

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)

Grado en Ingeniería Mecánica.

ALUMNO: D. Rafael Viniegra de la Fuente.

DIRECTORES: Dña. Araceli Regueiro Pereira.

D. Iván Iglesias Sánchez.

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universidade Vigo

ÍNDICE DE DOCUMENTOS.

Memoria del Trabajo. ***4***

Planos del dron. ***61***

Pliego de condiciones. ***71***

Presupuesto. ***76***



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)

Grado en Ingeniería Mecánica

Memoria del Trabajo.

ALUMNO: D. Rafael Viniegra de la Fuente.

DIRECTORES: Dña. Araceli Regueiro Pereira.

D. Iván Iglesias Sánchez.

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universidade Vigo

RESUMEN

En los últimos años, los vehículos submarinos no tripulados han cobrado gran relevancia en misiones científicas y militares. En este contexto, el Centro Universitario de la Defensa (CUD) impulsó el desarrollo de un dron submarino modular para investigaciones en aguas someras próximas a la Escuela Naval Militar. Este Trabajo Fin de Grado se centró en diseñar y desarrollar el casco hidrodinámico del dron, garantizando su modularidad, resistencia estructural y eficiencia hidrodinámica.

El proceso incluyó un análisis histórico de los submarinos hasta los actuales AUV, que permitió definir las características del casco. Se diseñaron la proa, sección central y popa utilizando Autodesk Inventor, aplicando criterios hidrodinámicos basados en estudios previos. Además, se incorporaron perfiles NACA en las superficies de sustentación y se creó un sistema de ensamblaje modular con abrazaderas, optimizado para impresión 3D en ABS.

Se realizaron simulaciones con Autodesk CFD que confirmaron una notable mejora en la eficiencia hidrodinámica respecto al prototipo inicial, reduciendo la resistencia al avance y mejorando la eficiencia energética a 5 nudos. El diseño final cumplió con los requisitos establecidos y se consolidó como un elemento clave para la futura implementación del MoAUV en misiones de investigación.

PALABRAS CLAVE

Dron submarino, modular, casco, CAD e hidrodinámico.

AGRADECIMIENTOS

A los profesores Araceli Regueiro Pereira e Iván Iglesias Sánchez, los tutores de este proyecto. Por su constante interés y apoyo durante todo el proceso de elaboración del proyecto.

A mis familiares y amigos, por estar siempre presentes en todos los momentos de mi paso por la Escuela Naval, animándome a ser cada día mejor en tiempos difíciles.

A María, por enseñarme que la constancia y el trabajo duro vencen a cualquier adversidad en la vida.

A la promoción 425-155, que han sido desde el principio mi familia dentro de la Escuela Naval, enseñándome valores de hermandad y lealtad.

A Jesucristo nuestro Señor, por darme el regalo de la vida.

CONTENIDO

CONTENIDO *1*

Índice de Figuras *4*

Índice de Tablas *6*

ÍNDICE DE ABREVIATURAS *1*

1 Introducción y objetivos *2*

1.1 Introducción. **2**

1.2 Motivación. **2**

1.3 Objetivos. **3**

1.4 Estructura del trabajo. **3**

2 Estado del arte *4*

2.1 Drones submarinos. **4**

2.1.1 Antecedentes de los drones submarinos. 4

2.1.2 El submarino en los siglos XVIII y XIX. 6

2.1.3 El nacimiento del submarino convencional en el siglo XX. 8

2.2 . El dron Submarino moderno. **11**

2.2.1 Evolución desde la guerra fría hasta la actualidad. 11

2.2.2 Utilidades de los drones submarinos en la actualidad. 11

2.2.3 Clasificación de drones submarinos. 12

2.3 Fundamentos para el diseño de drones submarinos. **13**

2.3.1 Hidrodinámica en el diseño del MoAUV. 13

2.3.2 Tipos de cascos y materiales de construcción. 15

3 Desarrollo del TFG *17*

3.1 Datos de partida. **17**

3.2 Diseño conceptual del dron. **18**

3.2.1 Hipótesis y especificaciones particulares. 18

3.2.2 Diseño preliminar del casco hidrodinámico. 19

3.2.3 Diseño en detalle de la sección de popa. 23

3.2.4 Dimensionamiento de la sección de proa. 26

3.2.5 Dimensionamiento de la sección central. 29

3.2.6 Parámetros finales Casco hidrodinámico. 31

3.3 Análisis hidrodinámico del casco. **32**

3.4 Diseño del mecanismo de unión **33**

3.4.1 Investigación sobre mecanismos de unión en piezas de fabricación aditiva 33

3.4.2 Diseño del mecanismo de unión mediante abrazaderas. 36

3.4.3 Resultado final abrazaderas de unión. 40

3.5 Análisis FEM mecanismo de unión modular. **41**

3.5.1 Condiciones del análisis. 41

3.5.2 Materiales del análisis. 42

4 Resultados y validación *44*

4.1 Resultados finales análisis hidrodinámico. **44**

4.1.1 Análisis de velocidades. 45

4.1.2 Análisis de presiones. 46

4.1.3 Análisis de estela. 48

4.1.4 Resultados finales análisis hidrodinámico. 49

4.2 Análisis FEM. 49
4.2.1 Desplazamientos. 49
4.2.2 Tensiones de Von Mises. 50
4.2.3 Resultados finales análisis FEM. 51
4.3 Cumplimiento de especificaciones. 51
5 Conclusiones y líneas futuras 53
5.1 Líneas futuras. 53
6 Bibliografía 55
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales 59
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Sumergible Leonardo Da Vinci [3]. 5
Figura 2-2: Maqueta del Drebbel [7]. 5
Figura 2-3: Submarino Turtle [11]. 6
Figura 2-4: Submarino Nautilus [13]. 7
Figura 2-5: Replica submarino Peral [16]. 8
Figura 2-6: U-Boat XXI [18]. 9
Figura 2-7: USS Albacore [21]. 9
Figura 2-8: ROV moderno [23]. 10
Figura 2-9: AUV de última generación (GAVIA 1000m) [24]. 11
Figura 2-10: Sparus II (Nuevo AUV de la armada española) [26]. 12
Figura 2-11: Clasificación drones según su tamaño [28]. 13
Figura 2-12: Curva comparativa resistencia al avance con F [30]. 15
Figura 3-1: Casco de presión interno [34]. 17
Figura 3-2: Forma ideal cascos submarinos [35]. 19
Figura 3-3: Casco primitivo MoAUV [autoría propia]. 20
Figura 3-4: Sección de proa primitiva [autoría propia]. 20
Figura 3-5: Sección de popa primitiva [autoría propia]. 21
Figura 3-6: Posibles cascos submarinos sección 2D [36]. 22
Figura 3-7: Comparativa de evolución de Cd en función de la forma del casco [36]. 22
Figura 3-8: Popa primitiva [autoría propia]. 23
Figura 3-9: Curva Hidrodinámica de la sección de popa [autoría propia]. 24
Figura 3-10: Pagina Web generadora perfiles NACA [37]. 24
Figura 3-11: Popa Hidrodinámica con perfiles NACA final [autoría propia]. 25
Figura 3-12: Proa primitiva [autoría propia]. 26
Figura 3-13: Comparación proas elipsoidales en función del valor m [38]. 27
Figura 3-14: Curva hidrodinámica de la sección de proa [Autoría propia]. 27
Figura 3-15: Proa hidrodinámica [autoría propia]. 28
Figura 3-16: Sello interior casco de presión [40]. 29
Figura 3-17: sección central primitiva [autoría propia]. 29
Figura 3-18: Cuerpo central definitivo [autoría propia]. 30
Figura 3-19: Casco definitivo [autoría propia]. 32
Figura 3-20: Dron en el interior del túnel de viento. [autoría propia] 32
Figura 3-21: Mecanismos de unión más típicos [43]. 34
Figura 3-22: Unión con forma de milano frente a forma recta [45]. 35
Figura 3-23: Aplicación de inserto termofijado [47]. 35
Figura 3-24: Cola de milano abrazadera [autoría propia]. 36
Figura 3-25: Zona de unión sección de proa [autoría propia]. 37
Figura 3-26: zona de unión sección de popa [autoría propia]. 37
Figura 3-27: posición de los agujeros según especificaciones del fabricante de los insertos [autoría propia]. 38
Figura 3-28: Creación del agujero en la abrazadera superior para compatibilidad con el tornillo [autoría propia]. 38
Figura 3-29: Posición del pasador de las abrazaderas [autoría propia]. 39
Figura 3-30: Tapón para la abrazadera superior [autoría propia]. 39
Figura 3-31: abrazadera superior [autoría propia]. 40
Figura 3-32:Abrazadera inferior [autoría propia]. 40
Figura 3-33: Dron dividido en cuartos [autoría propia]. 41
Figura 3-34: actuaciones previas a la simulación [autoría propia] 41
Figura 3-35: Mallado de la pieza [autoría propia]. 42

Figura 3-36: Disposición inicial del dron previo a análisis [autoría propia]. 42
Figura 4-1: Resultado final dron MoAUV [autoría propia]. 44
Figura 4-2: Análisis en CFD de velocidad en el casco del dron primitivo [autoría propia]. 45
Figura 4-3: Análisis en CFD de velocidad en el casco del dron final [autoría propia]. 45
Figura 4-4: Análisis en CFD de presión en el casco del dron primitivo [autoría propia]. 46
Figura 4-5: Análisis en CFD de presión en el casco del dron final [autoría propia]. 47
Figura 4-6: Análisis en CFD de la estela en el casco del dron primitivo [autoría propia]. 48
Figura 4-7: Análisis en CFD de la estela en el casco del dron final [autoría propia]. 48
Figura 4-8: análisis de desplazamientos [autoría propia]. 50
Figura 4-9: análisis de Von Mises [autoría propia]. 50
Figura 4-10: Detalle posición de la tensión máxima del FEM [autoría propia] 51
Figura 4-11: Mecanismo de unión ensamblado [autoría propia]. 52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Coeficientes adimensionales. 14
Tabla 3-1:Parámetros casco de presión [34]. 18
Tabla 3-2: Especificaciones del dron. 18
Tabla 3-3:Partes del dron. 19
Tabla 3-4:Parámetros casco de presión [34]. 19
Tabla 3-5:Coeficientes adimensionales sección de popa. 23
Tabla 3-6: Parámetros popa. 25
Tabla 3-7: coeficientes adimensionales proa. 26
Tabla 3-8: Parámetros proa. 28
Tabla 3-9: Coeficientes sección central. 30
Tabla 3-10: Parámetros cuerpo central. 31
Tabla 3-11: Parámetros característicos dron completo. 31
Tabla 3-12: Parámetros Materiales. 43
Tabla 4-1: Tabla comparativa análisis hidrodinámico de velocidades. 46
Tabla 4-2: Tabla comparativa análisis de presión. 47
Tabla 4-3: Tabla comparativa análisis de estela. 49

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

- **AUV**: Autonomous Underwater Vehicle (Vehículo Submarino Autónomo)
- **ROV**: Remotely Operated Vehicle (Vehículo Operado Remotamente)
- **MoAUV**: Modular Autonomous Underwater Vehicle (Vehículo Submarino Autónomo Modular)
- **CFD**: Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
- **CAD**: Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora)
- **ABS**: Acrilonitrilo Butadieno Estireno (material plástico usado en impresión 3D)
- **FEM**: Finite Element Method (Método de Elementos Finitos)
- **ISR**: Intelligence, Surveillance and Reconnaissance (Inteligencia, Vigilancia y Reconocimiento)
- **CUD:** Centro Universitario de la Defensa
- NACA: National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Consultivo Nacional para la Aeronáutica)
- **USV:** Unmanned Surface Vehicle (Vehículo de Superficie No Tripulado)
- **SUUV**: Small Unmanned Underwater Vehicle (Vehículo Submarino No Tripulado Pequeño)
- **MUUV**: Medium Unmanned Underwater Vehicle (Vehículo Submarino No Tripulado Mediano)
- **LUUV**: Large Unmanned Underwater Vehicle (Vehículo Submarino No Tripulado Grande)
- **E**: Módulo de elasticidad (MPa)
- **G**: Módulo de corte (MPa)
- **Re**: Número de Reynolds
- **v**: Velocidad del flujo (m/s)
- **ρ**: Densidad del fluido (kg/m³)
- **μ**: Viscosidad dinámica (Pa·s)
- **m**: Valor adimensional relacionado con geometrías de proa (usado en curvas hidrodinámicas)
- **M3 x 16**: Medida estándar de tornillos (milímetros)
- **nudos**: Unidad de velocidad marítima (1 nudo ≈ 0.514 m/s)
- **kg**: Kilogramo (unidad de masa)
- **mm**: Milímetro (unidad de longitud)
- **m**: Metro (unidad de longitud)
- **Pa**: Pascal (unidad de presión)
- **h**: Hora (tiempo)
- **€/kg**: Euros por kilogramo (coste de material)
- **€/h**: Euros por hora (coste de mano de obra)
- **€**: Euros (moneda)
- **M:** Mega
- **N:** Newton
- **F:** Factor de elongación
- **Cp:** Coeficiente prismático

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción.

El estudio y conocimiento de las aguas someras cercanas a la Escuela Naval Militar es vital para el correcto desarrollo de la instrucción de los alumnos en ámbitos de interés como la navegación en las lanchas de instrucción o la navegación a vela en raqueros y goletas.

Para ello el centro universitario de la defensa está realizando un dron modular submarino no tripulado con capacidad de realizar estudios de interés en la cercanía de la Escuela para así poder asegurar la seguridad y correcto desarrollo de estas actividades.

Este proyecto también tiene una parte de carácter científico importante ya que, mediante este dron, el CUD será capaz de realizar estudios de la ría de Pontevedra. Este también podrá ser usado en asignaturas que se cursan durante el grado para que futuros alumnos puedan entender mejor el funcionamiento de una plataforma tan importante como los Submarinos o el funcionamiento de equipos como el sondador.

Es por los beneficios que se obtendrán de dicho dron que el CUD ha decidido desarrollar un dron con la ayuda de diferentes alumnos mediante sus TFG, en este caso, el diseño y fabricación del casco del dron será la materia de este trabajo.

Para ello se han usado herramientas de diseño asistido por ordenado (CAD), Autodesk inventor profesional, y posteriormente el uso de herramientas 3D y de análisis dimensional para comprobar el correcto funcionamiento y que dicho casco cumple con las prestaciones solicitadas.

Otro punto muy importante de este dron es el hecho de que sea modular, es decir, que tenga piezas "de quita y pon" en función de la misión que este vaya a realizar. Es por ello por lo que el casco cumple con los requisitos básicos de un dron submarino como resistencia e hidrodinámica y a su vez posee una forma de montarse y desmontarse de manera fácil para así poder añadir nuevos módulos en caso de ser necesarios.

1.2 Motivación.

La Escuela Naval Militar tiene la necesidad de desarrollar proyectos de carácter tecnológico que sirvan para mejorar tanto el material como el adiestramiento de los alumnos durante los cursos que aquí realizan.

Para ello la escuela ha decidido realizar un proyecto en el que se logren unir los dos mundos, el militar y el civil, en forma de un dron submarino modular. De esta forma la escuela naval apuesta por el desarrollo técnico y militar de sus alumnos al mismo tiempo. Gracias a este proyecto los alumnos también podrán disfrutar de un material tecnológico que les permita hacer estudios de carácter científico-militar en las aguas cercanas a la escuela naval militar mediante este dron.

Otra motivación que ha hecho posible este proyecto es la necesidad que tiene la armada de desarrollar drones de cualquier índole ya que, como se está viendo en las guerras actuales, los drones son un futuro próximo de los conflictos armados.

1.3 Objetivos.

El objetivo principal del trabajo es el desarrollo de un casco optimizado para un dron submarino no tripulado, para ello se diseñará y analizará el comportamiento del casco diseñado para comprobar si este cumple con los requisitos de diseño y está optimizado para la navegación submarina.

Otro objetivo prioritario del diseño del casco del dron es que este cumpla con el requisito de la modularidad, permitiendo así un montaje y desmontaje rápido y eficaz. Facilitando de esta forma el uso y modificación de componentes internas del dron.

1.4 Estructura del trabajo.

El trabajo estará estructurado de la manera estipulada por el centro universitario de la defensa componiéndose de 5 partes separadas entre sí, cumpliendo a su vez con la UNE 157001:2014 [1]. Siendo estas sus partes:

- Introducción: contiene los objetivos del proyecto, los antecedentes de este y por último la motivación de este.
- Estado del arte: se trata de una breve reseña histórica de los submarinos y su evolución a lo largo de la historia, los drones como nueva tecnología en todos los ámbitos de la sociedad y la unión de estos. También se tratará el diseño asistido por ordenador (CAD) y por último la fabricación aditiva.
- Desarrollo: se desarrolla en profundidad las distintas fases que se vayan aconteciendo, su definición de requisitos, conceptualización, dimensionamiento y diseño.
- Resultados: se estudiará el análisis hidrodinámico y de tensiones y el tiempo y recursos necesarios para la fabricación del casco del dron.
- Conclusión y líneas futuras: se realiza una conclusión de los resultados obtenidos a lo largo del proyecto y se comparará con los objetivos marcados al principio de este. A su vez se comprobará la viabilidad del proyecto y su futuro. Al final se realizará una conclusión del proyecto realizado.

2 ESTADO DEL ARTE

En la última década se ha podido apreciar el creciente uso e importancia de los drones en todos los ámbitos de la industria. En el ámbito submarino los AUVs (vehículos submarinos autónomos) han cobrado un papel fundamental en temas científicos, militares y de exploración. Estos necesitan tener un diseño adecuado y adaptado a su medio, el mar. Es por ello por lo que se requiere en todos ellos un diseño hidrodinámico, eficiente y adaptable las diversas condiciones que se pueden dar en su medio.
El principal esfuerzo de este TFG es diseñar un casco modular que cumpla con los requisitos establecidos y que sea lo más eficiente e hidrodinámico posible.

2.1 Drones submarinos.

Para entender el nacimiento de la necesidad de los humanos de crear drones submarinos no tripulados, para que estos cumplan numerosas misiones en el ámbito submarino. Es necesario entender y observar la evolución que ha sufrido el interés por el mundo submarino por parte del humano. Para ello veremos la evolución desde el primer sumergible hasta el nacimiento del primer ROV y así entender los antecedentes de los AUV.

2.1.1 Antecedentes de los drones submarinos.

El mar y todo lo relacionado con este siempre ha sido un tema de interés para los humanos desde la antigüedad hasta la actualidad. El antecedente de los submarinos son los sumergibles, siendo la única diferencia entre estos que los sumergibles no son capaces de navegar en inmersión grandes distancias, teniendo que hacer esto en superficie. Mientras que los submarinos si tienen esa independencia operativa pudiendo navegar grandes distancias bajo el agua.

El primer ejemplo que se tiene del intento de un sumergible es el de Leonardo da Vinci, el cual en una de sus hojas del Codex Leicester muestra el diseño preliminar de un artífice subacuático, véase la Figura 2-1: Sumergible Leonardo Da Vinci [3], que permitirá permanecer altos periodos de tiempo bajo el agua. Este no se llevó a cabo ya que el propio da Vinci se negó por la maldad del hombre por naturaleza y el mal uso que se haría de este [2].



Figura 2-1: Sumergible Leonardo Da Vinci [3].

No fue hasta el año 1578 que no se volvió a investigar y avanzar en materia de sumergibles, año en el cual el matemático y artillero ingles William Bourne, en su obra "Inventions or Devises" (1578). En esta obra el autor da un diseño propio de un sumergible de madera cubierto de cuero impermeable el cual, mediante la reducción de su volumen era capaz de sumergirse. No llego nunca a construirse, pero sentó las bases de la construcción de futuros sumergibles [4].

Posteriormente, en el año 1620, el científico holandés Cornelio Van Drebbel. El cual, basándose en los diseños de William Bourne construyo el primer submarino de la historia, véase la Figura 2-2: Maqueta del Drebbel [7]. Este consistía en un armazón de madera recubierto de piel de cabra engrasada y con un sistema de propulsión a remo, consiguió hacer numerosos viajes por el Támesis con dicho submarino [5] [6].



Figura 2-2: Maqueta del Drebbel [7].

Fue en el año 1624 cuando el sacerdote francés Marín Mersenne, con su obra “la verite des sciences” [8] explicaba la forma que debían tener los sumergibles para poder soportar de forma eficiente la presión hidrostática y a su vez las formas básicas para que estos fuesen lo más hidrodinámicos posibles. Aunque el científico no diseño ningún sumergible puso las bases del diseño de submarinos [9].

2.1.2 El submarino en los siglos XVIII y XIX.

A lo largo del siglo XVII y principios del XVIII, se hicieron numerosos intentos por desarrollar sumergibles funcionales. Sin embargo, no fue hasta 1775 cuando se logró construir el primer submarino con un propósito militar: el *Turtle*, diseñado por David Bushnell, véase la Figura 2-3: Submarino Turtle [11].

Este invento supuso un gran avance en la ingeniería submarina, ya que rompía con las ideas previas de Marin Mersenne, quien había propuesto que los sumergibles debían tener una forma cilíndrica para soportar mejor la presión del agua. En contraste, el *Turtle* tenía un diseño esférico, similar a una tortuga, lo que le otorgaba mayor maniobrabilidad bajo el agua. Este diseño supuso un gran avance ya que en el existían dos hélices basadas en tornillos de Arquímedes que le permitían tener capacidad de movimiento tanto en avance como en profundidad [10].

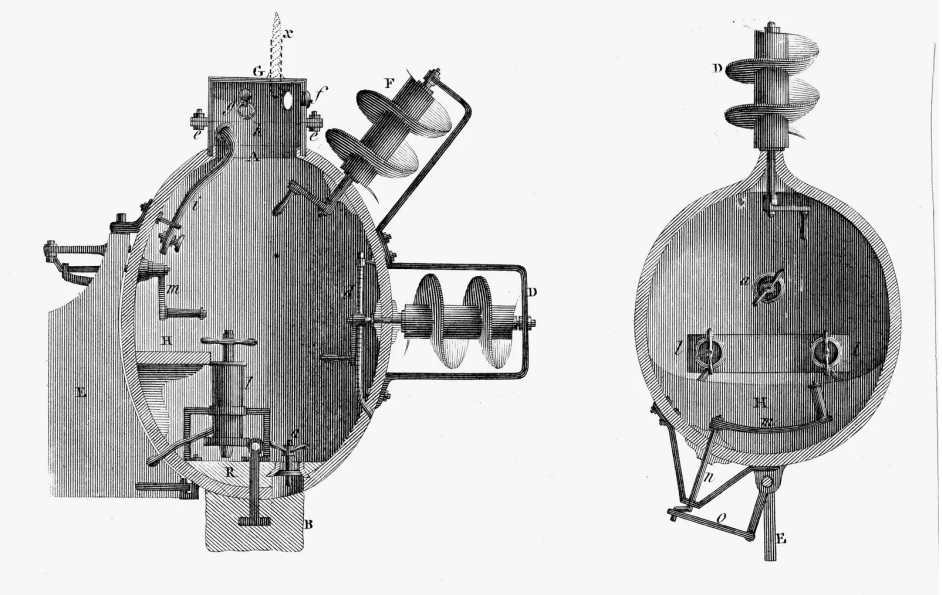


Figura 2-3: Submarino Turtle [11].

Después del *Turtle* de David Bushnell, comenzaron a surgir nuevos intentos de construir sumergibles más avanzados. En 1797, el ingeniero estadounidense Robert Fulton propuso a la Marina Francesa un submarino con la idea de emplearlo contra la flota británica en el Canal de la Mancha. Al principio, la propuesta fue rechazada, pero cuando Napoleón Bonaparte asumió el cargo de Primer Cónsul, decidió financiar el proyecto con la esperanza de que pudiera cambiar el equilibrio de poder en el mar.

Así nació el Nautilus, véase la Figura 2-4: Submarino Nautilus [13]. Terminado su construcción en 1801. Este submarino tenía 6,5 metros de eslora, un casco de madera con forma elíptica y un sistema de propulsión mixto. Durante las pruebas en el río Sena, alcanzó una profundidad de 7,6 metros y una velocidad de 4 nudos. Está velocidad fue alcanzada gracias al empleo de una hélice como medio de propulsión y el uso de un casco hidrodinámico.

A pesar de todo, el Nautilus nunca se usó en combate. En 1804, tras varias pruebas y sin resultados concluyentes, el gobierno francés retiró su apoyo económico. Fulton intentó entonces vender

su diseño a la Marina Británica, pero tampoco logró convencerlos. Finalmente, regresó a Estados Unidos, donde falleció en 1815 [12].

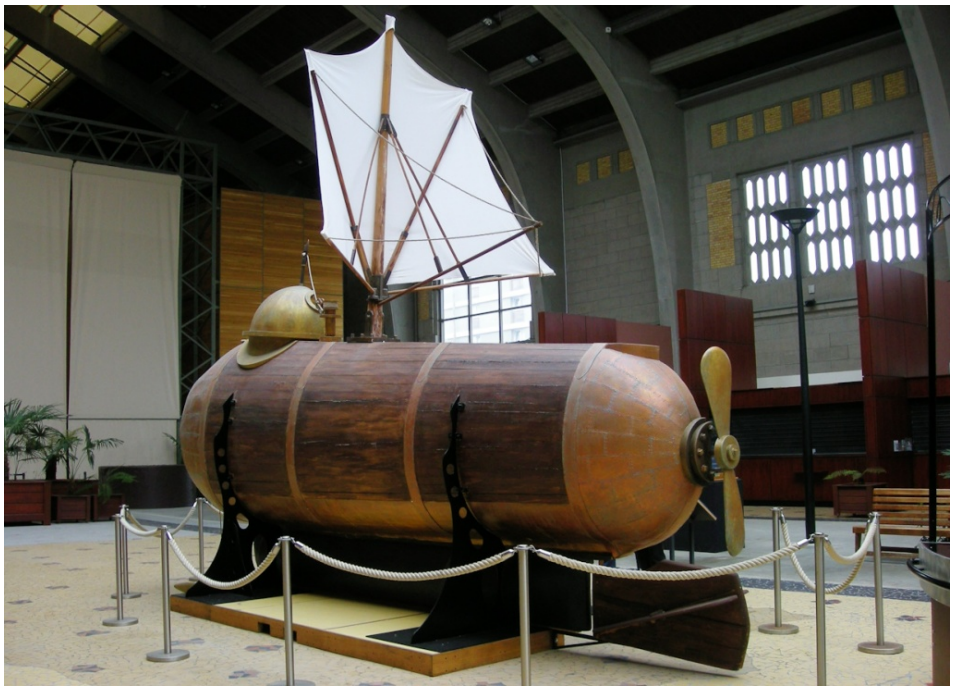


Figura 2-4: Submarino Nautilus [13].

El siguiente avance de gran relevancia en el ámbito de la construcción submarina vino de la mano del inventor español Narciso Monturiol. El cual, en 1859, presentó su primer proyecto, el Ictíneo I. Este no supuso un gran avance en materia de ingeniería submarina, pero gracias a él consiguió demostrar la capacidad de la navegación submarina, obteniendo así apoyo financiero para la fabricación de un modelo más avanzado.

Esta financiación permitió a Monturiol construir el ictíneo II en 1864. Este submarino de casco hidrodinámico, que supuso un gran avance gracias a la integración de un sistema de propulsión anaeróbico basado en reacciones químicas que producían vapor de agua para mover las hélices. Por razones económicas la empresa de Monturiol quebró decidiendo así desmantelar el submarino y abandonar el proyecto [14].

A finales del siglo XIX el aumento de interés en submarinos por parte de las armadas del mundo fue notable. Es por esto por lo que los submarinos sufrieron grandes avances en materia de profundidad, autonomía, capacidad de combate e hidrodinámica.

El primer submarino torpedero con una propulsión completamente eléctrica es, considerado por muchos expertos en la materia, el peral, véase la Figura 2-5: Replica submarino Peral [16]. Construido en 1887 y botado en la bahía de Cádiz el 8 de septiembre de 1888. El diseñador de este submarino es Isaac Peral, un teniente de navío de la armada española y profesor de física y matemáticas que demostró a sus superiores en unos estudios que había resuelto los problemas de la navegación submarina. gracias a este estudio, el Almirante Manuel de la Pezuela y lobo mostro interés y apoyo en su construcción. El submarino de peral destacaba por una propulsión completamente eléctrica, un casco hidrodinámico, la capacidad de maniobrar con precisión bajo el agua y la capacidad de lanzar torpedos en inmersión, algo revolucionario para la época [15].



Figura 2-5: Replica submarino Peral [16].

2.1.3 El nacimiento del submarino convencional en el siglo XX.

Durante el siglo XX los submarinos experimentaron un rápido avance tecnológico, sobre todo en lo militar. Avance debido principalmente al impulso de las dos guerras mundiales y la guerra fría, jugando un papel fundamental en todas ellas.

Esto produjo que los submarinos pasaran de ser pequeñas embarcaciones con capacidad militar limitada a grandes embarcaciones con capacidad estratégica y operativa ampliada con la introducción de la propulsión nuclear a mediados del siglo XX.

Durante la primera guerra mundial, los U-Boats alemanes representaron una gran amenaza por su capacidad de combate, estos podían atacar con torpedos autopropulsados y gracias a ello tenían la capacidad de realizar bloqueos navales y atacar convoyes enemigos. Como respuesta, nacieron los primeros esfuerzos en la guerra antisubmarina, principalmente mediante hidroaviones y minas para así reducir la capacidad submarina del enemigo.

La segunda guerra mundial supuso un punto de inflexión en el desarrollo y evolución de los submarinos, consolidándose como unidades clave estratégicas para la consolidación del poder naval en la guerra moderna. Durante esta, los submarinos alemanes U-Boats evolucionaron desarrollando grandes capacidades militares, como ataques coordinados submarinos (las manadas del atlántico), gran capacidad de operación en inmersión, propulsión Diesel-eléctrica, siendo cruciales en el desarrollo de la batalla del atlántico. Estos avances impulsaron el desarrollo de nuevos sistemas de detección, como el sonar. En respuesta a ello, los cascos de los submarinos se fueron modificando en busca de una forma hidrodinámica para reducir el ruido y minimizar el riesgo de detección. El máximo esplendor del arma submarina en la segunda guerra mundial fue con el submarino tipo XXI de la Kriegsmarine, véase la Figura 2-6: U-Boat XXI [18]. Estos avances sentaron las bases de diseño y construcción submarina durante la guerra fría [17].



Figura 2-6: U-Boat XXI [18].

Durante las primeras décadas de la guerra fría y basándose en los avances del submarino tipo XXI alemán. Tanto la Unión Soviética como Estados Unidos vieron el potencial de los submarinos como arma estratégica capaz de cambiar el desarrollo de la guerra. Fue Estados Unidos quien tomó la delantera creando el primer submarino de propulsión nuclear de la historia, el USS Nautilus. Este avance revolucionó la guerra submarina otorgando a los submarinos la capacidad de actuar en inmersión durante largos periodos de tiempo sin necesidad de emerger.

Junto con la introducción de la propulsión nuclear en los submarinos, la hidrodinámica submarina también experimento un cambio radical con el objetivo de reducir lo máximo posible los ruidos y así evitar ser detectado por los sonares de última generación enemigos. El primer gran avance se produjo en el submarino experimental USS Albacore, el cual, en el año 1953 propuso una forma de casco basada en una forma de lágrima, véase la Figura 2-7: USS Albacore [21]. El diseño del Albacore conseguía una gran eficacia hidrodinámica en inmersión a la vez que una reducción de la resistencia al avance. Esta forma se comenzó a usar en los submarinos de la US Navy tras la construcción de la clase Skipjack. Siendo el primer submarino de propulsión nuclear con la forma Albacore. Afianzando así las bases de diseño de los submarinos modernos y asentando el submarino como arma clave para la guerra naval [19] [20].

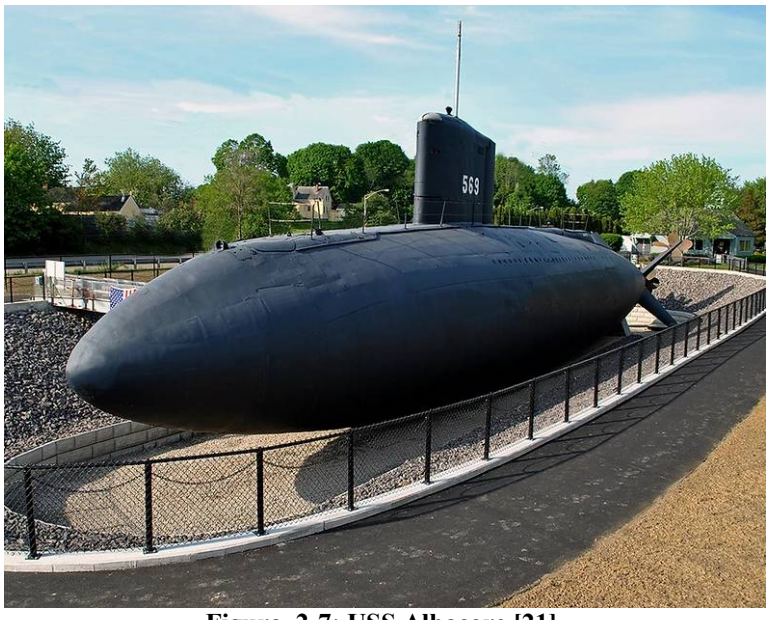


Figura 2-7: USS Albacore [21].

A medida que los submarinos avanzaban rumbo a mayores autonomías en inmersión y mayores capacidades, también nació la necesidad de desarrollar vehículos submarinos no tripulados con capacidad de control remoto, también conocidos como ROV, véase la Figura 2-8: ROV moderno [23]. Su desarrollo estuvo motivado por la necesidad de operar en entornos de alto riesgo sin poner en riesgo vidas humanas, siendo utilizados originalmente en misiones militares y de rescate submarino. El primer ROV de la historia fue desarrollado por la US Navy, la cual creó un vehículo de recuperación submarina en la década de los 60. Este suceso significó el comienzo de una nueva era en la exploración y operatividad submarina. Facilitó la exploración de entornos submarinos inaccesibles para el ser humano.

Con el tiempo, y basándose en la tecnología de los ROV, nacieron los AUV (Autonomous Underwater Vehicle), con capacidad de maniobra autónoma sin necesidad de la actuación de un operador para su funcionamiento, permitiendo realizar sus misiones de exploración y recolección de información de forma totalmente independiente [22].

El desarrollo de los AUV modernos está basado en los diseños de los submarinos actuales, optimizando su hidrodinámica para maximizar la eficiencia operativa. Su diseño toma como referencia la forma de lágrima, desarrollada por Estados Unidos en el USS Albacore, que reduce la resistencia al avance y mejora la maniobrabilidad en inmersión.

Además, los AUV se caracterizan por su diseño modular, lo que permite ensamblarlos a partir de múltiples secciones funcionales, facilitando su adaptación a diferentes misiones y entornos operativos [22].

El diseño de los AUV modernos, y la evolución sufrida desde el primer sumergible hasta los drones más modernos de la actualidad han servido como base para la creación de drones submarinos modulares, como el desarrollado en este TFG. La optimización hidrodinámica, la reducción de resistencia al avance y el modularidad son aspectos clave en este proyecto, permitiendo la adaptación a diferentes misiones en entornos submarinos complejos.

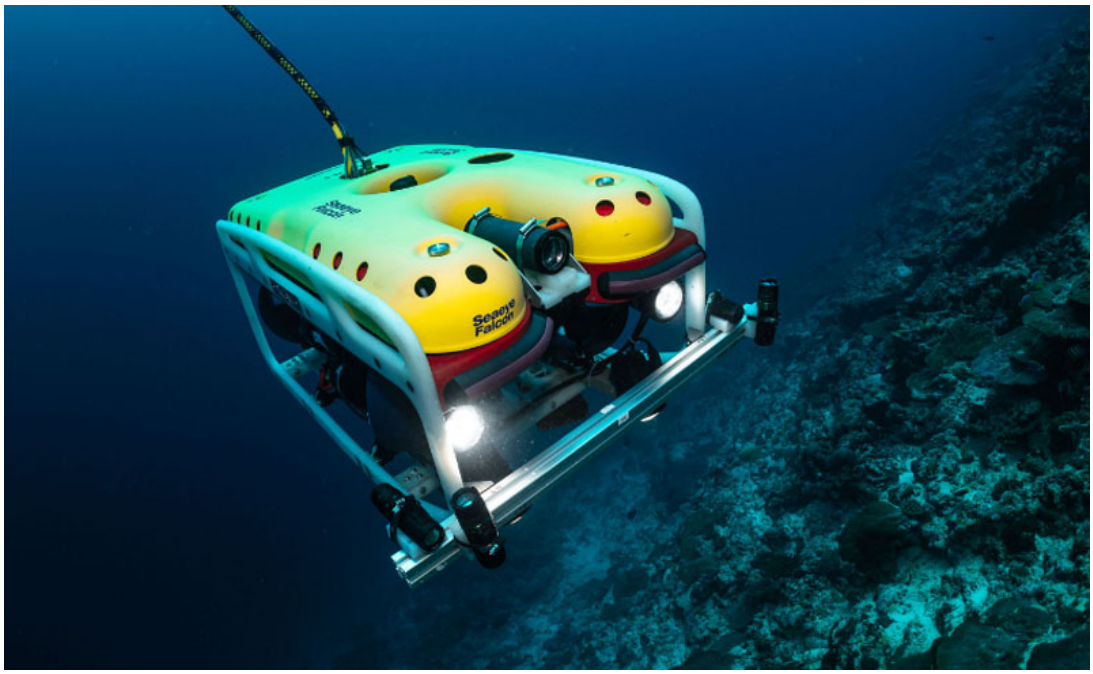


Figura 2-8: ROV moderno [23].

2.2 . El dron Submarino moderno.

2.2.1 Evolución desde la guerra fría hasta la actualidad.

Desde su creación durante la guerra fría, los ROV y posteriormente los AUV han sufrido una modernización sin precedentes debido a su uso e importancia en numerosos ámbitos de la sociedad en el entorno marítimo. A finales del siglo XX y a causa de sus avances tecnológicos los AUV comenzaron a tener un mayor peso sobre los ROV, incorporando sistemas de navegación submarina más modernos y capaces, ganando una mayor autonomía y fiabilidad que los primeros modelos.

A partir de la década de los 2000, los AUV comenzaron a ser utilizados en el ámbito científico, expandiendo su abanico de misiones a la exploración, la arqueología submarina y la seguridad marítima mediante la investigación de fondos marinos. En la actualidad los AUV han sufrido numerosas actualizaciones llegando a sofisticar por completo sus sistemas, véase la Figura 2-9: AUV de última generación (GAVIA 1000m) [24]. Usando sensores submarinos de última generación, sistemas de propulsión más modernos y eficientes e incluso incluyendo el uso de inteligencia artificial para optimizar la navegación, autonomía, recolección y análisis de datos e incluso un uso optimizado de la energía y la propulsión [22].

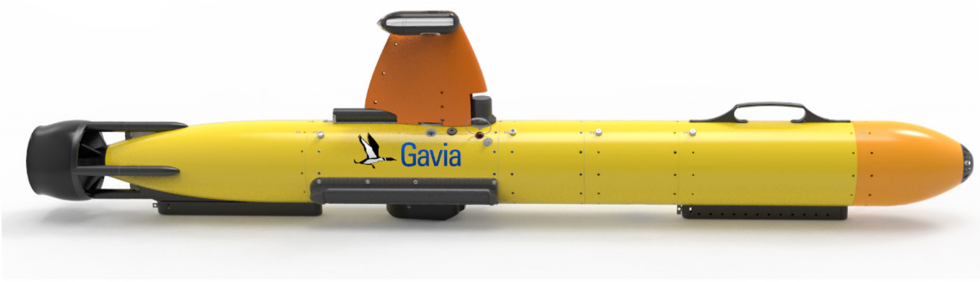


Figura 2-9: AUV de última generación (GAVIA 1000m) [24].

2.2.2 Utilidades de los drones submarinos en la actualidad.

En las últimas décadas, los drones submarinos han adquirido un papel fundamental en numerosos ámbitos, destacándose en aplicaciones científicas y militares a nivel global. Su capacidad de operación autónoma y recolección de datos en entornos extremos ha permitido avances significativos en la investigación científica submarina y en el desarrollo de estrategias de defensa naval en diversos países.

En el ámbito científico, los AUV han supuesto un antes y un después en la investigación submarina, suponiendo un punto de inflexión en esta. Gracias a sus tecnologías son capaces de desarrollar investigaciones sobre la topografía y batimetría de los fondos marinos, analizando como afecta el cambio climático en estos y en la dinámica oceánica.

También, mediante sensores de última generación de salinidad, temperatura y calidad del agua entre otros, se han conseguido realizar estudios de los ecosistemas submarinos y la contaminación de estos. Consiguiendo así entender mejor su funcionamiento para evitar su destrucción. Otro papel fundamental de los drones en el ámbito científico es la investigación de la arqueología submarina y la

inspección de infraestructuras subacuáticas a través de sensores avanzados y precisos sin necesidad de intervención humana [25].

En cuanto a las aplicaciones militares de los drones submarinos, estos han tomado un papel fundamental en ejecutar misiones de gran complejidad sin necesidad de intervención humana directa, alejándolos así de los peligros asociados a estas misiones.

La principal misión de estos es ISR (inteligencia, vigilancia y reconocimiento), son perfectos para estas misiones por su capacidad de desarrollar misiones de ISR de fuerzas enemigas o de áreas estratégicas sin ser detectados gracias a su discreción. Otra misión fundamental de los AUV en el marco militar es en materia de medidas contraminas, véase la Figura 2-10: Sparus II (Nuevo AUV de la armada española) [26]. Esto es así por la capacidad de acercarse a las minas y realizar un estudio profundo de estas sin necesidad de poner en riesgo una vida humana para ello. Los AUV también juegan un papel fundamental en la guerra antisubmarina, mediante la detección y seguimiento de submarinos enemigos en inmersión, permitiendo una mayor capacidad de enfrentamiento frente a estos por parte de unidades aliadas.

Los AUV son usados a su vez en puertos y arsenales para desarrollar misiones de ayuda al mantenimiento de la flota y las instalaciones. Gracias a estos se pueden realizar estudios exhaustivos del casco de las unidades de la flota o de los muelles donde estas atracan sin necesidad de usar mano de obra humana [22].



Figura 2-10: Sparus II (Nuevo AUV de la armada española) [26].

2.2.3 Clasificación de drones submarinos.

Los AUV pueden clasificarse en función de su tamaño y la misión que desarrollan. En función de estos dos parámetros se diseñará el dron de una manera u de otra para poder realizar todas las misiones esperadas de él. Véase la Figura 2-11: Clasificación drones según su tamaño [28].

Su clasificación en función de su tamaño los divide en 4 tipos de drones:

- **SUUV (Small UUV):** Aquellos drones de porte menor que pueden ser transportados por un hombre y tienen un diámetro inferior a 25 centímetros. A causa de su reducido tamaño la operatividad de estos se ve disminuida considerablemente perdiendo autonomía y capacidad de carga respecto al

resto de drones por su reducido volumen. En el ámbito militar son usados para misiones de reconocimiento por parte de fuerzas especiales.

- **MUUV (Medium UUV):** Son aquellos que tienen un diámetro comprendido entre 25 y 53 centímetros. El límite superior es crucial ya que 53 centímetros es el diámetro estándar de los torpedos pesados, lo equipados por la mayoría de los submarinos del mundo para así poder ser lanzados desde estos. Estos drones de tamaño medio tienen una gran importancia ya que a causa de su diámetro son capaces de ser usados desde cualquier submarino del mundo, independientemente de su tamaño, aportando grandes capacidades tácticas a estos.
- **LUUV (Large UUV):** Drones comprendidos entre diámetros de 53 y 213 centímetros. Estos drones no entran en tubos lanza torpedos para así poder ser desplegados. De forma que existen distintos medios y artilugios para ello.
- **XLUUV (Extra Large UUV):** estos son aquellos que pasan de los 213 centímetros de diámetro, tratándose de "Minisubmarinos". Debido a su gran tamaño estos solo podrían ser operados desde tierra o desde algún buque madre con capacidad de desplegarlos. Hay que destacar que gracias a su gran tamaño tienen una capacidad y autonomía muy superiores a los anteriores, llegando a incorporar plantas eléctricas completas en su interior para así gozar de una mayor autonomía [27].

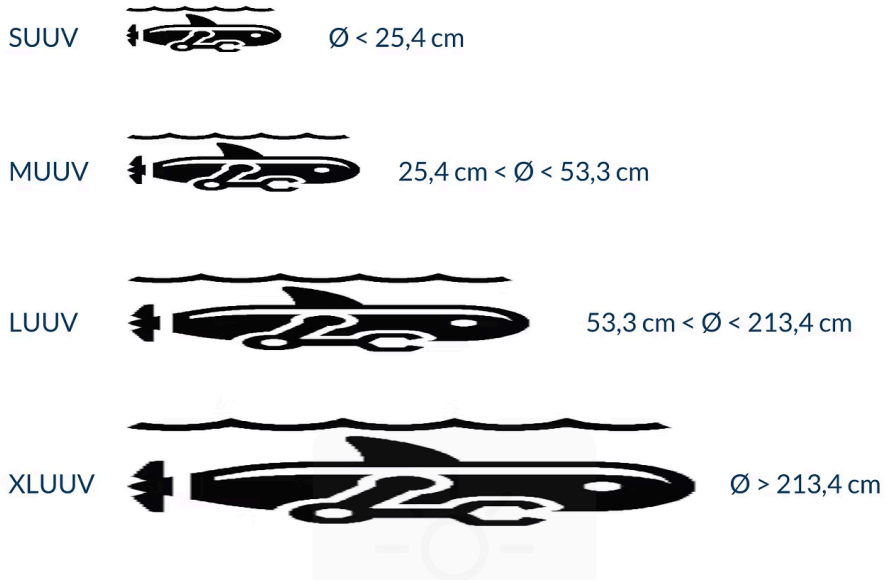


Figura 2-11: Clasificación drones según su tamaño [28].

2.3 Fundamentos para el diseño de drones submarinos.

2.3.1 Hidrodinámica en el diseño del MoAUV.

La hidrodinámica en los drones submarinos es un factor clave que influye directamente en su eficiencia operativa, maniobrabilidad y consumo energético. Un diseño hidrodinámico optimizado permite reducir la resistencia al avance, lo que se traduce en una mayor autonomía y menor consumo de energía. También es importante estudiar un conjunto de coeficientes y formas dentro de está para poder reducir exponencialmente la resistencia al avance de él dron.

El primer parámetro que reducir en la navegación gracias al estudio de la hidrodinámica es la reducción de la resistencia al avance, mantener la menor fuerza de arrastre en todo momento es crucial para el diseño de un dron eficiente en el ámbito de la hidrodinámica. Por ello se buscará tener los valores más bajos posibles en el área frontal del dron y el Cd [29].

Para ello en el diseño submarino existen unos coeficientes prismáticos y unas formas prestablecidas en las cuales la resistencia al avance es la menor posible en todo momento. Estos coeficientes son coeficientes adimensionales en los cuales se comparan las formas del dron para

conocer de esta forma si se cumple con los requisitos de hidrodinámico. Los principales a definir son los siguientes:

Coeficientes adimensionales del casco de un dron submarino		
Coeficiente Prismático Conjunto.	Cp	$Cp = \frac{Vol.Dron}{\frac{\pi * D^2}{4} * L}$
Factor de elongación del casco.	F	$F = \frac{L}{D}$
Coeficiente prismático proa.	Cpr	$Cpr = \frac{Vol.Proa}{\frac{\pi * D^2}{4} * Lpr}$
Coeficiente prismático popa.	Cpp	$Cpp = \frac{Vol.Popa}{\frac{\pi * D^2}{4} * Lpp}$
Factor de elongación proa.	a	$a = \frac{Lpr}{D}$
Factor de elongación popa.	b	$b = \frac{Lpp}{D}$
Coeficiente prismático cuerpo central	$Cpcent$	$Cp = \frac{Vol.central}{\frac{\pi * D^2}{4} * Lcent}$
Factor de elongación cuerpo central	$Acent$	$Acent = \frac{Lcent}{D}$

Tabla 2-1: Coeficientes adimensionales.

Donde:

- Vol = volumen
- D = diámetro
- L = Eslora
- Lpr = Eslora Proa
- Lpp = Eslora Popa

También es importante tener en cuenta la resistencia al avance en función de *F,* en el siguiente grafico se aprecia la relación entre *F* y la resistencia de presión y la fricción entre el casco y al agua, véase la Figura 2-12: Curva comparativa resistencia al avance con F [30]. El valor óptimo para está es 6 pero por motivos de construcción se suelen usar valores entre 7 y 9, siendo 9 el valor en que se consigue el tamaño máximo diámetro/eslora sin obtener valores de fricción muy altos.

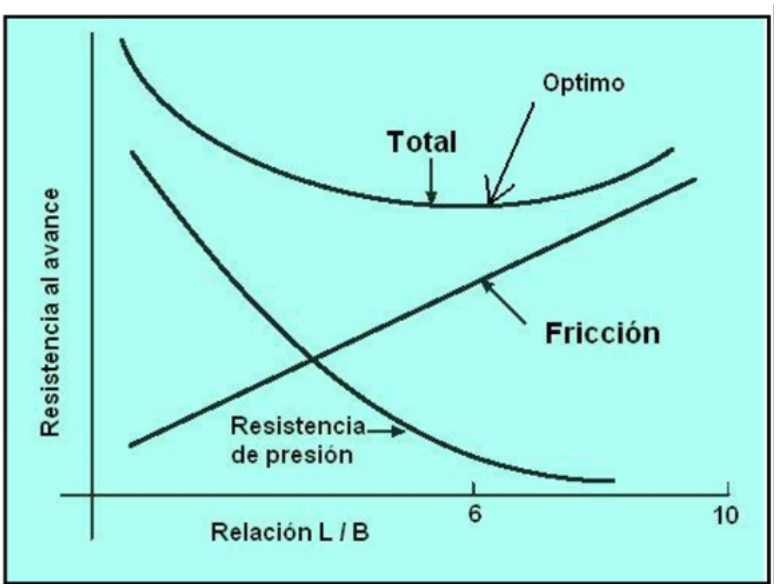


Figura 2-12: Curva comparativa resistencia al avance con F [30].

2.3.2 Tipos de cascos y materiales de construcción.

El diseño de un dron submarino destaca por su gran complejidad, en estos, debe integrarse de forma eficiente un conjunto de equipos y sistemas que trabajen simbióticamente entre sí para un correcto cumplimiento de la misión del dron. Uno de los componentes más relevantes en el diseño de un dron submarino es el casco hidrodinámico. Este ha de ser estudiado y diseñado de forma que posea un conjunto de características que supongan la menor resistencia al avance posible para el dron, maximizando así su eficiencia operativa. Las características que considerar en los cascos hidrodinámicos son el material en el que sea construido como un diseño hidrodinámico que suponga una menor resistencia al avance para el dron.

En cuanto a la forma que pueden tener los cascos de los drones submarinos son principalmente tres. Las formas principales son cilíndricas, forma Albacore o esféricos, está forma se eligiera en función de la misión que deba cumplir el dron, así como las características de este, como profundidad de trabajo o velocidad media.

Los cascos esféricos son aquellos que sirven para trabajos a grandes profundidades. Esto es así ya que gracias a su geometría reparte la fuerza ejercida por la hidrostática de manera más eficiente, permitiendo de esta forma el acceso a grandes profundidades. Como inconveniente hay que destacar que la integración de equipos y sistemas es más compleja debido a la forma del casco. Continuando con los cilíndricos, es el casco más habitual en la construcción submarina ya que este diseño proporciona un mejor rendimiento hidrodinámico en comparación con los cascos esféricos y facilita la integración de equipos en el interior del submarino. La última forma posible es la Albacore, basada en el USS Albacore, está forma destaca por estar basada en la forma de lagrima. Siendo la forma más optima posible a la hora de reducir la resistencia al avance mediante su forma hidrodinámica perfecta. Este tipo de casco es empleado en drones que requieran un alto rendimiento hidrodinámico en inmersión, a pesar de que el diseño y la disposición de los equipos en su interior presentan grandes desafíos técnicos [31].

La selección de materiales para el casco del dron submarino es un factor determinante en su rendimiento y durabilidad ya que tienen que poseer ciertas características indispensables. Gracias a una selección correcta de los materiales a usar se conseguirá la resistencia estructural y la eficiencia hidrodinámica deseadas. En función de las operaciones a desarrollar por el dron se suele discernir entre aceros de alta resistencia, aleaciones de titanio y materiales compuestos o polímeros reforzados.

En cuanto a los aceros de alta resistencia estos son usados a causa de si gran resistencia mecánica frente a esfuerzos de tracción soportando así grandes presiones hidrostáticas. Continuando con las aleaciones de titanio, estas son usadas en drones cuyos trabajos y operaciones son a grandes profundidades, necesitando una mayor resistencia mecánica que los aceros de alta resistencia. Estos

también destacan por su resistencia a la corrosión, fundamental para el ambiente marino, su peso ligero a causa de su menor densidad y al no ser magnético, de gran ayuda para drones submarinos militares. Por último, tenemos los materiales compuestos, como polímeros reforzados mediante fibra de vidrio o carbono. Estos materiales se usan con mayor predominancia en drones submarinos frente a los anteriores por su gran versatilidad y propiedades específicas. En la mayoría de los casos, los drones submarinos emplean fabricación aditiva para la producción de sus componentes, utilizando materiales como el ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato) debido a su resistencia estructural y compatibilidad con entornos subacuáticos. Los polímeros destacan por su capacidad de personalización mediante la fabricación aditiva de piezas del dron y al ser resistentes a la corrosión marina [32].

3 DESARROLLO DEL TFG

Para el desarrollo del trabajo se va a utilizar Autodesk inventor [33] para la creación de las piezas del dron y su posterior ensamblado. En este capítulo se va a desarrollar el proceso de diseño del casco del dron submarino desde su prototipo más primitivo hasta el casco final. También se va a estudiar las distintas opciones posibles, para cumplir con la modularidad del dron, de unión entre las secciones del dron de forma no permanente.

3.1 Datos de partida.

Previo a comenzar a diseñar el casco hidrodinámico del dron submarino es necesario entender las dimensiones y características del casco de presión que ira en el interior del dron y el cual tendrá los componentes más relevantes para la navegación y su correcto funcionamiento en su interior. Para ello sacaremos la información del TFG *Modelo paramétrico de calibración de un módulo de control de orientación en un AUV* [34] y también se realizarán mediciones sobre el propio casco de presión ya fabricado.

En este podemos obtener las dimensiones del casco de presión para así poder crear un casco hidrodinámico que tenga las dimensiones y características necesarias para poder albergar de forma correcta el casco proporcionado, véase la Figura 3-1: Casco de presión interno [34].

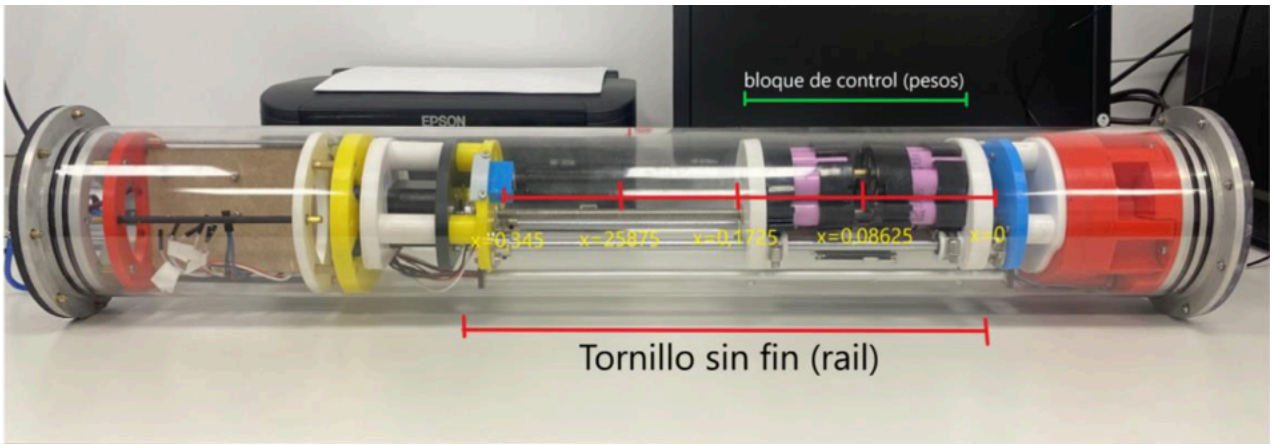


Figura 3-1: Casco de presión interno [34].

Este casco tiene que insertarse en el interior de nuestro dron submarino de manera que quede alojado en su interior, para ello se introducirá un material de relleno entre este casco de presión y el casco hidrodinámico diseñado a continuación. El objetivo del material de relleno a introducir entre

cascos tiene como principal objetivo evitar el movimiento independiente entre ambos para el correcto funcionamiento del conjunto. Las dimensiones del casco de presión salen reflejadas en la siguiente tabla:

Características casco de presión.	
Longitud	0,845 metros
Diámetro máximo	0,149 metros
Diámetro mínimo	0,12 metros
Peso	6,67 kg

Tabla 3-1:Parámetros casco de presión [34].

3.2 Diseño conceptual del dron.

A continuación, se explica cuál ha sido el proceso mediante el cual se ha llegado al diseño final del casco hidrodinámico del dron. Cumpliendo con todas las especificaciones impuestas previas al comienzo del diseño del dron y analizando la evolución sufrida por los componentes y los resultados finales de cada uno de ellos.

3.2.1 Hipótesis y especificaciones particulares.

Previo a diseñar el casco del dron se impusieron los requisitos y especificaciones que tenía que cumplir el diseño del casco. El principal requisito del dron, a parte de la hidrodinámica del casco, es que debía ser modular en su totalidad y que en su interior se albergaria un casco de presión. También se comentó la posibilidad de que este tuviese un sonar en su sección de proa y de que pudiese llevar o no un sistema de propulsión tradicional.

Especificaciones
Diámetro de 149mm como mínimo
Que albergue en su interior un casco de presión ya diseñado
Modularidad
Popa con capacidad de propulsión o no
Forma hidrodinámica
Velocidad máxima de 5 nudos

Tabla 3-2: Especificaciones del dron.

El diseño del dron está basado en las formas hidrodinámicas de los cascos de submarinos de última generación, véase la Figura 3-2: Forma ideal cascos submarinos [35]. Estos cascos están basados en los avances en materia de hidrodinámica, reduciendo lo máximo posible el impacto del casco del submarino como resistencia al avance. Para ello la forma más hidrodinámica demostrada es la forma de lágrima, está se caracteriza por ser una forma complicada de recrear y fabricar. Está forma de casco de submarino se le llama forma Albacore en honor al primer submarino en usarla en la historia, el USS Albacore. Para reducir complicaciones a la hora de diseñar y construir submarinos se decantó por formas aproximadas a la de lagrima. Buscando obtener los beneficios de la forma Albacore con un reducido coste de diseño y construcción. Para lograrlo la construcción naval de submarinos de la actualidad se basa en un cilindro con una proa con forma de elipsoide y una popa con forma de paraboloide.

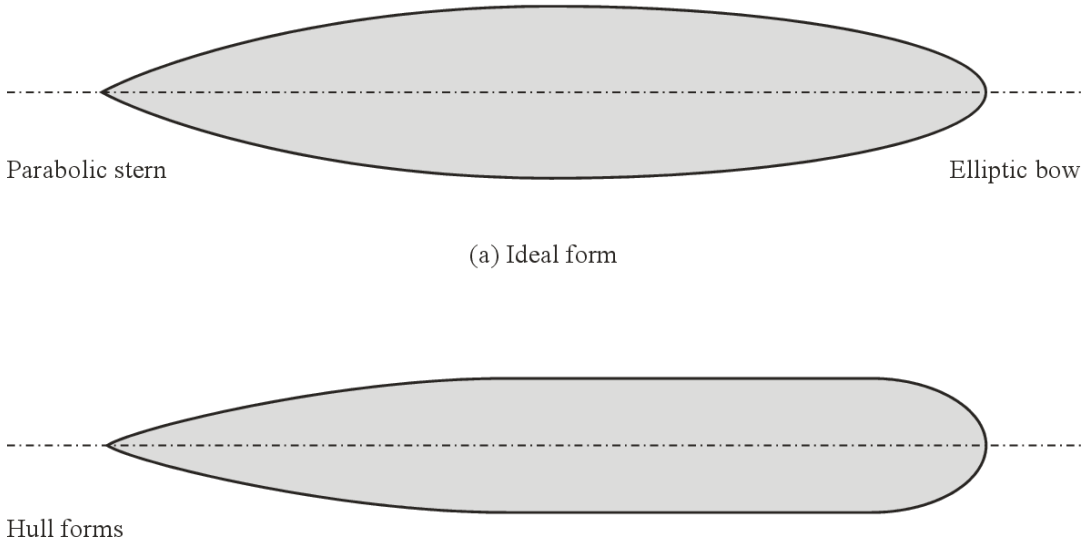


Figura 3-2: Forma ideal cascos submarinos [35].

Una vez analizadas las características básicas del casco del dron comencé diseñando un prototipo preliminar asemejando las formas al casco ideal simplificado. Usando como base los torpedos navales ya que estos poseen casi la misma forma de casco exterior a la deseada por el dron. Por motivos de comodidad a la hora de diseñar el dron decidí dividir este en 4 partes distintas:

Partes del dron
Sección de proa
Sección intermedia
Sección de popa
Mecanismo de unión

Tabla 3-3:Partes del dron.

Centrándose al comienzo del diseño principalmente en el diseño hidrodinámico del casco para así centrarse en al final del diseño en los posibles métodos de unión de las partes del dron.

Este casco tiene que insertarse en el interior de nuestro dron submarino de manera que quede alojado en su interior, para ello se introducirá un material de relleno entre este casco de presión y el casco hidrodinámico diseñado a continuación. El objetivo del material de relleno a introducir entre cascos tiene como principal objetivo evitar el movimiento independiente entre ambos para el correcto funcionamiento del conjunto. Las dimensiones del casco de presión salen reflejadas en la siguiente tabla:

Características casco de presión.	
Longitud	0,845 metros
Diámetro máximo	0,149 metros
Diámetro mínimo	0,12 metros
Peso	6,67 kg

Tabla 3-4:Parámetros casco de presión [34].

3.2.2 Diseño preliminar del casco hidrodinámico.

Para comenzar con el diseño genérico del casco del dron use como base el ejemplo de un torpedo como artefacto que tiene un casco parecido al necesario para mi dron. También se solicitó que existiese un espacio entre el casco hidrodinámico a diseñar y el casco de presión ya proporcionado por el CUD

para poder introducir un material de relleno entre ambos y así evitar el movimiento libre de uno dentro del otro. De esta forma se desarrolló un casco preliminar caracterizado por tener una proa basada en forma de elipse, un cuerpo central cilíndrico y una popa cónica con aletas de sustentación hechas a "mano alzada" para así tener una idea básica sobre la que trabajar y realizar el diseño en detalle de cada una de estas piezas. En cuanto al mecanismo de unión no se ha tenido en cuenta hasta tener el diseño hidrodinámico del casco concluido. A continuación, se muestran las distintas partes del dron:

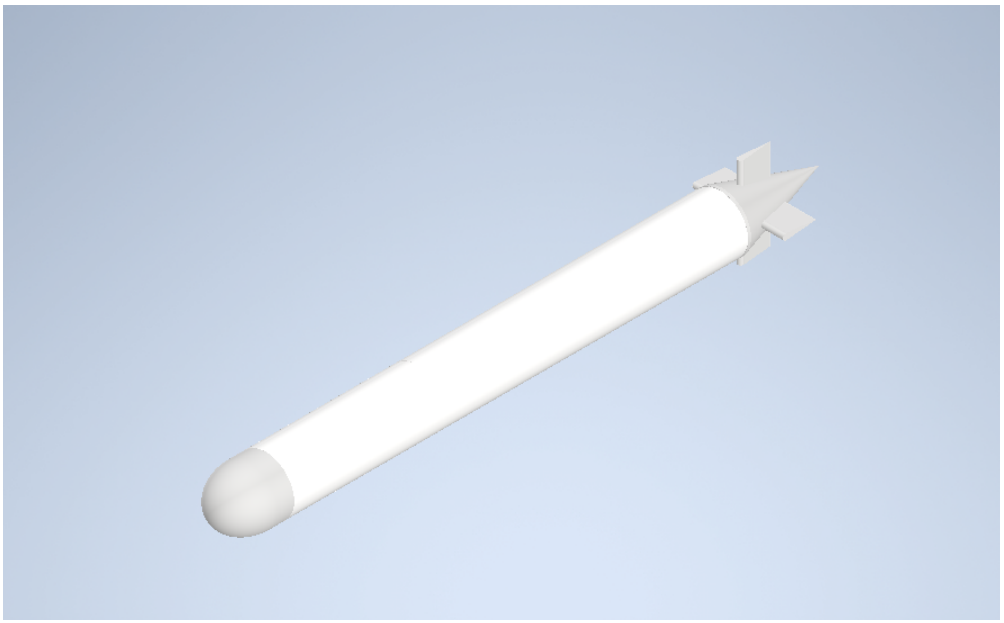


Figura 3-3: Casco primitivo MoAUV [autoría propia].

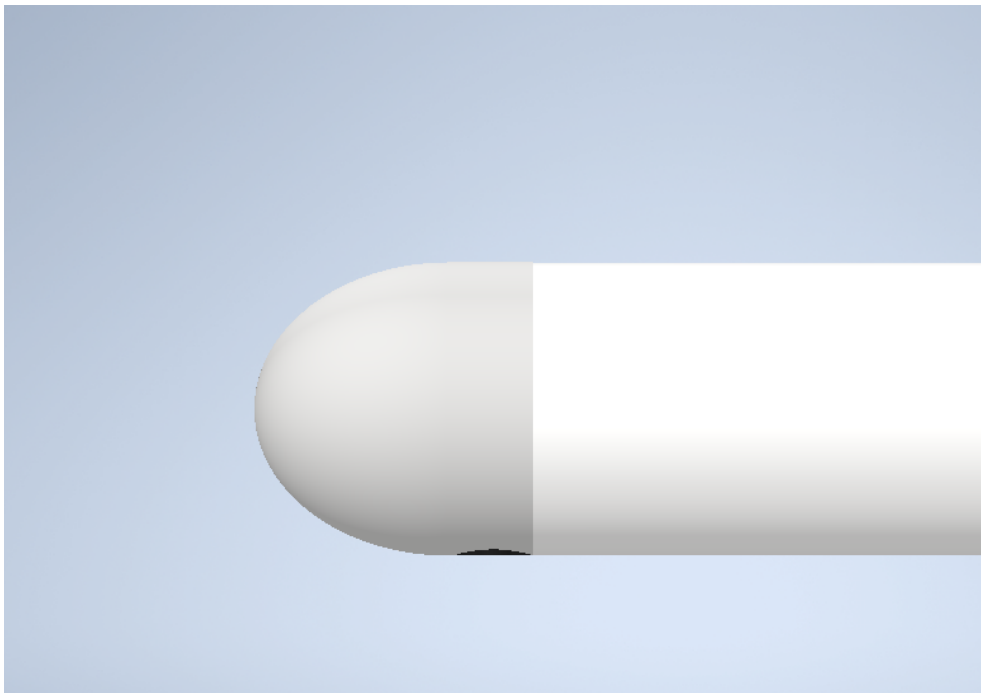


Figura 3-4: Sección de proa primitiva [autoría propia].

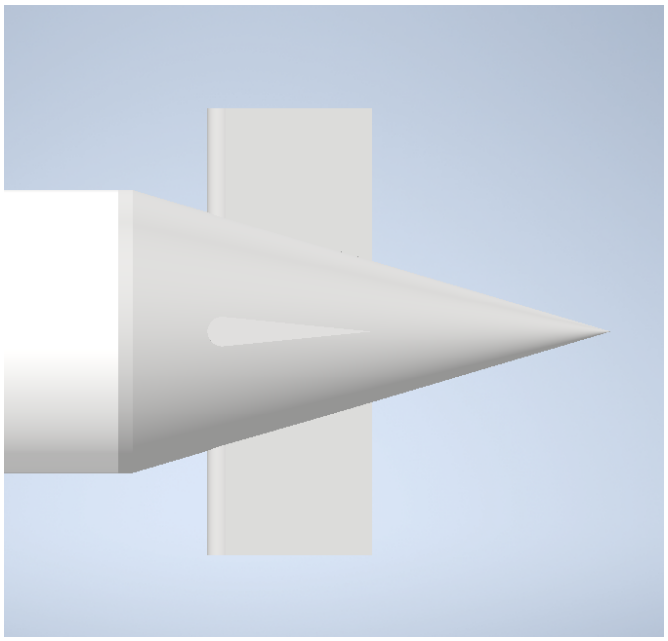


Figura 3-5: Sección de popa primitiva [autoría propia].

En este diseño preliminar se escogió un diámetro de 190 milímetros, la posibilidad de tener dos cuerpos centrales de longitudes 0,5 y 1 metro correspondientemente en función de las necesidades de eslora del dron por el casco de presión y las secciones de proa y de popa no fueron diseñadas teniendo en cuenta factores de hidrodinámica. En el caso de la proa se trata de una elipse revolucionada y la popa consiste en un cono con aletas de sustentación creadas sin tener en cuenta los perfiles NACA. Este primer diseño sirvió para sentar las bases de forma deseadas a la hora de fabricar el dron final y a su vez para comenzar con los cálculos dimensionales del dron para restringir así su tamaño y forma.

Lo primero fue definir el diámetro y posteriormente la eslora máxima del dron para así poder céntrame en cada una de las secciones y desarrollarlas basándome en la hidrodinámica y los estudios realizados en la materia para poder definir mis formas deseadas. Para comenzar con los diseños y formas de cada una de las partes del dron decidí escoger un diámetro de 200 milímetros con 5 milímetros de grosor. Con este diámetro y un valor de F=9, mediante este diámetro y el coeficiente adimensional F podemos calcular la eslora máxima del dron a través de la formula:

$$F = \frac{L}{D}$$

Formula proveniente de: Tabla 2-1: Coeficientes adimensionales.

Esto da una eslora máxima del dron de 1,8 metros a repartir entre las tres distintas secciones del dron. A causa de las medidas del casco de presión, 0,85 metros son para la sección central para así poder alojar el casco de presión en su interior. A la hora de definir las formas de las secciones de proa y de popa del casco me base en el artículo de revista "*Conceps in submarine shape design"*[36].

En este estudio, véase la Figura 3-6: Posibles cascos submarinos sección 2D [36]. podemos ver la comparativa entre distintos tipos de formas de cascos submarinos y la variación de resistencia al avance que suponen las distintas formas en un submarino de las mismas características.

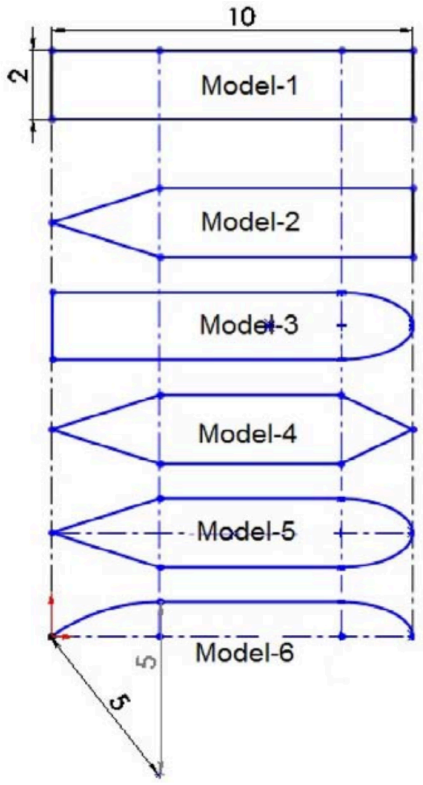


Figura 3-6: Posibles cascos submarinos sección 2D [36].

El primer prototipo está basado en el modelo 5 de la figura anterior. A la hora de decidir si optar por esta forma o una nueva me base en los estudios realizados en esta misma revista sobre las variaciones de resistencia al avance decantándome por el diseño de un nuevo dron con la forma 6, como se muestra en la Figura 3-7: Comparativa de evolución de Cd en función de la forma del casco [36].

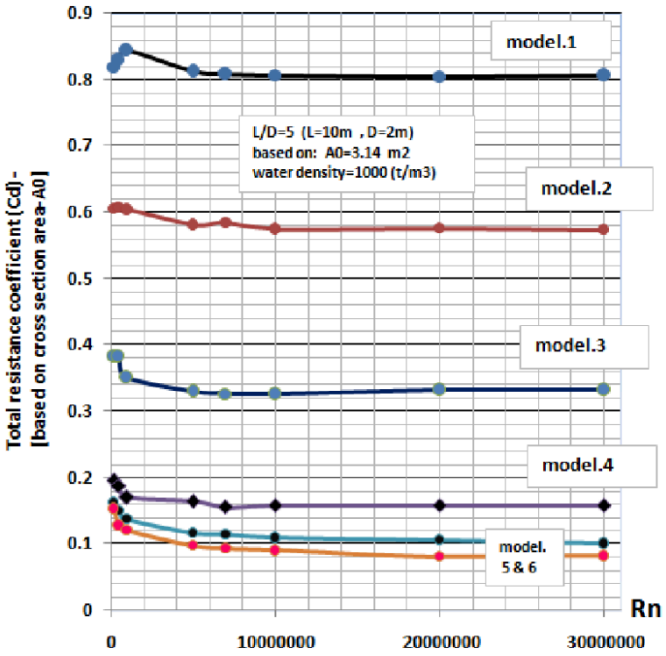


Figura 3-7: Comparativa de evolución de Cd en función de la forma del casco [36].

A continuación, desarrollare en detalle el diseño de cada una de las partes del casco del dron buscando cumplir los objetivos preestablecidos de dimensiones e hidrodinámica.

3.2.3 Diseño en detalle de la sección de popa.

Una vez seleccionados los perfiles deseados para el casco del submarino, basándome en la forma seleccionada en el apartado anterior se cambió de una forma cónica a un paraboloide.

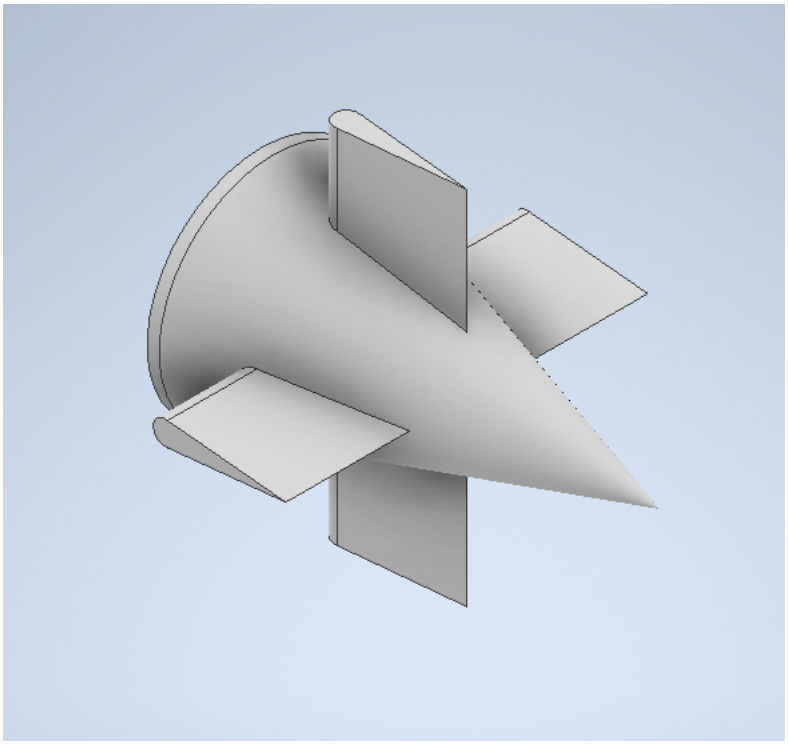


Figura 3-8: Popa primitiva [autoría propia].

Usando como referencia central para desarrollar el casco del dron el TFG "DISEÑO Y ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE UN SUBMARINO AUTÓNOMO NO TRIPULADO: AUV" [30] diseñe las secciones del submarino de forma que estas fuesen hidrodinámicas según las bases de diseño naval modernos. En cuanto a la popa es importante destacar los coeficientes adimensionales de esta para así poder diseñarla correctamente:

Coeficientes sección de popa.

Coeficiente prismático popa	$Cpp = \frac{Vol.Popa}{\frac{\pi * D^2}{4} * Lpp}$
Factor de elongación de popa	$b = \frac{Lpp}{D}$

Tabla 3-5:Coeficientes adimensionales sección de popa.

Además, en base a las características de maniobra y velocidad punta del dron se selecciona un valor de b=2,6 basado en los estudios realizados en el TFG "DISEÑO Y ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE UN SUBMARINO AUTÓNOMO NO TRIPULADO: AUV" [30].

Con este valor de b y un diámetro de 20 centímetros nos da una longitud de popa de 52 centímetros. A continuación, tenemos que seleccionar la ecuación matemática que mejor defina la forma de nuestra popa para así poder introducirla en inventor. En TFG anteriormente nombrado existe la posibilidad de realizar la popa basándose en dos ecuaciones distintas, de estas selecciono la primera

basándome en el criterio de una superficie mojada mínima para así obtener la menor resistencia al avance posible en está. Siendo la formula usada la siguiente:

$$f(x) = \frac{D}{2} * (1 - \left(\frac{x}{Lpp}\right)^{nexp}) \text{ [30]}$$

Una vez seleccionada la ecuación que define la popa del dron se introduce en Auotdesk inventor en la opción de curva parametrizada para que tenga la forma deseada.

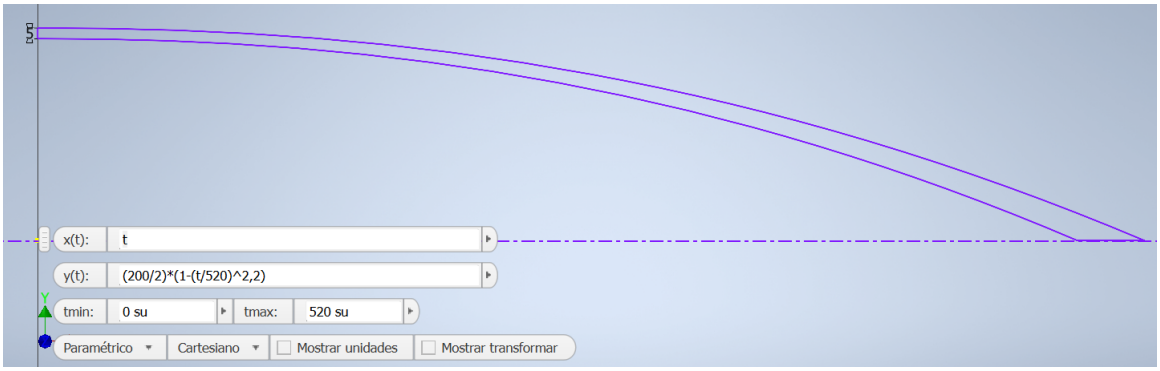


Figura 3-9: Curva Hidrodinámica de la sección de popa [autoría propia].

Una vez introducida la curva y revolucionada me centre en las aletas de sustentación que se encuentran en la popa usando para ello los perfiles estandarizados NACA. Debido a la simetría del casco decidí usar unos perfiles NACA 0015 por ser hidrodinámicos, estandarizados y a su vez simétricos. Para generar la forma deseada use la página web "airfoil tools" [37]. Una vez generada la forma la moví a un Excel para posteriormente introducirlo en inventor. Para que esta nube de puntos generada por la página web quedase en la posición deseada, a 10 centímetros del comienzo de la sección de proa tuve que añadir 10 centímetros a la posición en el eje X de todos estos puntos.

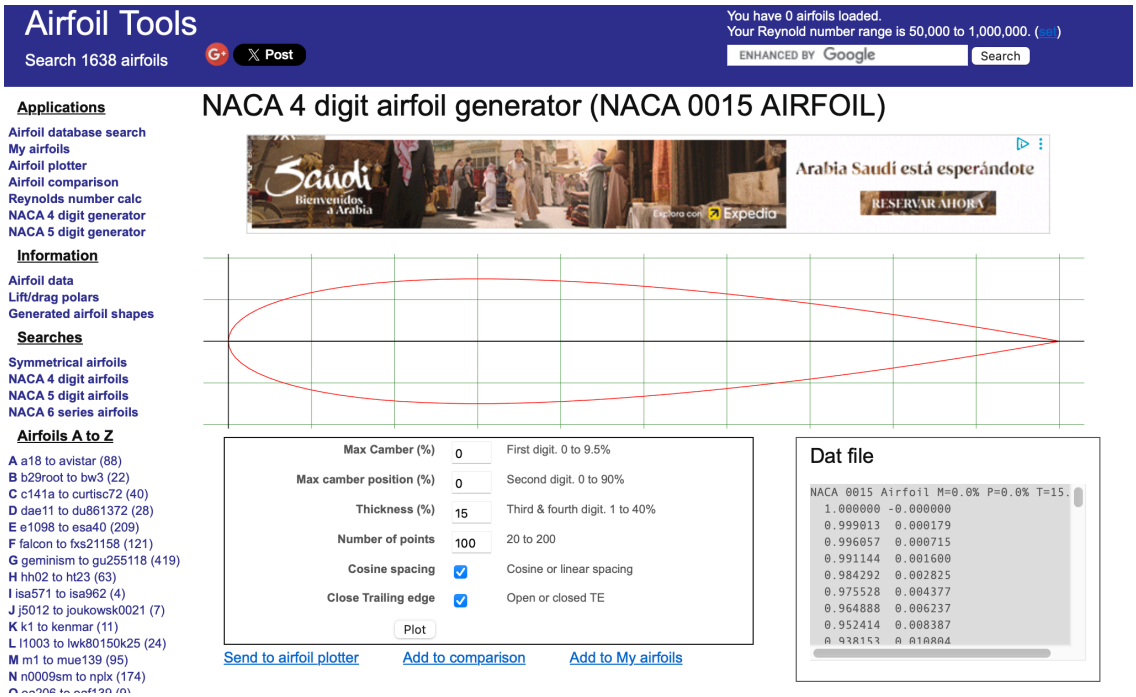


Figura 3-10: Pagina Web generadora perfiles NACA [37].

Una vez definidos los perfiles NACA de las aletas de sustentación y la curva que define la forma de está ya se pudo revolucionar la pieza para crearla. Hay que destacar que, para el diseño de todas las piezas del dron a excepción de alguna parte del mecanismo de unión, que veremos más adelante, están pensadas para ser fabricadas mediante fabricación aditiva seleccionando como material plástico ABS. Una vez resueltas todas las consideraciones tenidas en cuenta en el diseño de la popa de dron nos da como resultado la siguiente popa:

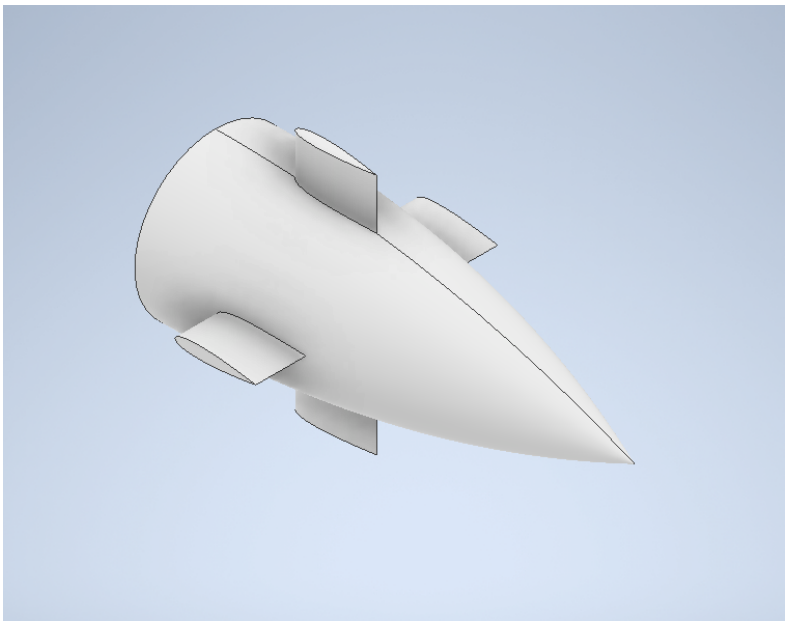


Figura 3-11: Popa Hidrodinámica con perfiles NACA final [autoría propia].

Está popa diseñada tiene las siguientes características, las cuales cumplen con los requisitos de diseño e hidrodinámica necesarios para el dron submarino:

Parámetros característicos de la popa.

Coeficiente prismático popa	$Cpp \approx 0{,}56$
Factor de elongación de popa	$b = 2{,}6$
Longitud de popa	$Lpp = 52\ cm$
Masa sección de popa	$m = \ 2{,}1\ Kg$
Volumen desplazado	$V \approx 0{,}00915\ m^3$

Tabla 3-6: Parámetros popa.

Podemos apreciar que la popa diseñada es óptima para el casco del dron submarino gracias al coeficiente prismático de popa de 0,56. Este valor está comprendido entre 0,53-0,65 siendo estos los valores recomendados para el diseño de una popa [30], finalizando de esta forma el diseño de la popa del dron submarino.

3.2.4 Dimensionamiento de la sección de proa.

Continuando con el diseño de la proa, también era necesario realizar cambios para que esté cumpliese con los estándares de hidrodinámica buscados en el diseño del dron submarino, es por ello por lo que he basado el diseño de la proa en los resultados demostrados en la Figura 3-7: Comparativa de evolución de Cd en función de la forma del casco [36] usando como proa un elipsoide para así reducir la resistencia al avance del dron lo máximo posible.

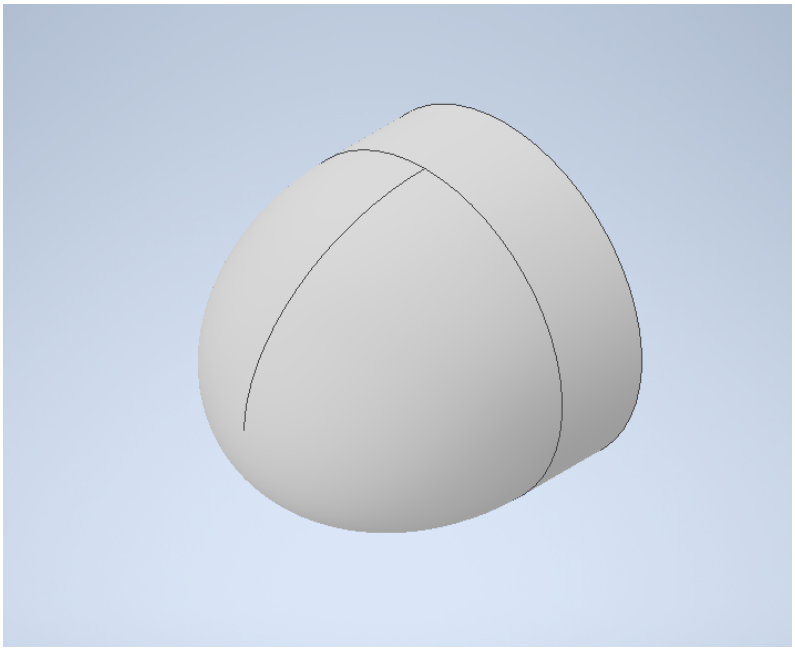


Figura 3-12: Proa primitiva [autoría propia].

También es importante destacar el cálculo de los coeficientes adimensionales de la proa al igual que se ha hecho con la popa para así poder decidir mediante estos si el diseño es lo suficientemente hidrodinámico como para cumplir con los requisitos establecidos previamente.

Coeficientes sección de proa.

Coeficiente prismático proa	$Cpr = \frac{Vol.Proa}{\frac{\pi * D^2}{4} * Lpr}$
Factor de elongación de proa	$a = \frac{Lpr}{D}$

Tabla 3-7: coeficientes adimensionales proa.

Una vez decidido realizar una proa con forma de elipsoide se seleccionó la siguiente ecuación para definirla del TFG "DISEÑO Y ESTUDIO HIDRODINÁMICO DE UN SUBMARINO AUTÓNOMO NO TRIPULADO: AUV" [30]. En este se disponen dos ecuaciones para el diseño de la proa, he decidido crear la proa mediante el algoritmo más sencillo entre ambos por la ligera sección mojada que existe entre ambos y por la sencillez de introducir está en inventor. La fórmula que define la proa del dron es la siguiente:

$$f(x) = \frac{D}{2} * \left(1 - \left(\frac{x}{Lpr}\right)^m\right)^{\frac{1}{m}} \text{ [28]}$$

Donde el diámetro sigue siendo 20 centímetros, la longitud de la proa es la diferencia entre la eslora máxima del dron y las secciones de popa e intermedia, dando una eslora de *Lpr* = 43 centímetros. Una vez seleccionados el valor de *Lpr* y el diámetro hay que seleccionar un valor para m. Este valor es el responsable de la forma de la curva, de forma que cuanto más afilada sea la proa en su extremo mejor cortará el agua al avanzar el dron,

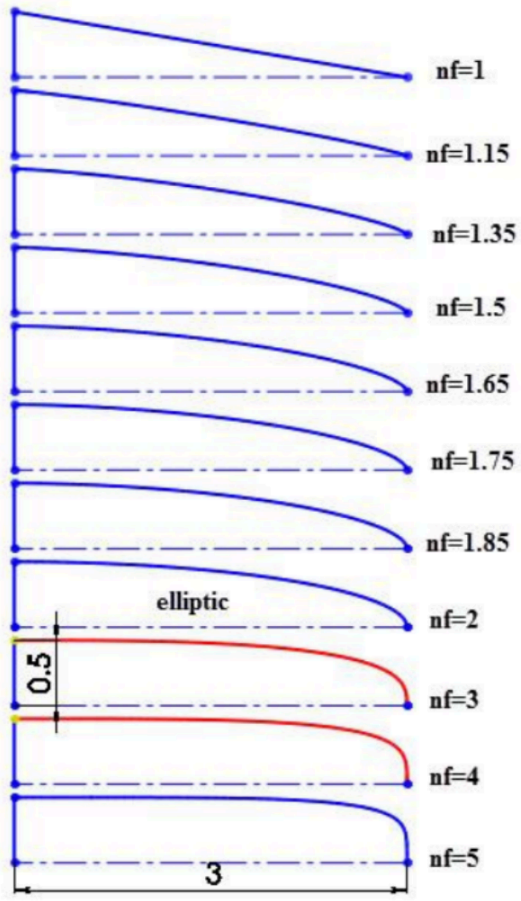


Figura 3-13: Comparación proas elipsoidales en función del valor m [38].

tampoco es muy indicado que está sea muy afilada ya que se perderían los beneficios hidrodinámicos de usar una proa elíptica. De forma que basándome en la revista científica " Journal of Scientific and Engineering Research, 2016, 3(1):1-16" [38] use un valor de m = 2 para la proa del submarino.

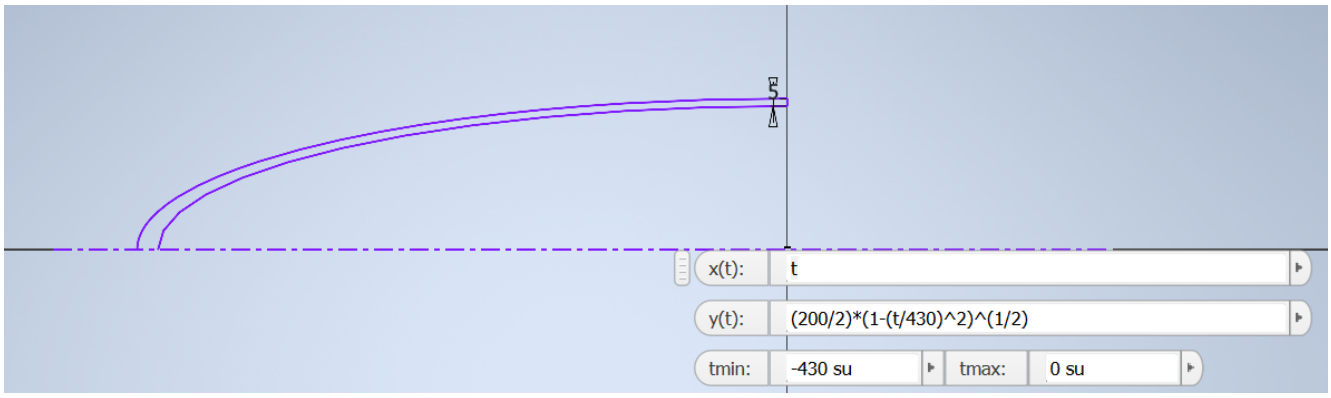


Figura 3-14: Curva hidrodinámica de la sección de proa [Autoría propia].

Una vez introducida la curva característica de la proa hidrodinámica del dron, se revoluciona sobre el eje X en Autodesk Inventor para crear el sólido.

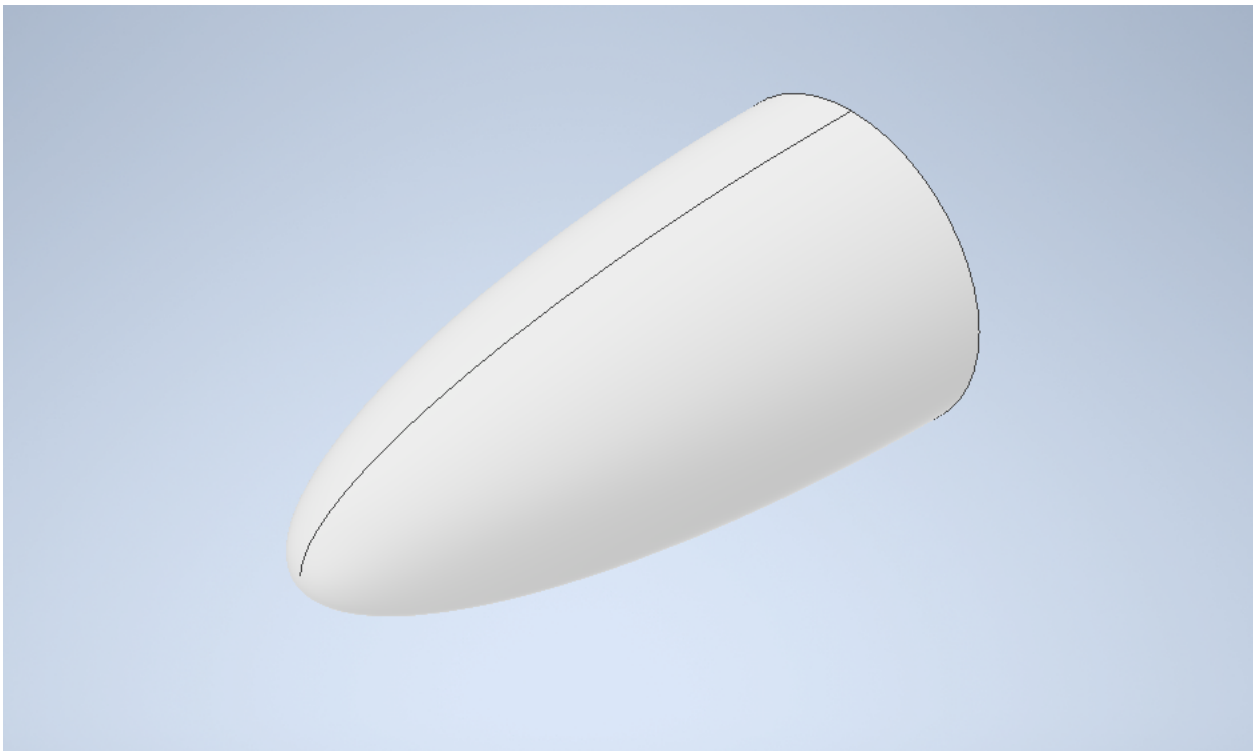


Figura 3-15: Proa hidrodinámica [autoría propia].

Al tener ya la proa diseñada y creada podemos calcular las características de está para comprobar si cumple con los requisitos de diseño para su uso.

Parámetros característicos de la proa.

Coeficiente prismático proa	$Cpr \approx 0{,}667$
Factor de elongación de proa	$a = 2{,}15$
Longitud de proa	$Lpr = 43\ cm$
Masa sección de proa	$m = 1{,}239\ Kg$
Volumen desplazado	$V \approx 0{,}0090\ m^3$

Tabla 3-8: Parámetros proa.

El factor de elongación de $a = 2{,}15$ está comprendido entre 2 y 2,5 que son los valores óptimos para drones submarinos de investigación cumpliendo de esta forma con los parámetros del factor de elongación. Continuando con el coeficiente prismático de 0,667. Este es ligeramente superior al recomendado, estando estos comprendidos entre 0,6 y 0,65. Pero al esperarse una velocidad de operación del dron de entorno a unos 5 nudos máximo no se espera que este valor del coeficiente prismático afecte de manera considerable a la hidrodinámica del casco [39].

3.2.5 Dimensionamiento de la sección central.

Una vez diseñados la proa y la popa es necesario diseñar el cuerpo intermedio que una estas dos y que albergue en su interior el casco de presión diseñado por el CUD.

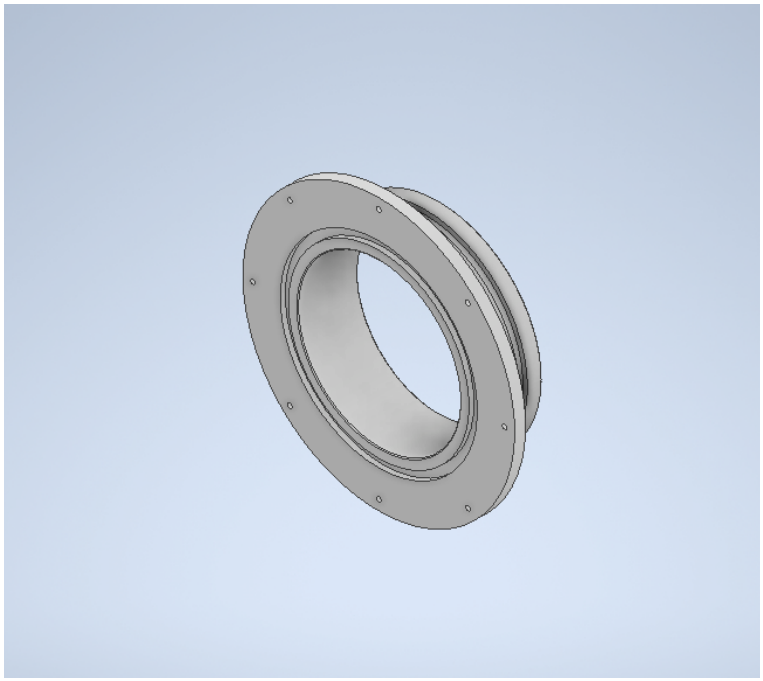


Figura 3-16: Sello interior casco de presión [40].

Para ello he diseñado un cilindro de 20 centímetros de diámetro y 85 centímetros de longitud para poder introducir en su interior el casco de presión que tiene unas dimensiones de 14,9 centímetros, véase la de diámetro y una longitud aproximada de 83 centímetros, véase la Figura 3-1: Casco de presión interno [34].

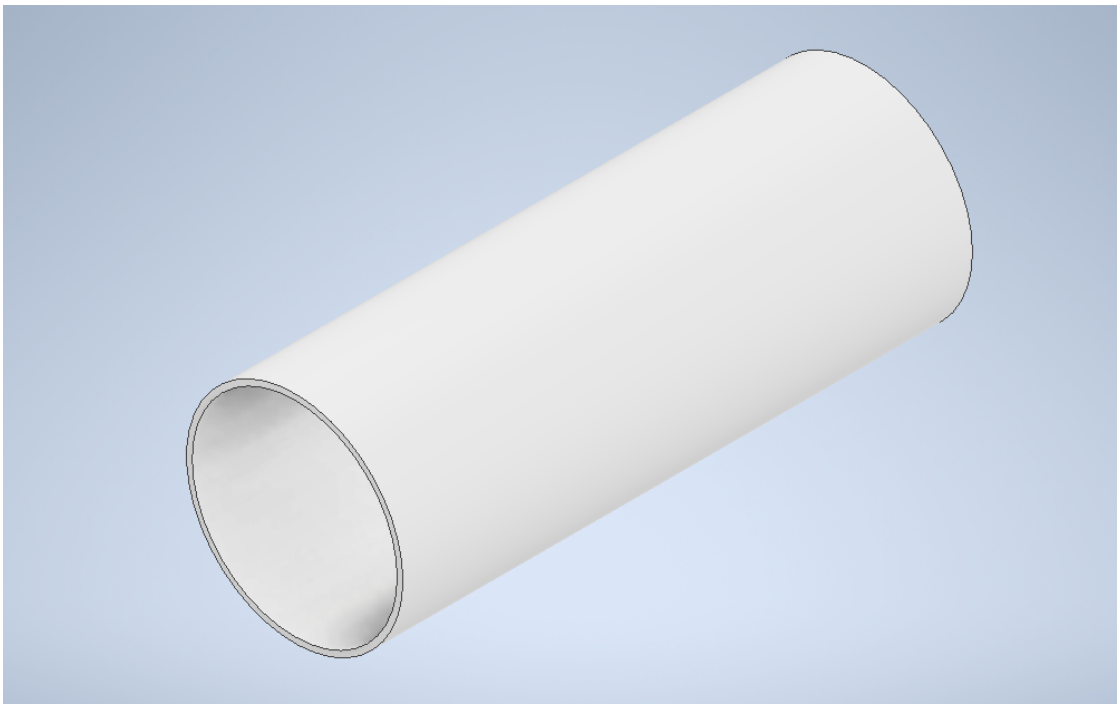


Figura 3-17: sección central primitiva [autoría propia].

En el primer diseño del cuerpo central se optó por un cilindro de 15 centímetros de diámetro y dos medidas posibles, medio o un metro de longitud. Pero a causa del coeficiente de elongación F=9 seleccionado no se pudo hacer de esta manera ya que había que fijar las esloras de cada una de las secciones del dron. A su vez se aumentó el diámetro a 20 centímetros por la restricción establecida que debía existir una distancia entre el casco de presión y el casco hidrodinámico donde meter material de relleno para que así el casco de presión quedase en el centro del dron.

Una vez seleccionadas las medidas del cuerpo central del dron es necesario calcular sus parámetros característicos para así poder realizar los cálculos conjuntos de él dron final. Al igual que las secciones anteriores los parámetros a definir son los siguientes:

Coeficientes sección central.

Coeficiente prismático sección central	$Ccentral = \frac{Vol.central}{\frac{\pi * D^2}{4} * Lcentral}$
Factor de elongación sección central	$Acent = \frac{Lcentral}{D}$

Tabla 3-9: Coeficientes sección central.

Tras todas las consideraciones tenidas en cuenta para el diseño del dron nos da como resultado el siguiente cuerpo central del dron.

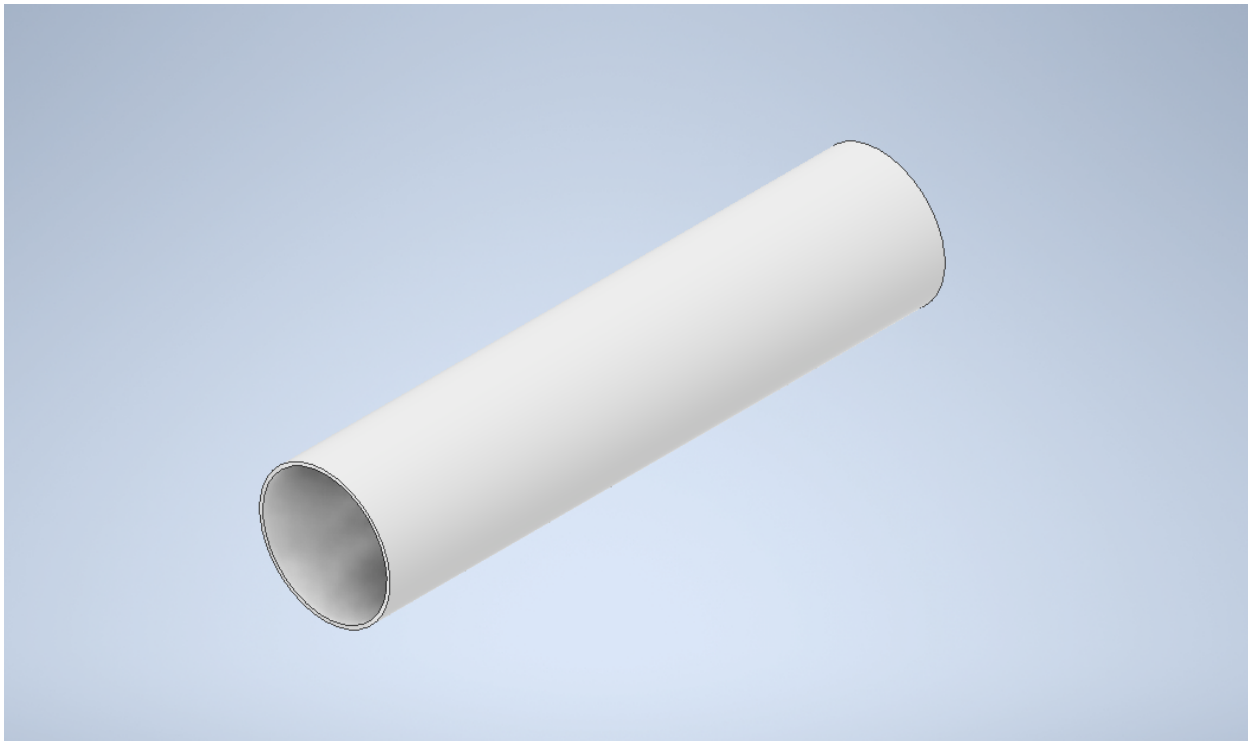


Figura 3-18: Cuerpo central definitivo [autoría propia].

A continuación, pasamos a calcular los parámetros del cuerpo central para comprobar si cumple con los requisitos hidrodinámicos esperados del dron.

Parámetros característicos cuerpo central.

Coeficiente prismático cuerpo central	$Cpcent \approx 1$
Factor de elongación cuerpo central	$Acent = 4{,}25$
Longitud cuerpo central	$Lcent = 85\ cm$
Masa cuerpo central	$m = 3{,}355\ Kg$
Volumen desplazado	$V \approx 0{,}0267\ m^3$

Tabla 3-10: Parámetros cuerpo central.

Ahora pasaremos a analizar los datos de la sección de proa para comprobar si son óptimos para el diseño hidrodinámico del dron submarino. Para ello me he basado en los coeficientes expuestos en la revista Burcher, R., & Rydill, L. J. (1998). Concepts in Submarine Design. Cambridge University Press [41]. En donde dice que el coeficiente prismático del cuerpo central es de 1, propio de un cilindro perfecto. También recomienda que el valor del factor de elongación del cuerpo central este comprendido entre 3,5 y 5 para conseguir mayor flotabilidad y estabilidad en el dron, de forma que con 4,25 se consigue cumplir también con este valor.

3.2.6 Parámetros finales Casco hidrodinámico.

Una vez diseñados todas las secciones del casco submarino podemos unirlas para analizar si el conjunto cumple con las especificaciones hidrodinámicas necesarias para el dron submarino. Para calcular sus parámetros característicos sin necesidad de crear el mecanismo de unión se han unido como un ensamblaje solido en inventor para comprobar mediante análisis hidrodinámico en CFD su comportamiento hidrodinámico y para poder calcular sus coeficientes adimensionales y de esta forma poder corregir de última hora los parámetros necesarios del dron submarino.

Parámetros característicos dron submarino.

Coeficiente prismático	$Cp \approx 0{,}793$
Factor de elongación	$F = 9$
Longitud total	$Ltot = 180\ cm$
Masa total	$mtot = 6{,}694\ Kg$
Diámetro máximo	$\emptyset máx = 20\ cm$
Volumen desplazado total	$Vtot \approx 0{,}0449\ m^3$

Tabla 3-11: Parámetros característicos dron completo.

Podemos apreciar que el valor del coeficiente prismático es acorde con el de un casco hidrodinámicamente optimizado estando sus valores entre $0.65 \leq Cp \leq 0.80$ [41]. Al comprobar esto podemos comprobar que cumple con los requisitos establecidos previos al diseño del casco del dron.

A continuación, podremos calcular la resistencia al avance y realizar los análisis hidrodinámicos deseados sobre el casco del dron a la velocidad máxima de operación.

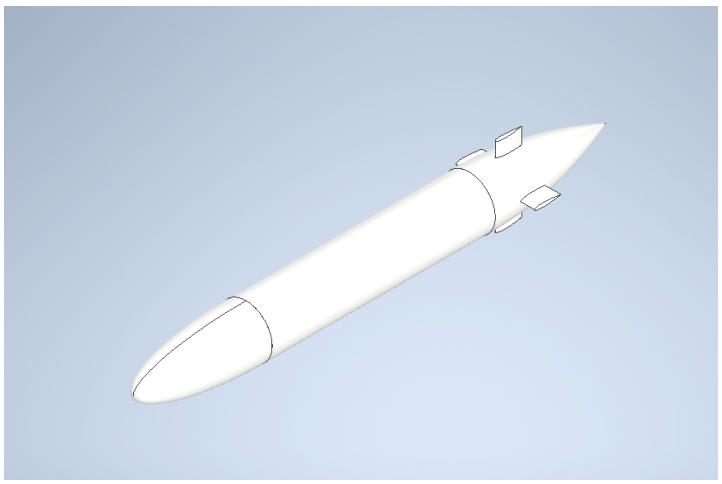


Figura 3-19: Casco definitivo [autoría propia].

3.3 Análisis hidrodinámico del casco.

Una vez diseñados todos los componentes del dron submarino y ensamblados con un único dron se ha realizado un análisis computacional hidrodinámico mediante el software de Autodesk CFD [42]. Gracias a este software se puede ver los lugares del casco donde se produzcan cambios en el flujo del agua al navegar el dron. Para poder hacer estos ensayos computacionales ha sido necesario crear "túneles de viento" donde introducir el casco y así poder simular el comportamiento hidrodinámico del dron en las características deseadas. El "túnel de viento" no es más que un rectángulo de cristal extruido en inventor para que entre en su interior la totalidad del dron submarino, el material escogido es cristal por ser transparente y de esta forma poder comprobar si está introducido completamente en el túnel del viento, al cual posteriormente se le asigna el material agua para poder simular la hidrodinámica del dron.

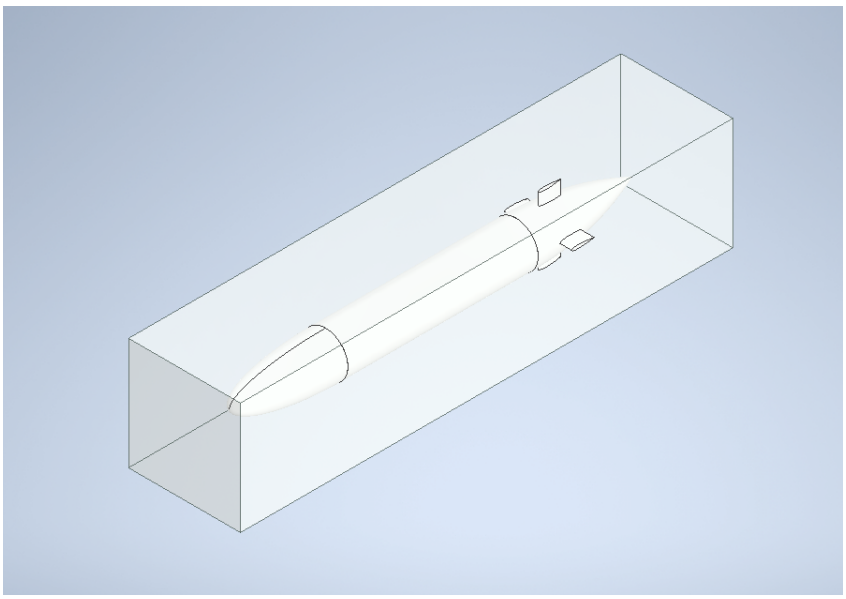


Figura 3-20: Dron en el interior del túnel de viento. [autoría propia]

Una vez introducido el modelo con el túnel del viento se introduce el ensamblaje en el software CFD y se imponen las características del análisis. Primero se selecciona el material de las partes de dron, dejando la opción de que el material sea según lo diseñado en Autodesk inventor. Al túnel de viento se le da el medio en el cual se pretende realizar el análisis. En nuestro caso, al ser un análisis hidrodinámico le daremos el valor de agua. una vez seleccionados los materiales del estudio a realizar ya podemos seleccionar las condiciones a las que vamos a someter el dron para ver así el comportamiento de este frente a distintas casuísticas.

Previo a analizar el comportamiento del dron definitivo en distintos escenarios se comparó el dron primitivo con el dron final para comprobar si verdaderamente se ha conseguido un aumento en eficiencia hidrodinámica. Hay que destacar que la simulación realizada es de 100 iteraciones para evitar grandes tiempos de simulación y mantener resultados fiables. se analizará el comportamiento del casco frente a 3 parámetros principales: la velocidad, la presión y la estela en la popa. Para conseguir los resultados deseados del análisis hidrodinámico del dron es necesario seleccionar dos parámetros, previamente se seleccionará como ya se ha comentado los materiales de todas las secciones y el túnel del viento. Se seleccionará la opción de Boundary Conditions, lugar donde seleccionaremos la cara frontal del túnel del viento y de daremos el valor de velocidad en nudos, y le daremos un valor de 5, la velocidad máxima del dron optima. Posteriormente seleccionaremos la cara posterior del túnel de viento y seleccionaremos la condición de presión, dándole un valor de 2 atmosferas. Un valor cercano a la presión máxima de operación de 10 metros. Una vez seleccionado todos los parámetros anteriormente nombrados, es necesario darle a solve. Una vez en el panel de solve, nos dirigimos a physics y comprobamos que este seleccionada la opción de incompresible, ya que el agua es prácticamente incompresible, una vez seleccionado todo lo anterior podemos realizar las simulaciones que más adelante en la memoria se analizaran.

3.4 Diseño del mecanismo de unión

Una vez definido el casco hidrodinámico es necesario diseñar el mecanismo de unión para así cumplir con el último requisito de diseño. Por ello se estudiaron numerosas opciones previas al diseño del mecanismo de unión y de esta forma elegir el más adecuado para la unión entre las distintas secciones del casco del dron.

3.4.1 Investigación sobre mecanismos de unión en piezas de fabricación aditiva

Para diseñar el mecanismo de unión de los distintos módulos del dron submarino se ha realizado un estudio previo de distintos posibles mecanismos de unión que pudiesen cumplir con los requisitos del proyecto del dron.

Para ello se buscó un mecanismo de unión que fuese fiable y capaz de resistir la unión de los módulos, a su vez que este fuese fácil de integrar, que fuese fácil de montar y desmontar y a su vez se pidió que se evitase en la manera de lo posible el uso de uniones roscadas impresas directamente en los extremos de las piezas a unir.

Una vez establecidos los requisitos de fabricación del mecanismo de unión se estudiaron varias posibilidades de mecanismos de unión para así poder elegir el más conveniente para el dron submarino. En el TFG Comparativa de sistemas de unión de piezas impresas en 3D [43] podemos ver distintos mecanismos de unión.

Uniones rígidas	Fijas	Fijas (remaches y roblones)
		Soldadas
		Clavada
		Encolada
	Desmontables	Atornillada / Apernada
		Nacha vetadas (chavetas y lengüetas)
		Pasadores
		Amarrada

Figura 3-21: Mecanismos de unión más típicos [43].

De estos, los mecanismos de unión fijos no se van a contemplar a causa de la necesidad de modularidad en el dron. De las uniones desmontables se aprecian las siguientes como válidas para su uso en el mecanismo de unión:

- Unión apernada: consiste en la unión de dos piezas mediante un pasador y una tuerca, limitando su movimiento. Para usarla es necesario que el vástago atraviese por completo ambas piezas a unir para usar la rosca en uno de sus extremos.
- Unión atornillada: muy parecida a la unión apernada pero el vástago no es necesario que atraviese completamente las piezas. Su uso es parecido al de las uniones apernadas, pero está destaca por ser más simple.
- Unión con pasadores: mediante el uso de unión por pasadores se asegura el giro simultaneo de las piezas, así como una estabilidad en la unión de las piezas a pesar de someterlo a grandes cargas

También existen métodos de unión distintos que se basan en los principios de los mecanismos de unión anteriores. También es posible la unión entre piezas mediante el uso de pines y pernos de ajuste, estos unen piezas de fabricación aditiva mediante la fuerza de presión, en este tipo se realizan agujeros específicos donde encajar a presión pines o pernos específicos, garantizando una unión firme y precisa. Otra opción que considerar es el uso de uniones por encaje a presión en las cuales la unión se produce mediante la introducción a presión de una pieza dentro de la otra produciéndose la unión de las piezas mediante un apriete [44].

Otros métodos que considerar en la unión entre las piezas del dron son mediante es uso de ensamblajes impresos en 3D en las mismas piezas para realizar un ensamblaje mediante fricción entre estas formas. Para ello es importante el uso de formas fáciles de imprimir para que la unión sea igual de

efectiva y su impresión no suponga ninguna complicación. La forma principalmente usada es la de las colas de milano para este efecto [45].

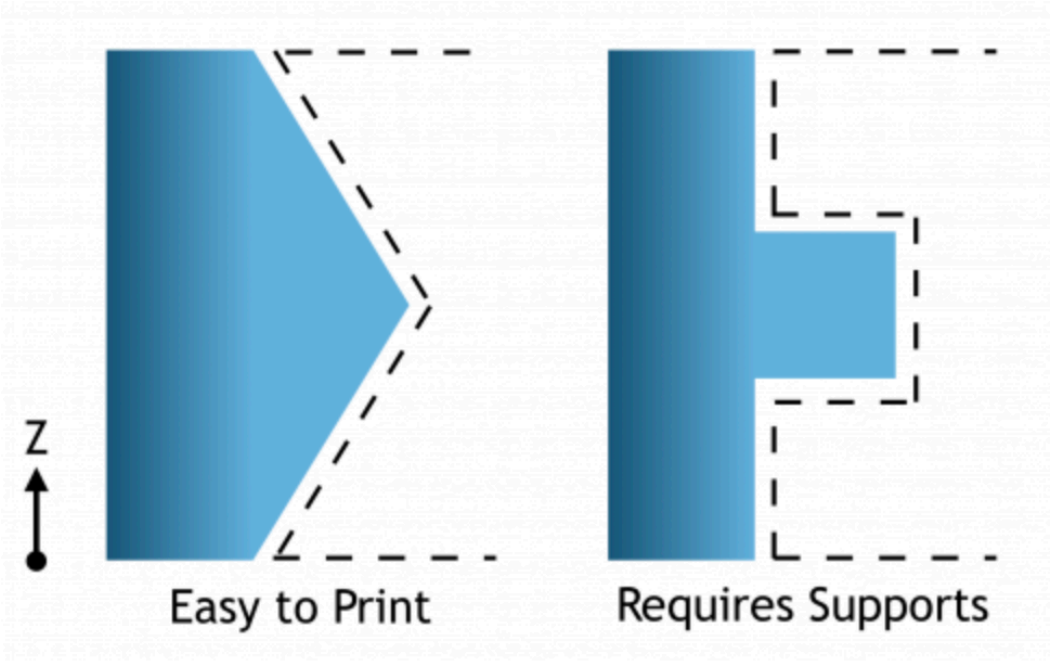


Figura 3-22: Unión con forma de milano frente a forma recta [45].

Una de las técnicas más modernas usadas para la unión de piezas de fabricación aditiva es el uso de uniones roscadas mediante tornillos. Para ello existen distintas opciones que pueden servir. Existen distintos tipos de uniones mediante tornillos, variando donde se encuentra el roscado que recibe el tornillo [46]. Las distintas opciones para tener en cuenta son las siguientes:

- Roscado en la pieza 3D: se trata de diseñar la pieza con la rosca ya incluida en su interior, para ello se necesita una impresión de la pieza de mucha calidad para que la unión roscada sea óptima.
- Insertos de piezas roscadas metálicas: se diseña un agujero en la pieza donde se introduce un inserto metálico donde se produce la unión roscada. Estos insertos pueden ser de dos tipos en función de su método de unión a la pieza receptora. Estos pueden ser termofijados (el inserto se une en piezas termoplásticos mediante soldadura o pegamentos termoendurecibles) o roscados de expansión (la unión a la pieza es gracias a un moleteado en la cara exterior del inserto que es el encargado de sujetarlo en el interior de la cavidad).
- Tuercas incorporadas en el diseño: se diseña un lugar donde introducir una tuerca convencional estandarizada en su interior para que esta realice la unión roscada con el tornillo.
- Tornillos autorroscantes: este se inserta en los relieves negativos sin que sea necesario preparar la pieza para ello. Es importante el uso de materiales dúctiles ara poder usar este tipo de unión.

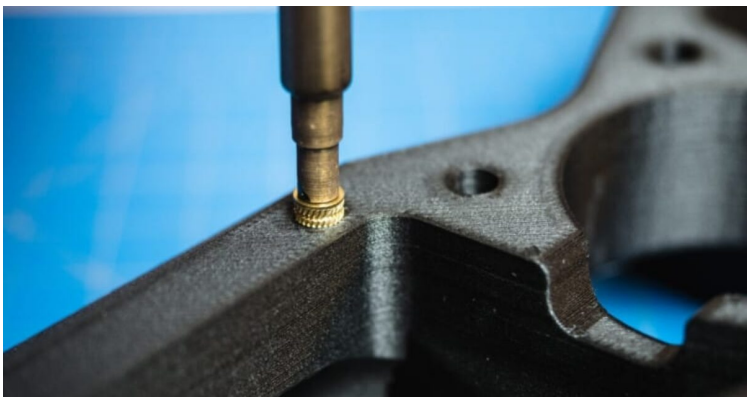


Figura 3-23: Aplicación de inserto termofijado [47].

En caso de no encontrar un mecanismo de unión óptimo para la unión modular se estudió la posibilidad de usar uniones semifijas, se estudió el uso de otros métodos como soldadura o soldadura química pero está es incompatible para la modularidad del casco del dron submarino [48], [49].

Para las uniones adhesivas es necesario conocer el material usado en el diseño las piezas, en nuestro caso plástico ABS. Las adhesivos principales usados para realizar uniones entre piezas de ABS son [49]:

- Adhesivos Cianoacrilato: posee un secado rápido y buena adhesión entre piezas de menor tamaño, pero es poco resistente a impactos y vibraciones.
- Adhesivos epóxicos: tiene una alta resistencia térmica y mecánica pero su tiempo de secado es más alto y resulta más complicado retirarlo en caso de así desearlo.
- Adhesivo de poliuretano: es flexible y resistente a impactos y bueno en ambientes húmedos y uniones con vibración, resulta muy difícil de retirar.
- Adhesivos termofusibles: muy fácil aplicación y tiempo de secado corto, tienen menor resistencia mecánica que los adhesivos anteriores y se puede retirar con facilidad, en caso de que este muy caliente puede deformar la pieza.
- Adhesivos estructurales: son acrílicos y metacrilatos y destacan por tener una gran resistencia mecánica y química y resultar en una unión fuerte y con flexibilidad, son complicados y caros de aplicar y en caso de querer retirarlo es complicado.

También se ha observado los drones submarinos para analizar que mecanismos de unión usan estos. Se ha podido observar que el uso de abrazaderas es habitual en la construcción de drones submarinos al igual que el uso de juntas tóricas. Las juntas tóricas no son necesarias ya que no es necesario que el casco hidrodinámico sea estanco de forma que esto solo complicaría el mecanismo de unión entre piezas.

3.4.2 Diseño del mecanismo de unión mediante abrazaderas.

Una vez realizado un estudio previo de distintos mecanismos de unión usados en piezas de fabricación aditiva y buscando una alta sencillez en el mecanismo para mayor facilidad de montaje y desmontaje del dron. Se ha optado por un mecanismo de unión por abrazaderas. Esta está dividida en dos secciones, una superior y otra inferior. El modo de unión entre ellas es mediante una unión roscada con insertos metálicos termofijos. A su vez la abrazadera contactara con las secciones del dron mediante una cola de milano.

Para ello previamente se diseñó la zona de unión dentro de las piezas modulares del dron submarino con el objetivo que una vez añadida las abrazaderas las forma general sea la misma que la de las simulaciones hidrodinámicas. El modo de unión entre las secciones y la abrazadera es mediante una cola de milano.

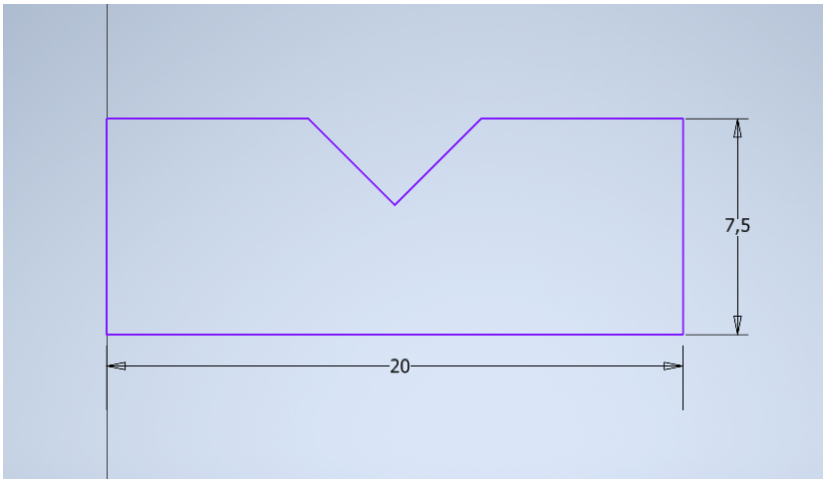


Figura 3-24: Cola de milano abrazadera [autoría propia].

Una vez diseñada la cola de milano de la abrazadera y sabiendo las medidas necesarias en las secciones del dron para mantener la hidrodinámica intacta se pudo pasar a crear las secciones de unión dentro de las piezas para que encajasen a la perfección con las abrazaderas de unión.

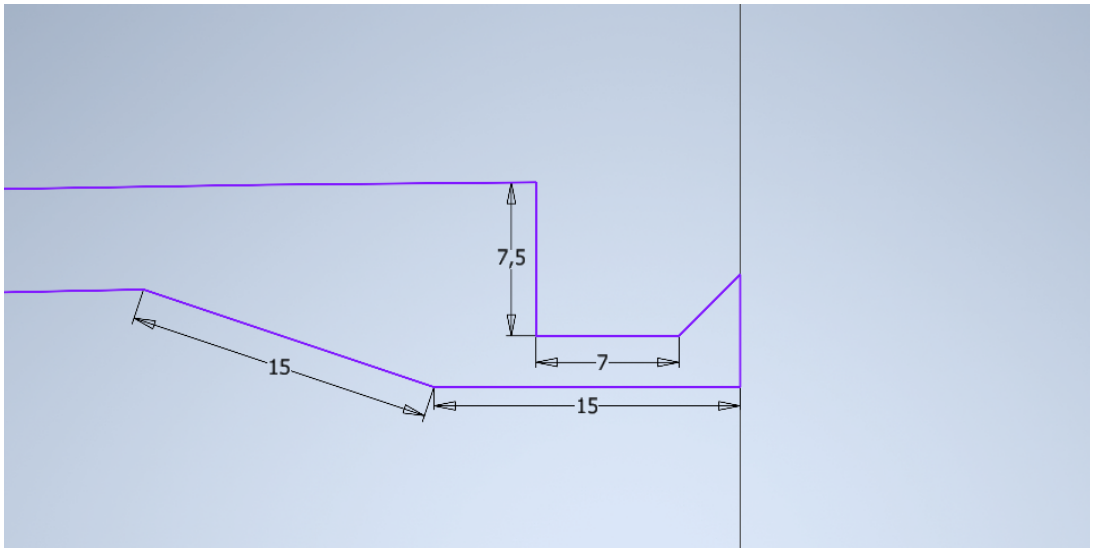


Figura 3-25: Zona de unión sección de proa [autoría propia].

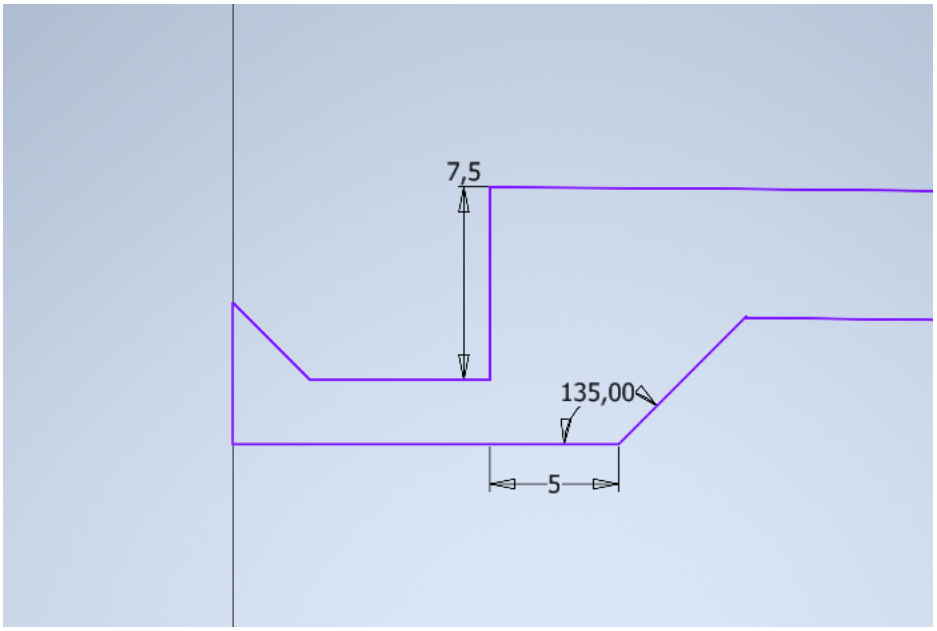


Figura 3-26: zona de unión sección de popa [autoría propia].

De forma que gracias a la forma de la abrazadera y a las modificaciones creadas en el fin de las secciones de proa, intermedia y popa se consigue que se unan todas las piezas de manera sólida y resistente. A continuación, se pasó a diseñar en ambas partes de la abrazadera la posición de los agujeros donde los insertos termofijables se colocarán para que la posición y forma de estos cumplan con los requisitos del fabricante del inserto. El inserto más optimo por el espacio reducido donde insertarlo es el inserto ruthex M3 thread insert [50].

El fabricante nos facilita la información del agujero donde insertar el pasador, siendo este de 4 milímetros de diámetro y 6,7 milímetros de profundidad como mínimo. También destaca la importancia de que al inserto le rodee en todo momento como mínimo 1,6 milímetros de material para que así sea lo

suficientemente resistente y no rompa. Una vez conocida esta información se diseñaron los agujeros en ambas secciones de la abrazadera para cumplir con los requisitos del fabricante.

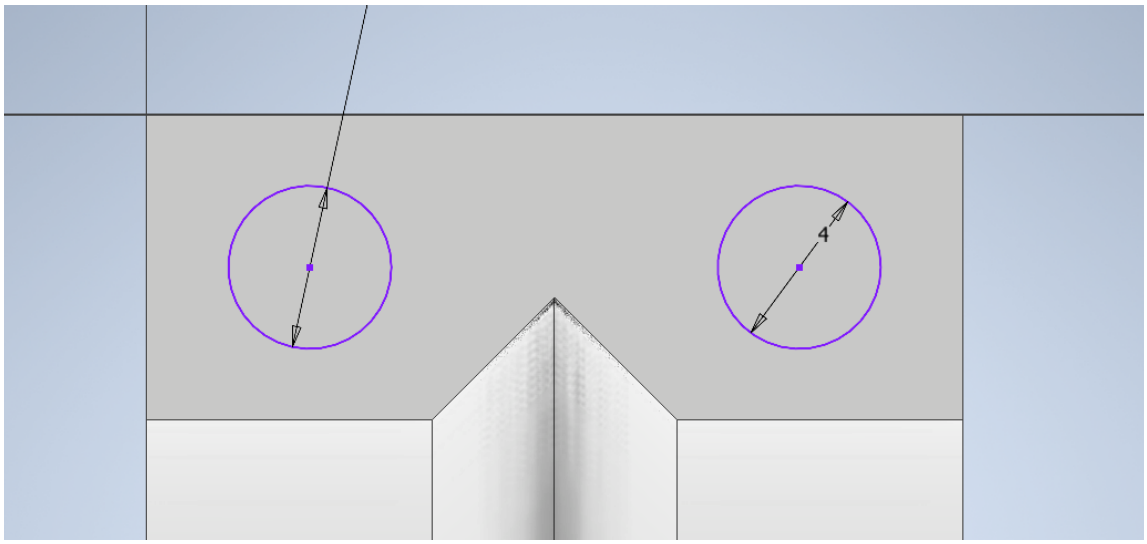


Figura 3-27: posición de los agujeros según especificaciones del fabricante de los insertos [autoría propia].

He de destacar que los agujeros varían en función de en qué sección de la abrazadera se encuentren ya que se va a introducir un inserto en la sección inferior para que la fuerza de la unión roscada actúe en ambas partes de forma óptima, es por ello que en la sección inferior de la abrazadera la profundidad del agujero de 10 milímetros y en la abrazadera superior una profundidad de 6 milímetros, punto en el cual el agujero se agranda hasta los 5,5 milímetros de diámetro para que la cabeza del tornillo pueda entrar. También destacar que el diámetro de la abrazadera superior para el paso del tornillo es de 3 milímetros. Para crear esos agujeros se ha usado un plano desplazado 60 milímetros hacia arriba desde donde se han realizado los agujeros hasta una distancia de 53,3 milímetros. Se van a usar tonillos M3 x 16 milímetros de longitud [51] para unir ambas secciones de forma que el tornillo quede totalmente insertado en ambas secciones siendo la resistencia del tornillo máxima. El tornillo seleccionado es de titanio para poder soportar tanto grandes cargas mecánicas como la corrosión del entorno marino.

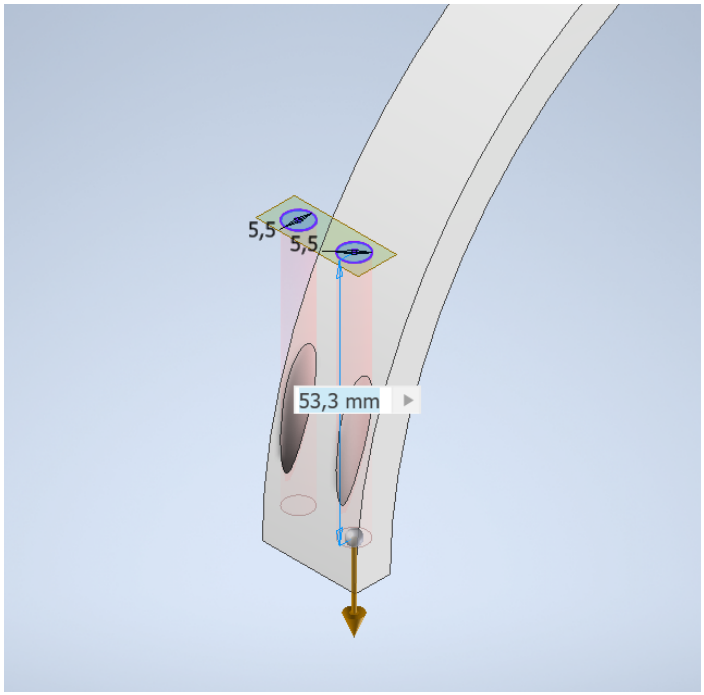


Figura 3-28: Creación del agujero en la abrazadera superior para compatibilidad con el tornillo [autoría propia].

Una vez diseñados los agujeros para tanto los insertos como para el tornillo en ambas abrazaderas se ha creado un pequeño pasador en la sección inferior de la abrazadera y un aguajero en la superior para que el acople de ambas piezas sea correcto y así facilitar el uso de los tornillos, el tamaño del pasador es de 2 milímetros de diámetro y de alto a ambos lados de la abrazadera.

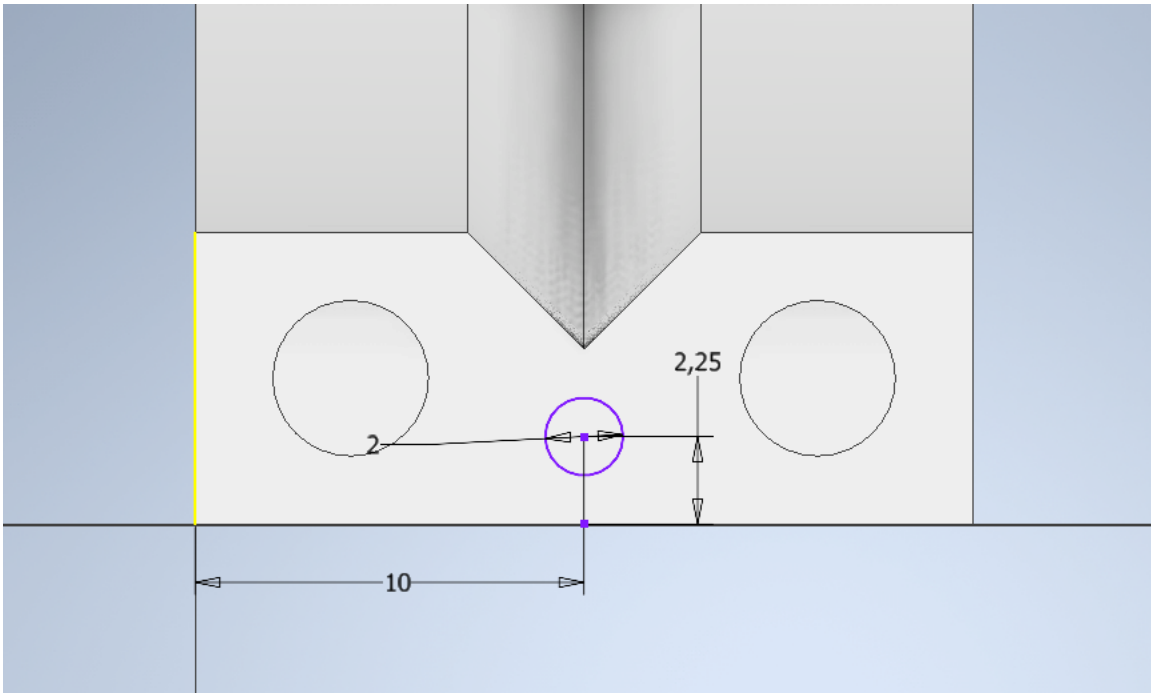


Figura 3-29: Posición del pasador de las abrazaderas [autoría propia].

Una vez diseñados todos los detalles en cuanto al mecanismo de unión por abrazadera se diseñaron unos tapones con el objetivo de tapar el agujero de la abrazadera superior usado para introducir los tornillos para la unión. Estos tapones tienen como principal objetivo tapar a la perfección el aguajero quedando la superficie del casco del dron lo más cercano a que fuese de solo una pieza para que el efecto en la hidrodinámica sea el menor posible, manteniendo así la eficiencia del dron al navegar.

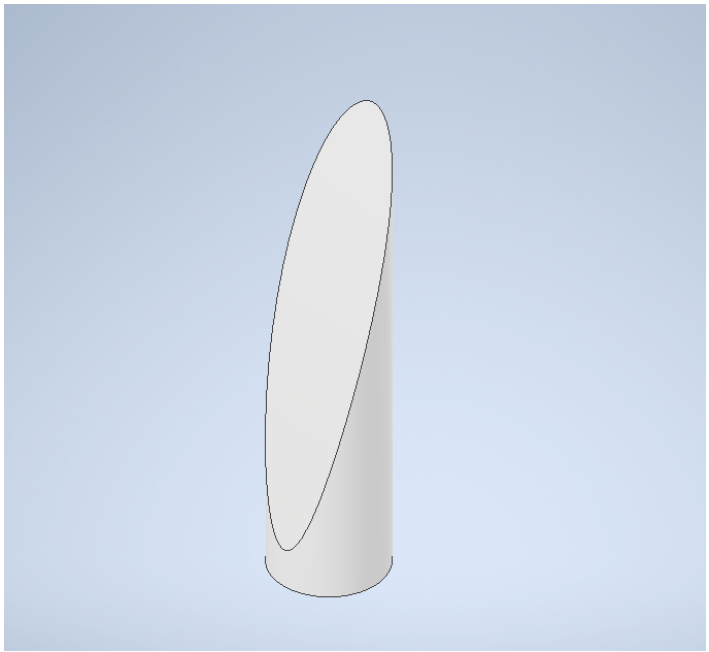


Figura 3-30: Tapón para la abrazadera superior [autoría propia].

3.4.3 Resultado final abrazaderas de unión.

Una vez tenidas en cuenta todas las limitaciones de diseño por parte de los fabricantes de los insertos termofijables y los tornillos de titanio a la vez que no afectar al diseño del casco hidrodinámico podemos terminar las abrazaderas de unión y comprobar que su diseño es el correcto y que todas las piezas encajan a la perfección y según lo previsto. Para ello se ha realizado el primer ensamblaje completo del dron para comprobar el correcto funcionamiento de todas las piezas a la hora de unirlas. Dando como resultado las siguientes abrazaderas:

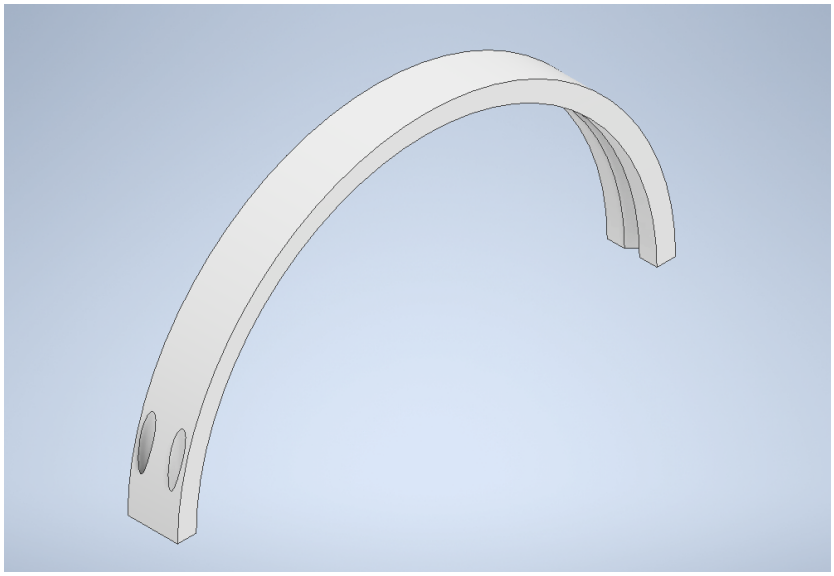


Figura 3-31: abrazadera superior [autoría propia].

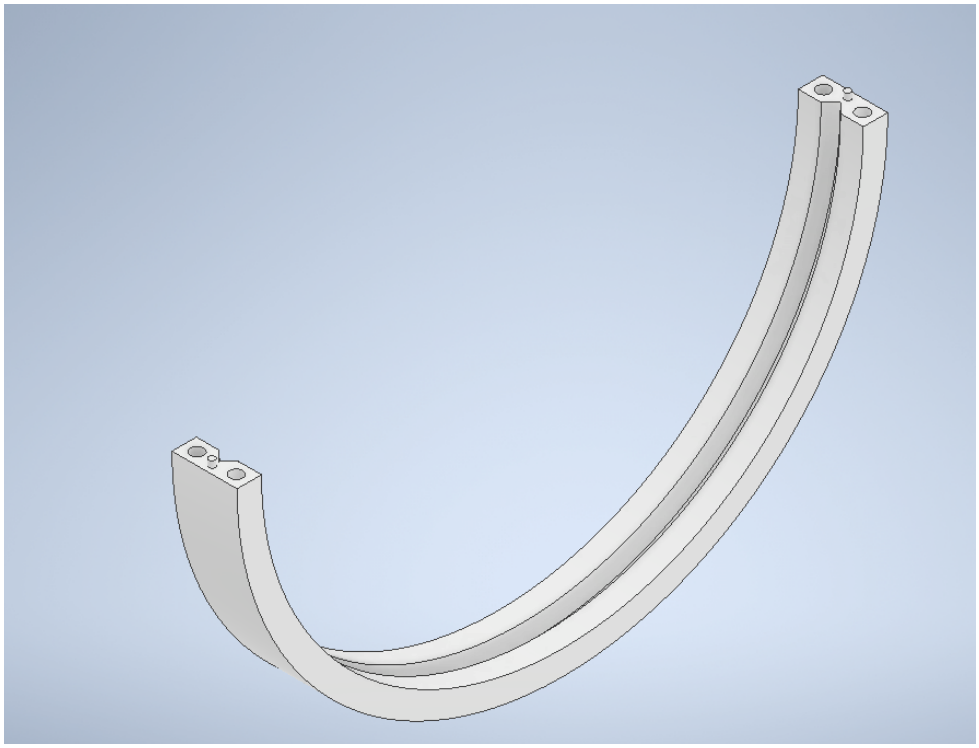


Figura 3-32:Abrazadera inferior [autoría propia].

3.5 Análisis FEM mecanismo de unión modular.

3.5.1 Condiciones del análisis.

Para realizar el análisis FEM de manera correcta en el mecanismo de unión se han realizado una serie de actuaciones previas para poder simularlo posteriormente, a su vez se ha seleccionado como momento crítico para el análisis el momento de izado del dron, este será mediante don cintas que se pondrán bajo la tripa del dron para así por izarlo. Para evitar al ordenador proporcionado por el CUD una carga computacional excesiva y simplificar el proceso para realizar el análisis. Se ha decidido dividir submarino en un cuarto, centrando el análisis en el mecanismo de unión de la sección de proa.

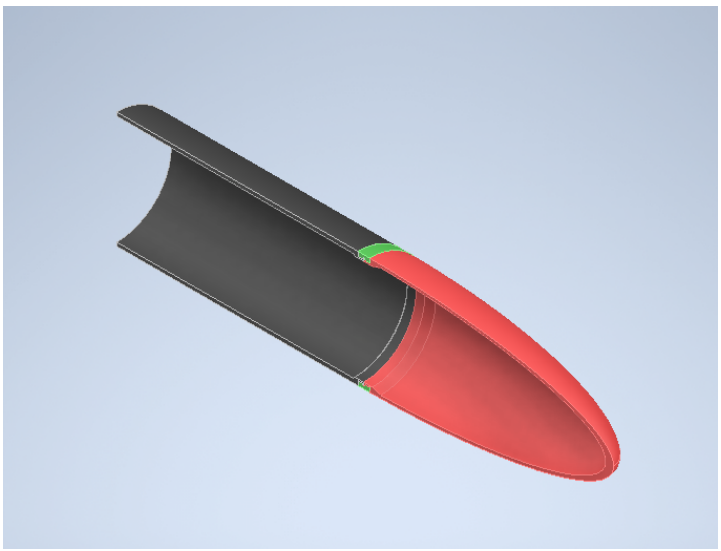


Figura 3-33: Dron dividido en cuartos [autoría propia].

Una vez dividido el dron se simplifica mucho el cálculo de tensiones para el ordenador, pudiendo de esta forma obtener mejores resultados computacionales. Al tener el dron dividido en secciones podemos comenzar introduciendo los parámetros de simulación. Primero seleccionamos como se unen las piezas entre sí. Por incapacidad del ordenador de reducir la malla a tamaños tan pequeños se han eliminado la unión termofija y los tornillos de titanio, seleccionando la opción de soldado entre la abrazadera superior y la inferior, formando solo una pieza. El resto de las uniones están separadas entre sí. A su vez se han restringido las superficies de las caras libres resultantes al cortarse el dron en cuartos y se le ha aplicado una carga distribuida sobre toda la cara superior equivalente a medio metro de columna de agua para el momento de izar el dron y se le ha incorporado la zona equivalente de apoyo donde iría la cinta de izado del dron para así poder realizar el cálculo correctamente.

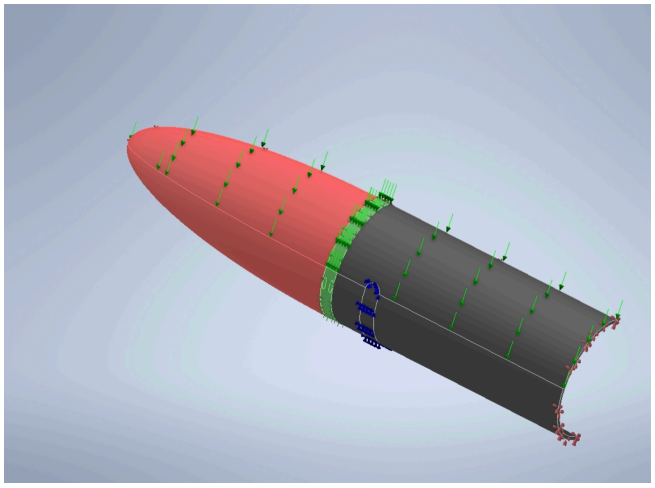


Figura 3-34: actuaciones previas a la simulación [autoría propia]

Una vez introducido toda esta información se ha procedido al mallado de la pieza para su correcta simulación. Para ello se ha seleccionado un tamaño de malla de todo la sección del dron fina de 3,6 milímetros y luego se ha generado una malla específica para las superficies de unión entre piezas de 1 milímetro para obtener los resultados más correctos posibles en la simulación.

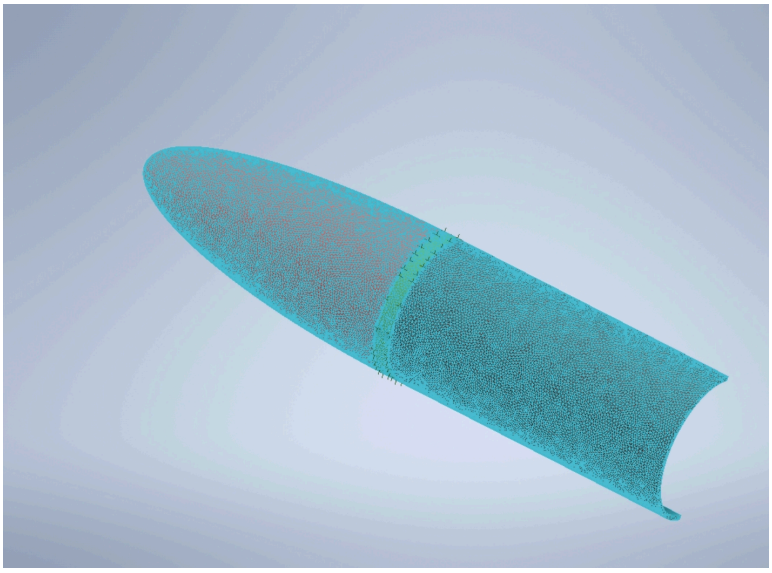


Figura 3-35: Mallado de la pieza [autoría propia].

A continuación, se analizarán los datos obtenidos en la simulación FEM. Gracias a este análisis se decidirá si el mecanismo de unión es lo suficientemente resistente como para soportar. Para realizar este análisis se han usado como cargas de trabajo las máximas esperadas, siendo estas el momento de sacar el dron del agua. para ello se ha puesto una carga distribuida de 0,05Mpa en la cara superior del dron.

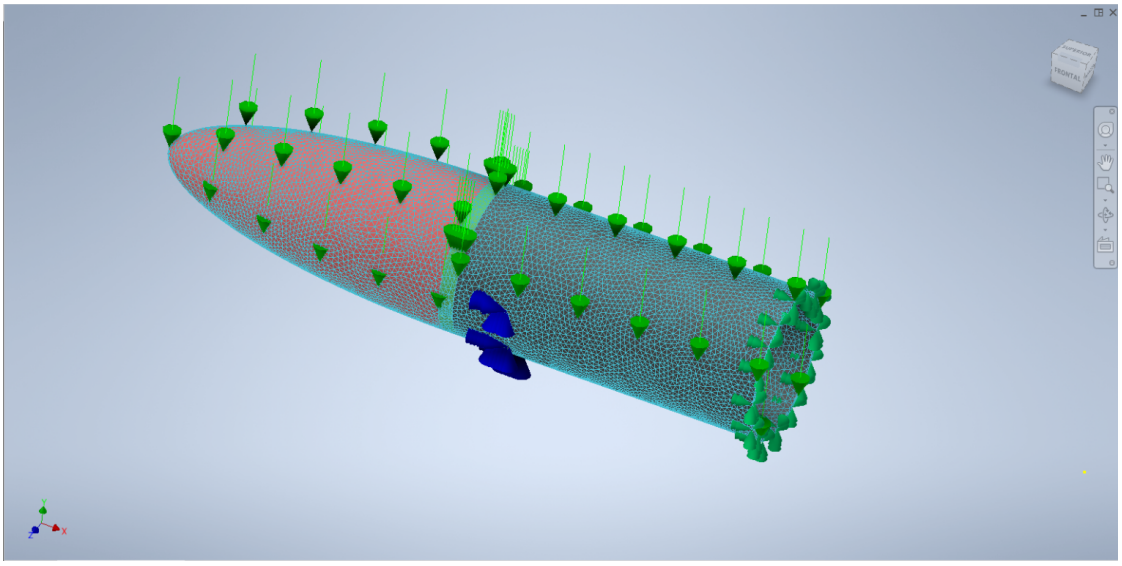


Figura 3-36: Disposición inicial del dron previo a análisis [autoría propia].

3.5.2 Materiales del análisis.

A continuación, se muestran los valores mecánicos de los elementos del dron. como ya se ha comentado en el punto 3.5.1: Condiciones del análisis, se han retirado los tornillos e insertos y se ha fusionado ambas abrazaderas en una sola en favor de la simplificación y sencillez del proceso. A pesar de ello es importante conocer los valores de los materiales del dron para conocer si este se comporta de manera correcta en función de los resultados del análisis.

Parámetros materiales usados.

Material	E (MPa)	G (MPa)
ABS	2240	811,6
Titanio	1,096E + 05	4,117E + 04
Latón	1,028E + 05	3,777E + 04

Tabla 3-12: Parámetros Materiales.

4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

En el siguiente apartado se van a mostrar los resultados finales del dron submarino modular (MoAUV) y se comprobará si el diseño cumple todos los requisitos impuestos.

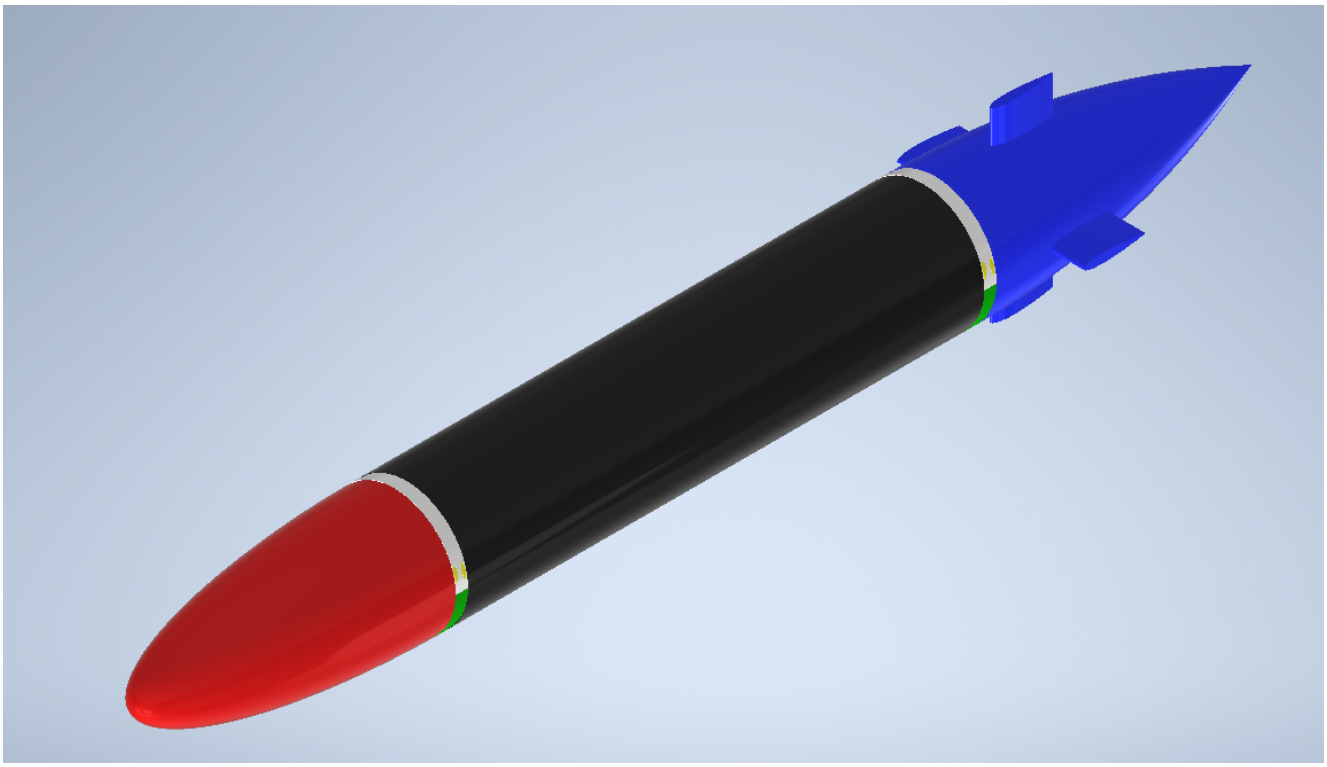


Figura 4-1: Resultado final dron MoAUV [autoría propia].

4.1 Resultados finales análisis hidrodinámico.

A continuación, se analizarán los datos obtenidos en la simulación hidrodinámica, comparando el diseño optimizado mediante fórmulas hidrodinámicas frente al casco primitivo. De esta forma se obtiene la información necesaria para decidir si el casco está optimizado hidrodinámicamente. Para ello se

centrará el análisis en 3 parámetros que nos facilita el software CFD. La velocidad del agua a lo largo del casco, la evolución de la presión en este y por último la estela que deja el dron al navegar. Gracias al estudio de estos parámetros sabemos si el casco del dron es correcto.

4.1.1 Análisis de velocidades.

El primer análisis realizado es el de evolución de la velocidad a lo largo del casco. Para realizar el análisis de velocidades, en ambos casos, se ha establecido una situación de velocidad de 5 nudos, unos 217 cm/s, y una presión de 2 atm. De forma que podremos comparar entre ambos cascos para apreciar las mejorías obtenidas. Los resultados obtenidos en materia de velocidad son los siguientes:

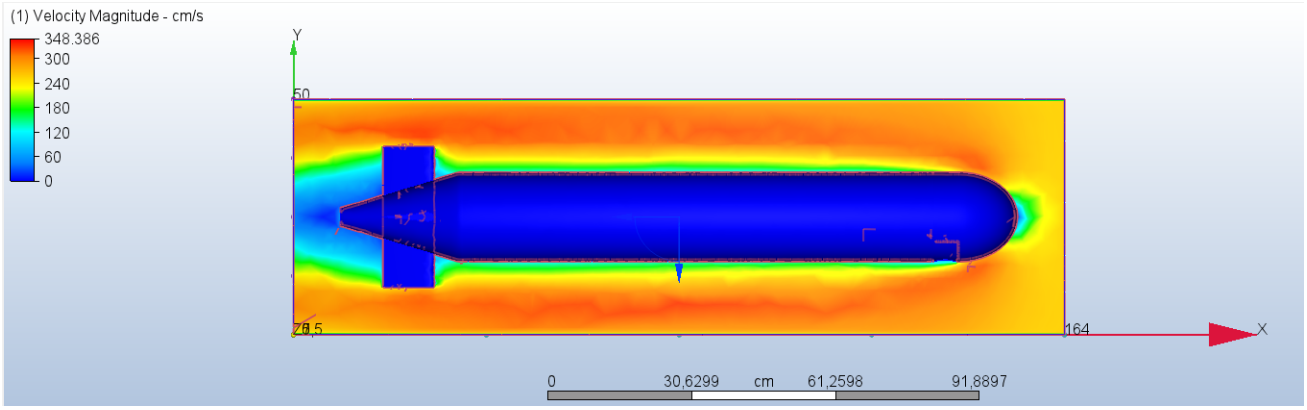


Figura 4-2: Análisis en CFD de velocidad en el casco del dron primitivo [autoría propia].

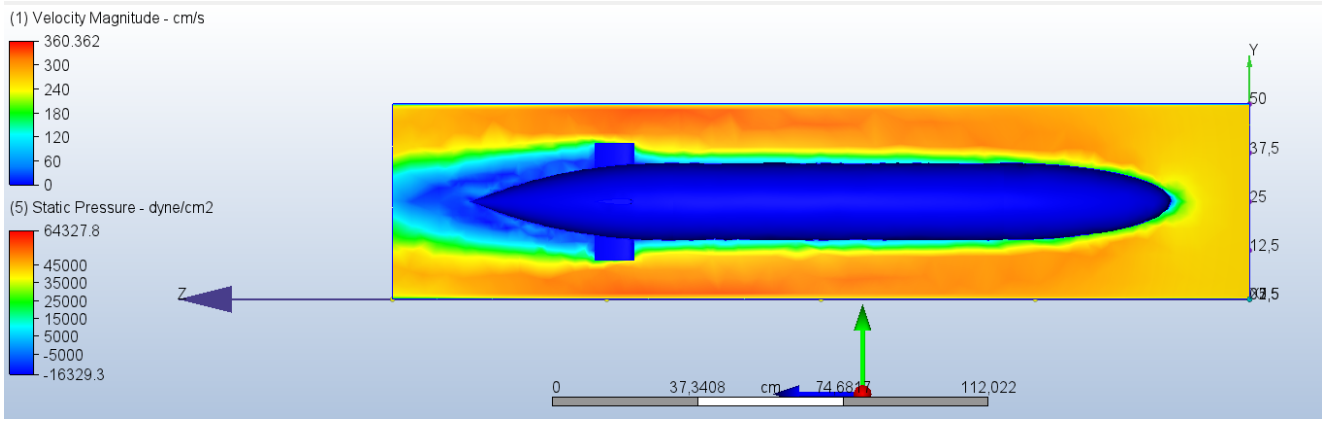


Figura 4-3: Análisis en CFD de velocidad en el casco del dron final [autoría propia].

En las simulaciones de velocidad se aprecia que el flujo en el dron primitivo presenta una mayor perturbación en la popa y en la proa. En la proa se puede apreciar un punto de contacto del casco con el agua muy brusco, lo cual hace que aumente considerablemente la resistencia a lo largo de la proa. Esto también produce que el movimiento de agua a lo largo del casco tenga una mayor velocidad respecto al casco del dron, aumentando así la resistencia. Por último, la popa en forma cónica supone un cambio muy abrupto entre el cuerpo del dron y la popa, creando un flujo perturbado en la popa del dron, aumentando esto considerablemente la resistencia hidrodinámica del dron.

Por otro lado, en el dron final se puede apreciar que el punto de contacto del agua con la proa del dron está mucho más optimizado hidrodinámicamente, lo cual reduce la resistencia al avance de la proa del dron considerablemente. Gracias a esta proa el flujo de agua a lo largo del casco tenga una menor velocidad respecto al casco primitivo, reduciendo el rozamiento a lo largo del casco del dron. Por último, el uso de una popa optimizada mediante hidrodinámica favorece que el paso del flujo del cuerpo central a la sección de popa sea mucho menos abrupto, resultando en un flujo menos turbulento en la popa.

También se puede apreciar que gracias a la popa hidrodinámica y el uso de perfiles estandarizados NACA la variación de velocidad en la popa se ve reducida respecto a su prototipo primitivo. A continuación, ese muestra una tabla resumen en donde se destacan los principales punto del análisis para la comparación entre ambos cascos:

Tabla comparativa análisis velocidad.

Parámetro	Dron primitivo	Dron final
Resistencia por fricción.	Mayor	menor
Separación del flujo en popa.	Alta	Baja
Estabilidad del flujo.	Turbulento en popa	Flujo más estable
Consumo de energía	mayor	Más eficiente

Tabla 4-1: Tabla comparativa análisis hidrodinámico de velocidades.

4.1.2 Análisis de presiones.

Una vez estudiado el comportamiento del dron a su velocidad máxima de 5 nudos pasamos a estudiar su comportamiento respecto a la presión. Usando una presión de trabajo de 2 atmosferas, simulando una profundidad de trabajo del dron de unos 10 metros aproximadamente. Dando como resultado los siguientes gráficos de presión:

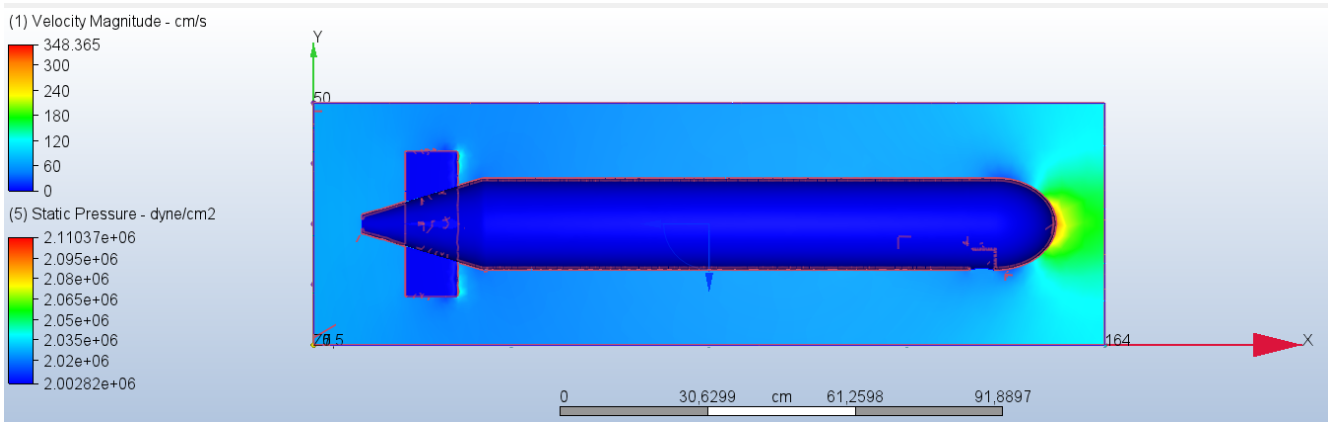


Figura 4-4: Análisis en CFD de presión en el casco del dron primitivo [autoría propia].

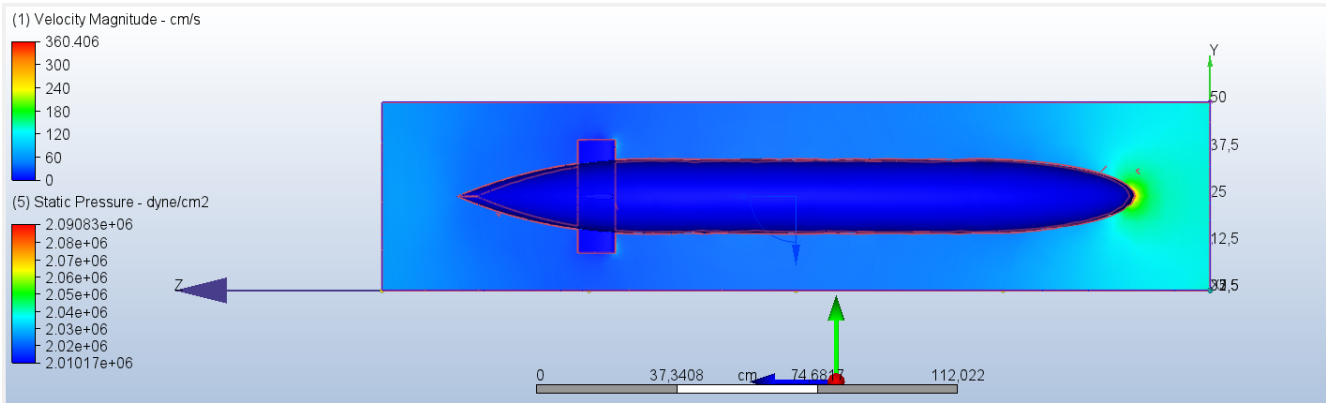


Figura 4-5: Análisis en CFD de presión en el casco del dron final [autoría propia].

Una vez obtenidos los resultados de los análisis hidrodinámicos de presión de ambos cascos se pueden comparar para apreciar si se ha conseguido un rendimiento optimizado.

Comenzando con la proa se puede apreciar como en el dron primitivo se produce una concentración de presión alta en la punta de la proa, esto representa una alta resistencia frontal en el dron primitivo. Continuando con su sección central se puede apreciar un gradiente de presión ligeramente superior lo cual representa una mayor resistencia por fricción y por último en la popa, al tener forma de cono, la separación del flujo es muy abrupta afectando a la estela del dron primitivo y aumentando de esta forma la resistencia al avance.

En cuanto a las mejoras obtenidas en la presión gracias al casco optimizado se puede apreciar que la diferencia de presión en la proa es más homogénea y reducida frente al dron primitivo, obteniendo de esta forma menor resistencia al avance. En el cuerpo del dron se mantiene más homogénea, demostrando una menor resistencia al avance gracias a una integración más optimizada entre la proa y el cuerpo del dron. Por último, en la popa, debido a una integración optima entre cuerpos, se consigue que el cambio de sección sea menor de forma que se forman menores gradientes de presión en la popa, reduciendo el avance. Si nos fijamos en las superficies de sujeción de ambas se puede apreciar que el uso de perfiles NACA 0015 reduzca la presión en el punto de contacto con el agua, reduciendo la resistencia de estas al máximo posible. Se ha creado la siguiente tabla resumen con los valores más relevantes del estudio de la presión:

Tabla comparativa análisis de presión.

Parámetro	Dron primitivo	Dron final
Presión en la proa.	Más concentrada y brusca	Distribución más homogénea
Presión en el cuerpo central.	Gradiente de presión pronunciado	Distribución uniforme
Presión en la popa.	Caída brusca de presión	Transición progresiva
Resistencia de forma.	Mayor a causa de la succión de presión	Menor resistencia total

Tabla 4-2: Tabla comparativa análisis de presión.

4.1.3 Análisis de estela.

Por último, analizaremos la mejoría de la hidrodinámica centrándonos en la estela de ambos drones para poder compararlos. La estela de un submarino es crucial para el rendimiento hidrodinámico de este, una estela muy corta o con un gradiente negativo de velocidad y presión puede ser muy perjudicial para el rendimiento hidrodinámico del dron. La estela se estudia con los valores de las anteriores simulaciones, es decir. Una velocidad de 5 nudos y una profundidad de operación de 10 metros, 2 atmosferas. Dando como resultado los siguientes gráficos:

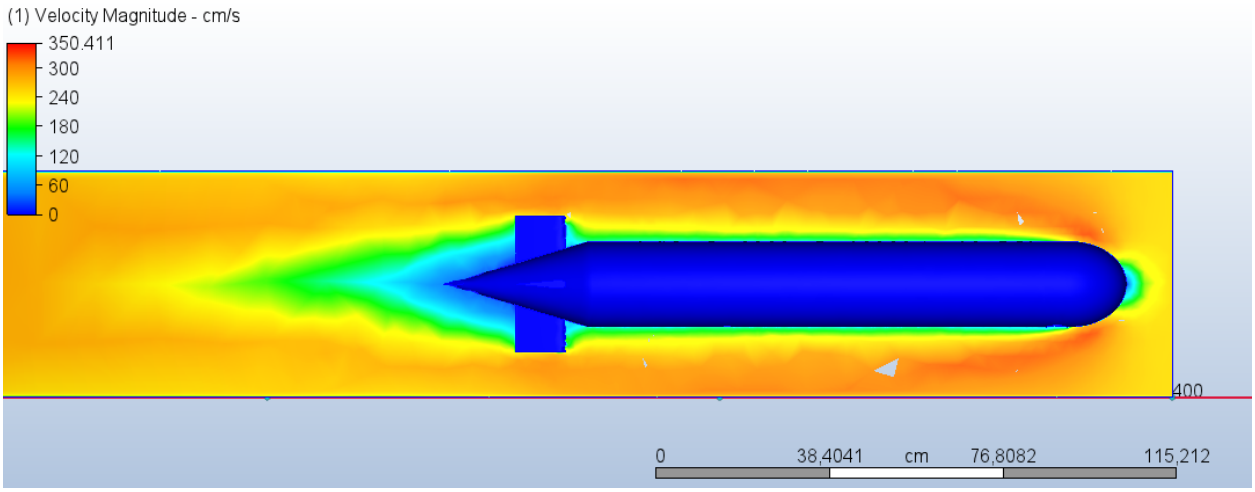


Figura 4-6: Análisis en CFD de la estela en el casco del dron primitivo [autoría propia].

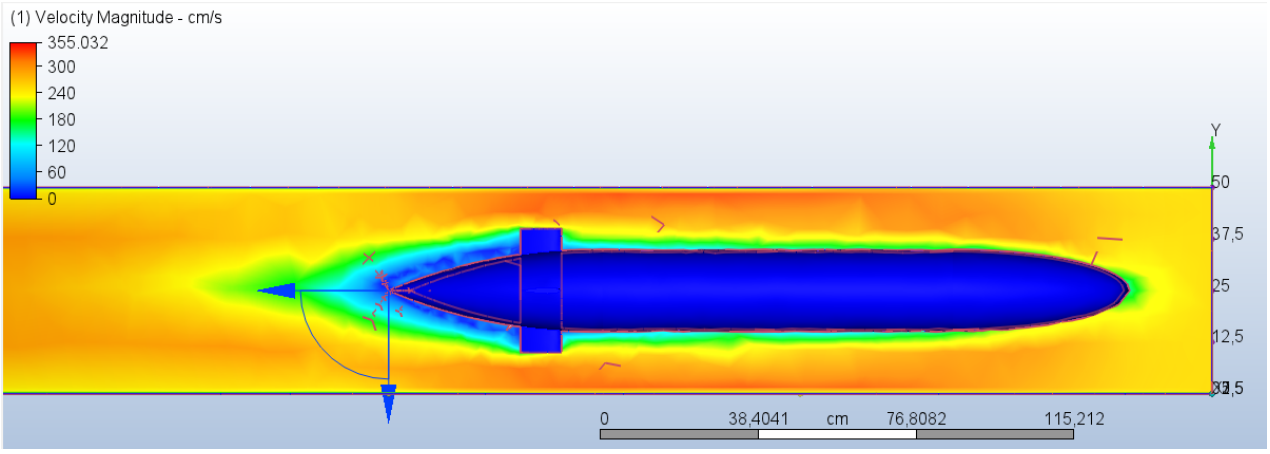


Figura 4-7: Análisis en CFD de la estela en el casco del dron final [autoría propia].

En la estela del dron primitivo se puede apreciar un flujo más perturbado en la popa a causa de la transición abrupta entre el cuerpo central cilíndrico y la popa cónica. A causa de esto se aprecia un flujo más perturbado en la popa con zonas de baja velocidad lo cual aumenta la resistencia al avance. También se puede apreciar una estela mucho mayor en tamaño a causa de los perfiles de sustentación no estandarizados, indicando un flujo no eficiente en la popa del dron.

En cuanto al dron final, optimizado hidrodinámicamente, se puede apreciar que la transición entre el cuerpo central y la popa está mucho más optimizada induciendo una menor resistencia al avance. El flujo es mucho más uniforme en la sección de popa gracias al uso de ecuaciones hidrodinámicas en lugar de un cono como forma exterior de la popa. Por último, gracias al uso de hidrodinámica en el diseño de la popa y gracias al uso de perfiles de sustentación estandarizados NACA, se aprecia una estela mucho menor en tamaño con menor turbulencia, reduciendo la resistencia al avance. Se ha creado la siguiente tabla resumen con los valores más relevantes del estudio de la estela:

Tabla comparativa análisis de estela.

Parámetro	Dron primitivo	Dron final
Tamaño de la estela	Más grande y extendida	Más compacta y uniforme
Separación de flujo en la popa.	Alta	Baja
Turbulencias en la popa.	significativas	reducidas
Resistencia de estela.	mayor	menor

Tabla 4-3: Tabla comparativa análisis de estela.

4.1.4 Resultados finales análisis hidrodinámico.

Gracias a las simulaciones realizadas podemos confirmar que el casco final es hidrodinámico y que cumple con todos los valores y requisitos previstos de él gracias a un diseño basado en el conocimiento hidrodinámico y en la construcción naval de submarinos modernos, resultando en un dron que cumple con el funcionamiento preestablecido y que goza de una eficiencia hidrodinámica superior a la del dron primitivo. Como se puede ver en las tablas resumen de cada capítulo del análisis del dron el casco optimizado cumple con los requisitos esperados de él, confirmando que este es correcto y está optimizado.

4.2 Análisis FEM.

Para el análisis FEM se van a estudiar principalmente dos valores para entender el comportamiento del casco ante las cargas sometidas por medio metro de columna de agua, gracias a estos resultados podremos considerar si el diseño del mecanismo de unión es óptimo para las cargas esperadas del dron durante su funcionamiento. Estos valores son el desplazamiento sufrido y las tensiones de Von Mises.

4.2.1 Desplazamientos.

Primero analizaremos los desplazamientos observados en el análisis. Se observa que los desplazamientos son bajos a las cargas sometidas, denotando una gran rigidez de unión mediante el mecanismo de unión. El desplazamiento máximo obtenido 0,4092 milímetros. Gracias a estos datos se aprecia que las uniones del casco del dron y los tapones hidrodinámicos soportan la carga máxima, cumpliendo con los requisitos.

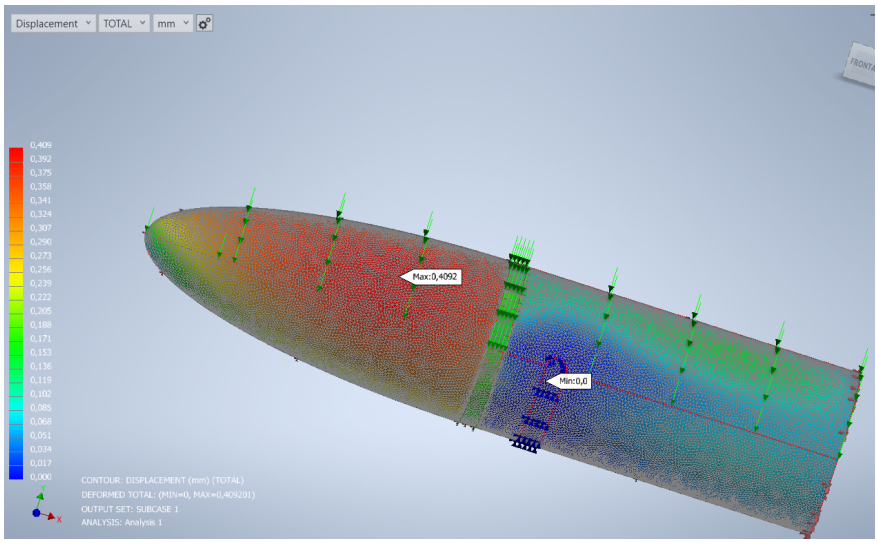


Figura 4-8: análisis de desplazamientos [autoría propia].

4.2.2 Tensiones de Von Mises.

A continuación, se analizarán las tensiones máximas de Von Mises sufridas por la carga impuesta. La tensión máxima observada es de 129,90 MPa, este valor es muy superior al límite elástico a tracción del plástico ABS está comprendido entre 30 y 50 MPa. De esta forma observamos que el valor es muy superior al límite y que la pieza rompería. Hay que destacar que en ningún momento en la simulación se ha tenido en cuenta que el interior de las piezas está relleno de material, aliviando las cargas sufridas al izar el dron y al ser un punto muy localizado en la malla, se considera que este valor no es muy representativo.

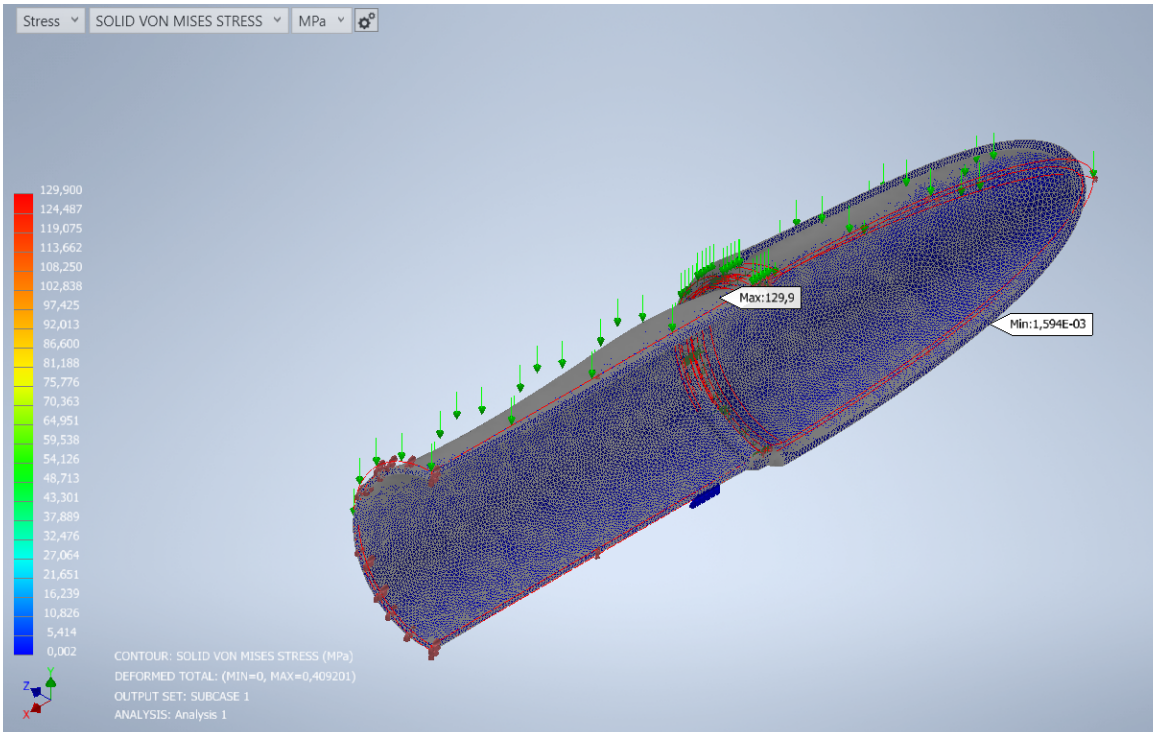


Figura 4-9: análisis de Von Mises [autoría propia].

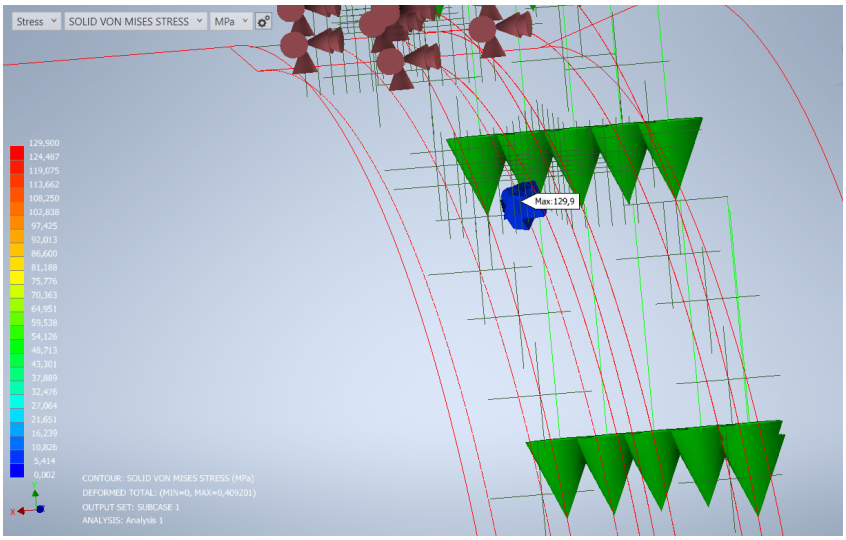


Figura 4-10: Detalle posición de la tensión máxima del FEM [autoría propia]

4.2.3 Resultados finales análisis FEM.

Gracias a los resultados obtenidos del análisis FEM de error relativo de tensiones del 3,736 % y un error global de convergencia del 2,076E – 8 se considera que el análisis es válido en su totalidad destacando únicamente una posible reducción de malla en las zonas críticas para reducir el valor de error relativo de tensiones, aunque el valor actual es aceptable. En cuanto a los datos obtenidos de los análisis realizados se considera el diseño óptimo para las cargas de trabajo, en desplazamiento cumple los requisitos esperados de él y en cuanto al analís de tensiones de Von Mises se considera el valor como valido por la baja potencia de los equipos utilizados y la ausencia de una definición precisa del material de relleno entre el casco de presión y el casco hidrodinámico, dejando en este punto la simulación. El desarrollo de un modelo estructural definitivo, que integre todos los componentes internos y el comportamiento conjunto del relleno estructural, se propone como una línea de trabajo futura para continuar con la validación del diseño del MoAUV.

4.3 Cumplimiento de especificaciones.

Como se puede apreciar en la Tabla 3-2: Especificaciones del dron. El resultado final del casco del dron cumple a la perfección en todos los aspectos previstos para el diseño de este, consiguiendo un casco hidrodinámico en su totalidad con perfiles y formas optimizadas testadas. También se ha conseguido desarrollar un mecanismo de unión mediante abrazaderas que cumplen con los requisitos de la modularidad del dron.

En la

Parámetros característicos dron submarino.

Coeficiente prismático	$Cp \approx 0{,}793$
Factor de elongación	$F = 9$
Longitud total	$Ltot = 180\ cm$

Masa total	$mtot = 6{,}694\ Kg$
Diámetro máximo	$\emptyset máx = 20\ cm$
Volumen desplazado total	$Vtot \approx 0{,}0449\ m^3$

Tabla 3-11: Parámetros característicos dron completo. podemos apreciar los valores característicos del dron, destacando que cumple con todos los coeficientes adimensionales tanto individualmente como colectivamente para poder considerarlo un casco optimizado hidrodinámicamente. A su vez también se han usado perfiles estandarizados NACA 0015 para la creación de las superficies de sustentación. Resultando en un casco optimizado hidrodinámicamente en todos los aspectos. Para resaltar estos cálculos realizados se ha realizado un análisis hidrodinámico mediante el software CFD para comprobar las mejoras habidas desde el diseño del casco primitivo hasta el final.

En los análisis hidrodinámicos mediante CFD podemos observar mejorías notables tanto en rozamiento a la velocidad de operación de 5 nudos, mejoras en la presión a lo largo del casco, sobre todo en el punto de contacto de la proa con el agua y en la popa, reduciendo considerablemente el vórtice de vacío dejado por el dron al avanzar, reduciendo la resistencia al avance. Por último, también se puede apreciar una notoria mejoría en la estela que produce el dron al avanzar a la velocidad de operación. De forma que se considera que el casco se ha optimizado de manera satisfactoria en cuanto a hidrodinámica y resistencia al avance.

Otro aspecto considerado a la hora de diseñar el casco del dron ha sido la modularidad para poder montar y desmontar este según las necesidades que se tengan en cada momento, es por ello por lo que se ha buscado un mecanismo de unión que fuese sencillo de instalar, que cumpliese con las necesidades mecánicas del dron y que a su vez fuese de fácil funcionamiento. Este mecanismo está basado en dos abrazaderas que unen las distintas secciones del dron mediante colas de milano. Entre abrazaderas se ha diseñado para que la unión sea roscada mediante tornillos de titanio M3 x 16 y usando insertos termofijables para mayor fuerza de unión entre piezas.

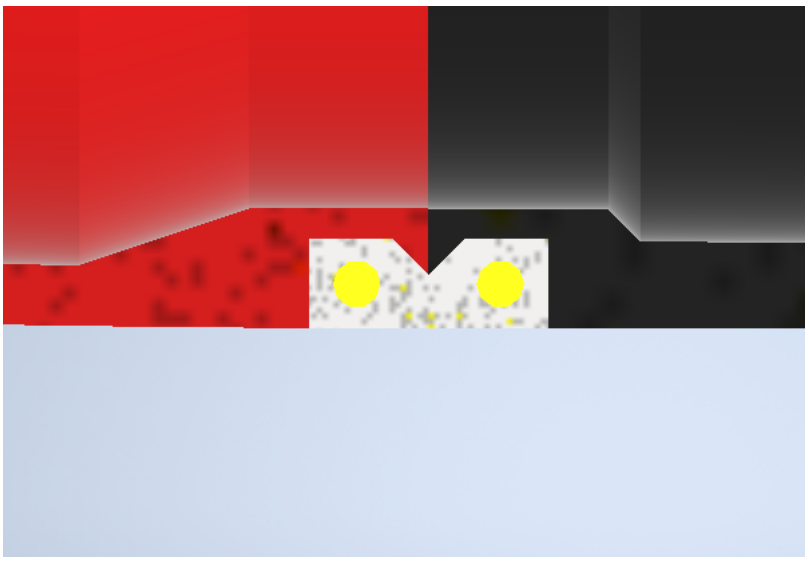


Figura 4-11: Mecanismo de unión ensamblado [autoría propia].

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Respecto a los objetivos establecidos previos al diseño del dron, se han cumplido todos de forma satisfactoria ya que se ha conseguido diseñar un dron que cumple con los requisitos previstos. Usando plástico ABS en el diseño para conseguir un casco resistente y compacto.

En cuanto a los problemas en el diseño, el principal problema es la incapacidad de imprimir piezas de tamaño tan grande en las impresoras del CUD. Obligando a fragmentar las piezas para su posterior unión para poder desarrollar el casco en la escuela, perdiendo propiedades y resistencias que son cruciales para el correcto funcionamiento del casco del dron.

De forma que esto obliga a tener que invertir en una impresora que tenga capacidad de imprimir piezas de mayor porte que las actuales en los laboratorios del CUD. Obligando a buscar otras soluciones como fragmentar las piezas para su posterior unión o la subcontratación de empresas de impresión 3D que tengan impresoras capaces de imprimir todas las secciones del casco y las partes del mecanismo de unión sin necesidad de fragmentar.

Otro de los problemas durante el desarrollo del TFG fue encontrar un software que pudiese permitir realizar las comparativas en cuanto a la hidrodinámica de los cascos diseñados. Se probaron distintos softwares como Autodesk fision, pero no se consiguió realizar el estudio en ninguno a causa de la complicación de estos. De forma que se acabó realizando los análisis en CFD permitiendo observar el impacto de un diseño hidrodinámico en el casco.

Otro problema enfrentado durante el diseño del dron ha sido el mecanismo de unión, la idea principal era realizar una unión roscada entre los componentes diseñada directamente sobre las secciones del dron. Pero a causa de las especificaciones y requisitos del dron se pidió buscar alternativas, de forma que obligo a restructurar el diseño del mecanismo de unión buscando opciones que fuesen aplicables a las necesidades del dron y evitando en todo momento el uso de uniones roscadas en las piezas 3D. apostando por insertos termofijados y tornillos de titanio para realizar la unión entre piezas.

5.1 Líneas futuras.

Este proyecto supone un avance en el desarrollo de un dron submarino de carácter científico desarrollado por el CUD. Es por ello por lo que la evolución de este diseño y del proyecto total son esperanzadores buscando llegar a un dron submarino modular científico plenamente operativo que pueda ser usado tanto por los alumnos como por los profesores del CUD. En los siguientes apartados se van a estudiar la líneas futuras en cuanto a diseño e implementación del dron.

En cuanto a las líneas futuras en el diseño del casco del dron se ha conseguido la modularidad del dron consiguiendo desembocar en un diseño que pueda adaptarse a las necesidades de cada uso que se

le quiera dar a este. También se puede estudiar fabricar el casco diseñado en otros materiales y mediante otros medios que no sean fabricación aditiva con el objetivo de tener un dron con mejores prestaciones mecánicas, alcanzando mayores profundidades y pudiendo realizar de esta forma realizar nuevas misiones que con un casco de fabricación aditiva no son posibles. En cuanto a la posibilidad de cambiar el casco de presión en tamaño buscando nuevos objetivos con el dron, habría que rediseñar los valores de diámetro, y eslora del casco. Pero gracias a las ecuaciones usadas para crear las secciones del dron solo habría que recalcular las dimensiones de estas para poder albergar en su interior un casco de presión de mayor o menor tamaño. Pudiendo de esta forma adaptarse a cualquier misión que se le quiera dar al dron y consiguiendo en todo momento una eficiencia hidrodinámica.

Gracias al diseño de un casco hidrodinámico modular para el dron se consigue que la aplicación de este sea la más sencilla y a la vez eficiente posible para el uso del dron submarino. De forma que el dron podrá ser usado siempre que así se desee. A su vez el diseño optimizado del casco del dron permitirá reducir la potencia necesaria para moverlo y la instalación de sistemas de propulsión óptimos para su funcionamiento. Además, gracias al mecanismo de unión mediante abrazaderas se consigue que la fatigue se localice en estas piezas de forma que en caso de romper alguna será más fácil la fabricación de una nueva en lugar de tener que fabricar una de las secciones al completo de nuevo para así poder volver a usar el dron. De forma que gracias al diseño de un casco hidrodinámico optimizado y el sistema de unión mediante abrazaderas se ha conseguido que la implementación y uso del casco hidrodinámico sea optima y fácil para su futuro uso en investigaciones deseadas.

Finalmente, como línea futura fundamental, se propone el desarrollo de un modelo estructural completo en Autodesk Nastran, incorporando el conjunto del casco de presión, el material de relleno interior y todos los elementos estructurales relevantes. Este análisis permitiría obtener una validación estructural global más precisa del MoAUV, optimizando el diseño para futuras versiones operativas del dron.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] “UNE 157001:2014 Criterios generales para la elaboración formal de los documentos que constituyen un proyecto técnico”, Asociación *Española de Normalización (UNE)*, [En línea]. Disponible en: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0052985. [Consultado el 26 de marzo de 2025].

[2] "Leonardo’s submarine", Museo Galileo - Codice leicester, [En línea]. Disponible en: https://mostre.museogalileo.it/codiceleicester/en/water/50-leonardo-s-submarine. [consultado el 10 de marzo de 2025].

[3] "P19_2b_CA_909v.jpg 1280×1699 píxeles", Museo Galileo - Codice Leicester, [En línea]. Disponible en: https://mostre.museogalileo.it/codiceleicester/images/pannelli/P19_2b_CA_909v.jpg. [consultado el 10 de marzo de 2025]

[4] W. Bourne, "Inventions or devises", 1578. [En línea]. Disponible en: http://archive.org/details/bim_early-english-books-1475-1640_inventions-or-devises-_bourne-wm_1578. [consultado el 10 de marzo de 2025]

[5] "Drebbel and the Rowboat Submarine", Submarine Force Library & Museum Association, [En línea]. Disponible en: https://ussnautilus.org/drebbel-and-the-rowboat-submarine/. [consultado el 10 de marzo de 2025]

[6] A. A. Aguirre-Roldán y S. M. Fernández-Fraga, "Vehículos submarinos no tripulados: aliados estratégicos de la industria marina", Ciencia UANL, vol. 22, n.o 96, 2019. [en línea]. disponible en: //www.cienciauanl.uanl.mx/2020/12/vehiculos-submarinos-no-tripulados-aliados-estrategicos-de-la-industria-marina/. [consultado el 10 de marzo de 2025].

[7] “Réplica del submarino de Cornelius Drebbel,” BBC, [en línea]. disponible en: https://ichef.bbci.co.uk/ace/ws/624/amz/worldservice/live/assets/images/2016/01/26/160126160021_cornelio_replica_624x351_colinsmithcreativecommonslicence_nocredit.jpg.webp. [consultado el 10 de marzo de 2025].

[8] M. Mersenne, "La vérité des sciences contre les septiques [sic] ou pyrrhoniens". Paris: Chez Toussainct du Bray, ruë Saint-Jacques, aux Epics-meurs., 1625. [en línea]. disponible en: https://books.google.es/books?id=FF44pHy9x_sC. [consultado el 10 de marzo de 2025]

[9] H. M. Rodríguez Ruiz y J. Díaz Delgado, "La evolución del arma submarina y su incidencia en las operaciones navales", Arte operacional marítimo: una aproximación desde la Escuela Superior de Guerra, S. Uribe Cáceres, Ed., Escuela Superior de Guerra, 2021, pp. 167-189. doi: 10.25062/9789584288981.05.

[10] "David Bushnell And The First American Submarine", U.S. Naval Institute. [En línea]. Disponible en: https://www.usni.org/magazines/proceedings/1942/february/david-bushnell-and-first-american-submarine. [consultado el 10 de marzo de 2025]

[11] «submarino Turtle - imagen de Getty Images". National Geographic España, [En línea]. Disponible en: https://static.nationalgeographic.es/files/styles/image_3200/public/gettyimages-893616486.webp?w=1600&h=1017. [consultado el 10 de marzo de 2025]
[12] W. B. Parsons, Robert Fulton and the submarine. New York: Columbia university press, 1922. [En línea]. Disponible en: http://archive.org/details/robertfultonsubm00parsrich. [consultado el 10 de marzo de 2025].
[13] "Submarino Nautilus - ilustración". El rincón de Byron, [En línea]. Disponible en: https://elrincondebyron.com/wp-content/uploads/2022/01/naut2.jpg?w=1024. [consultado el 10 de marzo de 2025].
[14] "La ingeniería y el proyecto del Ictíneo de Monturiol, 1857-1868". Universidad de Barcelona - Geocrítica, [En línea]. Disponible en: https://www.ub.edu/geocrit/sn/sn119-96.htm. [consultado el 10 de marzo de 2025]
[15] Historia del arma submarina española: ciclo de conferencias, marzo 2015. Madrid: Ministerio de Defensa, Secretaría General Técnica, 2015, [en línea]. disponible en: https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/P/D/PDF617.pdf [consultado el 10 de marzo de 2025].
[16] "Submarino de Isaac Peral - imagen". Universidad de Murcia, [En línea]. Disponible en: https://www.um.es/documents/29535134/33386047/960px-Submarino_de_Isaac_Peral.jpg/213ce581-5924-60a8-f2a5-953ed59ed07f?t=1665681944257 [consultado el 10 de marzo de 2025].
[17] "El submarino, su trayectoria centenaria y su vigencia en el siglo XXI" Revista de Marina. [En línea]. Disponible en: https://revistamarina.cl/es/articulo/el-submarino-su-trayectoria-centenaria-y-su-vigencia-en-el-siglo-xxi. [consultado el 10 de marzo de 2025].
[118] "Submarino U-Boat XXI en el museo de Bremerhaven - imagen". Wikimedia commons, [En línea]. Disponible en: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/2004-Bremerhaven_U-Boot-Museum-Sicherlich_retouched.jpg. [Consultado el 10 de marzo de 2025].
[19] "Nautilus (SSN-571)". Naval History and Heritage Command, [En línea]. Disponible en: http://public2.nhhcaws.local/browse-by-topic/ships/submarines/uss-nautilus.html [consultado el 10 de marzo de 2025]
[20] "Albacore III (AGSS-569)". Naval History and HEritage Command, [En línea]. Disponible en: http://public1.nhhcaws.local/research/histories/ship-histories/danfs/a/albacore-agss-569-iii.html [consultado el 10 de marzo de 2025]
[21] "USS-Albacore - imagen". The port Inn - Portsmouth, [En línea]. Disponible en: https://www.portinnportsmouth.com/wp-content/uploads/sites/9/2020/07/USS-Albacore.jpg [consultado el 10 de marzo de 2025].
[22] J. R. Conforto Sesto, "Vehículos autónomos submarinos: nuevos actores en las operaciones navales", Revista de marina, p. 11, 2009. [en línea]. Disponible en: https://armada.defensa.gob.es/archivo/rgm/2009/06/cap07.pdf [consultado el 10 de marzo de 2025].
[23] "vehículo submarino operado a distancia (ROV) - imagen". Ecoptik, [En línea]. Disponible en: https://www.ecoptik.net/uploads/image/20230522/About_underwater_ROV.jpg [consultado el 10 de marzo de 2025].
[24] "Vehículo Submarino autónomo Gavia - imagen". Oceanografía Litoral. [En línea]. Disponible en: https://www.oceanografialitoral.com/wp-content/uploads/GaviaAUV_1920-x-1080.jpg [consultado el 10 de marzo de 2025].
[25] M. Bethencourt Núñez, El uso de los vehículos marinos no tripulados en la gestión y la investigación de aguas marinas y continentales. Huelva: Universidad de Huelva: Ayuntamiento de Isla Cristina, 2022. [En línea]. Disponible en: https://rodin.uca.es/handle/10498/34135 [consultado el 10 de marzo de 2025].
[26] "Dron submarino Sparrus II - imagen". El Español, [En línea]. Disponible en: https://s1.elespanol.com/2023/09/09/actualidad/793180787_235922388_1706x960.jpg [consultado el 10 de marzo de 2025]

[27] F. Supervielle, "Estudio: drones submarinos (UUV)", Fede Supervielle [En línea]. Disponible en: https://www.fsupervielle.com/post/estudio-drones-submarinos-uuv [consultado el 10 de marzo de 2025].
[28] "Imagen comparativa tamaños drones submarinos", Fede Supervielle. [En línea]. Disponible en: https://www.fsupervielle.com/post/estudio-drones-submarinos-uuv [consultado el 19 de marzo de 2025].
[29] "Fuerza de rozamiento. Coeficiente de arrastre". Universidad del País Vasco, [En línea]. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/fluidos/reynolds/reynolds.html [consultado el 11 de marzo de 2025].
[30] G. R. Carrasco, Diseño y estudio hidrodinámico de un submarino autónomo no tripulado: AUV. Universidad Politécnica de Cartagena, 2021. [en línea]. disponible en: https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/855ea00e-51ec-41b5-887e-b0ad286896f4/content [consultado el 10 de marzo de 2025].
[31] Á. B. Fernández, Diseño de formas y análisis de resistencia de un vehículo autónomo submarino [Tesis de grado]. Universidad politécnica de Cartagena, 2021. [en línea]. Disponible en: https://repositorio.upct.es/server/api/core/bitstreams/6aeb5ffd-197c-4af9-b68b-ef51f871919c/content [consultado el 10 de marzo de 2025].
[32] H. A. Moreno, R. Saltarén, L. Puglisi, I. Carrera, P. Cárdenas, y C. Álvarez, "Robótica Submarina: Conceptos, Elementos, Modelado y Control", Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, vol. 11, n.o 1, pp. 3-19, ene. 2014, doi: 10.1016/j.riai.2013.11.001. [consultado el 10 de marzo de 2025].
[33] "Software Autodesk Inventor | Obtener precios y comprar el producto oficial Inventor 2025". Autodesk. [En línea]. Disponible en: https://www.autodesk.com/es/products/inventor/overview [consultado el 14 de marzo del 2025]
[34] F. N. Gómez, C. P. Collazo, y A. C. Reyes, "Modelo paramétrico de calibración de un módulo de control de orientación en un AUV". Centro Universitario de la Defensa - Universidad de Vigo, 2021. [en línea]. Disponible en: http://calderon.cud.uvigo.es/items/33e4d53b-fd47-451b-b25d-7c2950110b99 [consultado el 16 de marzo de 2025].
[35] "Imagen incluida en el documento 'Fluid Dynamics Submarine Report'," Elsaa Aesthetics, [En línea]. Disponible en: https://elsaaesthetics.blog/wp-content/uploads/2013/04/fluid-dynamics-submarine-report.pdf. [consultado el 14 de marzo de 2025].
[36] M. Moonesun, A. Mahdian, Y. M. Korol, M. Dadkhah y M. M. Javadi, "Concepts in submarine shape design," Indian Journal of Geo-Marine Sciences, vol. 45, n.º 1, pp. 100–104, ene. 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Mohammad-Moonesun/publication/306208601_Concepts_in_submarine_shape_design/links/658299872468df72d3be874d/Concepts-in-submarine-shape-design.pdf. [consultado el 14 de marzo de 2025].
[37] "NACA 4 digit airfoil generator (NACA 0015 AIRFOIL)," Airfoil Tools, [En línea]. Disponible en: http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit?MNaca4DigitForm%5Bcamber%5D=0&MNaca4DigitForm%5Bposition%5D=0&MNaca4DigitForm%5Bthick%5D=15&MNaca4DigitForm%5BnumPoints%5D=100&MNaca4DigitForm%5BcosSpace%5D=0&MNaca4DigitForm%5BcosSpace%5D=1&MNaca4DigitForm%5BcloseTe%5D=0&MNaca4DigitForm%5BcloseTe%5D=1&yt0=Plot. [Consultado el 12 de marzo de 2025].
[38] "CFD analysis of the bow shapes of submarines," ResearchGate, oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331001130_CFD_analysis_of_the_bow_shapes_of_submarines. [Consultado el 12 de marzo de 2025].
[39] R. Burcher, Concepts in Submarine Design. Cambridge, Inglaterra; Nueva York: Cambridge University Press, 1994. [En línea]. Disponible en: http://archive.org/details/conceptsinsubmar0000burc. [Consultado el 13 de marzo de 2025].

[40] “Perfil de investigación de Carlos Pérez Collazo”, Centro Universitario de la Defensa – Universidad de Vigo, [En línea]. Disponible en: https://cud.uvigo.es/en/pdi_english/name/carlos-perez-collazo/. [Consultado el 13 de marzo de 2025].
[41] R. Burcher, Concepts in Submarine Design. Cambridge, Inglaterra; Nueva York: Cambridge University Press, 1994. [En línea]. Disponible en: http://archive.org/details/conceptsinsubmar0000burc. [Consultado el 13 de marzo de 2025].
[42] “Software Autodesk CFD | Obtener precios y comprar el producto CFD oficial”, Autodesk, [En línea]. Disponible en: https://www.autodesk.com/es/products/cfd/overview. [Consultado el 14 de marzo de 2025].
[43] C. B. Calviño y J. F. Carrera, Comparativa de sistemas de unión de piezas impresas en 3D. Trabajo de Fin de Grado, Universidad Pontificia Comillas, 2021. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.comillas.edu/xmlui/bitstream/handle/11531/50977/TFG%20-%20Benito%20Calvino%2C%20Carlos.pdf?sequence=1. [Consultado el 14 de marzo de 2025].
[44] D. S. Díaz, “Uniendo piezas impresas en 3D más allá del pegamento”, to Infinity, [En línea]. Disponible en: https://www.toinfinitylab.com/uniendo-piezas-impresas-en-3d-mas-alla-del-pegamento/. [Consultado el 15 de marzo de 2025].
[45] “Ensambles impresos en 3D: una forma de simplificar los montajes,” Markforged, [En línea]. Disponible en: https://markforged.com/es/resources/blog/joinery-onyx. [Consultado el 15 de marzo de 2025].
[46] “La impresión 3D de roscas y cómo añadir insertos roscados a otras piezas impresas en 3D (con vídeo)”, Formlabs, [En línea]. Disponible en: https://formlabs.com/es/blog/anadir-rosca-tornillo-piezas-impresas-3d/. [Consultado el 15 de marzo de 2025].
[47] “Uso de insertos termofijados”, Markforged, [En línea]. Disponible en: https://markforged.com/es/resources/blog/heat-set-inserts. [Consultado el 15 de marzo de 2025].
[48] O. Koçar, N. Anaç y E. Baysal, “A new approach in part design for friction stir welding of 3D-printed parts with different infill ratios and colors” Polymers, vol. 16, n.º 13, art. n.º 13, ene. 2024. doi: 10.3390/polym16131790.
[49] D. K. K. Cavalcanti, M. Medina, H. F. M. de Queiroz, J. S. S. Neto, F. J. P. Chaves y M. D. Banea, “Recent advances in adhesive bonding of 3D-printed parts and methods to increase their mechanical performance”, Annals of Dunarea de Jos University of Galati Fascicle XII Welding Equipment and Technology, vol. 34, pp. 17-24, dic. 2023. doi: 10.35219/awet.2023.02.
[50] “ruthex M3 thread insert - 100 pieces RX-M3x5.7 brass threaded bushings for 3D printed plastic parts”, ruthex, [En línea]. Disponible en: https://www.ruthex.de/en/products/ruthex-gewindeeinsatz-m3-100-stuck-rx-m3x5-7-messing-gewindebuchsen. [Consultado el 16 de marzo de 2025].
[51] “Tornillo DIN 912 M3x16 mm de titanio grado 5 (6Al4V)”, Tornillos de Titanio, [En línea]. Disponible en: https://www.tornillosdetitanio.com/b2c/producto/912m3x16gr5/1/tornillo-din-912-m3x16-mm-de-titanio-grado-5-6al4v-. [Consultado el 16 de marzo de 2025]. [51] “CreatBot D1000”, impresoras3D.com, [En línea]. Disponible en: https://www.impresoras3d.com/producto/creatbot-d1000/. [Consultado el 16 de marzo de 2025].
[52] “Impresión 3D”, PROTO&GO!, [En línea]. Disponible en: https://protoandgo.com/impresion-3d/. [Consultado el 16 de marzo de 2025]."Leonardo’s submarine", Museo Galileo - Codice leicester, [En línea]. Disponible en: https://mostre.museogalileo.it/codiceleicester/en/water/50-leonardo-s-submarine. [consultado el 10 de marzo de 2025].

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

El Desarrollo del Dron se ha producido teniendo en cuenta en todo momento el uso de fabricación aditiva, de esta forma se consigue en todo momento reducir al máximo el impacto medioambiental que pueda tener el desarrollo del dron. Ya que gracias al uso de fabricación aditiva el proceso de creación del dron no resulta contaminante para el medio ambiente. También al ser un dron reutilizable se consigue de esta forma que la creación de las distintas partes del dron es reutilizable para numerosas actuaciones y usos del dron submarino. Siendo solo sustituibles las secciones en caso de daño estructural critico o querer desarrollar una nueva misión que exija la creación de una nueva pieza adaptada para está.

Continuando con las implicaciones sociales se prevé que el uso del dron pueda beneficiar a la sociedad que vive en zonas costeras. Gracias a este dron se van a poder realizar numerosos estudios e investigaciones del mar y el fondo marino de las zonas someras cercanas a costa. De forma que gracias al dron creado se podrán realizar estudios que nos den información sobre el estado del ecosistema marítimo cercano a costa, pudiendo así tomar las decisiones pertinentes para mantener estos lo más sanos y estables posibles.

Finalizando con las implicaciones económicas, el diseño y desarrollo no destaca por ser una inversión muy alta, de forma que se podrán realizar los drones necesarios sin necesidad de invertir una cantidad elevada de presupuesto, el caso de decidir subcontratar una empresa externa que fabrique los componentes del dron el coste por unidad de casco estaría comprendido entre 4000 y 5000 euros, en el caso de querer realizar una flota de drones submarinos con un elevado número de drones sería interesante contemplar la compra de una impresora 3D de grandes dimensiones para poder fabricar las piezas en la escuela naval. Para ello y considerando el coste de 39000 euros de la impresora recomendada para poder cumplir con los tamaños de impresión sin necesidad de fragmentar las piezas sería necesario disponer de una flota comprendida entre 7 y 10 submarinos para no perder dinero con la compra de la impresora en cuestión.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

La creación y desarrollo de este dron submarino pueden tener una gran repercusión en el adiestramiento de los alumnos de la escuela naval militar. Mediante este dron los alumnos podrán tener un mayor contacto con los conocimientos de construcción naval submarina y a su vez podrán comprender y experimentar con las distintas formas y tamaños de un dron buscando la eficiencia hidrodinámica.

A su vez los alumnos podrán aprovechar el dron para aumentar sus conocimientos sobre el mundo submarino, como por ejemplo en la asignatura de 5º curso Sensores Navales en los temas de sonares y acústica submarina. Mediante el dron se podrían realizar prácticas en la asignatura en las que gracias al dron fabricado los conocimientos y el entendimiento de un tema tan importante para el oficial de marina como es el mundo submarino sean mayores que sin el dron, obteniendo una mejoría tanto académica como militar de los alumnos.

A su vez el dron podrá ser usado para realizar estudios de las aguas cercanas a la escuela naval militar, alcanzando un conocimiento mayor del entorno submarino que la rodea y consiguiendo de esta forma afectar sobre el medio marino de la menor forma posible. Estudiando la variación de salinidad, temperatura y contaminación en la ría de Pontevedra a distintas profundidades y distancias de costa. Buscando obtener el conocimiento más completo posible de la ría de Pontevedra y su entorno submarino.



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)

Grado en Ingeniería Mecánica

Planos del dron.

ALUMNO: D. Rafael Viniegra de la Fuente.

DIRECTORES: Dña. Araceli Regueiro Pereira.

D. Iván Iglesias Sánchez.

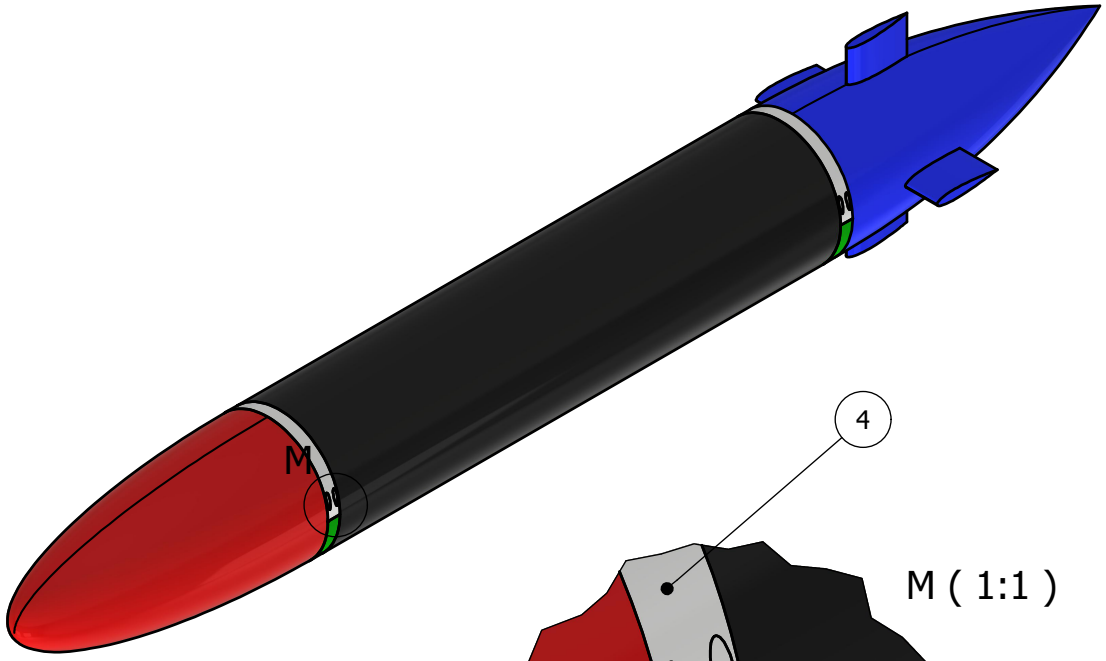
CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

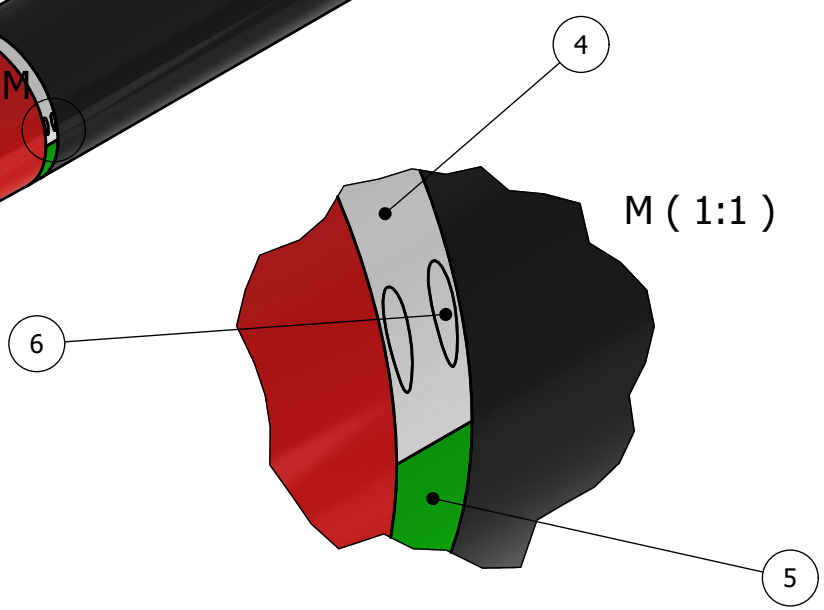
Universidade Vigo

INDICE DE PLANOS.

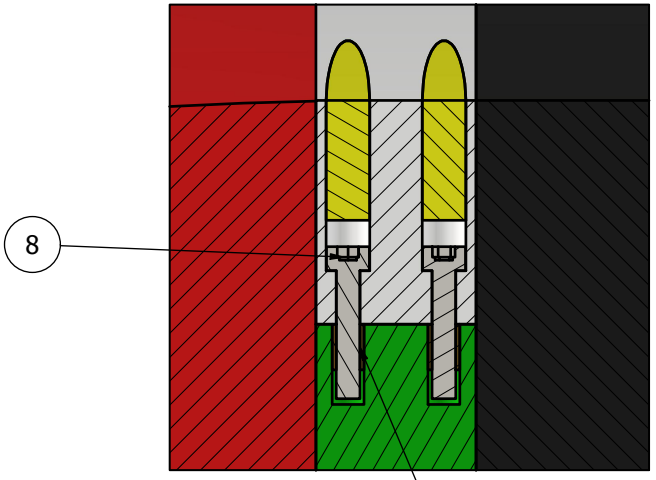
Plano de conjunto. *64*
Proa Hidrodinámica. *65*
Sección intermedia. *66*
Sección de Popa. *67*
Abrazadera superior. *68*
Abrazadera Inferior. *69*
Tapón Abrazadera. *70*

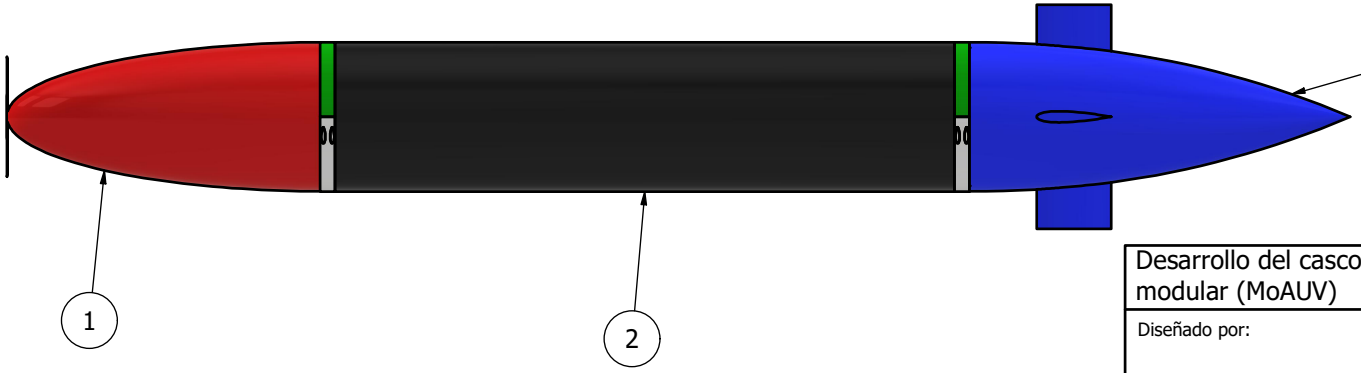
LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Sección de proa	Plastico ABS
2	1	Sección intermedia	Plastico ABS
3	1	Sección de Popa	Plastico ABS
4	2	Abrazadera Superior	Plastico ABS
5	2	Abrazadera Inferior	Plastico ABS
6	8	Tapones Abrazaderas	Plastico ABS
7	8	insertos termijables de latón	Latón
8	8	tornillos de titanio	Titanio





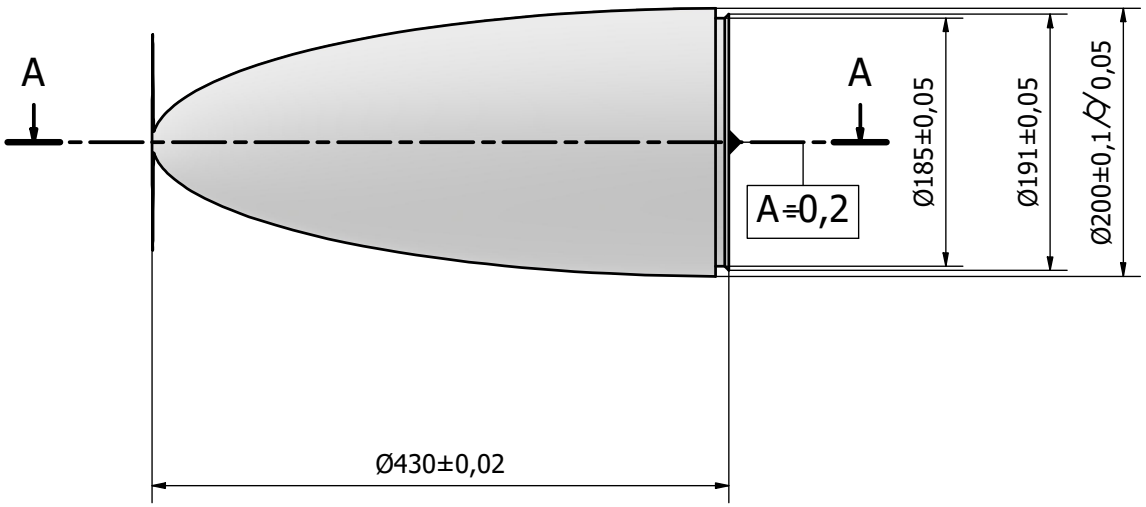
M (1:1)

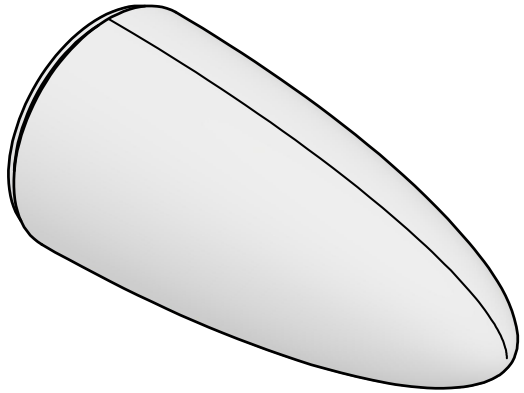


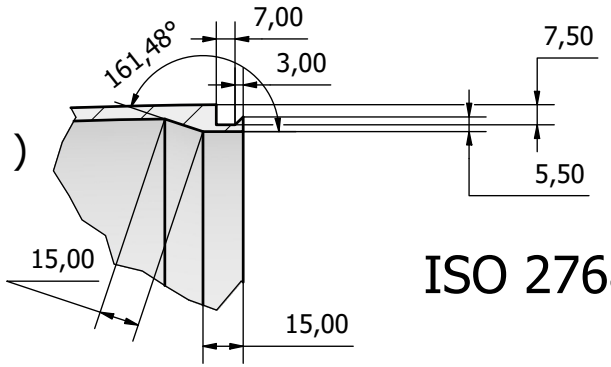


Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)		Fecha: 06/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Ensamblaje de conjunto	
	Nº de registro: 1	Material:
		Escala: 0,16 : 1

ISO 2768-mK

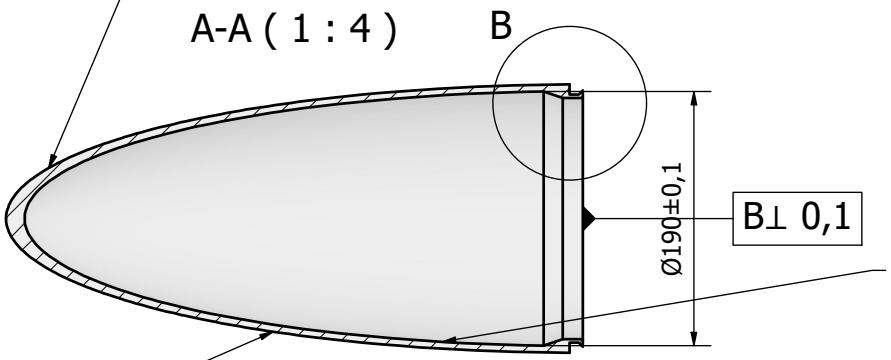






ISO 2768-fH

Ra<3.2µm

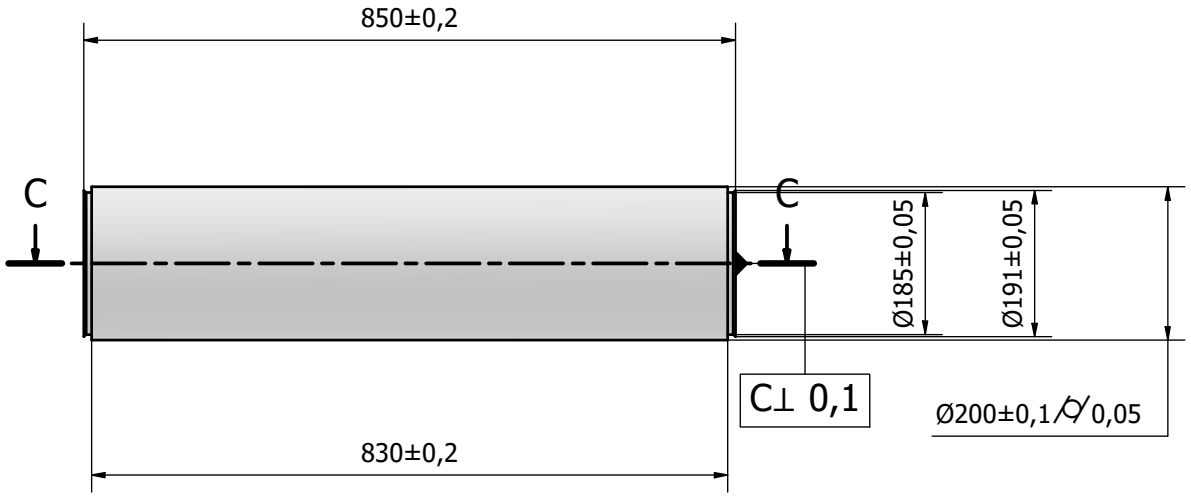


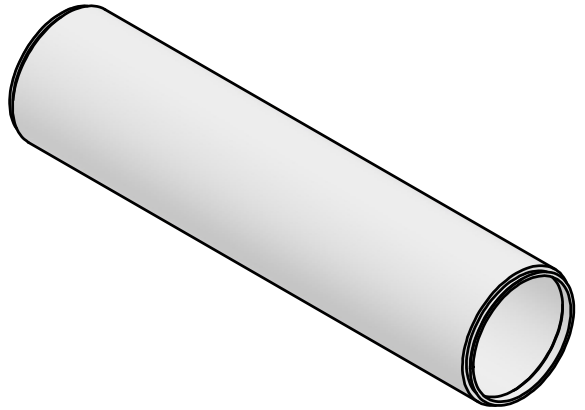
Ra<12,5µm

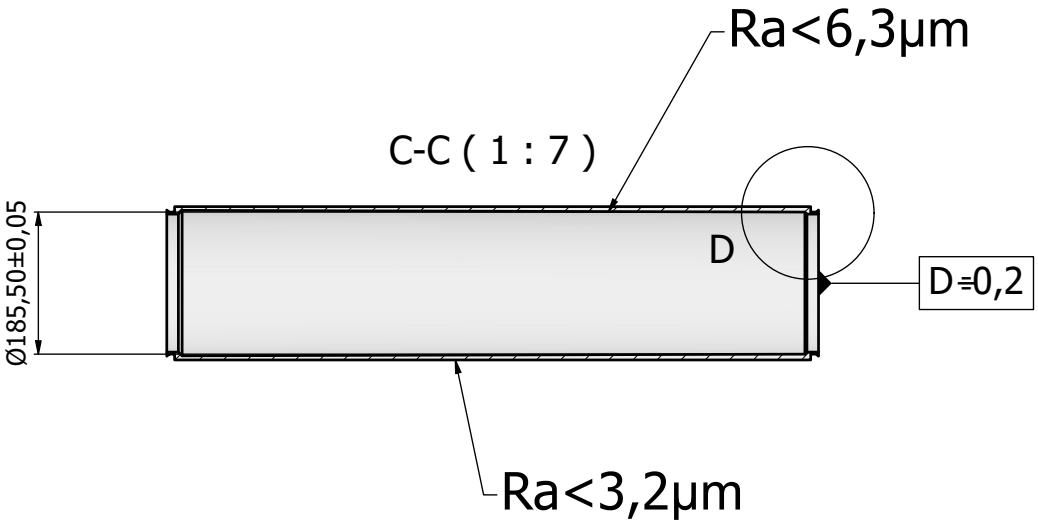
$$y(x) = \frac{200}{2} * \left(1-\left(\frac{x}{430}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}};\ -430<x<-10$$

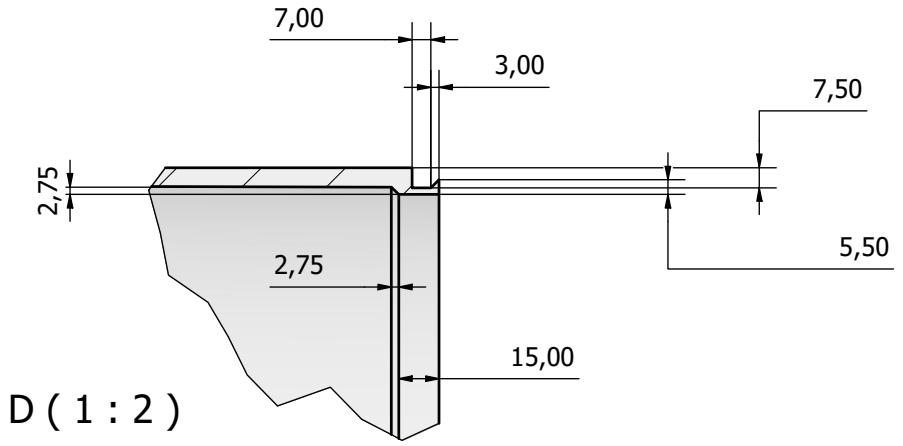
Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)			Fecha: 03/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Sección de Proa		
	Nº de registro: 2	Material: Plástico ABS	Escala: 1 : 4

ISO 2768-mK



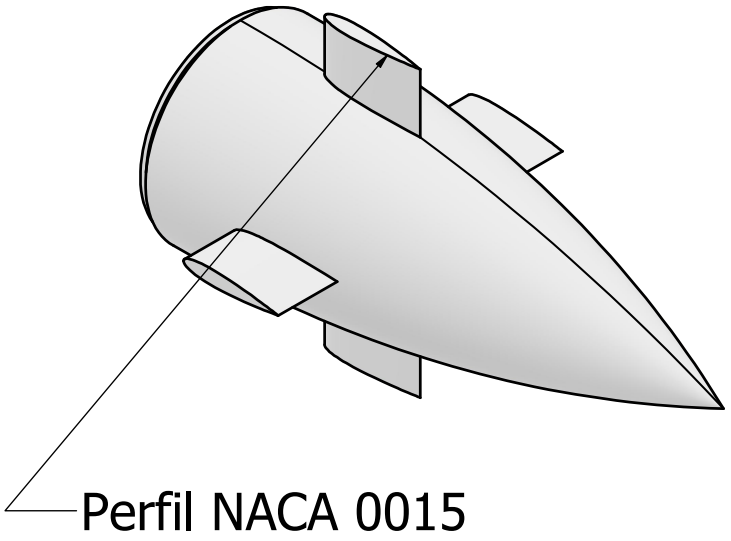


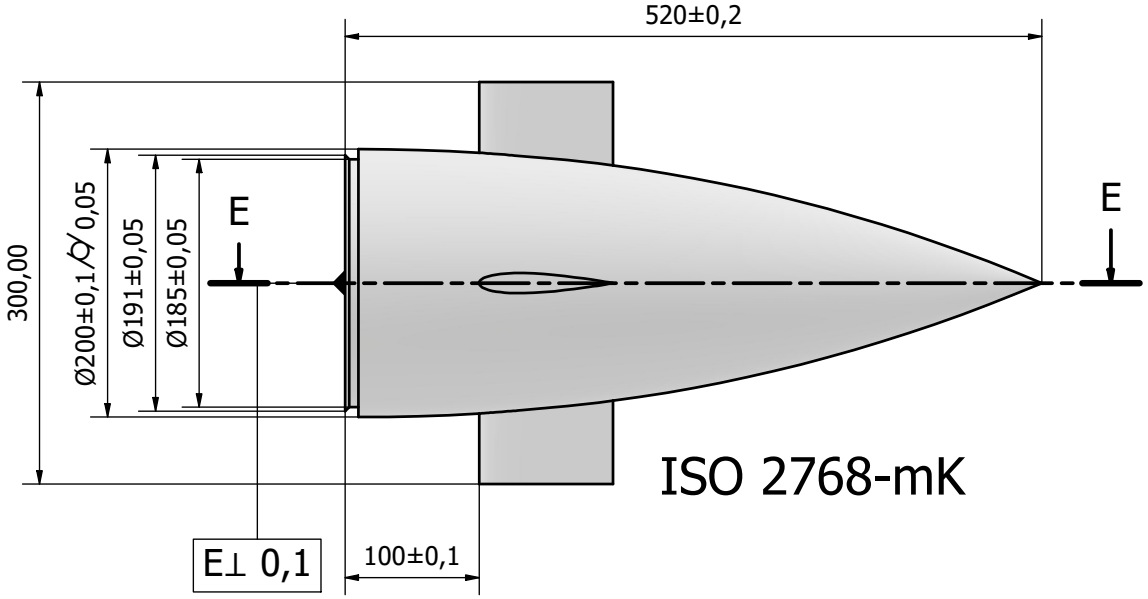




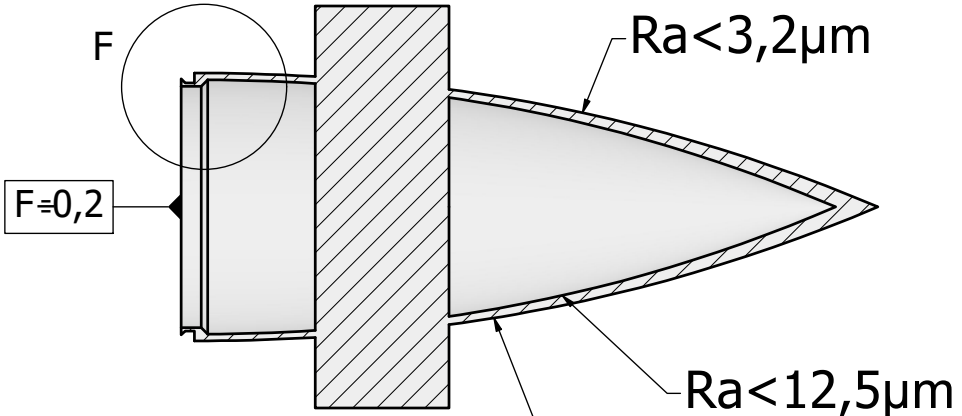
ISO 2768-fH

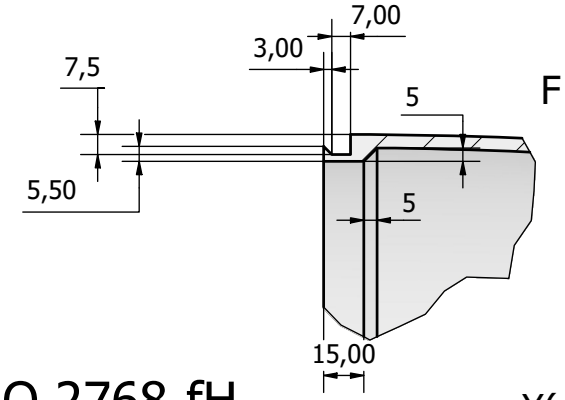
Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)			Fecha: 03/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Sección Intermedia		
	Nº de registro: 3	Material: Plástico ABS	Escala: 1 : 7





E-E (1 : 4)

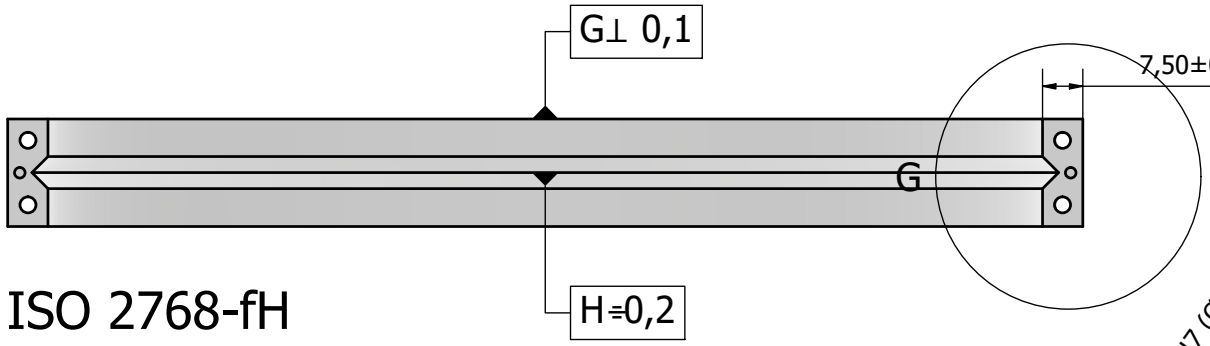




F (1 : 2)

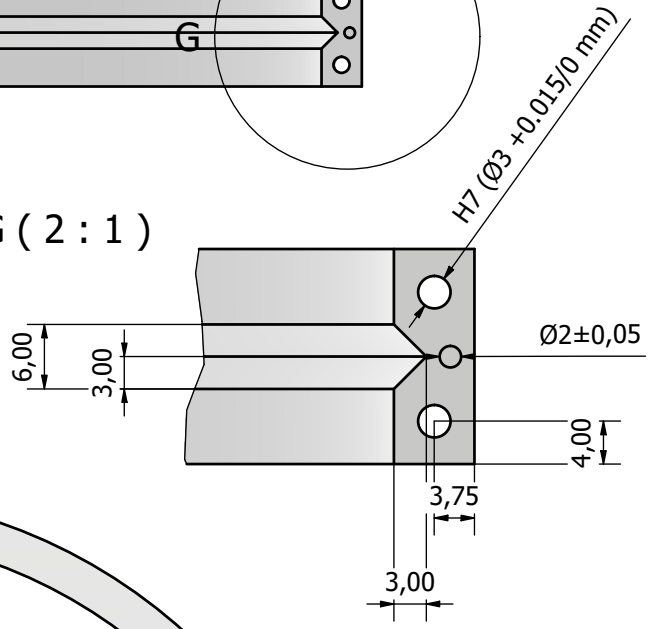
$Y(x) = \frac{200}{2} * (1-(\frac{x}{520})^{2,2}); 0<x<520$

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)			Fecha: 02/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Sección de popa		
	Nº de registro: 4	Material: Plástico ABS	Escala: 1 : 4

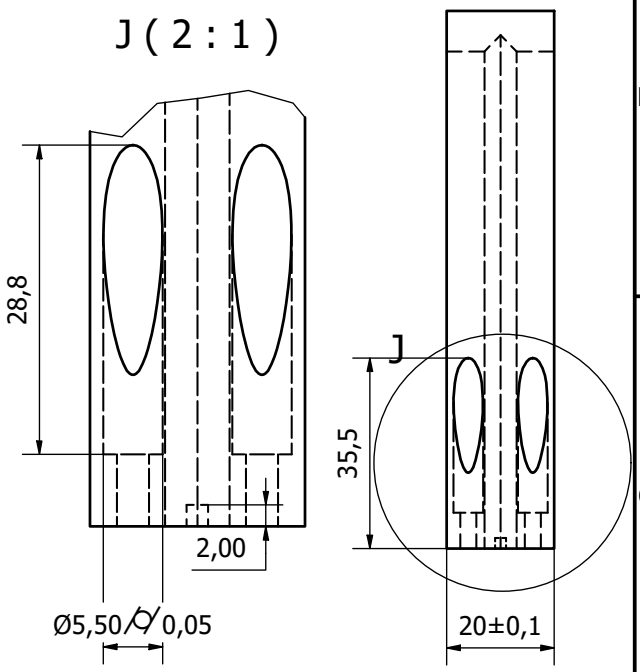


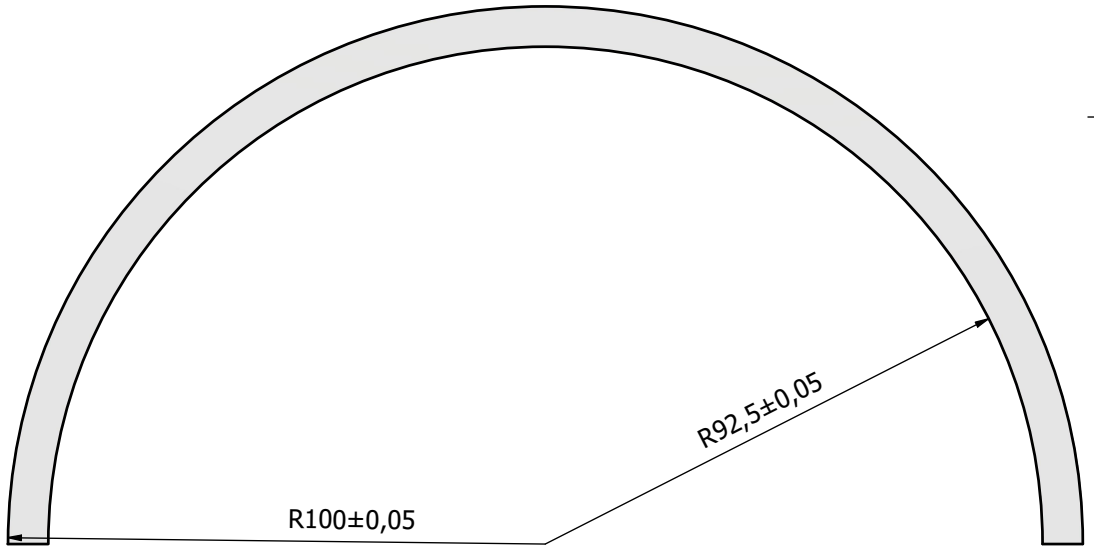
ISO 2768-fH

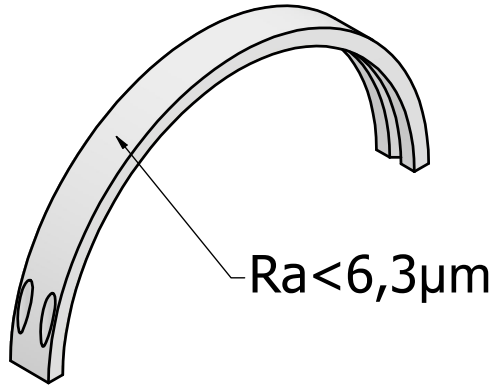
G (2 : 1)



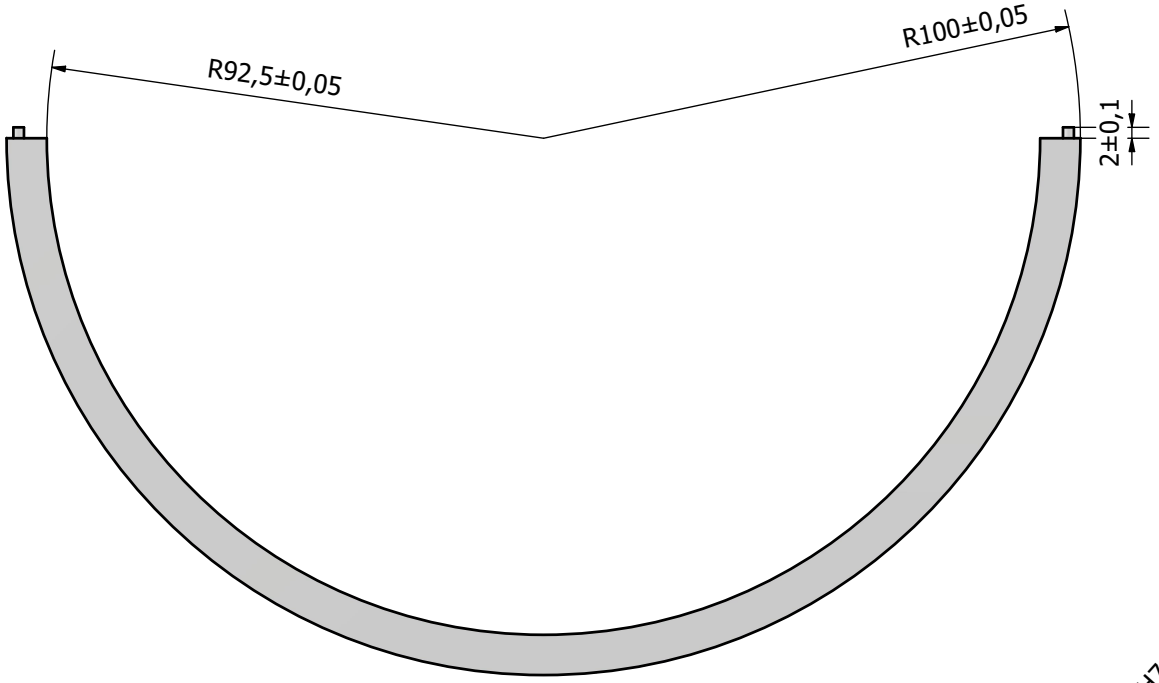
J (2 : 1)

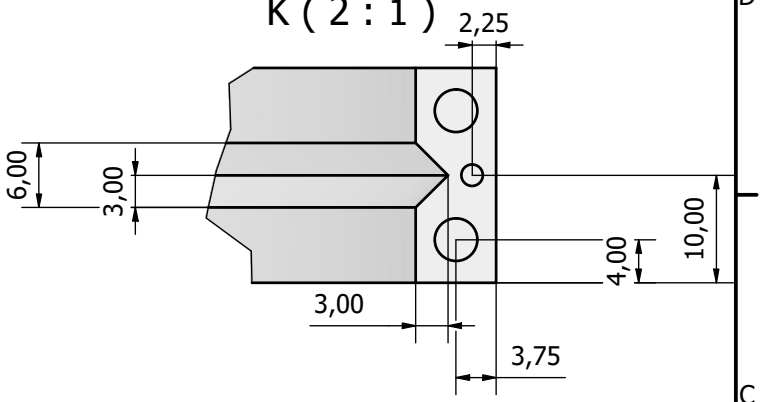


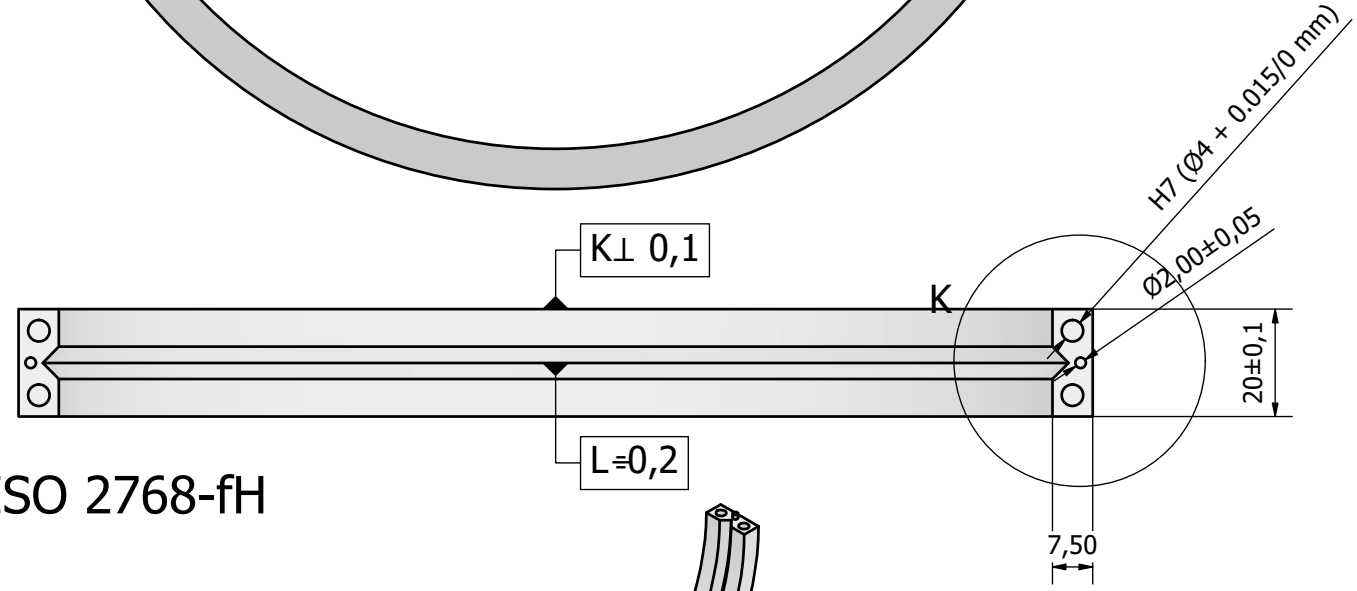


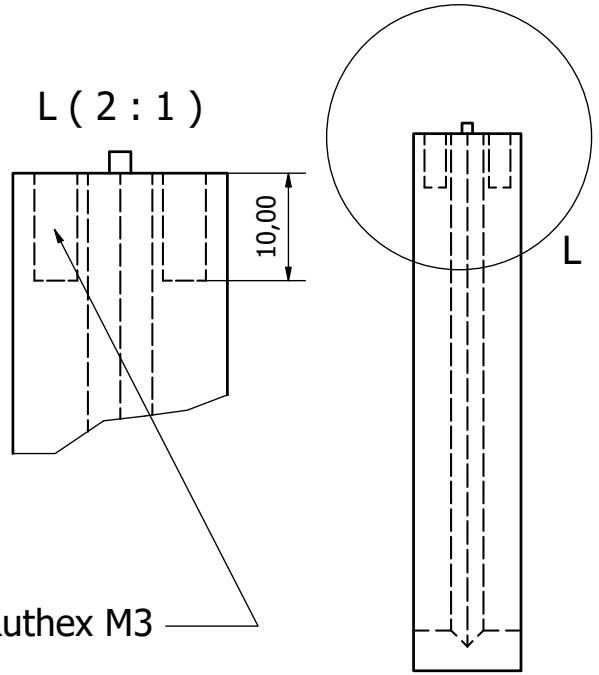


Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)			Fecha: 06/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Abrzadera Superior		
	Nº de registro: 5	Material: Plástico ABS	Escala: 1 : 1

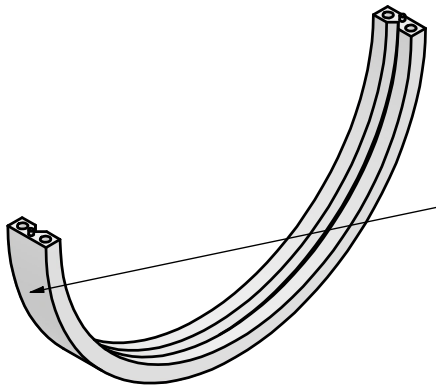








ISO 2768-fH

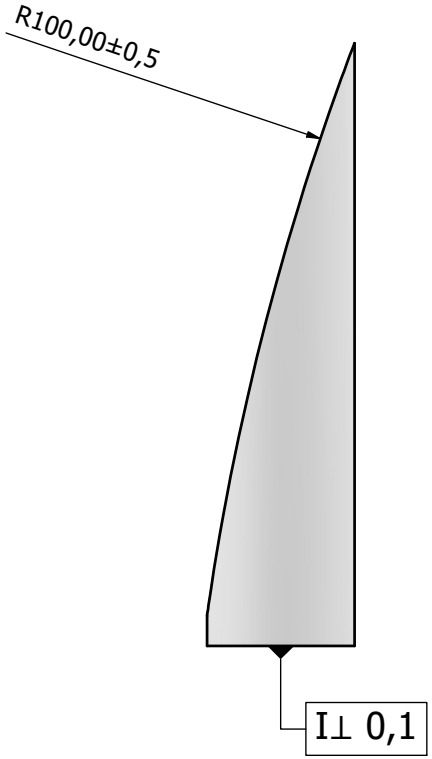


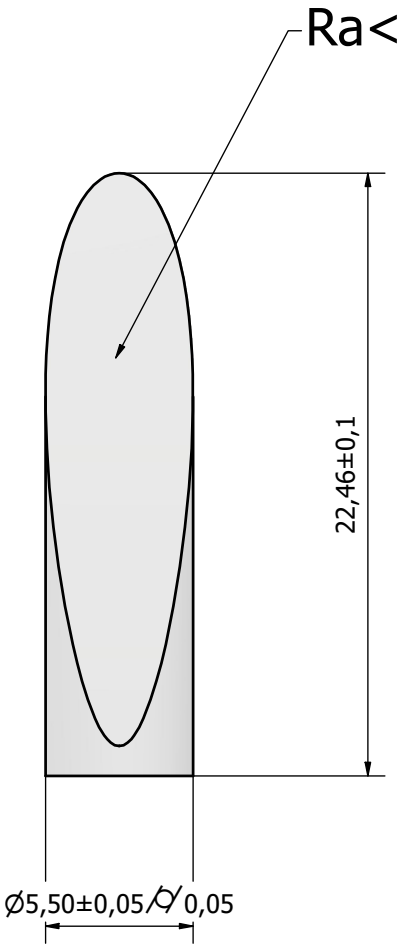
Ra<6,3µm

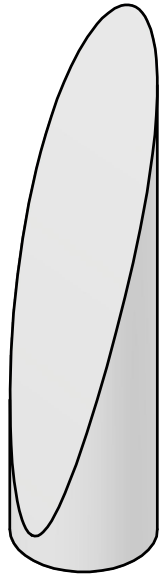
Inserto termofijado Ruthex M3

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)			Fecha: 06/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Abrazadera inferior		
	Nº de registro: 6	Material: Plástico ABS	Escala: 1:1

ISO 2768-fH







Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)				Fecha: 08/03/2025
Diseñado por: Rafael Viniegra de la Fuente	Tapón Abrazadera			
	Nº de registro: 7	Material: Plástico ABS	Escala: 5 : 1	



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)

Grado en Ingeniería Mecánica

Pliego de condiciones.

ALUMNO: D. Rafael Viniegra de la Fuente.

DIRECTORES: Dña. Araceli Regueiro Pereira.

D. Iván Iglesias Sánchez.

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universidade Vigo

INDICE PLIEGO DE CONDICIONES

1. Objetivos del contrato. 74
2. Descripción 74
3. Ubicación. 74
4. Periodo de garantía. 74
5. Especificaciones técnicas. 74
6. Formación manuales y comunicación. 75
7. Plazo de ejecución. 75
8. Forma de pago. 75

1. Objetivos del contrato.

El objetivo del presente contrato es la fabricación de un dron submarino modular (MoAUV) para el laboratorio de mecánica del centro universitario de la defensa de Marín (CUD).

2. Descripción.

El casco de él dron submarino modular está diseñado para funcionar de manera complementaria al dron, el cual actúa de forma autónoma en operaciones subacuáticas que requieren maniobrabilidad y flexibilidad. Este está diseñado para desarrollar misiones de inspección, investigación y exploración subacuática. Gracias a su modularidad es posible adaptar el dron con distintos módulos necesarios para la misión a desarrollar.

El diseño del casco del dron ha sido desarrollado mediante Auotdesk inventor profesional, asegurando en todo momento que la geometría del casco cumple con criterios hidrodinámicos, maximizando su eficiencia energética y su maniobrabilidad. El dron está diseñado para operar a una velocidad máxima de 5 nudos y una profundidad media de 10 metros.

El caso está preparado para su fabricación mediante tecnologías de fabricación aditiva, permitiendo la producción de la estructura diseñada para ser ligera, resistente y de alta precisión dimensional. Gracias a esta tecnología se asegura la optimización del diseño del casco en su exterior y en su interior para así poder albergar en su interior los componentes del casco de presión ya fabricado.

Este deberá cumplir con los requisitos de resistencia y seguridad necesarios para el uso en el entorno marino. Asegurando la resistencia ante la corrosión, posibles impactos y la presión de operación esperada. El casco deberá ajustarse a las especificaciones más definidas en el punto 5 de este documento.

3. Ubicación.

El casco será entregado en el laboratorio de mecánica del Centro Universitario de la Defensa (CUD) en Marín, dentro de la Escuela Naval Militar

4. Periodo de garantía.

El periodo de garantía será de 1 año desde la fecha del acta de recepción del suministro. Durante este periodo la empresa adjudicaría se encargará de reponer todo aquello que se declarara defectuoso y realizar un plan de mantenimiento anual sin cargo alguno.

5. Especificaciones técnicas.

El suministro objeto de este expediente dispondrá de todas las características que se describen a continuación. Las empresas licitadoras deberán incluir en la documentación administrativa la descripción técnica del suministro ofertado que acredite el cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos en este pliego. Esta documentación no será objeto de valoración, pero se comprobará que se cumplen los requisitos aquí recogidos. La comprobación de su contenido permitirá excluir del procedimiento a aquellas empresas que no cumplan con lo requerido y, por lo tanto, presenten una oferta no válida. Las exclusiones serán motivadas y se recogerán en el resultado de la apertura del procedimiento llevada a cabo:

<u>Características técnicas generales:</u>

- Fabricación del casco hidrodinámico de un dron submarino modular mediante tecnología de impresión 3D.

- Material de impresión: plástico ABS apto para aplicaciones marinas y resistente a la corrosión en agua salada.
- Casco hueco en su interior para alojar un casco de presión adicional, conforme a diseño proporcionado.
- Largo total del casco: 1,8 metros.
- Diámetro exterior del casco: 0,2 metros.
- Diámetro interior del casco: 0,19 metros.
- Punto máximo de ancho: 0,3 metros en la zona de las superficies de sustentación.
- Peso total de la pieza: 6,694 kilogramos.
- Fabricación de acuerdo con el archivo de diseño 3D entregado (formato Autodesk Inventor).
- La empresa adjudicataria podrá seleccionar la tecnología de impresión 3D más adecuada (FDM, SLS, SLA, etc.) siempre que garantice la calidad final y cumpla con las especificaciones requeridas.
- Entrega de la piezas completamente impresas y post-procesadas (incluyendo acabados superficiales y eliminación de soportes).

Seguridad y normativa:

- El casco deberá cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad en ambientes marinos y corrosivos, apto para operación en agua salada.
- Cumplimiento de normativas aplicables al entorno marino y a componentes estructurales sumergibles (ej. normativa ISO o similar para componentes náuticos).
- El diseño incluye requisitos de hidrodinámica, flotabilidad y anclaje, ya incorporados en el modelo 3D facilitado.

Tamaño y peso:

- Peso total inferior a 7 kilogramos (6,694 kg).
- Dimensiones máximas:
    - Largo: 1,8 metros.
    - Diámetro exterior: 0,2 metros (0,3 metros en el punto más ancho).

6. Formación manuales y comunicación.

La comunicación con el proveedor deberá realizarse en idioma español. El licitador deberá incluir un plan de formación que se llevará a cabo tras la entrega y verificación del casco fabricado y post-procesado. La formación estará dirigida al personal responsable de la integración y uso del casco dentro del sistema modular del dron.

El plan de formación deberá contemplar la entrega de los manuales de uso, manual técnico y de mantenimiento del producto en idioma español, incluyendo instrucciones específicas sobre manipulación, instalación y mantenimiento en entorno marino.

El servicio de mantenimiento y soporte técnico deberá ser prestado directamente por el fabricante o por una empresa distribuidora autorizada y acreditada por el fabricante, que disponga de sede y CIF en España.

7. Plazo de ejecución.

El plazo de ejecución del contrato será de 10 semanas y no se considera la posibilidad de prórroga.

8. Forma de pago.

El 100% del pago será tras el suministro, instalación, puesta a punto del equipamiento, impartición de los cursos de formación, comprobación del correcto funcionamiento y firma del acta de recepción del suministro."



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Desarrollo del casco de un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV)

Grado en Ingeniería Mecánica

Presupuesto.

ALUMNO: D. Rafael Viniegra de la Fuente.

DIRECTORES: Dña. Araceli Regueiro Pereira.

D. Iván Iglesias Sánchez.

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universidade Vigo

A continuación, vamos a estudiar el presupuesto de fabricación del dron submarino estimado de la Primero vamos a estudiar el precio aproximado de construcción del casco submarino. Para ello vamos a dividir el presupuesto en tres partes, costes materiales, recursos humanos y coste de subcontratación.

Costes materiales.

Precio material impresión 3D (ABS)	30 € / Kg
Peso dron submarino	6,694 kg
Coste total material de impresión	200,82 €
Tornillos mecanismo de unión	4,10 € / uds
Cantidad tornillos de unión	8 tornillos
Precio total tornillos	32,8 €
Insertos termofijables	9,14 €
Precio total materiales	242,76 €

Continuando con los recursos humanos usados para el diseño del casco, solo existe un gasto en este aspecto y es el total de horas trabajadas para el diseño y desarrollo del proyecto.

Recursos humanos.

Precio / hora de trabajo	30 € / hora
Total de horas trabajadas	320 horas
Precio total recursos humanos	9.600 €

Como se ha decidido la subcontratación para construir el casco submarino esto introduce un nuevo gasto en el presupuesto. Está se ha decidido por el gran tamaño de las piezas y la calidad de fabricación de estas para su correcto funcionamiento. Una posibilidad de empresa nacional a subcontratar es PROTOANDGO [52].

Costes subcontratación.

Coste tiempo impresión	60 € / hora
Tiempo estimado de impresión	45 horas
Coste impresión del dron	2.700 €
Post-procesado del casco	600 €

Precio total subcontratación.	3.300 €

Una vez obtenidos todos los presupuestos necesarios por separado para el diseño y fabricación del dron submarino podemos obtener el presupuesto final para ello.

Presupuesto final.

Coste total del dron.	13.142,76 €