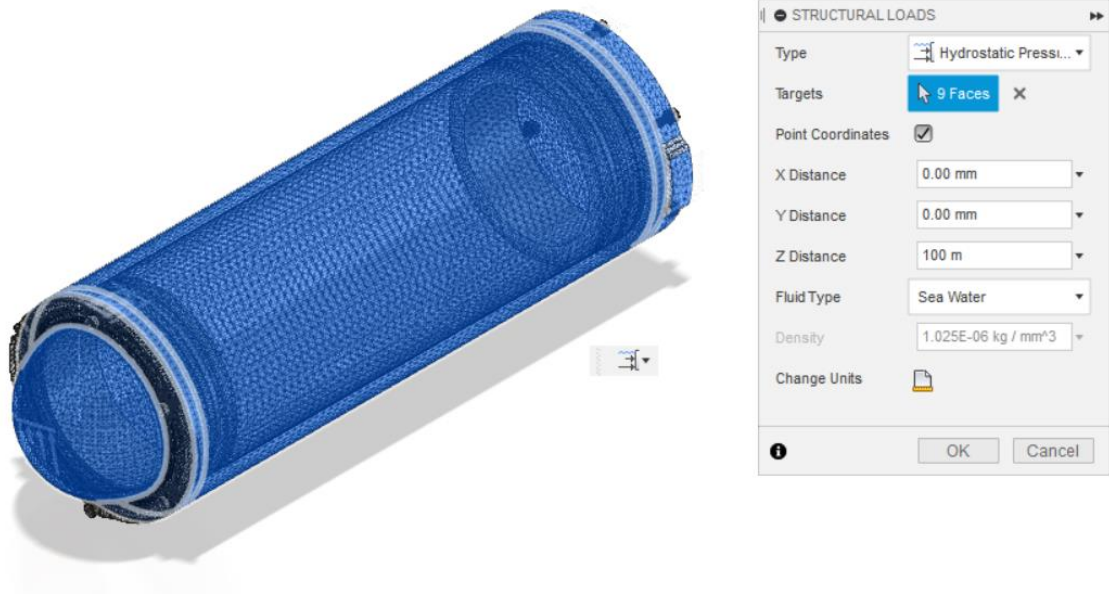


Figura 69 - Simulación a presión de trabajo. Presión hidrostática

A continuación, resolvemos la simulación pulsando sobre el botón “Solve”. Tras unos minutos, obtenemos los siguientes resultados:

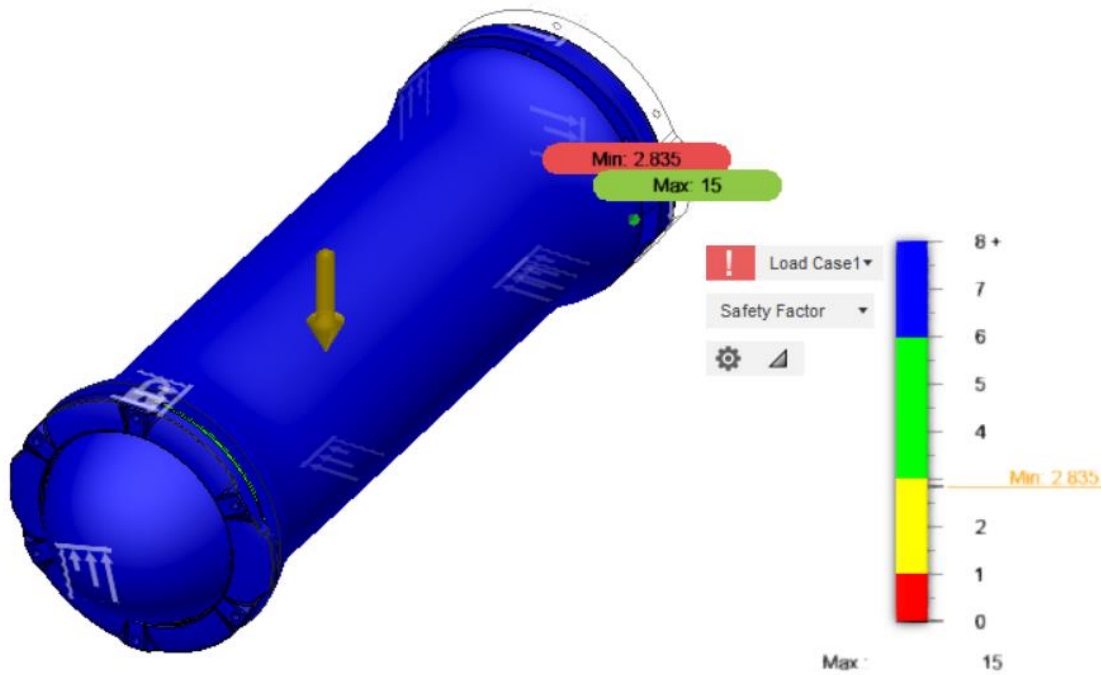


Figura 70 - Simulación a presión de trabajo. Error de contactos

Observamos que la deformación del tubo “atraviesa” las caras de la brida de aluminio que quedan en el interior del tubo. Esto nos muestra que se ha cometido un error en la generación automática de contactos, ya que la distancia entre el tubo y la brida es mayor que

la considerada mínima para crear un contacto. Aumentamos esta distancia a 1 mm y repetimos la simulación (la distancia entre ambas caras es de 0.125 mm). Ahora, los resultados son los siguientes:

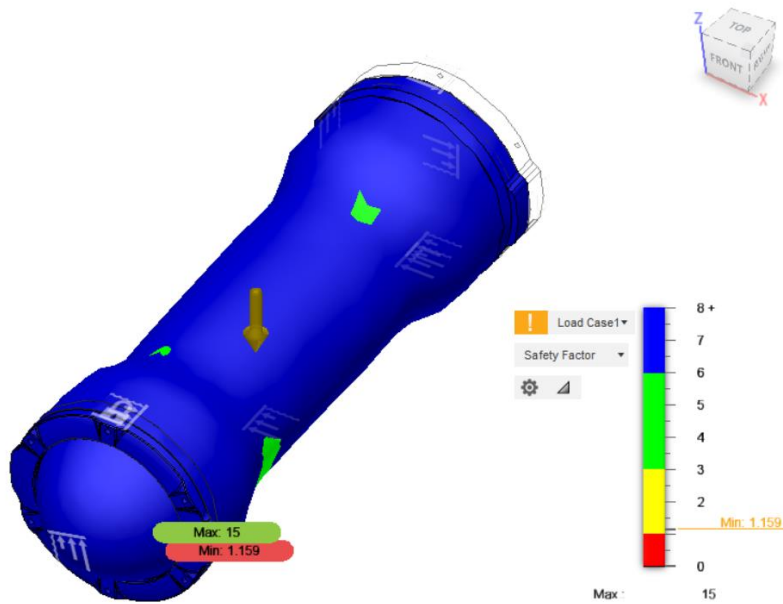


Figura 71 - Simulación a presión de trabajo. Resultados

El factor de seguridad mínimo se encuentra en la brida de aluminio, con un valor de 1.159:

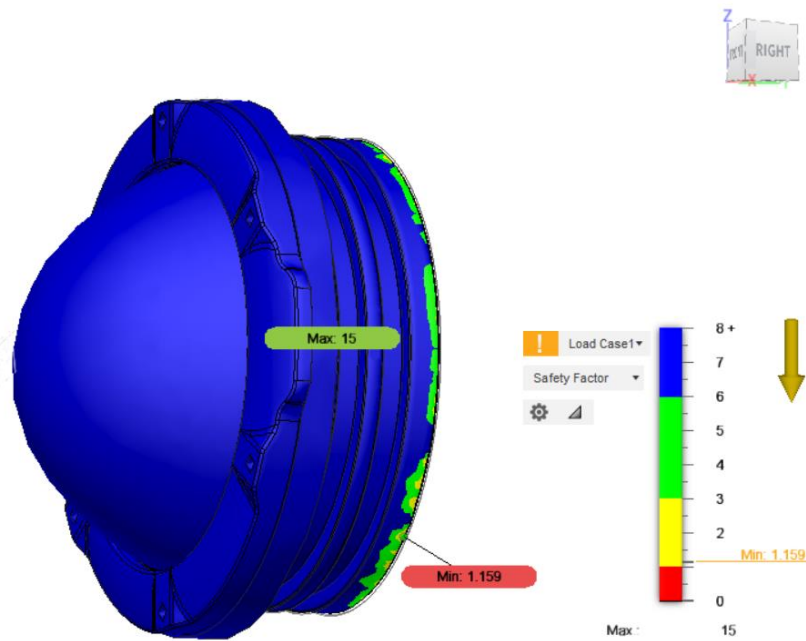


Figura 72 - Simulación a presión de trabajo. Fallo bridas

No obstante, los cuerpos considerados como críticos para asegurar la estanqueidad del cerramiento son el tubo, la tapa y la cúpula de acrílico. Entre ellos, el factor de seguridad mínimo se encuentra en el borde interior de la cúpula, y tiene un valor de 3.102:

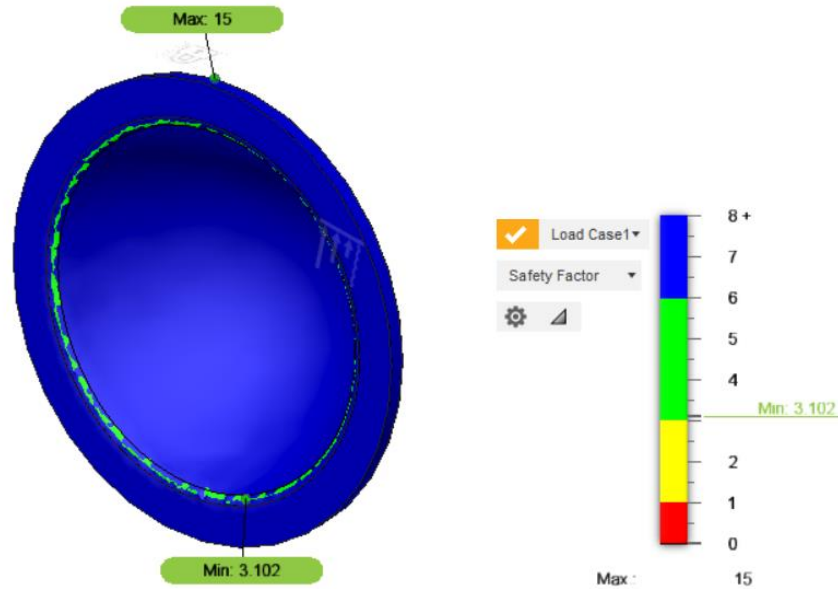


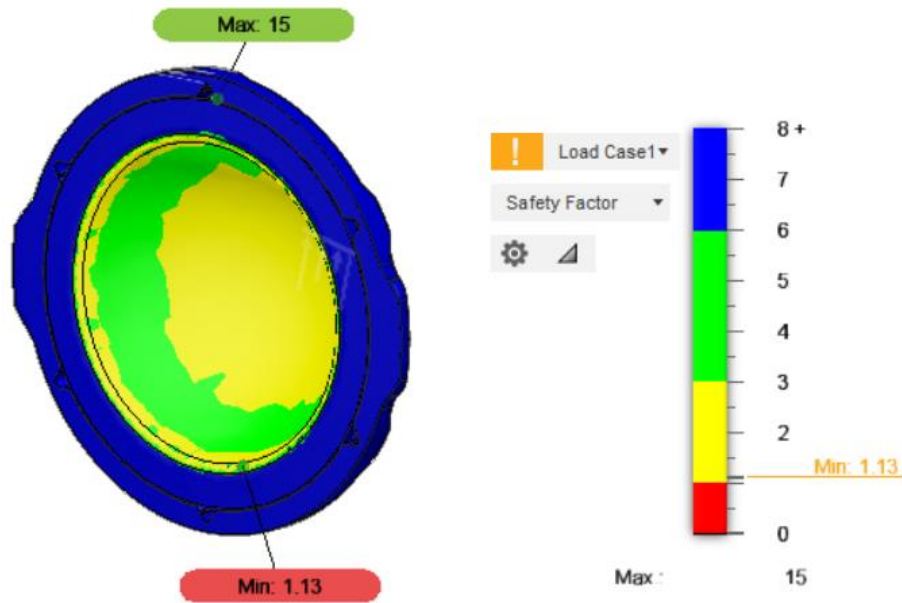
Figura 73 - Simulación a presión de trabajo. Punto crítico

Esto supone la confirmación de que el cerramiento soportará sin problemas la presión de trabajo. Pasamos al siguiente estudio, en el que establecemos una presión de:

$$D_{max} = n \times D_{OP} = 3.102 \times 100 \text{ m} = 310.2 \text{ m}$$

5.4 Presión hidrostática de fallo

Tras la simulación anterior, establecemos la presión de trabajo en la ejercida por una columna de agua de 310.2 m. Siguiendo el procedimiento anterior, obtenemos los siguientes resultados:



Como en el caso anterior, el punto crítico es el borde interior de la cúpula. Esta vez con un factor de seguridad de 1.13

Capítulo 6

Conclusión y trabajos futuros

6.1 Conclusión

Como recapitulación, los pasos seguidos en este trabajo han sido:

1. **Estudio del Estado del Arte:** Revisión de la historia de la robótica submarina y de los modelos de ROVs comerciales que hay en el mercado.
2. **Selección de los componentes:** Tras la definición de las especificaciones objetivo, se han seleccionado todos los subsistemas que componen el vehículo, estudiando la viabilidad de su integración.
3. **Diseño mecánico:** Diseño de la estructura del vehículo e integración de los componentes en la misma.
4. **Simulación:** Realización de estudios con software de simulación para la validación del diseño en las condiciones de trabajo.

El paso 3 se ha llevado a cabo realizando una comparativa entre los dos programas de diseño y simulación propuestos en los objetivos del proyecto, a saber, Autodesk Fusion 360, y SolidWorks, obteniendo una panorámica de las facilidades y ventajas que aportan cada uno.

Habiendo realizado los pasos anteriores, las conclusiones obtenidas en el proyecto son las siguientes:

- 1) Se ha realizado el desarrollo completo de diseño de un vehículo submarino operado remotamente, desde el estudio del estado del arte hasta la simulación y comprobación de la resistencia del vehículo frente a los esfuerzos a los que de forma más común estará sometido, pasando por la selección, modelado en detalle y ensamblaje virtual de cada uno de sus componentes.

- 2) Del modelo y simulaciones realizadas, así como de los estudios llevados a cabo para determinar el estado del arte y la selección de componentes se puede concluir que el vehículo diseñado es viable y podría ser una herramienta factible para diferentes fines en el ámbito submarino.
- 3) En el mercado actual, se echan en falta soluciones realmente flexibles y adaptables a diferentes aplicaciones o subsistemas.
- 4) El concepto de vehículo submarino operado remotamente (ROV) con capacidades de trabajo profesional, y de tamaño coste reducidos, es perfectamente viable y, siguiendo las premisas de este proyecto, resulta una solución efectiva para las aplicaciones para las que se destina.
- 5) Como herramienta de diseño, el programa Fusion 360 es perfectamente válido para la creación de diseños de Ingeniería reales, siendo una herramienta más accesible que otras opciones como SolidWorks. Por otro lado, este último ofrece una mayor robustez y trazabilidad de los diseños realizados, así como más potencia para realizar diseños parametrizados.

De los objetivos marcados inicialmente, existen varios que no han podido llevarse a cabo o formar parte de este trabajo. El motivo ha sido fundamentalmente la falta de tiempo y la excesiva ambición inicial a la hora de proponerlos. Estos objetivos no realizados o no incluidos en la memoria son:

- Fabricar y construir el vehículo.
- Obtener los parámetros que definen el comportamiento dinámico del sistema.
- Realizar una simulación en un entorno virtual.

6.2 Trabajos futuros

Como continuación de este Trabajo de Fin de Máster se plantean diferentes posibilidades, dadas por las necesidades que se plantean en el sector del trabajo profesional submarino. Aunque la mayoría de ellas se trate de accesorios integrables en el vehículo, también existen posibles mejoras que se estudiarán tras la validación en los trabajos continuos en campo. Dichas mejoras pueden ordenarse por relevancia de la siguiente manera:

1. Optimización de la propulsión, diseñando hélices con tobera para aumentar la eficiencia y la autonomía.
2. Incorporación de un manipulador para la recogida de objetos ligeros.
3. Sensores para la medición de la calidad del agua.
4. Integración de un sónar para la navegación en aguas de visibilidad reducida.
5. Diseño de una electrónica integrada más económica.

A estos trabajos futuros hay que añadirles aquellos que estaban contemplados en los objetivos iniciales de este trabajo y que no han podido ser completados o incluidos en esta memoria:

- Fabricar y construir el vehículo.
- Obtener los parámetros que definen el comportamiento dinámico del sistema.
- Realizar una simulación en un entorno virtual.

Referencias

- [1] H. P. U. Oceanic Institute, «Aqua Facts», *aboutoceans*. .
- [2] U. S. D. of C. National Oceanic and Atmospheric Administration, «How much of the ocean have we explored?» .
- [3] ROV Committee of the Marine Technology of Society, «ROVs - A BRIEF HISTORY». .
- [4] E. Buell, «The Whitehead Torpedo», *Submarine Force Museum - Home of the Historic Ship NAUTILUS*, 27-oct-2017. .
- [5] Diving Almanac, «REBIKOFF, Dimitri», 17-may-2018. .
- [6] USNUM Curator, «CURV III», 21-abr-2016. .
- [7] V. Barford, «Pisces III: A dramatic underwater rescue», *BBC News Magazine*, 30-ago-2013. .
- [8] A. M. Tahir y J. Iqbal, «UNDERWATER ROBOTIC VEHICLES: LATEST DEVELOPMENT TRENDS AND POTENTIAL CHALLENGES», p. 7.
- [9] Teledyne Marine, «SEABOTIX website». .
- [10] VideoRay, «VideoRay website». .
- [11] Deep Trekker, «Deep Trekker website». .
- [12] SAAB Seaeeye, «SAAB Seaeeye website». .
- [13] Aquabotix, «Aquabotix website». .
- [14] Outland Technology, «Outland Technology website». .
- [15] Oceaneering, «Oceaneering website». .
- [16] Diab Group, «OCEANEERING - THE WORLD'S LARGEST ROV MANUFACTURER». .
- [17] OpenROV, «OpenROV website». .
- [18] Blue Robotics, «Blue Robotics website». .
- [19] «<https://mavlink.io/en/>». .
- [20] «<http://qgroundcontrol.com/>». .
- [21] TSS, *TSS O-Ring Calculation Software*. Trelleborg Sealing Solutions.