



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un módulo de propulsión para un MoAUV

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Casais Fernández Ulyses

DIRECTORES: Regueiro Pereira Araceli

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de un módulo de propulsión para un MoAUV

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

Este Trabajo Fin de Grado se centra en el diseño, fabricación y validación de un módulo de propulsión para un vehículo submarino autónomo modular (MoAUV). El objetivo principal ha sido desarrollar un sistema funcional, fabricable mediante impresión 3D, que integre todos los componentes necesarios para la propulsión del vehículo en entornos marinos. El diseño se llevó a cabo con Autodesk Inventor, mientras que la preparación para impresión y generación de G-CODE se realizó en Bambu Studio, utilizando como material plástico ASA debido a su resistencia mecánica y durabilidad en agua salada.

El módulo está compuesto por un cuerpo estructural, un alma interna de refuerzo, una hélice T200 carenada y aletas fijas basadas en el perfil NACA 0012. Se realizaron simulaciones estructurales para validar la resistencia del conjunto frente a fuerzas hidrodinámicas y presión hidrostática, alcanzando factores de seguridad adecuados en todos los componentes tras ciertas optimizaciones de diseño.

Las piezas fueron impresas en la Bambu Lab P1P y se realizó un montaje parcial en laboratorio para verificar la viabilidad del ensamblaje. El resultado ha sido un diseño modular, ligero, económico y listo para futuras ampliaciones, como la integración de sistemas de maniobra o su fabricación en aluminio mediante mecanizado CNC.

PALABRAS CLAVE

Diseño modular, CAD, Modular Autonomous Underwater Vehicle.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera dedicar unas palabras de agradecimiento a todas las personas que, de una forma u otra, han estado presentes durante estos años y han hecho posible la realización de este Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, a mi familia, por su apoyo incondicional, por creer en mí incluso en los momentos más difíciles y por estar siempre ahí, acompañándome en cada paso del camino. Sin su paciencia, comprensión y ánimo constante, el paso por la Escuela Naval Militar hubiese sido mucho más difícil.

También quiero agradecer a los oficiales que me han acompañado durante estos cinco años de formación. Su experiencia, exigencia y dedicación han sido fundamentales para mi desarrollo tanto académico como personal, y me llevo con orgullo las enseñanzas recibidas a lo largo de este tiempo.

En especial, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la profesora Doña Araceli Regueiro, por su disponibilidad, cercanía y la ayuda prestada en este tramo final del proyecto. Su guía y apoyo han sido clave para poder concluir este trabajo con éxito.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura del trabajo	8
2 Estado del arte	10
2.1 Introducción	10
2.1.1 Vehículos autónomos submarinos	10
2.1.2 Fuerzas que actúan sobre un submarino	10
2.1.3 La propulsión acuática	10
2.1.4 Herramientas de diseño y análisis.....	10
2.1.5 Fabricación aditiva mediante impresión 3D	10
2.2 Vehículos autónomos submarinos	10
2.3 Fuerzas que actúan sobre un submarino	11
2.4 Propulsión submarina.....	11
2.5 Entorno de diseño, preparación y análisis.....	14
2.5.1 Autodesk Inventor	14
2.5.2 Bambu Studio	15
2.6 Fabricación aditiva mediante impresión 3D	15
3 Desarrollo del TFG.....	16
3.1 Introducción	16
3.2 Módulo de propulsión. Hélice de tobera	16
3.3 Requerimientos	17
3.3.1 Requerimientos estructurales	17
3.3.2 Requerimientos funcionales.....	17
3.4 Fase inicial	17
3.5 Solicitaciones	19
3.5.1 Resistencia al avance	19
3.5.2 Sustentación de las aletas.....	20
3.5.3 Corriente lateral	20
3.5.4 Empuje hidrostático	21
3.5.5 Presión hidrostática.....	21

3.5.6 Fuerza ejercida sobre los tornillos	22
3.6 Diseño	23
3.6.1 Cuerpo estructural.....	23
3.6.2 Alma interna de refuerzo	26
3.6.3 Aletas	28
3.7 Material	30
3.7.1 Acrilonitrilo Estireno Acrilato	31
3.7.2 Metil Etil Cetona.....	31
3.8 Impresión 3D.....	32
3.8.1 Cuerpo estructural	32
3.8.2 Alma interna de refuerzo	36
3.8.3 Aletas	38
3.9 Ensamblaje	40
4 Resultados / Validación / Prueba.....	42
4.1 Introducción	42
4.2 Análisis estructural.....	42
4.2.1 Tensión de Von Mises	43
4.2.2 Coeficiente de seguridad.....	43
4.2.3 Desplazamiento.....	43
4.3 Pruebas de ensamblaje y validación física	44
4.4 Presupuesto	46
5 Conclusiones y líneas futuras	48
5.1 Introducción	48
5.2 Conclusiones por objetivos	48
5.2.1 Desarrollar un Estado del Arte	48
5.2.2 Diseñar el módulo de propulsión	48
5.2.3 Fabricación mediante impresión 3D	49
5.3 Líneas futuras	50
5.3.1 Incorporación de maniobrabilidad	50
5.3.2 Fabricación en aluminio 5083	50
6 Bibliografía.....	51
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	53
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	54
Anexo III: TABLA NACA.....	55
Anexo IV: PLANOS	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Cuarta revolución[1].....	7
Figura 1-2 MoAUV modular[2]	8
Figura 2-1 Clase Le Triomphant.[9].....	13
Figura 3-1 Hélice T200. (autoría propia)	18
Figura 3-2 Boceto del cuerpo. (autoría propia)	24
Figura 3-3 Cuerpo con agujeros para fijar la hélice. (autoría propia)	25
Figura 3-4 Alma estructural. (autoría propia).....	26
Figura 3-5 Cuerpo con el alma. (autoría propia)	27
Figura 3-6 Boceto de los discos del alma. (autoría propia).....	27
Figura 3-7 Boceto del perfil NACA. (autoría propia)	29
Figura 3-8 Aleta extruída entera. (autoría propia).....	29
Figura 3-9 Aleta dividida (autoría propia)	30
Figura 3-10 Primera mitad del cuerpo, Bambu Studio (autoría propia).....	33
Figura 3-11 Primera mitad del cuerpo impresa (autoría propia)	34
Figura 3-12 Segunda mitad del cuerpo, Bambu Studio (autoría propia).....	35
Figura 3-13 Segunda mitad del cuerpo impresa con la hélice acoplada (autoría propia).....	35
Figura 3-14 Cuerpo estructural con la hélice (autoría propia)	36
Figura 3-15 4 discos en la base de impresión (autoría propia).....	36
Figura 3-16 Disco integrado (autoría propia).....	37
Figura 3-17 Disco en base de impresión (autoría propia)	37
Figura 3-18 Aleta principal (autoría propia)	38
Figura 3-19 Una de las aletas secundarias en la impresora (autoría propia).....	39
Figura 3-20 Aleta principal unida (autoría propia).....	40
Figura 3-21 Aleta secundaria (autoría propia)	40
Figura 3-22 Piezas impresas (autoría propia).....	41
Figura 3-23 Cuerpo con aleta superior y principal (autoría propia).....	41
Figura 4-1 Tensión de Von Mises (autoría propia)	43
Figura 4-2 Desplazamiento máximo (autoría propia)	44
Figura 4-74-3 Aleta principal (autoría propia)	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Propiedades de materiales (autoría propia).....	31
---	----

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este apartado se va a presentar el proyecto que se va a realizar: el diseño del módulo de propulsión de un dron submarino. Además, se procederá a explicar los antecedentes que han dado lugar al desarrollo de este trabajo, así como a especificar el objetivo principal, y aquellas tareas secundarias que se pretenden alcanzar.

1.1 Antecedentes

La irrupción de la Cuarta Revolución Industrial (Figura 1-1) ha transformado profundamente el enfoque productivo y tecnológico de múltiples sectores. Este nuevo paradigma, impulsado por la digitalización, la automatización y la interconexión, ha motivado a numerosas empresas a adaptarse y liderar el cambio. Entre ellas destacan compañías tecnológicas, aunque la transformación alcanza también ámbitos estratégicos como la defensa.

En este contexto, la Armada Española ha iniciado un proceso de modernización tecnológica, con la colaboración de empresas como Navantia, Seadrone o Marine Instruments. El objetivo es integrar soluciones innovadoras que mejoren sus capacidades operativas, entre las cuales se encuentran los vehículos submarinos autónomos.



Figura 1-1 Cuarta revolución[1]

Los Modular Autonomous Underwater Vehicles (MoAUVs) han adquirido protagonismo en aplicaciones de investigación, inspección submarina y operaciones militares. Estos dispositivos, caracterizados por su tamaño reducido, autonomía y eficiencia energética, plantean un desafío importante para la ingeniería: desarrollar diseños compactos, funcionales y económicamente viables. En particular, el sistema de propulsión representa un componente clave que condiciona directamente el rendimiento del vehículo.

A lo largo de las últimas décadas, el diseño de sistemas de propulsión submarinos ha avanzado significativamente gracias a mejoras en la propulsión eléctrica, la hidrodinámica y los sistemas de control. Sin embargo, en el caso de los MoAUVs, las limitaciones de espacio y energía exigen soluciones innovadoras y altamente optimizadas. Entre las tecnologías emergentes se encuentran los propulsores biomiméticos y los sistemas de análisis mediante dinámica de fluidos computacional (CFD), que permiten prever el comportamiento del sistema antes de su fabricación.



Figura 1-2 MoAUV modular[2]

Además, el diseño moderno debe tener en cuenta la sostenibilidad y la eficiencia energética, reduciendo al máximo el impacto en el entorno marino sin comprometer la funcionalidad. En este proyecto se aborda el diseño de un módulo de propulsión para un MoAUV Figura 1-2 que combine compacidad, eficiencia hidrodinámica y adaptabilidad a distintos escenarios operativos, mediante el uso de tecnologías avanzadas y simulación computacional.

1.2 Objetivos

En el título se establece el objetivo final del trabajo, diseñar el módulo de propulsión de un micro submarino. La prioridad máxima durante el desarrollo del proyecto es diseñar un conjunto funcional, que se pueda incorporar en el prototipo del MoAUV existente en el laboratorio.

Para ello se pueden establecer tres puntos clave, que se desean conseguir a la hora de desarrollar el Trabajo de Fin de Grado.

1. Llevar a cabo un Estado del Arte sobre los MoAUV y los avances tecnológicos destacables de los últimos años.
2. Diseñar el módulo de propulsión para el MoAUV que se encuentra en el laboratorio.
3. Lograr un prototipo funcional y económico que se obtendrá mediante impresión 3D.

1.3 Estructura del trabajo

Habiendo introducido el proyecto:

1. Sección 2: se desarrollará el Estado del Arte en el cual se estudiará el entorno en el que se trabaja: el mundo de la guerra antisubmarina por la aplicación del micro submarinos en la Armada; los vehículos no tripulados, los vehículos autónomos submarinos.
2. Sección 3: se procederá a desarrollar el prototipo del módulo de propulsión de este TFG, centrándose en los diseños planeados, la elección de materiales y la construcción.
3. Sección 4: se presentarán los resultados obtenidos, la validación de estos y las pruebas que

- se han hecho para tal fin.
4. Sección 5: se presentarán las Conclusiones y las Líneas Futuras del trabajo realizado para futuras investigaciones y proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este apartado se van a estudiar aquellos campos que giran en torno al proyecto, desde el medio en el que surge, hasta la tecnología sobre la que trabaja. Para ello se van a desarrollar los siguientes temas:

2.1.1 Vehículos autónomos submarinos

Una introducción a los vehículos específicos que trabajan bajo la superficie marítima.

2.1.2 Fuerzas que actúan sobre un submarino

Explicación de las fuerzas que aparecen en un submarino cuando este se encuentra realizando su navegación.

2.1.3 La propulsión acuática

Explicación de los distintos tipos de propulsión submarina existentes.

2.1.4 Herramientas de diseño y análisis

Introducción de la herramientas digitales en la ingeniería.

2.1.5 Fabricación aditiva mediante impresión 3D

Introducción a la técnica de impresión 3D.

2.2 Vehículos autónomos submarinos

Se empieza con el desarrollo de los vehículos autónomos submarinos (AUV, por sus siglas en inglés). Representan un avance significativo en el ámbito de la ingeniería oceánica y la exploración de los entornos acuáticos. Estos dispositivos, diseñados para operar sin intervención humana directa, surgieron como una evolución natural de las tecnologías de vehículos submarinos no tripulados. Sus orígenes se remontan a mediados del siglo XX, cuando se buscaban nuevas formas de explorar el océano más allá de las capacidades humanas.

Uno de los primeros antecedentes documentados fue el desarrollo del vehículo AUTECH I por la Universidad de Washington a principios de los años 1960. Este fue uno de los primeros prototipos capaces de navegar de forma programada bajo el agua sin conexión directa con la superficie [3]. Más adelante, en los años 1970 y 1980, instituciones como el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y el Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) desarrollaron los AUVs 'EAVE' y 'ABE', sentando las bases de los sistemas modernos.

Durante las últimas décadas, los AUV han evolucionado considerablemente tanto en autonomía como en capacidades de navegación y recolección de datos. Esta evolución ha sido impulsada por avances en sensores acústicos, sistemas de navegación inercial (INS) y algoritmos de control adaptativo, lo que ha permitido realizar misiones prolongadas a grandes profundidades. Además, el diseño modular ha permitido desarrollar los denominados MoAUV (Modular Autonomous Underwater Vehicles), sistemas que facilitan la adaptación del vehículo a múltiples misiones mediante la incorporación de módulos funcionales intercambiables.

En la actualidad, los AUV se utilizan en una gran variedad de aplicaciones: mapeo del lecho marino, vigilancia de infraestructuras submarinas, detección de minas, investigación climática y operaciones militares encubiertas. Su capacidad para operar en condiciones extremas sin riesgo humano los ha consolidado como herramientas imprescindibles en el estudio y control del entorno marino.

2.3 Fuerzas que actúan sobre un submarino

Pasando ahora a analizar las fuerzas que actúan sobre los vehículos marinos. Los vehículos sumergibles están sometidos a múltiples fuerzas que determinan su comportamiento estructural, estabilidad y maniobrabilidad. La comprensión de estas fuerzas es fundamental para su diseño:

1. Presión hidrostática: Es la fuerza ejercida por el agua sobre la superficie del vehículo, proporcional a la profundidad. Aumenta con la densidad del agua y afecta al diseño del casco [4].

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

2. Resistencia al avance: Incluye fricción viscosa y resistencia por forma. Se modela mediante coeficientes de arrastre (C_d), y se calcula según la velocidad, forma del casco y rugosidad [4].

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

3. Fuerza de flotación: Conforme al principio de Arquímedes, actúa verticalmente hacia arriba sobre el volumen desplazado. La flotabilidad neutra es deseable en AUVs para evitar correcciones constantes[4].

$$F_b = \rho \cdot g \cdot V_s$$

4. Fuerza de sustentación: Se genera principalmente por las aletas estabilizadoras. Es una fuerza fundamental para el control vertical y la maniobrabilidad del vehículo durante la navegación. Su magnitud depende del perfil hidrodinámico de las superficies, su ángulo de ataque, la velocidad del flujo y la densidad del fluido[4].

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot A \cdot v^2$$

5. Corrientes laterales: Generan cargas transversales sobre la estructura, afectando la estabilidad y el control del vehículo. Se modelan como cargas de viento adaptadas al entorno acuático [4].

$$F_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A_{lat} \cdot V_c^2$$

6. Empuje de hélice: Es la fuerza generada para contrarrestar la resistencia. Depende de la potencia del motor, eficiencia propulsiva y geometría de la hélice [4].

2.4 Propulsión submarina

Una vez explicado las fuerzas a las que se ve sometido un vehículo que tiene como medio de funcionamiento el acuático, se procede a la explicación de los distintos métodos de generación de empuje existentes. La propulsión submarina es el sistema encargado de generar el desplazamiento de un vehículo bajo el agua. A diferencia de la propulsión aérea o terrestre, el entorno subacuático impone desafíos como la alta densidad del medio y la necesidad de eficiencia energética y sigilo[5].

1. Hélice convencional : La propulsión por hélice convencional es el método más ampliamente utilizado en vehículos submarinos, tanto tripulados como no tripulados. Este sistema convierte la energía mecánica proporcionada por un motor en empuje, mediante la rotación de una hélice que genera una diferencia de presión en el agua circundante, impulsando así el vehículo hacia adelante.

Las hélices convencionales están compuestas por varias palas unidas a un cubo central, y su diseño puede variar en cuanto al número de palas, diámetro, paso y perfil, dependiendo de los requisitos específicos de la embarcación. Un diseño óptimo de la hélice es crucial para maximizar la eficiencia propulsiva y minimizar fenómenos indeseados como la cavitación.

La cavitación es un fenómeno que ocurre cuando la presión local en el lado de succión de la pala de la hélice cae por debajo de la presión de vapor del agua, formando burbujas de vapor. Estas burbujas pueden colapsar violentamente, causando ruido, vibraciones y potencial daño por erosión en las palas de la hélice . Además, la cavitación aumenta la detectabilidad acústica del submarino, un aspecto crítico en operaciones militares[6].

Para mitigar la cavitación, se emplean diseños de hélices con palas “high-skew” y palas con aletas en las puntas (tip fins), que ayudan a distribuir la carga de manera más uniforme y retrasar la aparición de cavitación[7].

La eficiencia de una hélice convencional depende de múltiples factores, incluyendo el coeficiente de empuje, el coeficiente de torque y el número de Reynolds. Estudios han demostrado que modificaciones en el diseño, como la incorporación de aletas en las puntas de las palas, pueden mejorar la eficiencia hidrodinámica y reducir la cavitación.

2. Hélice con tobera: Este sistema de propulsión, también denominado *ducted propeller* o sistema con tobera Kort, consiste en una hélice rodeada por un conducto anular de perfil hidrodinámico[8]. Esta configuración modifica el comportamiento del flujo alrededor de las palas, generando una aceleración controlada del fluido que atraviesa el sistema y optimizando el empuje generado por la hélice.

El concepto fue introducido por Ludwig Kort en 1934, y desde entonces ha sido ampliamente empleado tanto en embarcaciones de superficie como en vehículos submarinos. Su aplicación en entornos subacuáticos resulta especialmente útil en situaciones donde se requiere un empuje sostenido a baja velocidad, así como en configuraciones que exigen una mayor protección de la hélice o una reducción de la cavitación.

En el ámbito submarino, este tipo de propulsión ha sido adoptado en modelos avanzados como los submarinos de la clase *Le Triomphant*, el de la Figura 2-1, en los que se emplea un sistema de hélice bomba carenada para reducir la firma acústica y mejorar la eficiencia en régimen de crucero.



Figura 2-1 Clase Le Triomphant.[9]

3. Propulsión hidrojet: Esta sistema de propulsión, también conocido como *water jet propulsion* o sistema *pump-jet*, es una alternativa a los sistemas de hélice convencionales, especialmente valorada por su bajo nivel de ruido y alta maniobrabilidad. Este tipo de propulsión se basa en la expulsión de agua a alta velocidad a través de una tobera, generando empuje según el principio de acción y reacción de Newton. El sistema funciona mediante una bomba que succiona agua desde una toma ubicada en la parte inferior del vehículo, acelera el fluido mediante un impulsor interno y lo expulsa por una tobera orientable situada en la parte posterior[10].

Este tipo de configuración permite un control muy preciso del movimiento, ya que la orientación de la tobera puede ajustarse para dirigir el flujo de salida, lo que facilita maniobras complejas como giros cerrados, inversión de marcha o navegación en espacios reducidos. Además, al no contar con elementos giratorios externos expuestos, presenta ventajas en términos de seguridad, resistencia a impactos y reducción de la firma acústica, lo cual es especialmente relevante en entornos militares o de investigación.

4. Propulsión por aletas oscilantes: es un sistema inspirado en la locomoción de diversas especies acuáticas, que emplea el movimiento periódico de aletas para generar empuje. Este enfoque biomimético busca replicar la eficiencia y maniobrabilidad observadas en organismos marinos, ofreciendo ventajas potenciales en términos de sigilo y capacidad de maniobra para vehículos submarinos[11].

El principio de funcionamiento se basa en la oscilación controlada de una o más aletas, que al moverse de forma sinusoidal inducen la formación de vórtices en el fluido circundante. Estos vórtices generan diferencias de presión que resultan en una fuerza neta propulsiva. La eficiencia de este sistema depende de parámetros como la frecuencia y amplitud de oscilación, la rigidez de las aletas y su ángulo de ataque. Investigaciones recientes han demostrado que la optimización de estos parámetros puede mejorar significativamente el rendimiento propulsivo.

5. Propulsión por supercavitación: La supercavitación es un fenómeno hidrodinámico que permite a un objeto moverse a altas velocidades bajo el agua al reducir drásticamente la resistencia del fluido. Este efecto se logra creando una burbuja de gas que envuelve completamente el objeto, minimizando el contacto directo con el agua y, por ende, disminuyendo la fricción. La supercavitación se produce cuando un objeto se desplaza a tal velocidad que genera una caída de presión en su entorno inmediato, provocando la formación de vapor y la creación de una cavidad gaseosa alrededor del objeto.

Sin embargo, la implementación de la propulsión por supercavitación enfrenta desafíos significativos. El control y la maniobrabilidad de objetos en estado de supercavitación son complejos debido a la dificultad de dirigir un objeto que esencialmente "vuela" dentro de una burbuja de gas. Además, la estabilidad de la cavidad gaseosa debe mantenerse para evitar colapsos que podrían resultar en una pérdida abrupta de velocidad o daño estructural. Investigaciones recientes han explorado el uso de microburbujas de cavitación para mejorar el movimiento de submarinos experimentales, aunque estos estudios aún se encuentran en fases preliminares[12].

2.5 Entorno de diseño, preparación y análisis

La evolución de las herramientas digitales ha transformado profundamente la manera en la que se abordan los procesos de diseño e ingeniería. Lejos de ser simples instrumentos de dibujo o cálculo, estos entornos se han convertido en plataformas integrales que permiten modelar, analizar y fabricar componentes complejos con un grado de precisión y control sin precedentes. Su presencia hoy es imprescindible en cualquier disciplina técnica, especialmente en aquellas que exigen iteración rápida, validación estructural o prototipado funcional.

Una de las soluciones más extendidas en el entorno del diseño asistido por ordenador (CAD) es Autodesk Inventor, un software paramétrico que permite generar modelos 3D, ensamblajes mecánicos, simulaciones básicas y documentación técnica de forma precisa. Inventor se emplea ampliamente tanto en el ámbito académico como en la industria por su interfaz intuitiva y su potencia en entornos mecánicos complejos [13].

Para la preparación de modelos digitales de cara a su fabricación mediante impresión 3D, uno de los entornos más versátiles y extendidos es Bambu Studio, desarrollado por la compañía Bambu Lab. Este software permite convertir los modelos 3D en archivos G-code mediante un proceso de laminado, en el que se definen parámetros como la altura de capa, el tipo de relleno, la densidad de soportes o las velocidades de impresión. Su interfaz visual, clara e intuitiva, ofrece una vista previa de la impresión capa por capa, lo que permite detectar errores geométricos, verificar zonas críticas y estimar el consumo de material y el tiempo total de fabricación[14].

2.5.1 Autodesk Inventor

Autodesk Inventor, con el logo que se ve en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es una herramienta de diseño paramétrico en tres dimensiones que poco a poco se ha ido integrado en el sector de la ingeniería, esto se debe especialmente a la capacidad de diseñar piezas y sistemas mecánicos. Su entorno de trabajo permite construir modelos complejos a partir de geometrías básicas, estableciendo relaciones entre elementos que pueden modificarse en cualquier momento sin perder coherencia en el conjunto. Esta forma de trabajo facilita el desarrollo y resulta especialmente útil cuando el diseño aún no está completamente definido.

Una de las grandes ventajas de Inventor es cómo organiza el trabajo. Cada pieza se puede diseñar de forma independiente y luego integrarla dentro de un ensamblaje, donde es posible comprobar si encaja bien o si hay interferencias. También se pueden aplicar restricciones entre partes móviles para simular su comportamiento real. Esto resulta muy útil, por ejemplo, al diseñar mecanismos que deben girar, deslizar o mantenerse alineados bajo ciertas condiciones.

Inventor también ofrece una herramienta básica de simulación que permite analizar cómo se comporta una pieza o conjunto cuando se le aplican fuerzas. Aunque no es tan avanzado como otros programas de cálculo estructural, es más que suficiente para hacer una primera comprobación del diseño. Con esta función se pueden detectar tensiones, desplazamientos o posibles puntos débiles antes de pasar a un análisis más detallado en otro software.

Otra aspecto a destacar es la facilidad con la que se puede exportar el modelo a otros formatos. Inventor permite guardar las piezas en archivos como .STL, .STEP o .IGES, que son compatibles con la mayoría de programas de simulación o impresión 3D. Esto es muy práctico cuando se trabaja en equipo o cuando el diseño necesita ser validado o fabricado con otras herramientas.

2.5.2 Bambu Studio

Bambu Studio, con el logo que se ve en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, es un software de preparación para impresión 3D desarrollado por la compañía Bambu Lab. Actúa como laminador (slicer), permitiendo transformar modelos tridimensionales en archivos de instrucciones G-code listos para ser ejecutados por una impresora 3D. Aunque está optimizado para trabajar con las impresoras de la marca Bambu Lab, como la serie X1 o P1, su versatilidad permite adaptarse a una amplia gama de configuraciones mediante la personalización de parámetros técnicos.

Bambu Studio incorpora un potente motor de visualización previa que permite examinar el laminado capa por capa antes de la impresión, identificando posibles errores estructurales, defectos de orientación o zonas sin soporte. Esta revisión visual facilita la toma de decisiones sobre densidad de relleno, generación de soportes, estructuras de puentado o velocidad de impresión, lo que es especialmente útil en entornos de diseño funcional o prototipado rápido.

El programa también permite gestionar el control de temperatura de la boquilla y la cama caliente, la retracción del filamento, los parámetros de ventilación y la aceleración, elementos fundamentales para lograr una alta calidad superficial y resistencia mecánica en piezas técnicas. Una de sus funciones más avanzadas es la generación adaptativa de soportes y el uso de diferentes velocidades o resoluciones de capa dentro de una misma impresión, lo cual optimiza el tiempo de fabricación sin comprometer el acabado en zonas críticas.

Además, Bambu Studio cuenta con un sistema de sincronización en red que permite la impresión remota, el control en tiempo real del progreso y la gestión de múltiples impresoras desde una misma estación de trabajo. Esta funcionalidad lo convierte en una solución eficiente para laboratorios de impresión 3D, centros de innovación o entornos industriales donde se requiere escalabilidad y control del flujo de trabajo [14].

2.6 Fabricación aditiva mediante impresión 3D

La fabricación aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, ha revolucionado el diseño y producción de componentes técnicos, especialmente en entornos de desarrollo ágil como el de los vehículos submarinos. La tecnología más utilizada en este proyecto es FDM (Fused Deposition Modeling), debido a su compatibilidad con materiales como el ASA y su bajo coste de implementación.

La impresión FDM funciona mediante la extrusión de filamento termoplástico fundido[15], capa por capa, permitiendo fabricar geometrías complejas sin utillajes. Esto es especialmente útil para la creación de carcasas hidrodinámicas, soportes internos y elementos estructurales del módulo propulsor. El uso de materiales de ingeniería como el ASA permite combinar resistencia mecánica, durabilidad frente a ambientes húmedos y buena estabilidad térmica.

Además, la impresión 3D permite integrar la optimización de diseño mediante pruebas iterativas y simulaciones CAE. Esto facilita que el desarrollo en el apartado 3 del presente trabajo parta de una base técnica robusta y adaptable, alineada con las capacidades de fabricación digital directa. Las ventajas adicionales incluyen la reducción del peso, integración de ensamblajes y personalización del diseño para futuros prototipos.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Introducción

Una vez adquiridos los conocimientos fundamentales sobre la materia, este apartado describe el proceso de desarrollo del sistema de propulsión, abordando los principales desafíos técnicos y estructurales que conlleva el diseño de un sistema destinado a un submarino. Este tipo de sistemas debe alcanzar un equilibrio óptimo entre el rendimiento hidrodinámico, la simplicidad mecánica y la viabilidad de fabricación, factores especialmente críticos en aplicaciones subacuáticas. En un entorno como el medio marino, caracterizado por su elevada densidad, la optimización de la geometría, la selección de materiales y los métodos de ensamblaje resulta determinante para asegurar la funcionalidad y durabilidad del dispositivo.

El objetivo de este desarrollo consiste en la elaboración de un modelo funcional de un módulo de propulsión, diseñado como un sistema modular y adaptable a diferentes plataformas submarinas, con especial atención a su integración en vehículos experimentales de laboratorio. El software Autodesk Inventor se emplea como herramienta principal de diseño asistido por ordenador (CAD), facilitando la generación de geometrías precisas, la validación de ensamblajes mecánicos y la obtención de la documentación técnica asociada. Los modelos tridimensionales se exportan posteriormente en formato .stl y se procesan mediante el software de laminado Bambu Studio, compatible con impresoras 3D de alta velocidad, con el fin de configurar los parámetros específicos de impresión en función del material seleccionado.

Adicionalmente, el proceso incluye la selección técnica de los materiales más adecuados para cada componente, teniendo en cuenta criterios como la resistencia mecánica, el peso específico y la capacidad de soportar condiciones propias del entorno marino.

3.2 Módulo de propulsión. Hélice de tobera

Una vez realizada la parte introductoria, en esta parte, con el fin de comprender en profundidad el diseño propuesto, el módulo de propulsión se define como el conjunto responsable de generar el empuje necesario para el desplazamiento del dron submarino, contribuyendo simultáneamente a su estabilidad y comportamiento hidrodinámico durante la navegación, al tiempo que mantiene la integridad estructural del sistema. Este módulo se compone de un conjunto de aletas fijas, un cuerpo estructural interno, un núcleo (alma) de refuerzo y un sistema de ensamblaje que integra todos los componentes de manera funcional y mecánicamente coherente.

El diseño incorpora un sistema de aletas con perfil NACA, cuya función principal es estabilizar la trayectoria del vehículo durante su avance, minimizando las perturbaciones generadas por irregularidades hidrodinámicas del entorno. Estas aletas están fijadas a un cuerpo interno de elevada rigidez, cuya misión es aportar solidez estructural al conjunto sin intervenir en el control activo de la dirección.

Para garantizar una integración precisa y eficiente de todos los elementos, se ha desarrollado un ensamblaje completo en entorno CAD. En él se ha verificado la compatibilidad geométrica y funcional de las piezas, así como la correcta disposición de zonas de fijación, alojamientos técnicos y uniones mecánicas necesarias para la funcionalidad y manufacturabilidad del sistema.

Cabe destacar que el objetivo principal de este proyecto se centra exclusivamente en el diseño de un módulo de propulsión orientado a la generación de empuje en sentido longitudinal, es decir, hacia delante y hacia atrás. No se aborda en este caso el control de la maniobrabilidad lateral o el giro del vehículo, funciones que requieren sistemas adicionales de dirección o propulsión transversal. Esta delimitación permite focalizar el desarrollo en optimizar el empuje lineal y la eficiencia estructural del sistema.

3.3 Requerimientos

Tras especificar lo que va a ser el proyecto, se pasa a los requerimientos. Los proyectos de ingeniería mecánica tienen en común unos fundamentos, independientemente del fin último del diseño o proyecto, así como el sector al cual están orientados. Estos principios constituyen la base sobre la cual debe desarrollarse cualquier diseño técnico viable. Entre ellos, destacan los siguientes:

6. Funcionalidad: El diseño final debe ser completamente operativo, es decir, debe poder construirse y funcionar en condiciones reales. No debe quedarse únicamente en una propuesta teórica o conceptual, sino evolucionar hacia una solución técnica aplicable.
7. Competitividad: El resultado final debe ser capaz de introducirse en un mercado exigente, el cual es dinámico y global. Por lo que se debe conseguir que el producto tenga unos elementos diferenciadores frente al resto de competidores, de forma que consiga posicionarse como producto referente en el mercado en el que va a actuar.
8. Rentabilidad: Cada etapa, desde la concepción inicial hasta la producción y salida al mercado, debe de estar enfocada a garantizar la rentabilidad económica. En otras palabras, el producto debe generar un valor suficiente que compense y supere los costes implicados tanto en su desarrollo como su comercialización.

Adicionalmente, el diseño del módulo de propulsión debe atender a unos requerimientos y necesidades específicas, que se puede unificar en dos categorías, estructurales y funcionales:

3.3.1 Requerimientos estructurales

1. Rigidez mecánica: El conjunto debe mantener su forma bajo presión, sin deformaciones significativas durante la inmersión o el desplazamiento.
2. Reducción del peso: Es necesario mantener el peso del módulo dentro de un margen que permita el control de la flotabilidad total del vehículo.
3. Simplicidad estructural: Se ha priorizado un diseño de pocas piezas, sin elementos móviles, para facilitar el montaje, reducir errores y evitar fugas o fallos estructurales.

3.3.2 Requerimientos funcionales

1. Generación de empuje: El sistema debe permitir el desplazamiento controlado del vehículo a través del agua.
2. Estabilidad direccional: El sistema debe ser estable, minimizando las perturbaciones laterales y manteniendo la trayectoria del submarino durante la navegación.
3. Integración modular: El módulo debe diseñarse como una unidad independiente que pueda ensamblarse o sustituirse fácilmente en el cuerpo del vehículo.
4. Facilidad de fabricación: Todas las piezas deben poder producirse mediante medios convencionales como impresión 3D, mecanizado o corte CNC, utilizando materiales accesibles y compatibles con procesos de fabricación estándar.

3.4 Fase inicial

Tras tener aclarar los requisitos que debe cumplir el diseño, se toma la primera decisión. Para la generación de empuje del módulo de propulsión se ha seleccionado la hélice carenada T200 Thruster, que se puede ver en la Figura 3-1, desarrollada por la empresa Blue Robotics, ampliamente reconocida en el ámbito de la robótica subacuática por la fiabilidad, compacidad y versatilidad de sus productos. La T200 está específicamente diseñada para entornos marinos exigentes, ofreciendo un equilibrio entre empuje, eficiencia energética y facilidad de integración, lo que la convierte en una solución adecuada para plataformas ligeras como drones subacuáticos, sistemas de inspección o AUVs modulares.

Entre sus características técnicas más destacadas, según el fabricante, se encuentran las siguientes [16]:

1. Voltaje de operación: 6–20 V
2. Empuje máximo (16 V): $5,1 \text{ kgf} \approx 50 \text{ N}$
3. Empuje operativo típico (12–14 V): $2,5 \text{ kgf} \approx 25 \text{ N}$
4. Corriente máxima: 12,5 A
5. Potencia máxima: 192 W
6. Diámetro total: 100 mm
7. Peso en aire: 365 g
8. Materiales: carcasa de policarbonato, eje de acero inoxidable, componentes resistentes al agua salada
9. Propulsión reversible (bidireccional)

Esta hélice proporciona empuje tanto en sentido avante como en reversa, aunque el rendimiento en retroceso es ligeramente inferior, con una pérdida estimada de entre el 15 % y 20 % respecto al empuje hacia adelante, lo que implica un empuje máximo hacia atrás de aproximadamente 40 N.



Figura 3-1 Hélice T200. (autoría propia)

El diseño del módulo ha sido dimensionado para alojar esta hélice, junto con el sistema estructural que asegura su fijación y alineación axial respecto al flujo de agua. A partir de las características de empuje operativo (25 N), se estima la velocidad de crucero del vehículo aplicando el equilibrio de fuerzas entre el empuje generado por la hélice y la resistencia hidrodinámica al avance.

La resistencia se modela como:

$$FD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cd \cdot A \cdot v^2$$

Despejando para la velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{\rho \cdot Cd \cdot A}}$$

Donde:

1. $F=25 \text{ N}$ (empuje operativo típico)
2. $\rho = 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (densidad del agua de mar)
3. $C_d = 0,12$ (coeficiente de arrastre estimado para cuerpos torpedo-hidrodinámicos)

4. $A = 0,015 \text{ m}^2$ (área frontal estimada del casco)

Sustituyendo:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 25}{1025 \cdot 0.12 \cdot 0.015}} \approx 27,1 \approx 5,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Este resultado equivale a aproximadamente 10.1 nudos, una velocidad razonable para vehículos submarinos ligeros de uso científico, técnico o militar. Varios estudios coinciden en que velocidades en el rango de 3 a 6 m/s son adecuadas para AUVs de tamaño medio y baja resistencia frontal[17].

Con el fin de validar el diseño y estimar el rendimiento operativo del sistema, se ha calculado la velocidad de crucero estimada del vehículo impulsado por la T200. Para ello, se considera un empuje operativo de 25 N (trabajando a aproximadamente el 50 % de su capacidad máxima para conservar eficiencia y autonomía), una densidad del agua de mar de $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, un área frontal estimada del dron de $A = 0,015 \text{ m}^2$, y un coeficiente de arrastre $C_d = 0,12$, apropiado para un diseño con geometría hidrodinámica optimizada similar a la de un torpedo.

Aplicando la ecuación de equilibrio de fuerzas entre empuje y resistencia al avance:

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \rightarrow v \approx 5,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Esta velocidad equivale a aproximadamente 10.1 nudos, lo que representa un valor coherente con plataformas ligeras de uso científico, militar o de inspección costera.

Considerando que el empuje en sentido inverso es un 20 % menor (20 N), se repite el cálculo:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 20}{1025 \cdot 0.12 \cdot 0.015}} \approx 21,7 \approx 4,66 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 9,0 \text{ nudos}$$

Esto indica que, aunque el sistema permite navegación en reversa, su rendimiento está optimizado para la navegación en sentido avante, lo que se alinea con la mayoría de perfiles operativos previstos para este tipo de plataformas.

3.5 Solicitaciones

Durante las fases previas de diseño y validación del módulo de propulsión, se ha llevado a cabo un análisis detallado de las fuerzas que actuarán sobre el vehículo durante su navegación subacuática. Estas fuerzas condicionan tanto su comportamiento hidrodinámico como su integridad estructural, por lo que su estudio resulta fundamental para garantizar la viabilidad y fiabilidad del sistema. Las magnitudes han sido estimadas mediante cálculos técnicos aplicando modelos físicos clásicos de dinámica de fluidos, tomando como referencia una velocidad de crucero de 5,2 m/s y una profundidad máxima de operación de 30 metros, con inmersión completa del sistema de popa y aletas estabilizadoras. El entorno fluido considerado es agua salada, cuya densidad y propiedades han sido empleadas para evaluar cada una de las solicitaciones relevantes. A continuación, se exponen los resultados obtenidos para cada tipo de fuerza, como parte del proceso de dimensionamiento estructural y validación funcional del diseño.

3.5.1 Resistencia al avance

La fuerza de resistencia al avance (drag) es el resultado de la oposición que presenta el fluido al desplazamiento del cuerpo. Se calcula mediante la expresión:

$$FD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2$$

Donde:

1. $\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$ densidad del agua de mar
2. $Cd = 0,2$ coeficiente de arrastre estimado para una forma hidrodinámica optimizada.
3. $A = 0,015 m^2$ área frontal estimada del dron.
4. $v = 5,2 \frac{m}{s}$ velocidad del vehículo.

Sustituyendo:

$$FD = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 0,2 \cdot 0,015 \cdot 5,2^2 \approx 41,66 N$$

3.5.2 Sustentación de las aletas

La sustentación generada por las aletas estabilizadoras se calcula también mediante una fórmula similar a la del arrastre, dado que se trata de fuerzas aerodinámicas/hidrodinámicas:

$$FL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot CL \cdot A_{alet} \cdot v^2$$

Donde:

1. $CL = 0,3$ coeficiente de sustentación estimado para un perfil NACA 0012 en flujo simétrico.
2. $A_{alet} = 0,18098 m^2$ área total de las aletas.
3. El resto de variables como en el punto anterior.

$$FL = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 0,3 \cdot 0,18098 \cdot 5,2^2 \approx 741,25 N$$

Dado que el sistema cuenta con dos aletas que favorecen la sustentación, se puede estimar que cada una soporta una carga de sustentación de aproximadamente:

$$FL_{unidad} \approx \frac{741,25}{2} \approx 370,62 N$$

Esta fuerza contribuye a la estabilidad direccional del dron y no se emplea con fines de control activo o maniobrabilidad, dado que las aletas han sido diseñadas como elementos fijos.

3.5.3 Corriente lateral

Durante la navegación, los vehículos subacuáticos pueden verse afectados por corrientes marinas laterales, especialmente en entornos costeros o áreas con intensa dinámica oceánica. Estas corrientes ejercen una fuerza perpendicular al eje longitudinal del dron, que puede comprometer la estabilidad de los apéndices estructurales como las aletas laterales. Para evaluar este efecto, se ha considerado una corriente transversal de 20 nudos (equivalente a 10,29 m/s), valor que representa un caso extremo pero documentado en estudios oceanográficos.

Según el NOAA [18], las corrientes de superficie pueden alcanzar puntualmente velocidades superiores a 2 m/s en regiones costeras, y superar los 10 m/s en eventos extremos como mareas vivas intensificadas por efectos meteorológicos. Este valor, por tanto, se considera una condición límite razonable para evaluar la robustez del diseño frente a solicitaciones laterales severas.

La fuerza generada por dicha corriente sobre las dos aletas expuestas se calcula empleando la ecuación de arrastre:

$$F_{corriente} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_{lat} \cdot v^2$$

Donde:

1. $\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$ densidad del agua de mar.
2. $Cd = 0,2$ coeficiente de arrastre estimado para una forma hidrodinámica optimizada.
3. $Aalet = 0,18098 m^2$ área expuesta de las dos aletas laterales.
4. $v = 10,29 \frac{m}{s}$ velocidad de la corriente lateral.

Sustituyendo:

$$F_{corriente} = \frac{1}{2} \cdot 1025 \cdot 0,2 \cdot 0,015 \cdot 10,29^2 \approx 970,77 N$$

Esta fuerza representa una de las solicitaciones más críticas a las que podrían verse sometidas las aletas durante la operación. Su análisis es esencial para garantizar que el sistema de fijación y el material de las aletas puedan resistir sin comprometer la integridad estructural del módulo. Considerar este caso extremo permite validar el diseño ante escenarios operativos severos, aumentando la fiabilidad del vehículo en misiones reales.

3.5.4 Empuje hidrostático

El empuje hidrostático, también conocido como fuerza de flotación, es una fuerza vertical ascendente que actúa sobre un cuerpo sumergido en un fluido, como consecuencia del principio de Arquímedes. Esta fuerza es directamente proporcional al volumen de fluido desplazado por el objeto y depende de la densidad del medio, así como de la aceleración gravitatoria.

La expresión matemática del empuje hidrostático es:

$$F_{hidrostático} = \rho \cdot g \cdot V$$

Donde:

1. $\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$ densidad del agua de mar.
2. $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ es la aceleración gravitatoria.
3. $V = 0,002276 m^3$ es el volumen desplazado por la sección del dron analizada.

Sustituyendo:

$$F_{hidrostático} = 1025 \cdot 9,81 \cdot 0,002276 \approx 22,88 N$$

Este valor representa la fuerza neta vertical hacia arriba que actúa sobre la sección sumergida del vehículo. Si el peso del módulo en esa sección es superior a este empuje, el sistema tenderá a hundirse; si es menor, tenderá a ascender. En este caso, el empuje hidrostático no debe confundirse con la flotabilidad total del vehículo, ya que el cálculo se ha restringido exclusivamente al volumen de la popa, las aletas y la hélice.

3.5.5 Presión hidrostática

La presión hidrostática es la fuerza por unidad de área que ejerce el agua sobre un objeto sumergido debido al peso de la columna de fluido que se encuentra sobre él. Esta presión aumenta linealmente con la profundidad y es una de las variables más críticas en el diseño estructural de vehículos subacuáticos, ya que representa el principal límite operativo del sistema antes de la deformación o colapso de sus componentes.

La presión se calcula mediante la expresión:

$$P = \rho \cdot g \cdot h$$

Donde:

1. $\rho = 1025 \frac{kg}{m^3}$ densidad del agua de mar.
2. $g = 9,81 \frac{m}{s}$ es la aceleración gravitatoria.
3. $h = 30 m$ es la profundidad de operación máxima estimada.

Sustituyendo los valores:

$$P = 1025 \cdot 9,81 \cdot 30 \approx 301,58 kPa = 0,301 MPa$$

Este resultado equivale a aproximadamente 3 atmósferas adicionales a la presión atmosférica, y representa el valor máximo que soportarán las superficies externas del dron durante la inmersión completa hasta 30 metros de profundidad.

Este valor debe considerarse como una condición de diseño límite. Las estructuras y materiales seleccionados deben ser capaces de resistir esta presión sin deformaciones plásticas o fisuras. Superar esta profundidad podría implicar la entrada en el régimen de colapso estructural, por lo que se recomienda no excederla.

3.5.6 Fuerza ejercida sobre los tornillos

El sistema de fijación de la hélice carenada T200 al módulo de propulsión se realiza mediante dos tornillos métricos de tipo M3, cuya misión principal es resistir las cargas axiales inducidas por el empuje generado durante la operación del vehículo. Dado que la hélice puede funcionar en ambos sentidos (avante y atrás), resulta fundamental evaluar la sollicitación que estos tornillos experimentarán tanto en condiciones normales como en inversión de marcha.

Los tornillos M3 tienen un diámetro nominal de 3 mm, pero el parámetro relevante para el cálculo de la resistencia mecánica es el diámetro del núcleo, que en este caso es de aproximadamente 2.5 mm. A partir de este valor, se calcula el área resistente de cada tornillo:

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = 4\pi \cdot 0,0025^2 \approx 4,91 \times 10^{-6} m^2$$

Considerando el empuje total proporcionado por la hélice T200, que alcanza un máximo de 50 N en operación directa y aproximadamente 40 N en operación inversa, se distribuye dicha carga equitativamente entre ambos tornillos, resultando en 25 N por tornillo en el primer caso y 20 N en el segundo.

Las tensiones axiales generadas sobre la sección resistente de cada tornillo se calculan según la expresión:

$$\sigma = \frac{A}{F}$$

Para el caso de empuje directo (25 N):

$$\sigma_{directo} = \frac{25}{4,91 \times 10^{-6}} \approx 5,09 MPa$$

Para el caso de empuje inverso (20 N):

$$\sigma_{directo} = \frac{20}{4,91 \times 10^{-6}} \approx 4,07 MPa$$

Estos valores de tensión son muy inferiores a los límites admisibles para tornillos de acero clase 8.8, los cuales presentan un límite elástico de aproximadamente 640 MPa y un límite de rotura cercano a 800 MPa. Incluso bajo cargas dinámicas o efectos de fatiga, las tensiones se mantienen por debajo del 1 %

del límite elástico, lo que proporciona un elevado margen de seguridad frente al fallo del sistema de fijación.

No obstante, no solo los tornillos deben ser capaces de soportar la carga generada por el empuje máximo de la hélice, sino también el propio material del módulo de propulsión en el que estos se insertan. La zona de anclaje de los tornillos constituye un punto crítico en términos estructurales, ya que una posible deformación localizada o fallo por fatiga en esta región comprometería la integridad del sistema. Por tanto, el material utilizado en la fabricación del módulo debe presentar una resistencia a la tracción suficiente para soportar las tensiones localizadas inducidas por el empuje.

3.6 Diseño

Los resultados obtenidos en el análisis de fuerzas y tensiones que actúan sobre el vehículo establecen los requisitos estructurales que condicionan el diseño del módulo de propulsión. Las cargas derivadas del empuje de la hélice, la resistencia al avance, la presión hidrostática, las solicitaciones por corrientes laterales y la sustentación ejercida sobre las aletas deben ser adecuadamente absorbidas por una geometría que mantenga su integridad estructural durante la operación subacuática.

Partiendo de estos requerimientos, se ha desarrollado una solución basada en una arquitectura modular y robusta, compuesta por tres elementos principales: un cuerpo estructural externo, que constituye el volumen principal del módulo y proporciona la interfaz de integración con el resto del vehículo; un alma interna de refuerzo, que recorre el interior del cuerpo estructural y distribuye las tensiones a lo largo de toda la estructura, reforzando el conjunto frente a las cargas hidrodinámicas y mecánicas globales; y un conjunto de aletas estabilizadoras, dispuestas simétricamente y basadas en el perfil aerodinámico NACA 0012, que confieren al sistema estabilidad direccional durante la navegación sin interferir activamente en la maniobrabilidad.

3.6.1 Cuerpo estructural

El cuerpo estructural externo del módulo de propulsión constituye el núcleo físico del sistema, y está diseñado para cumplir una triple función: conferir rigidez mecánica al conjunto, actuar como interfaz para la integración de los distintos componentes, incluyendo la hélice T200, el alma interna de refuerzo y las aletas estabilizadoras, y mantener la geometría general del módulo frente a las solicitaciones hidrodinámicas generadas durante la navegación subacuática. Su diseño responde a la

necesidad de asegurar una estructura resistente y compacta, capaz de soportar las cargas inducidas por la propulsión y por el entorno marino, garantizando al mismo tiempo la compatibilidad dimensional con los elementos ensamblados.

Para ello, se ha modelado un cuerpo principal con forma de revolución, generado a partir de un perfil aerodinámico simétrico respecto al eje longitudinal del submarino. La geometría presenta una longitud de 300 mm y un diámetro máximo de 190 mm en la base como refleja la Figura 3-2, permitiendo una transición suave del flujo de agua alrededor del módulo y reduciendo las turbulencias y la resistencia al avance.

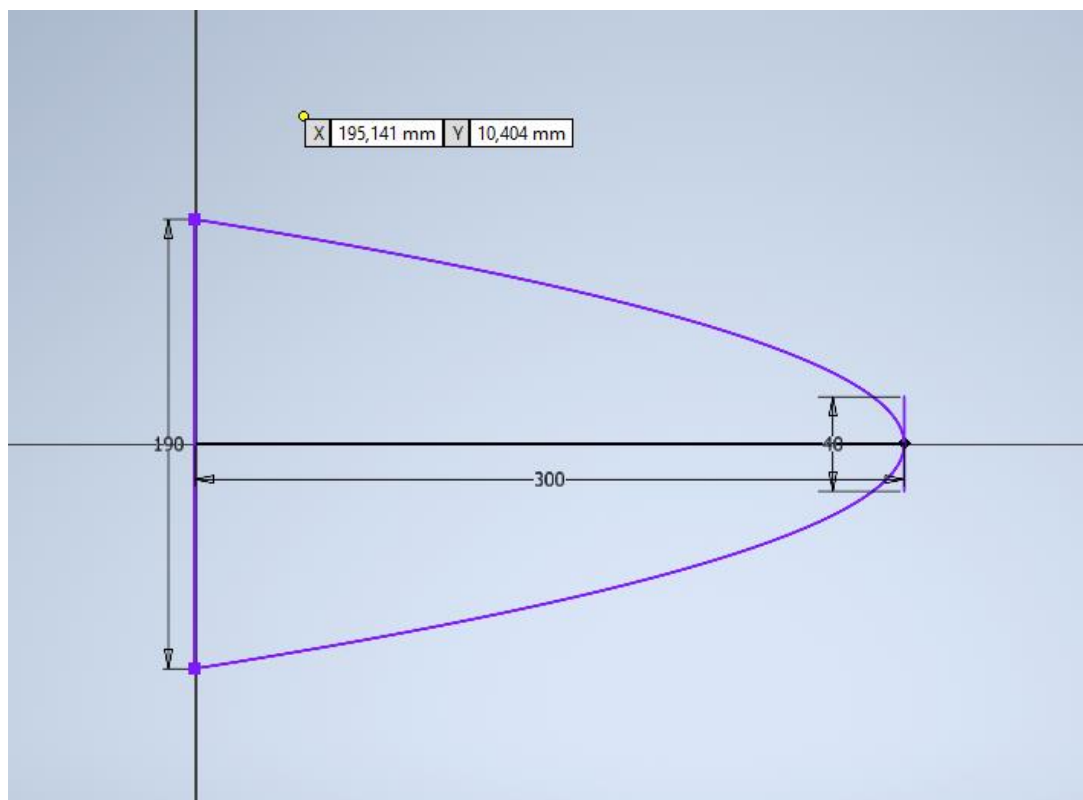


Figura 3-2 Boceto del cuerpo. (autoría propia)

En su interior, el volumen ha sido vaciado y estructurado mediante una serie de acanaladuras circulares longitudinales repartidas a lo largo del eje central. Estas acanaladuras están dimensionadas para alojar discos del alma estructural, garantizando su encaje preciso, alineación axial y fijación sin necesidad de adhesivos ni tornillería. El espacio entre discos queda disponible para ubicar sistemas como baterías, cableado u otros componentes funcionales.

La pared del cuerpo mantiene un espesor constante, optimizando la relación entre ligereza y resistencia, al tiempo que facilita el proceso de fabricación mediante técnicas como impresión 3D o moldeo por deposición. En la Figura 3-3 se observa como en la parte posterior se han incorporado agujeros roscados para el montaje directo de la hélice carenada T200, asegurando una fijación firme, centrada y sin desalineaciones.



Figura 3-3 Cuerpo con agujeros para fijar la hélice. (autoría propia)

El diseño también contempla la incorporación de aletas fijas con perfil NACA. Para ello, se han previsto ranuras laterales que permiten su inserción directa en el cuerpo estructural, manteniendo una fijación segura sin comprometer la integridad de la pieza. En conjunto, este soporte actúa como elemento central del módulo de propulsión, integrando estructura, control direccional y sistema de empuje en una única pieza robusta y funcional.

3.6.2 Alma interna de refuerzo

El alma estructural constituye el refuerzo interno del soporte del módulo de propulsión. Su función principal es aportar rigidez al conjunto, distribuir las cargas de forma uniforme a lo largo del eje longitudinal, y generar compartimentos útiles para el alojamiento de componentes como baterías, sistemas electrónicos o cableado interno como puede verse en la Figura 3-4.

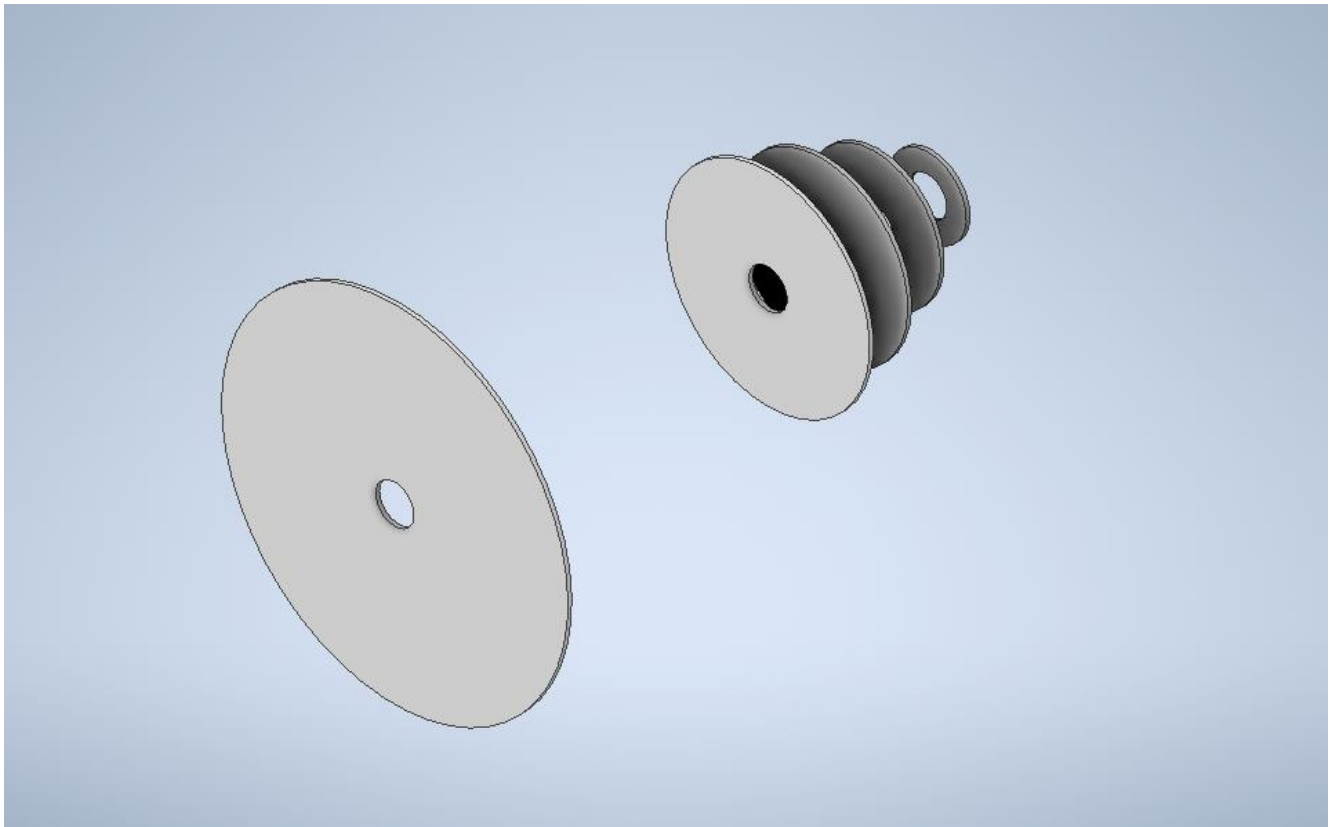


Figura 3-4 Alma estructural. (autoría propia)

El diseño está formado por una serie de discos circulares con orificio central, dispuestos en el interior del soporte a lo largo de 300 mm de longitud. Cada disco encaja con precisión en las acanaladuras interiores del soporte estructural, garantizando su fijación y alineación axial sin necesidad de adhesivos ni uniones adicionales. Para facilitar la integración del módulo con el resto del submarino, se ha reservado una zona libre de 5 mm en cada extremo del cuerpo: en el extremo ancho para su acoplamiento con la estructura principal, y en el extremo estrecho para la fijación del sistema de anclaje de la hélice, esto se puede ver en la Figura 3-5.

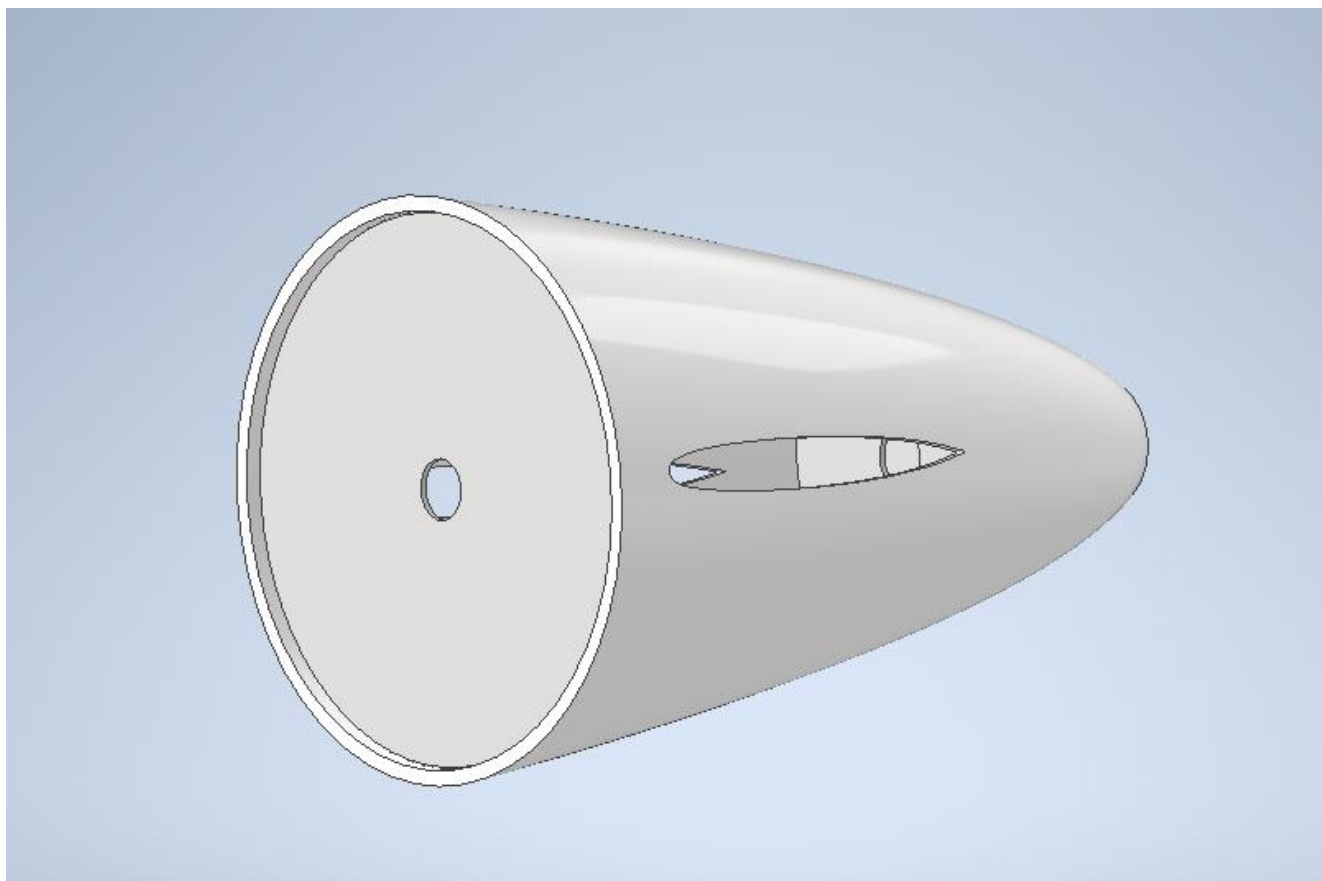


Figura 3-5 Cuerpo con el alma. (autoría propia)

La distancia entre discos es regular (27,7 mm), salvo entre el primer y segundo disco, donde se ha creado una separación especial que permite la correcta colocación e inserción de las aletas en el cuerpo del soporte, sin interferencias con la estructura interna lo cual se puede ver en la Figura 3-6, que representa el boceto antes de la revolución. Esta separación garantiza el ajuste firme de las aletas al tiempo que mantiene la continuidad del sistema de refuerzo.

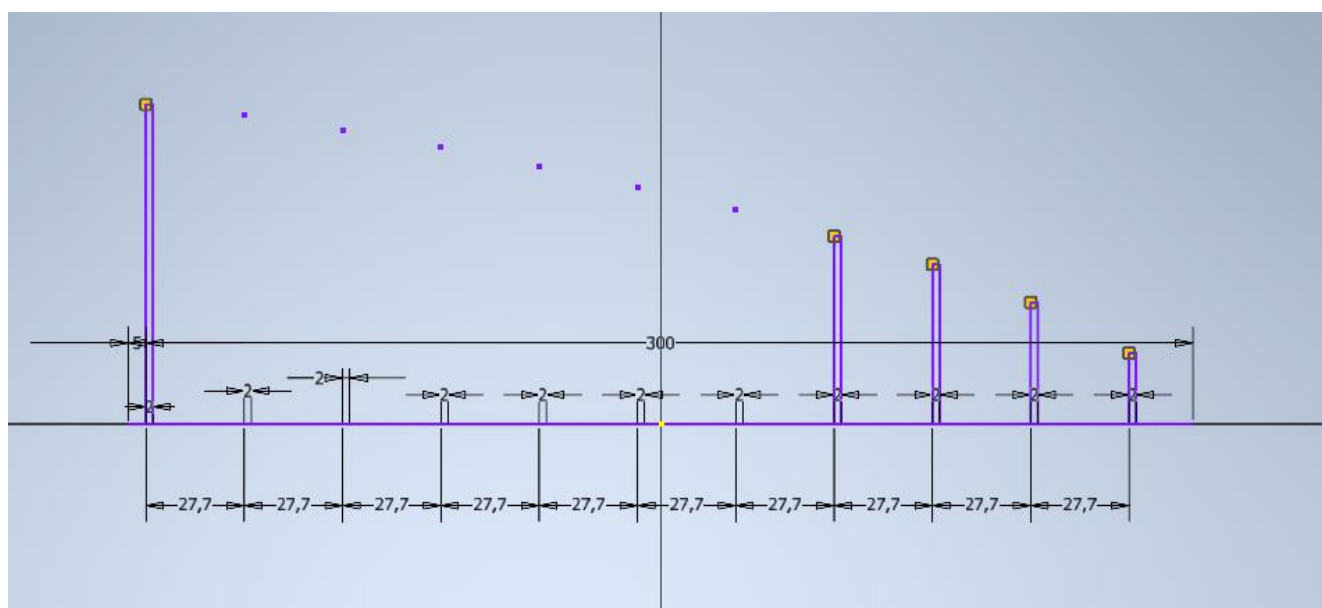


Figura 3-6 Boceto de los discos del alma. (autoría propia)

El orificio central presente en todos los discos permite el paso de cableado lo que facilita el montaje.

El alma estructural del módulo de propulsión tiene la función de reforzar internamente el soporte, mantener la alineación de los componentes, distribuir las cargas a lo largo del eje del módulo y permitir la integración de elementos funcionales como baterías o cableado. Debido a su posición interna, su exposición al entorno marino es indirecta, pero aun así requiere un material con buenas propiedades mecánicas, estabilidad dimensional y resistencia a la humedad.

3.6.3 Aletas

Las aletas diseñadas para el módulo de propulsión del vehículo subacuático tienen como finalidad proporcionar estabilidad direccional durante la navegación, reduciendo las oscilaciones y perturbaciones inducidas por el flujo del agua alrededor del sistema. Su incorporación está directamente orientada a garantizar un comportamiento estable en condiciones de avance y en presencia de corrientes laterales.

Para su diseño se ha optado por el uso de perfiles aerodinámicos de la serie NACA de cuatro cifras, ampliamente reconocidos tanto en aplicaciones aeronáuticas como navales por su favorable respuesta frente a flujos fluidos. Los perfiles NACA (acrónimo de *National Advisory Committee for Aeronautics*) constituyen geometrías normalizadas generadas a partir de fórmulas algebraicas, lo que permite una definición matemática precisa de las curvas que conforman el perfil sin necesidad de datos experimentales previos. La serie de cuatro cifras, en particular, resulta idónea para componentes pasivos de control, como aletas o timones, debido a su sencillez y estabilidad.

Cada cifra en esta serie define una propiedad geométrica específica del perfil:

1. La primera cifra indica el *camber* máximo (curvatura) expresado como porcentaje de la cuerda.
2. La segunda cifra establece la posición del *camber* a lo largo de la cuerda.
3. Las dos últimas cifras determinan el espesor máximo del perfil, también como porcentaje de la cuerda.

En este proyecto se ha empleado el perfil NACA 0012, como se puede ver en la Figura 3-7, que es simétrico respecto a su eje longitudinal, con un espesor máximo del 12 % de la cuerda. Esta simetría es clave para lograr un comportamiento equilibrado frente a flujos bidireccionales, evitando la generación de fuerzas desequilibrantes no deseadas. Gracias a estas características, el NACA 0012 es especialmente adecuado para aplicaciones subacuáticas donde la dirección del flujo puede cambiar o incluir componentes transversales.

El sistema de estabilización diseñado consta de dos configuraciones de aleta: una aleta longitudinal completa Figura 3-8, que se instala en el eje del módulo para estabilizar el avance, y una aleta transversal dividida en dos mitades simétricas Figura 3-9, superior e inferior, que facilitan su integración estructural y permiten el acoplamiento alrededor del cuerpo principal. Ambas configuraciones emplean el mismo perfil NACA y presentan dimensiones compatibles para unificar el comportamiento hidrodinámico del conjunto.

Las coordenadas geométricas del perfil NACA 0012 fueron obtenidas de una fuente especializada [19] y transformadas a unidades métricas. Estas coordenadas se introdujeron en el software Autodesk Inventor mediante un archivo Excel, escalado con un factor de 15 para alcanzar la dimensión deseada. La curva del perfil se trazó utilizando una spline que conectaba los puntos definidos desde el borde de ataque hasta el borde de salida. A partir de este boceto 2D, se realizó la extrusión para generar las aletas en tres dimensiones, respetando el contorno original del perfil.

El diseño contempla una geometría completamente fija, lo que significa que las aletas no cuentan con ningún sistema de orientación activa. Esta decisión responde al objetivo del proyecto, centrado en

la generación de empuje longitudinal mediante la hélice, sin considerar capacidades de maniobrabilidad por deriva. Las aletas cumplen una función pasiva de estabilización, sin influir directamente en la dirección del vehículo.

Finalmente, en la zona de unión con el cuerpo estructural del módulo se han incorporado alojamientos específicos que permiten la fijación adhesiva de las aletas al soporte, asegurando su correcta alineación y resistencia frente a las solicitaciones hidrodinámicas.

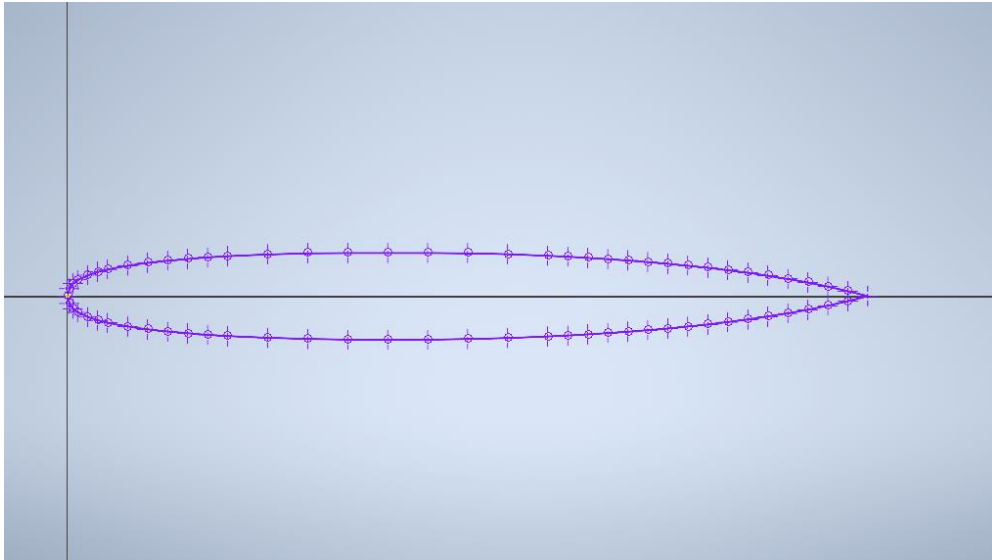


Figura 3-7 Boceto del perfil NACA. (autoría propia)

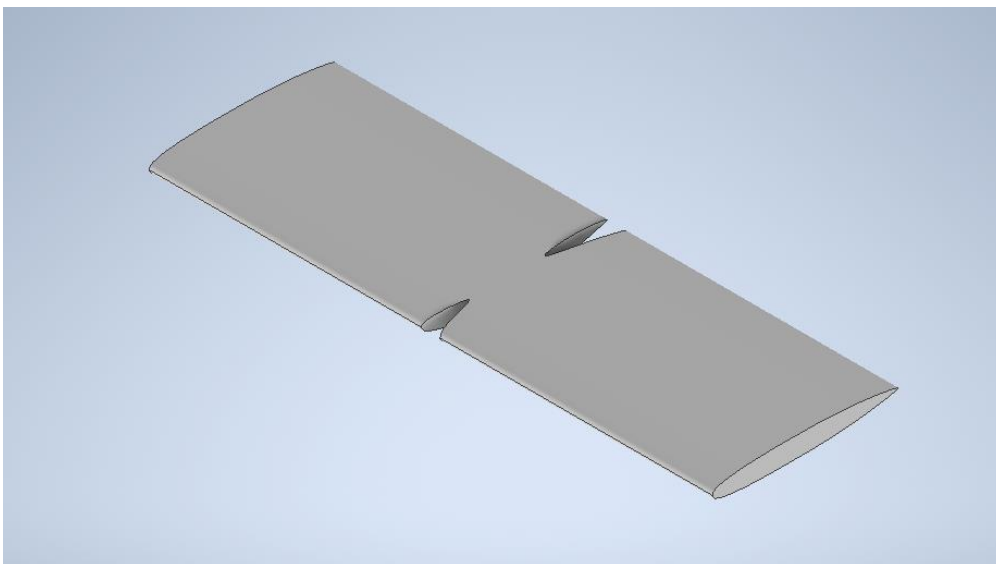


Figura 3-8 Aleta extruída entera. (autoría propia)

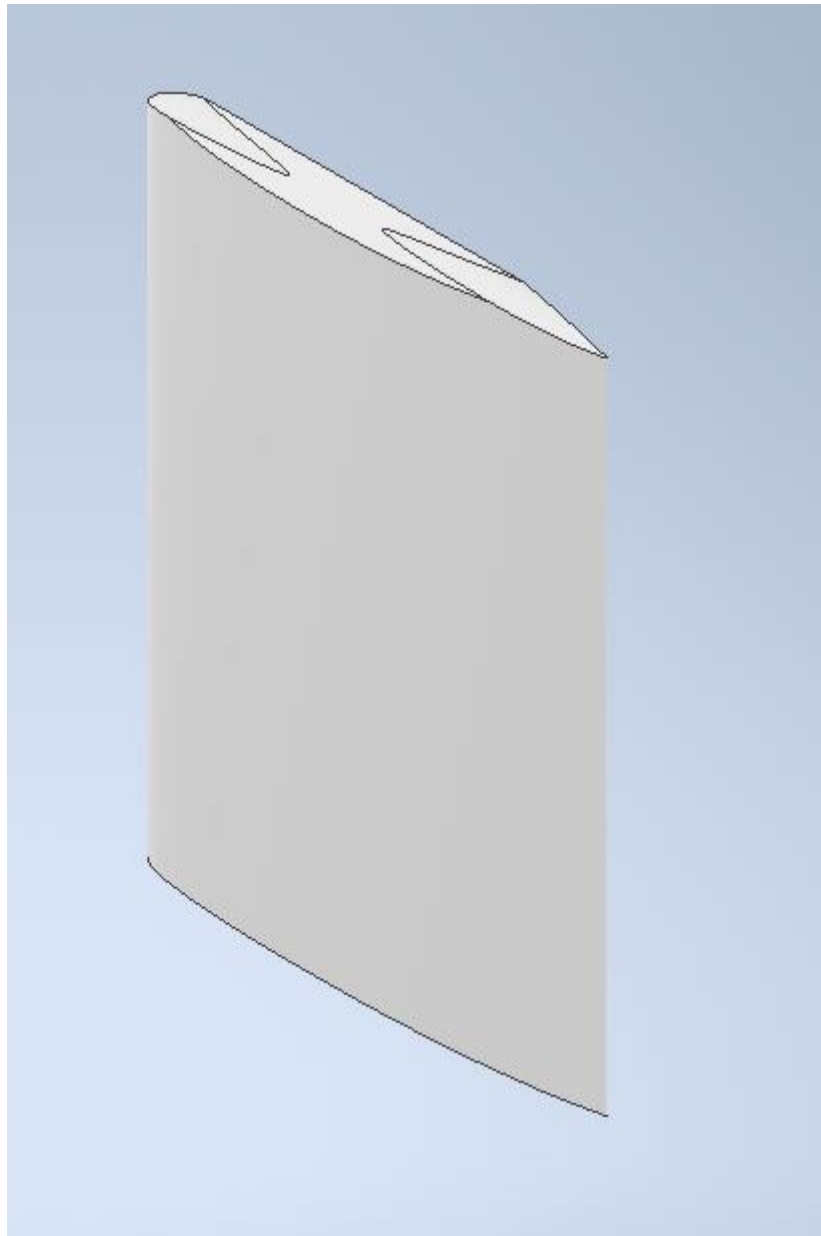


Figura 3-9 Aleta dividida (autoría propia)

3.7 Material

Una vez definido el diseño del módulo de propulsión, incluyendo el cuerpo estructural, el alma interna y las aletas estabilizadoras, resulta necesario seleccionar los materiales más adecuados para su fabricación. Esta elección debe considerar aspectos clave como la resistencia mecánica frente a las fuerzas identificadas en los apartados anteriores, la compatibilidad con procesos de fabricación aditiva (impresión 3D), la estabilidad dimensional en entornos marinos y la facilidad de montaje entre componentes.

Del mismo modo, es preciso establecer un sistema de unión eficaz que permita ensamblar las distintas piezas impresas manteniendo la coherencia estructural del conjunto. En este proyecto, se ha optado por el uso de un polímero técnico, el ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate), como material base de impresión, y por un adhesivo a base de metiletilcetona (MEK) como sistema de fijación entre componentes. Ambos se han seleccionado en función de sus propiedades técnicas, su disponibilidad en entornos de prototipado funcional y su idoneidad para aplicaciones en condiciones subacuáticas no presurizadas.

3.7.1 Acrilonitrilo Estireno Acrilato

En el diseño de sistemas subacuáticos, la elección del material estructural constituye un aspecto crítico, especialmente cuando se trata de aplicaciones en entornos marinos con exposición prolongada al agua salada. Factores como la resistencia mecánica, la densidad, la resistencia a la corrosión y la compatibilidad con procesos de fabricación aditiva deben evaluarse cuidadosamente.

El material seleccionado para la fabricación del módulo de propulsión ha sido el plástico ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate), un termoplástico de ingeniería ampliamente reconocido por su resistencia a la intemperie, estabilidad dimensional y buen comportamiento mecánico. No obstante, antes de justificar esta elección, se realiza una comparación técnica con otros materiales potenciales: PLA (ácido poliláctico), PETG (tereftalato de polietileno modificado con glicol), y aluminio 6061, que representa una alternativa metálica habitual en diseño estructural Tabla 3-1.

	ASA[20]	PLA[21]	PETG[22]	Aluminio 6061[23]
Resistencia a tracción (MPa)	45-50	50-70	45-50	276-310
Módulo elástico (GPa)	1,8-2,2	3,5	2,1	68,9-71,0
Densidad (g/cm ³)	1,05	1,25	1,27	2,7
Resistencia UV	Muy alta	Muy baja	Media	Alta
Resistencia Agua salada	Alta	Muy baja	Media	Alta (con anodizado)
Facilidad de impresión	Alta	Muy alta	Alta	No aplica

Tabla 3-1 Propiedades de materiales (autoría propia)

ASA se caracteriza por su excelente resistencia química, buena estabilidad frente a los rayos UV y una notable resistencia mecánica para un polímero impreso en 3D. A diferencia del PLA, que presenta una notable fragilidad y baja resistencia al agua salada, o del PETG, que tiende a deformarse con la humedad y presenta una resistencia UV limitada, el ASA mantiene su integridad estructural en condiciones adversas y prolongadas, lo que lo hace especialmente adecuado para entornos marinos.

Frente al aluminio 6061, si bien este presenta una resistencia estructural muy superior, su procesamiento requiere mecanizado CNC y tratamientos anticorrosión adicionales (como el anodizado) para evitar la degradación en ambientes salinos. En contraste, el ASA permite un proceso de fabricación aditiva rápido, económico y preciso, manteniendo una resistencia adecuada para los esfuerzos calculados en el módulo.

3.7.2 Metil Etil Cetona

En el ensamblaje del módulo de propulsión se requieren uniones firmes, duraderas y resistentes al entorno marino. Dado que las piezas han sido fabricadas en su totalidad en plástico ASA (Acrilonitrilo Estireno Acrilato), la elección del adhesivo debe asegurar una compatibilidad química con este material, garantizando al mismo tiempo resistencia mecánica y estabilidad frente a la humedad, el salitre y los ciclos térmicos.

Por estas razones, se ha optado por el uso de Metil Etil Cetona (MEK) como sistema de unión. La MEK no actúa como un adhesivo convencional, sino como un agente de soldadura química. Al aplicarse sobre superficies de ASA, disuelve parcialmente su capa superficial, permitiendo la fusión molecular entre las piezas una vez alineadas y en contacto. El resultado es una unión por difusión, de gran resistencia, que replica las propiedades estructurales del material base una vez evaporado el solvente[24].

Este tipo de unión es especialmente adecuado para entornos húmedos o sumergidos, ya que no presenta una interfaz adhesiva vulnerable al agua, como ocurre con colas epoxi u otros sistemas basados en polímeros añadidos. Además, permite conservar la integridad geométrica del diseño al no requerir espesores adicionales ni superficies rugosas.

Las uniones por disolución en termoplásticos como ABS o ASA presentan una resistencia a la tracción superior al 80 % de la del material original cuando el proceso de unión se realiza en condiciones controladas[25]. La MEK ha sido utilizada tradicionalmente en la industria para la unión de carcasas de plástico expuestas a ambientes agresivos, incluidos sistemas marinos, de fontanería y componentes eléctricos impermeables.

Su aplicación, sin embargo, requiere precisión y ventilación adecuada, dado que se trata de un compuesto orgánico volátil y potencialmente irritante. Se recomienda su uso con guantes, mascarilla y en zonas con flujo de aire controlado. Una vez aplicada, la unión alcanza su rigidez inicial en pocos minutos, aunque la resistencia mecánica máxima se obtiene transcurridas entre 12 y 24 horas.

3.8 Impresión 3D

Una vez finalizado el diseño de todas las piezas del módulo de propulsión en Autodesk Inventor, se procedió a la preparación para su fabricación mediante impresión 3D. Para ello, los modelos sólidos fueron exportados en formato .STL, compatible con los entornos de laminado más utilizados, asegurando así la integridad geométrica del diseño original durante la transición al entorno de fabricación. Destacar que las imágenes pertenecen al material PLA, pero los cálculos se han realizado para el material ASA, debido a que es el material seleccionado para el desarrollo del dispositivo.

La siguiente etapa se desarrolló en Bambu Studio, el software oficial de laminado (slicer) de la impresora Bambu Lab P1P, utilizado en este proyecto. En esta plataforma se realizaron los ajustes específicos de cada pieza, incluyendo la orientación en el plano de impresión, la configuración de soportes para geometrías sobresalientes, la selección del patrón de relleno y el porcentaje de densidad interna, así como los parámetros térmicos y de velocidad adecuados al filamento ASA utilizado. Estas configuraciones fueron claves para garantizar la calidad superficial, la resistencia estructural y la fidelidad dimensional de las piezas impresas.

Una vez completados todos los ajustes, los modelos fueron procesados para generar el archivo de instrucciones G-CODE, que contiene todas las trayectorias y parámetros que la impresora debe seguir durante el proceso de fabricación. Este archivo fue transferido a la Bambu Lab P1P, la cual ejecutó la impresión de cada componente con alta precisión, gracias a su sistema de extrusión directa y calibración automática de la base.

3.8.1 Cuerpo estructural

La primera pieza fabricada mediante impresión 3D fue el cuerpo estructural del módulo de propulsión, elemento fundamental dentro del conjunto al encargarse de mantener la geometría global, integrar los diferentes componentes (hélice, aletas y alma interna) y resistir las fuerzas hidrodinámicas generadas durante la navegación subacuática. Dada la longitud de la pieza y las limitaciones del volumen de impresión de la impresora Bambu Lab P1P, se decidió dividir el cuerpo en dos mitades, que posteriormente serían ensambladas mediante un adhesivo químico.

Los archivos originales fueron diseñados en Autodesk Inventor, y posteriormente exportados a formato STL para su importación en el software Bambu Studio, donde se preparó cada mitad por separado. En este entorno se configuraron los parámetros de impresión como la orientación y el tipo de relleno, con el objetivo de obtener una estructura resistente y optimizada para el entorno marino.

Primera mitad del cuerpo

La primera parte impresa corresponde a la sección inferior del cuerpo, la cual presenta una geometría cónica y ranuras verticales para la inserción de las aletas. Para esta pieza se empleó un relleno tipo giroide, ideal para estructuras que requieren una buena relación entre rigidez y peso. La estimación generada por el software Bambu Studio fue la siguiente:

1. Filamento total: 73,91 m
2. Masa de material: 223,99 g
3. Coste estimado: 5,60 €
4. Tiempo de impresión: 5 h 31 min
5. Tiempo total con planificación: 5 h 37 min

La Figura 3-10 muestra la previsualización de esta sección en Bambu Studio, mientras que la Figura 3-11 recoge el resultado final tras la impresión.

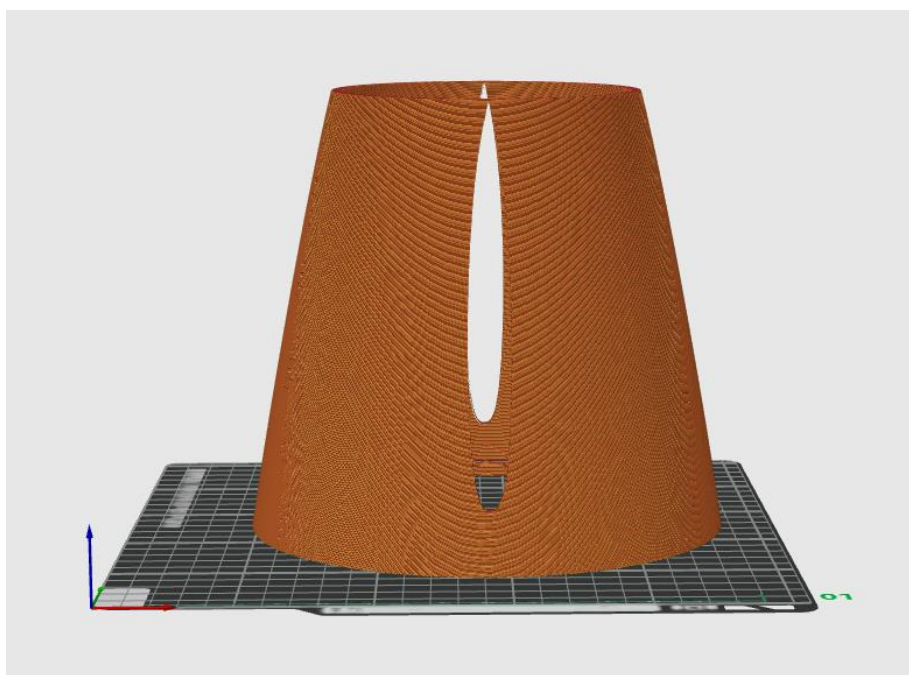


Figura 3-10 Primera mitad del cuerpo, Bambu Studio (autoría propia)



Figura 3-11 Primera mitad del cuerpo impresa (autoría propia)

Segunda mitad del cuerpo

La segunda parte corresponde a la parte superior del cuerpo estructural, diseñada para alojar el soporte de la hélice y cerrar el conjunto en continuidad con la geometría de la mitad inferior. También en este caso se utilizó relleno giroide y se adaptó la orientación del modelo para minimizar el uso de soportes.

Los parámetros asociados a esta impresión fueron los siguientes:

1. Filamento total: 30,25 m
2. Masa de material: 91,69 g
3. Coste estimado: 2,29 €
4. Tiempo de impresión: 2 h 20 min
5. Tiempo total con planificación: 2 h 27 min

Las Figura 3-12 y Figura 3-13 muestran respectivamente el modelo digital laminado y la pieza

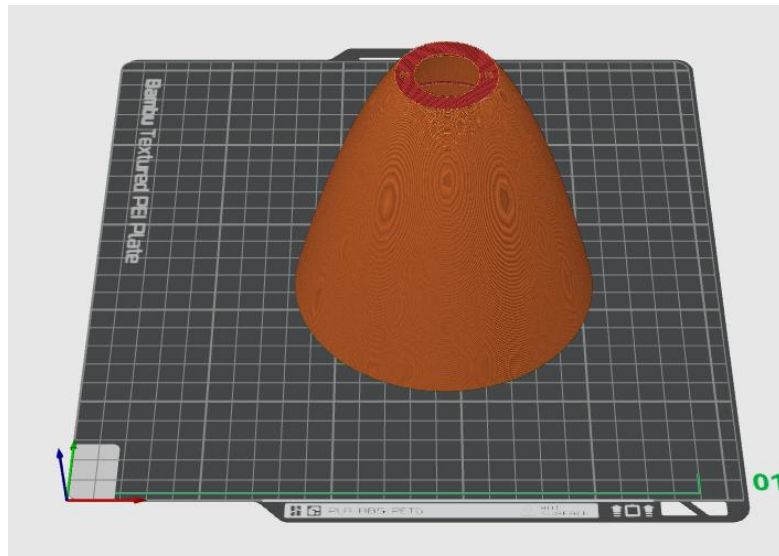


Figura 3-12 Segunda mitad del cuerpo, Bambu Studio (autoría propia)

fabricada.



Figura 3-13 Segunda mitad del cuerpo impresa con la hélice acoplada (autoría propia)

Ensamblaje de ambas mitades

Para unir ambas secciones del cuerpo estructural se opta por el uso de metil etil cetona (MEK), un adhesivo disolvente que actúa sobre materiales termoplásticos como el ASA. Este compuesto permite obtener una unión química entre ambas superficies mediante la disolución superficial y la posterior solidificación conjunta del material. Se trata de una técnica especialmente recomendada cuando se busca una fusión permanente, estanca y resistente a esfuerzos mecánicos moderados. La línea de unión fue cuidadosamente alineada para asegurar continuidad geométrica y resistencia estructural.

En conjunto, el cuerpo estructural impreso presenta buena fidelidad dimensional, acabado uniforme y resistencia adecuada, sirviendo de base para el resto del sistema propulsor.

La Figura 3-14 muestra el cuerpo estructural al completo, con la hélice acoplada en su parte posterior.



Figura 3-14 Cuerpo estructural con la hélice (autoría propia)

3.8.2 Alma interna de refuerzo

La segunda fase del proceso de fabricación se centró en la impresión del sistema de refuerzo interno, concebido para aportar rigidez estructural adicional al conjunto del módulo de propulsión. Este elemento, denominado alma interna, está constituido por una serie de discos concéntricos que se insertan longitudinalmente en el interior del cuerpo estructural previamente fabricado. Su función principal es distribuir las cargas a lo largo del eje del módulo, resistiendo esfuerzos de compresión y flexión generados durante la navegación y la manipulación del dispositivo.

El diseño de estos discos se realizó de forma que se adaptaran a la geometría interna del cuerpo estructural, garantizando un acoplamiento preciso sin generar interferencias. Para su fabricación, se utilizaron archivos CAD desarrollados en Autodesk Inventor, posteriormente exportados e introducidos en el software Bambu Studio. Este entorno permitió preparar la impresión optimizando parámetros como el tipo de relleno y el uso eficiente de filamento.

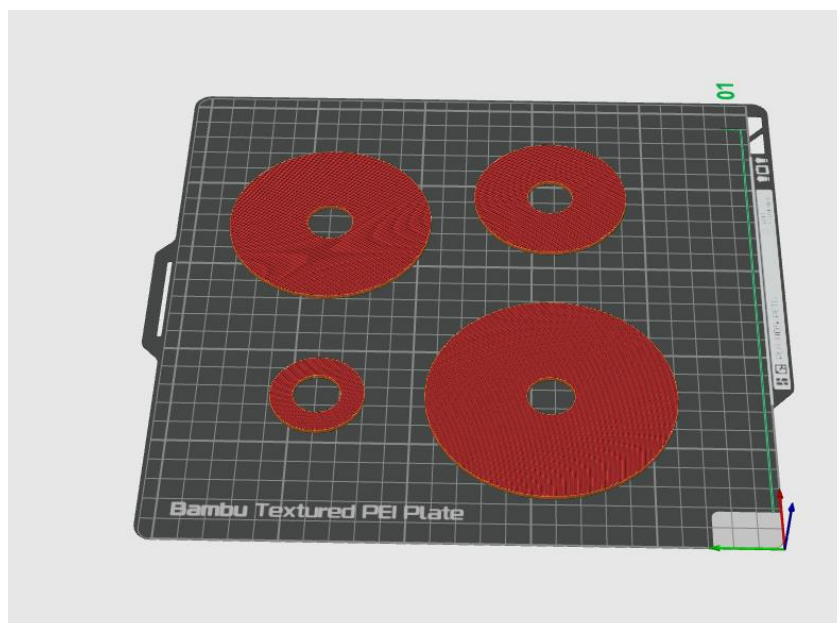


Figura 3-15 4 discos en la base de impresión (autoría propia)

En la Figura 3-15 puede observarse la disposición de los distintos discos sobre la base de impresión virtual. Cada uno de ellos fue diseñado con un orificio central para permitir el paso del cableado del motor y mejorar el ensamblaje. Además, uno de estos discos fue directamente integrado en el proceso de ensamblaje, como se muestra en la Figura 3-16, insertado en una de las mitades del cuerpo estructural antes del montaje final, proporcionando una sujeción firme desde el interior.



Figura 3-16 Disco integrado (autoría propia)

Para la impresión de estas piezas se utilizó la impresora Bambu Lab P1P.

La impresión del primer grupo de discos implicó:

1. Consumo de 13,48 metros de filamento
2. Peso de 40,84 gramos.
3. Tiempo total de 59 minutos.
4. Coste estimado 1,02€.

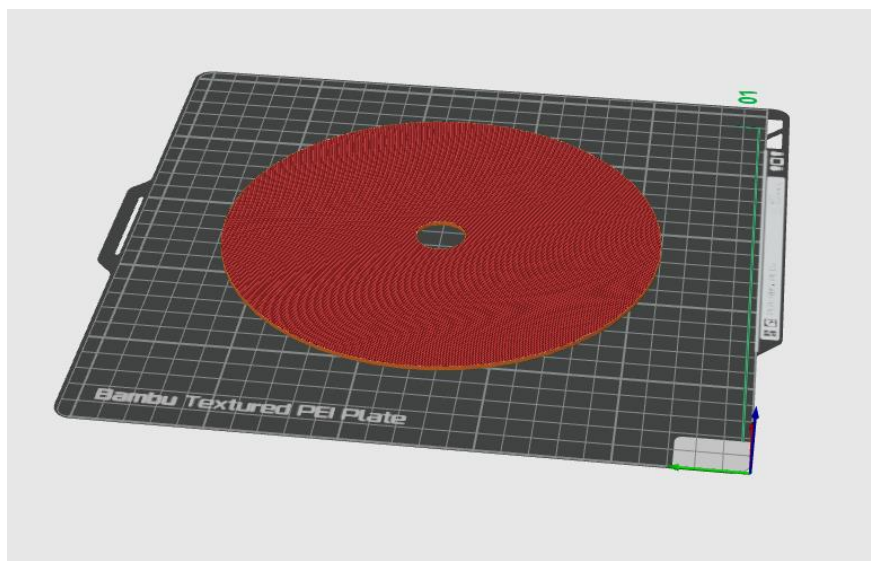


Figura 3-17 Disco en base de impresión (autoría propia)

La impresión del disco más grande que se visualiza en la Figura 3-17 requirió:

1. Consumo de 17,87 metros de filamento.
2. Peso de 54,15 gramos.
3. Tiempo total de 1 hora y 8 minutos.
4. Coste estimado 1,35€.

Estas cifras fueron generadas directamente por el software Bambu Studio durante la creación del archivo G-CODE, permitiendo un control preciso tanto del material empleado como del tiempo de fabricación.

3.8.3 Aletas

El proceso de impresión de las aletas estabilizadoras del módulo de propulsión siguió los mismos pasos metodológicos que el resto de componentes: partiendo del modelado paramétrico realizado en Autodesk Inventor, se exportaron los archivos en formato STL para su posterior tratamiento en el software de laminado Bambu Studio. En este entorno, se ajustaron parámetros clave como la orientación, la densidad de relleno y la necesidad de estructuras de soporte, especialmente relevantes para ciertas geometrías.

En el caso de la aleta de mayor tamaño visible en la Figura 3-18, se optó por dividir el modelo en tres partes independientes, debido a las limitaciones físicas del volumen de impresión de la impresora Bambu Lab P1P. Estas partes se imprimieron por separado y serán ensambladas posteriormente mediante adhesivo MEK, garantizando así la continuidad estructural y la resistencia mecánica de la pieza final. En esta misma imagen puede observarse la estructura verde de soporte generada automáticamente por el software para crear el paso de cable destinado a la hélice.

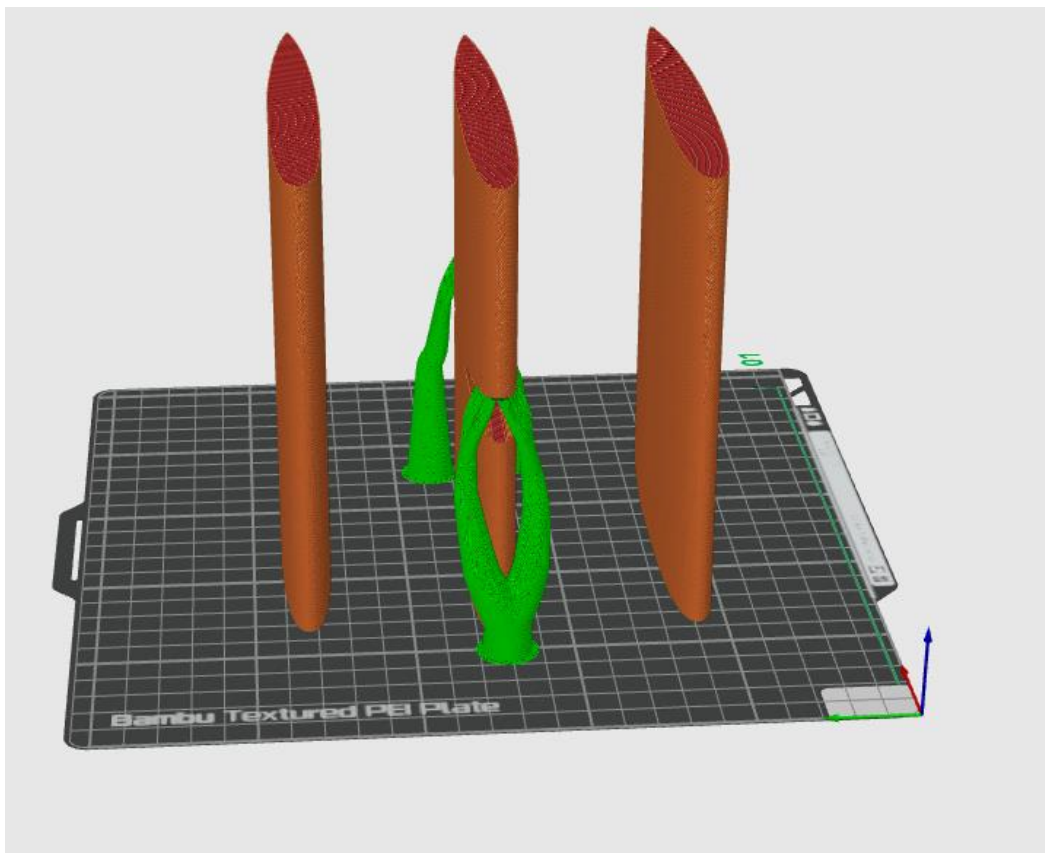


Figura 3-18 Aleta principal (autoría propia)

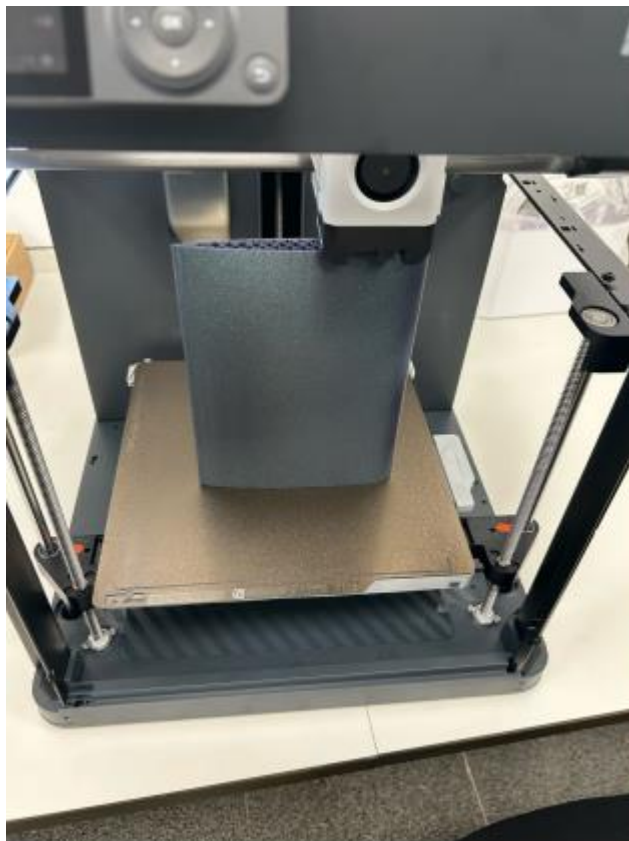


Figura 3-19 Una de las aletas secundarias en la impresora (autoría propia)

El segundo modelo de aleta, de menor tamaño, fue impreso directamente en dos partes independientes como se ve en la Figura 3-19. Esta decisión no solo respondió a limitaciones de espacio en el volumen de impresión, sino que además permitió facilitar el posterior acople de ambas aletas en conjunto con el cuerpo estructural del módulo de propulsión. Esta solución modular contribuye a una manipulación más eficiente durante el ensamblaje y una impresión optimizada, sin comprometer la geometría aerodinámica del perfil NACA 0012 definido durante la fase de diseño.

Ambas aletas fueron fabricadas empleando la impresora Bambu Lab P1P. Los parámetros de impresión fueron definidos cuidadosamente para asegurar la integridad dimensional y estructural del perfil.

La impresión del primer conjunto de piezas de la aleta principal (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) requirió

1. Consumo de 97,86 metros de filamento.
2. Peso de 296,58 gramos.
3. Coste estimado de 7,41€
4. Tiempo total de 6 horas y 13 minutos.



Figura 3-20 Aleta principal unida (autoría propia)

La impresión del segundo grupo de piezas (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.) requirió:

1. Consumo de 46,15 metros de filamento.
2. Peso de 139,86 gramos.
3. Coste estimado de 3,5€
4. Tiempo total de 3 horas y 12 minutos.

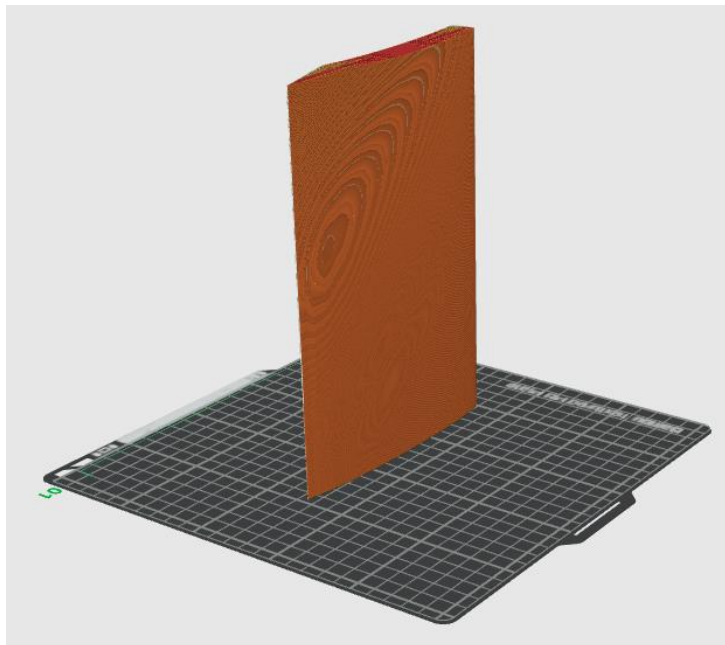


Figura 3-21 Aleta secundaria (autoría propia)

Todos estos datos fueron proporcionados directamente por el software Bambu Studio durante la generación del archivo G-CODE, lo que permitió una planificación precisa del consumo de material, coste económico y del tiempo de producción. Finalmente, la unión de las secciones de cada aleta se realizará de forma manual mediante la aplicación de metil etil cetona (MEK), asegurando una fijación química efectiva entre las superficies de ASA.

3.9 Ensamblaje

Finalizado el proceso de fabricación aditiva de todas las piezas que componen el módulo de propulsión, se procede a su ensamblaje. Esta etapa implica la integración física de los distintos componentes impresos en 3D, cuerpo estructural, alma de refuerzo y aletas, en una única unidad funcional que soporte las condiciones de operación previstas en un entorno marino.

En la Figura 3-22 se muestran las piezas principales tras su fabricación, listas para el montaje. Como puede observarse, los elementos se imprimieron por separado y en varios segmentos, debido tanto a

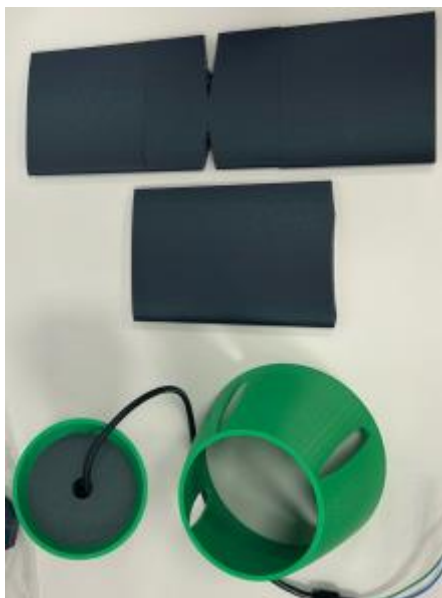


**Figura 3-22 Piezas impresas
(autoría propia)**

limitaciones dimensionales de la impresora como a razones prácticas de diseño. Posteriormente, estos segmentos fueron ensamblados con la ayuda de adhesivo MEK (metil etil cetona), cuya compatibilidad con el material ASA garantiza una unión sólida y resistente en entornos agresivos.

En la Figura 3-23 puede observarse una fase intermedia del ensamblaje, donde el cuerpo estructural ya integra las aletas superior y laterales. El diseño modular del sistema ha permitido una unión precisa y robusta de los componentes, manteniendo la continuidad geométrica de los perfiles hidrodinámicos y asegurando la alineación correcta para un funcionamiento eficiente en el agua.



Figura 3-23 Cuerpo con aleta superior y principal (autoría propia)

4 RESULTADOS / VALIDACIÓN / PRUEBA

4.1 Introducción

Una vez completadas las fases de diseño, fabricación e impresión 3D del módulo de propulsión, se procedió a su validación mediante distintas pruebas, tanto virtuales como físicas, con el fin de verificar la viabilidad estructural, funcional y geométrica del conjunto.

Por un lado, se llevaron a cabo análisis por elementos finitos (FEA) aplicados sobre los componentes clave, como la popa y las aletas estabilizadoras, utilizando las condiciones reales de operación previstas: velocidad de crucero de 5,2 m/s, inmersión total a 30 m de profundidad y solicitaciones hidrodinámicas tanto longitudinales como transversales. Estas simulaciones permitieron estudiar el comportamiento estructural del sistema frente a esfuerzos mecánicos, presión hidrostática y carga dinámica generada por la hélice, con el objetivo de identificar posibles puntos críticos, deformaciones excesivas o fallos por tensión. En el Anexo- se muestran las fuerzas y presiones aplicadas así como su punto de aplicación.

Por otro lado, se realizaron también pruebas de montaje en laboratorio, en las que se ensamblaron las distintas piezas impresas con el fin de verificar la precisión dimensional obtenida mediante impresión 3D, así como la compatibilidad entre los distintos encajes y superficies de contacto. Estas pruebas permitieron validar que las tolerancias de impresión eran adecuadas, que las piezas encajaban correctamente y que el módulo era ensamblable de forma manual sin necesidad de posprocesado adicional. Se comprobó especialmente la correcta unión de las dos mitades del cuerpo estructural, el alojamiento del alma interna, el ajuste de las aletas y la fijación segura de la hélice.

De este modo, se garantiza que el diseño no solo es funcional desde el punto de vista estructural, sino también viable a nivel de fabricación y ensamblaje, completando así una validación integral del módulo de propulsión.

4.2 Análisis estructural

Una vez finalizada la fase de diseño y fabricación, se llevó a cabo un análisis estructural mediante simulación por elementos finitos (FEA) en Autodesk Inventor para validar la resistencia del módulo de propulsión frente a las cargas principales identificadas durante el estudio previo de esfuerzos. La simulación se centró en el cuerpo estructural del módulo, particularmente en la zona de la popa, que es la encargada de soportar las fuerzas generadas por el empuje de la hélice T200 y la presión hidrodinámica derivada del movimiento del vehículo a una velocidad de 5,2 m/s.

En la simulación se aplicó una carga concentrada de 50 N en el punto de unión de la hélice, correspondiente al empuje máximo generado por la T200 a 16 V, y se restringieron los grados de libertad en los puntos de fijación del módulo, simulando su unión al resto del vehículo.

4.2.1 Tensión de Von Mises

El análisis arrojó un valor máximo de tensión equivalente de Von Mises de 37,01 MPa, localizado en la zona de transición entre el soporte de la hélice y la carcasa estructural, como se puede observar en Figura 4-1. Este valor se encuentra por debajo del límite elástico del material utilizado (ASA), cuyo valor característico es de 50 MPa. Por lo tanto, el diseño cumple con los criterios de resistencia estática.

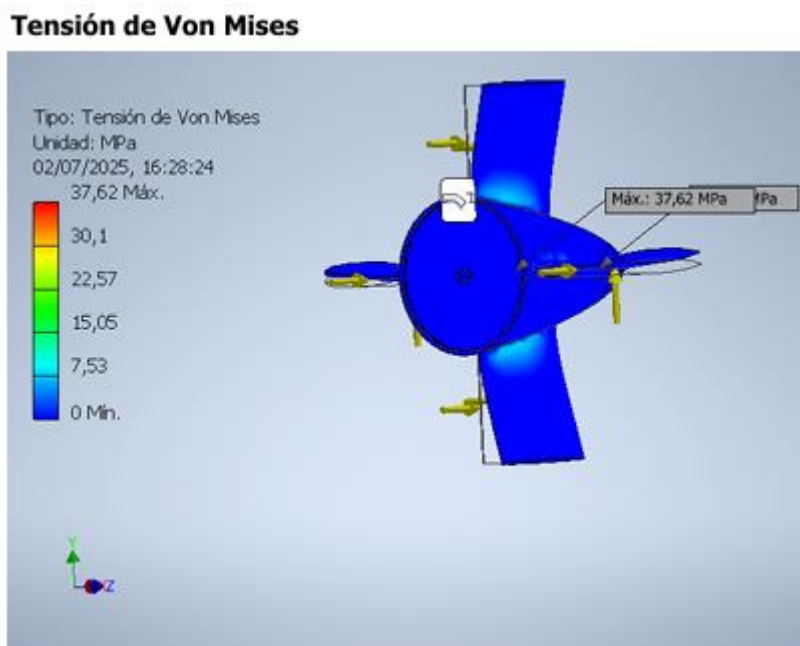


Figura 4-1 Tensión de Von Mises (autoría propia)

4.2.2 Coeficiente de seguridad

El coeficiente de seguridad (factor de seguridad) obtenido en la zona más crítica del modelo fue de aproximadamente 1,35. Este valor, aunque moderado, es adecuado para aplicaciones no críticas, especialmente considerando que el empuje máximo empleado en la simulación representa el valor extremo de operación, no el régimen de trabajo habitual (que se sitúa en torno a 25–30 N). Esto implica que, en condiciones normales, el módulo operará con un margen de seguridad superior al calculado.

4.2.3 Desplazamiento

En cuanto al desplazamiento máximo, se obtuvo un valor de 0,059 mm, visible en la Figura 4-2, en la zona libre opuesta a la fijación, lo que indica una excelente rigidez estructural del conjunto. Este desplazamiento es despreciable en relación con las tolerancias funcionales del sistema, y garantiza el

correcto alineamiento de la hélice y de las aletas estabilizadoras, sin riesgo de deformaciones que puedan afectar a la navegabilidad.

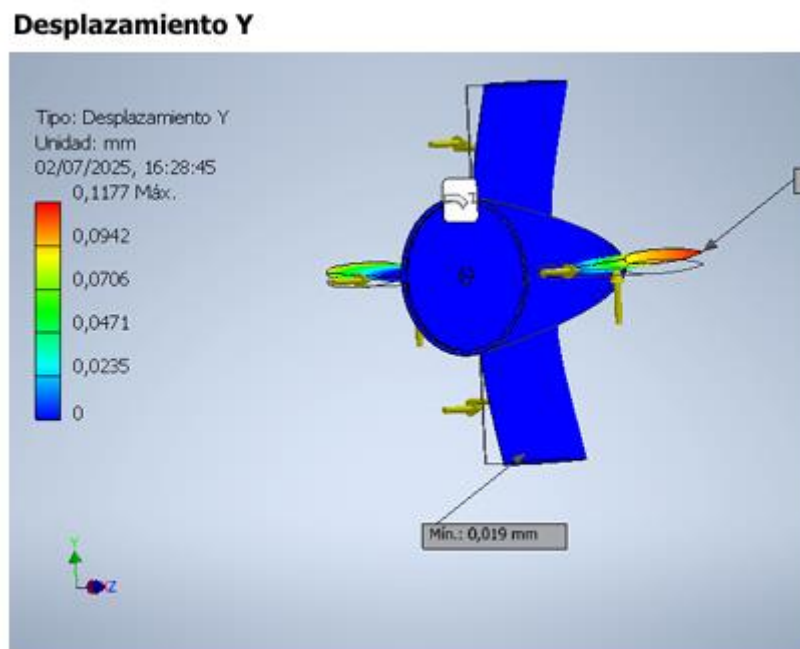


Figura 4-2 Desplazamiento máximo (autoría propia)

4.3 Pruebas de ensamblaje y validación física

Tras haber llevado a cabo el análisis estructural se realizaron las pruebas de ensamblaje. Aunque no se llevó a cabo el montaje completo del módulo de propulsión, se realizaron diversas pruebas de ensamblaje en seco en el laboratorio con el objetivo de verificar la viabilidad del diseño, la precisión de las piezas impresas y su correcta compatibilidad geométrica. Estas pruebas resultaron esenciales para detectar desviaciones dimensionales menores no apreciables en el entorno CAD, pero que sí se manifestaron en la realidad física de las piezas.

En primer lugar, se comprobó el encaje de las aletas en sus ranuras correspondientes dentro del cuerpo estructural. Ambas aletas, tanto la compuesta por dos partes como la completa, encajaron de forma precisa, sin requerir ajustes adicionales, validando la precisión del perfil NACA 0012 implementado en el diseño. La geometría interna de los alojamientos cumplió su función correctamente y permitió una inserción firme y estable.

Sin embargo, durante el montaje de los discos interiores de refuerzo se detectó una incompatibilidad dimensional: aunque en el entorno de modelado se ajustaban perfectamente, al imprimirlos a escala real se observó que no encajaban en el interior del cilindro del cuerpo estructural, observable en la Figura 4-. Para solventar este inconveniente, se redujo el tamaño de los discos en un 2 %, tras lo cual se logró un acoplamiento perfecto visible en la Figura 4-3. Esta modificación confirma la necesidad de considerar holguras prácticas en el diseño para compensar las tolerancias inherentes al proceso de impresión 3D,

especialmente con materiales como el ASA, que pueden experimentar ligeras variaciones durante el enfriamiento.



Figura 4-3 Disco incompatible (autoría propia)



Figura 4-4 Disco acoplado (autoría propia)

Además, en la zona trasera de la popa se detectó una pequeña desalineación provocada por la disposición excéntrica del cable de la hélice T200. Este cable no está centrado axialmente respecto al eje del propulsor, lo que provocaba un leve desajuste en el alineamiento del conjunto. Para corregirlo, fue necesario lijar ligeramente una zona del alojamiento, permitiendo así un acople preciso sin comprometer la estructura ni la funcionalidad del conjunto.

Estas pruebas de montaje constituyen un paso importante para asegurar la viabilidad funcional del diseño, anticipar problemas de ensamblaje y garantizar que el módulo pueda ensamblarse correctamente en condiciones reales de operación.

4.4 Presupuesto

Por último, se obtiene un presupuesto. Para determinar el coste económico asociado al desarrollo del módulo de propulsión, se ha realizado un desglose de los elementos principales que intervienen tanto en la fabricación como en la adquisición de componentes. El presupuesto contempla el coste del material termoplástico ASA utilizado en la impresión 3D de todas las piezas, el adhesivo necesario para su ensamblaje (MEK), la hélice T200 adquirida a la empresa Blue Robotics, y una estimación de la mano de obra correspondiente a las tareas de diseño, fabricación y ensamblaje.

Cabe destacar que, aunque la cantidad de adhesivo utilizada fue relativamente reducida (en torno a 150 mL), se ha considerado el precio del envase completo de 1 L, ya que es la unidad mínima de venta habitual en distribuidores industriales.

En cuanto a la hélice, se ha considerado el precio medio oficial de mercado a fecha de redacción de este documento, expresado en euros tras la conversión desde su valor original en dólares estadounidenses. Por su parte, la valoración de la mano de obra se ha estimado a razón de 15 €/hora, contemplando las horas efectivas dedicadas a la preparación y ejecución del prototipo, con un criterio conservador.

El resultado final ofrece una estimación ajustada del coste directo asociado al desarrollo del módulo de propulsión, sin considerar aspectos como amortización de equipos, licencias de software o costes indirectos.

Desglose económico:

1. Impresión 3D (filamento ASA): 24,67 €. Se muestra el precio de impresión en las Figuras 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8, Figura 4-9 y Figura 4-10.
2. MEK (bote de 1 L): 9,70 €. Aunque el consumo real fue de 150 mL ($\approx 1,46$ €), es necesario adquirir el bote completo.
3. Hélice Blue Robotics T200: 202,00 € (precio oficial 220 USD ≈ 202 €)[16].
4. Mano de obra (10 h $\times$ 15 €/h): 150,00 €.
5. Total estimado: **386,37 €**.

Además del análisis estructural global del módulo, resulta necesario considerar los esfuerzos puntuales que pueden afectar a las aletas durante la navegación. Estas superficies no solo cumplen una función de estabilización, sino que también están directamente expuestas a dos fuentes de carga: la acción de corrientes marinas externas y la fuerza generada por el propio avance del vehículo. Por tanto, se ha desarrollado un estudio específico para cuantificar ambas contribuciones.

Estimación total		
Total Filament:	73,91 m	223,99 g
Model Filament:	73,91 m	223,99 g
Coste:	5,60	

Figura 4-5 Primera mitad del cuerpo (autoría propia)

Estimación total		
Total Filament:	30,25 m	91,69 g
Model Filament:	30,25 m	91,69 g
Coste:	2,29	

Figura 4-6 Segunda mitad del cuerpo (autoría propia)

Estimación total		
Total Filament:	97,86 m	296,58 g
Model Filament:	94,89 m	287,57 g
Coste:	7,41	

Figura 4-74-3 Aleta principal (autoría propia)

Estimación total		
Total Filament:	46,15 m	139,86 g
Model Filament:	46,15 m	139,86 g
Coste:	3,50	

Figura 4-8 Aleta secundaria (precio unitario)
(autoría propia)

Estimación total		
Total Filament:	17,87 m	54,15 g
Model Filament:	17,87 m	54,15 g
Coste:	1,35	

Figura 4-9 Disco ancho (autoría propia)

Estimación total		
Total Filament:	13,48 m	40,84 g
Model Filament:	13,48 m	40,84 g
Coste:	1,02	

Figura 4-10 Resto de discos (autoría propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Introducción

Este apartado tiene como objetivo principal recapitular los logros alcanzados a lo largo del proyecto y valorar en qué medida se han cumplido los objetivos inicialmente propuestos. A lo largo del trabajo se ha desarrollado un módulo de propulsión específico para un dron subacuático de tipo MoAUV, abordando todas las fases del proceso: desde el análisis técnico preliminar y el diseño asistido por ordenador, hasta la validación estructural por simulación y la fabricación parcial mediante impresión 3D.

Además de evaluar el grado de cumplimiento de los objetivos planteados, este apartado pone en perspectiva las decisiones tomadas a lo largo del desarrollo, destacando los aciertos del proceso, las dificultades encontradas y las soluciones implementadas. Se reflexiona también sobre la viabilidad del sistema construido y su posible evolución en versiones futuras, identificando oportunidades de mejora o expansión en función de los resultados obtenidos y de las limitaciones detectadas.

5.2 Conclusiones por objetivos

5.2.1 Desarrollar un Estado del Arte

El primer objetivo consistía en el desarrollo del Estado del Arte. en este trabajo ha permitido contextualizar adecuadamente el diseño del módulo de propulsión dentro de la ingeniería de vehículos submarinos autónomos. Se ha realizado una revisión técnica rigurosa y estructurada que abarca desde los orígenes históricos de los AUV hasta las tecnologías de fabricación y simulación más actuales.

Se ha profundizado en la evolución de los AUV y, especialmente, en los Modular AUV (MoAUV), analizando su papel creciente en tareas militares, científicas e industriales. Asimismo, se ha presentado una caracterización detallada de las fuerzas hidrodinámicas a las que están sometidos estos vehículos durante su navegación subacuática, estableciendo la base teórica necesaria para comprender los esfuerzos estructurales del diseño.

En cuanto a los sistemas de propulsión, se ha documentado una amplia variedad de tecnologías, desde las hélices convencionales y con tobera hasta soluciones más avanzadas como la propulsión por aletas oscilantes o por supercavitación, lo que ha permitido justificar con criterio la elección de la propulsión por hélice para este diseño.

También se ha hecho una introducción detallada a las herramientas digitales empleadas, como Autodesk Inventor y Bambu Studio, y a la tecnología de impresión 3D mediante FDM, que resultan claves para el enfoque de fabricación adoptado. Este marco teórico ha permitido no solo orientar el diseño desde una perspectiva sólida, sino también justificar la viabilidad técnica de su desarrollo y posterior producción.

En conjunto, el Estado del Arte ha cumplido su función de servir como base técnica y conceptual para el resto del proyecto, guiando las decisiones de diseño y conectando la teoría con la práctica de forma coherente y fundamentada..

5.2.2 Diseñar el módulo de propulsión

El desarrollo del módulo de propulsión se ha basado en un enfoque funcional, estructural y práctico, orientado desde el inicio a obtener un diseño que pudiera fabricarse con impresión 3D y ensamblarse de forma sencilla. El conjunto se compone de tres elementos principales: el cuerpo estructural, un alma

interna de refuerzo y dos aletas estabilizadoras con perfil NACA 0012, además de la integración de la hélice T200 de Blue Robotics.

El cuerpo estructural fue diseñado en dos mitades debido a las limitaciones volumétricas de la impresora Bambu Lab P1P. Estas mitades fueron concebidas con zonas de contacto planas para facilitar su unión mediante metil etil cetona (MEK). En su interior, se alojan los discos del alma de refuerzo, cuya función es dotar al conjunto de una mayor rigidez, permitiendo resistir las cargas hidrodinámicas esperables durante la navegación.

Las aletas se diseñaron en dos configuraciones: una de ellas como aleta única, dividida en tres partes por razones de impresión, y otra compuesta por dos piezas simétricas. En ambos casos, se utilizó el perfil NACA 0012 por su carácter simétrico y su idoneidad para flujos variables, garantizando estabilidad direccional sin generar desequilibrios. Se incorporaron rebajes en la base de las aletas para su acople directo al cuerpo estructural.

Desde el punto de vista estructural, el diseño fue validado mediante simulaciones de esfuerzos estáticos, considerando las condiciones de carga más exigentes: la presión hidrostática a 30 metros de profundidad y las fuerzas combinadas de arrastre y empuje sobre las aletas. Los resultados mostraron que las zonas críticas del cuerpo superaban el límite elástico del ASA cuando el interior del módulo era completamente estanco. Esta situación se resolvió incorporando orificios de equilibrado que permiten la entrada de agua, igualando la presión interior y exterior, lo que redujo considerablemente las tensiones internas.

Las aletas, por su parte, mostraron un comportamiento excelente frente a las solicitaciones: la tensión máxima registrada fue de 37,1 MPa, muy por debajo del límite elástico del ASA (50 MPa), y el coeficiente de seguridad alcanzado fue de 1,35, confirmando su viabilidad sin necesidad de refuerzos adicionales. Además, el desplazamiento máximo fue de 0,4 mm, perfectamente asumible para este tipo de estructura.

En conjunto, el diseño final del módulo cumple con los requisitos de funcionalidad, resistencia estructural y facilidad de fabricación. Cada decisión de diseño ha sido fundamentada con criterios técnicos y validada con simulaciones, demostrando que el módulo no solo es viable sobre el papel, sino también adaptable a condiciones reales de operación subacuática.

5.2.3 Fabricación mediante impresión 3D

La fabricación del módulo de propulsión se realizó íntegramente mediante tecnología de impresión 3D FDM, empleando filamento ASA de 1,75 mm de diámetro, seleccionado por su resistencia mecánica, estabilidad térmica y buena respuesta frente al ambiente marino, especialmente en presencia de agua salada. Todas las piezas fueron modeladas previamente en Autodesk Inventor y posteriormente preparadas en el software Bambu Studio, donde se ajustaron parámetros como la orientación, los soportes, el relleno y las tolerancias necesarias para un montaje correcto.

La primera pieza fabricada fue el cuerpo estructural, dividido en dos mitades para adaptarse al volumen de impresión de la Bambu Lab P1P. Ambas mitades se imprimieron con precisión y serán unidas mediante metil etil cetona (MEK), un adhesivo que garantiza una unión resistente y duradera para este tipo de termoplástico.

El alma interna de refuerzo, compuesta por un conjunto de discos, también fue impresa en dos tandas. Durante su montaje se detectó que el ajuste entre los discos y el cuerpo era demasiado justo, lo que llevó a reducir el tamaño de los discos un 2 % y ajustar algunas zonas mediante lijado manual. Estas correcciones menores permitieron que las piezas encajaran correctamente y de forma funcional.

En cuanto a las aletas, se fabricaron dos modelos distintos. La aleta mayor, diseñada como una sola unidad, se imprimió en tres partes y será ensamblada con MEK. Este diseño incluyó un rebaje interno específico para permitir el paso del cable de alimentación de la hélice. La segunda aleta, de menor tamaño, fue impresa directamente en dos partes, lo que facilitó tanto la fabricación como el montaje en conjunto con el cuerpo estructural. Ambas soluciones respetaron el perfil NACA 0012 propuesto en el diseño y mantuvieron una alta fidelidad geométrica.

Durante el proceso se registraron los consumos de filamento, tiempos de impresión y costes estimados por pieza, permitiendo elaborar un presupuesto detallado. En general, la impresión 3D ha demostrado ser una alternativa eficaz, precisa y económica para fabricar el módulo, permitiendo realizar iteraciones rápidas y verificaciones de montaje en laboratorio. Aunque el montaje no se completó en su totalidad, las pruebas realizadas validaron la precisión del diseño y la viabilidad del proceso de fabricación.

5.3 Líneas futuras

Una vez completado el diseño del módulo de propulsión, surgen varias posibles vías de evolución que permitirían ampliar y perfeccionar el trabajo realizado. A continuación, se enumeran algunas propuestas de desarrollo futuro que podrían dar continuidad al proyecto:

5.3.1 Incorporación de maniobrabilidad

Aunque el diseño del módulo de propulsión ha demostrado ser funcional y estructuralmente válido, existen múltiples caminos para seguir desarrollando y mejorando el sistema de cara a futuras versiones. Una de las líneas más relevantes consiste en aumentar la capacidad de maniobrabilidad del vehículo. El diseño actual se basa en un sistema de aletas fijas, lo que limita el control activo del rumbo y la estabilidad en entornos dinámicos.

Una mejora lógica sería la incorporación de superficies móviles, como timones o aletas orientables, que permitan modificar la dirección del flujo y generar momentos de giro en el eje vertical o transversal. Otra opción viable sería añadir hélices auxiliares dispuestas en posiciones estratégicas que generen empuje lateral o de guiñada, permitiendo realizar maniobras complejas como giros en espacios reducidos, estacionamiento dinámico o compensación ante corrientes transversales. Estas modificaciones implicarían un rediseño parcial del módulo, así como la inclusión de sistemas de control y alimentación adicionales, pero su implementación supondría un salto cualitativo en la autonomía y navegabilidad del vehículo.

5.3.2 Fabricación en aluminio 5083

Otra línea de desarrollo a considerar es la fabricación del módulo de propulsión en aluminio 5083, un material ampliamente utilizado en aplicaciones marinas por su excelente resistencia a la corrosión en ambientes salinos, su buena soldabilidad y sus propiedades mecánicas superiores respecto a los termoplásticos[26]. Esta versión metálica permitiría incrementar significativamente la durabilidad del módulo, hacerlo apto para inmersiones prolongadas o a mayores profundidades, y reducir la flexión estructural en zonas críticas.

Para llevar a cabo esta transición, sería necesario adaptar el diseño actual a los requerimientos de mecanizado por control numérico (CNC), lo cual implicaría ajustar ciertas tolerancias, evitar geometrías internas inaccesibles y rediseñar los métodos de ensamblaje. También habría que generar los archivos CAM correspondientes, incluyendo trayectorias de herramienta, velocidades de corte y parámetros de mecanizado óptimos para aluminio 5083. Este proceso abriría la puerta a una fabricación más robusta y profesional.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] «How is Fourth Industrial Revolution changing our economy?», Diplomatist. Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://diplomatist.com/2022/02/03/how-is-fourth-industrial-revolution-changing-our-economy/>
- [2] begonya, «Vehículos: ASV, AUV, ROV y otros», INNOVA oceanografía litoral. Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.oceanografialitoral.com/pregunta-frecuente/vehiculos-asv-auv-rov-y-otros/>
- [3] G. Griffiths, *Technology and Applications of Autonomous Underwater Vehicles*. CRC Press, 2002.
- [4] E. V. Lewis, «Principles of Naval Architecture Second Revision».
- [5] «TFG_CarlosSuarezCampoamor.pdf». Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/66450/TFG_CarlosSuarezCampoamor.pdf?isAllowed=y&sequence=4&utm
- [6] «8_Chapter_Propeller_Cavitation_Noise.pdf». Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://oalib-acoustics.org/website_resources/books_papers/MUN_BOOK/8_Chapter_Propeller_Cavitation_Noise.pdf
- [7] Read «Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics» at NAP.edu. doi: 10.17226/5870.
- [8] M. Chamanara y H. Ghassemi, «Hydrodynamic Characteristics of the Kort-Nozzle Propeller by Different Turbulence Models», *American Journal of Mechanical Engineering*, vol. 4, n.º 5, Art. n.º 5, sep. 2016, doi: 10.12691/ajme-4-5-1.
- [9] «Le Triomphant (S616)», jmodels.net. Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://jmodels.net/de-hombres-y-maquinas/mar-sea/le-triomphant-s616/>
- [10] Y. Zhou, G. Pavesi, J. Yuan, y Y. Fu, «A Review on Hydrodynamic Performance and Design of Pump-Jet: Advances, Challenges and Prospects», *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, n.º 10, Art. n.º 10, oct. 2022, doi: 10.3390/jmse10101514.
- [11] N. P. Babu Mannam, Md. Mahbub Alam, y P. Krishnankutty, «Review of biomimetic flexible flapping foil propulsion systems on different planetary bodies», *Results in Engineering*, vol. 8, p. 100183, dic. 2020, doi: 10.1016/j.rineng.2020.100183.
- [12] S. C. Mancas, S. G. Sajjadi, A. Anderson, y D. Hoffman, «Micro cavitation bubbles on the movement of an experimental submarine Theory and Experiments», *AAFM*, vol. 19, n.º 1, pp. 169-201, dic. 2016, doi: 10.17654/FM019010169.
- [13] «Autodesk Inventor Software | Get Prices & Buy Official Inventor 2026». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.com/products/inventor/overview>
- [14] «bambulab.com/en/support/804923811139526656». Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bambulab.com/en/support/804923811139526656>
- [15] «Mastering FDM 3D Printing: Techniques and Applications», Sculpteo. Accedido: 4 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/3d-printing-technologies-and-processes/fdm-3d-printing/>
- [16] «T200 Thruster», Blue Robotics. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://bluerobotics.com/store/thrusters/t100-t200-thrusters/t200-thruster-r2-rp/>
- [17] C. Gao, W. Hu, y K. Chen, «Research on Multi-AUVs Data Acquisition System of Underwater Acoustic Communication Network», *Sensors (Basel)*, vol. 22, n.º 14, p. 5090, jul. 2022, doi: 10.3390/s22145090.
- [18] «National Oceanic and Atmospheric Administration». Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.noaa.gov/>
- [19] «NACA 4 digit Airfoil database search». Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://airfoiltools.com/search/index?m%5Bgrp%5D=naca4d&m%5Bsort%5D=1>
- [20] «Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA) :: MakeItFrom.com». Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Acrylonitrile-Styrene-Acrylate-ASA>

- [21] «Polylactide - an overview | ScienceDirect Topics». Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/polylactide>
- [22] «PETG», Curbell Plastics. Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.curbellplastics.com/materials/plastics/petg/>
- [23] «ASM Material Data Sheet». Accedido: 2 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://asm.matweb.com/search/specificmaterial.asp?bassnum=ma6061t6>
- [24] Grewel, Benatar, y Park, *Plastics and Composites Welding Handbook*. HANSER PUBN, 2003.
- [25] M. A. Rahman *et al.*, «Design of tough adhesive from commodity thermoplastics through dynamic crosslinking», *Sci Adv*, vol. 7, n.º 42, p. eabk2451, doi: 10.1126/sciadv.abk2451.
- [26] «Ficha Técnica Aluminio AW5083_VACP». Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://acpmaterials.es/images/valenciana/fichas_tecnicas/aluminios/Ficha%20Tecnica%20Aluminio%20AW5083_ACP.pdf

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

A lo largo del desarrollo del presente Trabajo de Fin de Grado se ha mantenido en todo momento una conciencia clara de los aspectos sociales, económicos y ambientales relacionados con el diseño del módulo de propulsión para un dron submarino autónomo.

Desde el punto de vista ambiental, el uso de tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, permite reducir considerablemente el desperdicio de material en comparación con procesos de mecanizado tradicionales. Además, la elección de un material como el ASA, resistente y duradero en entornos marinos, contribuye a alargar la vida útil del producto y minimizar la generación de residuos a medio plazo. También se ha tenido en cuenta la posibilidad de modificar el sistema para utilizar materiales reciclables o más sostenibles en futuras versiones.

En cuanto a las implicaciones económicas, el enfoque modular del diseño busca facilitar la fabricación, el transporte y el mantenimiento, lo que repercute directamente en una reducción de costes. Se ha priorizado el uso de materiales accesibles y técnicas de fabricación viables dentro del entorno universitario, sin renunciar a la funcionalidad y fiabilidad del sistema. Esto permitiría, en el futuro, una producción escalable del submarino a bajo coste, con aplicaciones potenciales en investigación oceanográfica o vigilancia medioambiental.

Por último, desde el punto de vista social, este tipo de tecnologías tiene un impacto positivo en sectores como la defensa, la protección del medio marino y la formación académica. El proyecto, desarrollado en el entorno del Centro Universitario de la Defensa, busca además fomentar la investigación aplicada y el aprendizaje técnico en un contexto orientado al servicio público y la innovación responsable.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El diseño de sistemas tecnológicos, incluso en su escala más reducida, no está exento de implicaciones éticas y sociales. En el caso concreto del desarrollo de un módulo de propulsión para un submarino autónomo modular, estas consideraciones adquieren una dimensión especial, ya que el entorno en el que operará —el medio marino— es especialmente sensible, y su aplicación potencial podría extenderse a usos tanto civiles como estratégicos.

Durante el desarrollo del proyecto se ha mantenido una actitud crítica hacia el impacto que ciertas decisiones técnicas podrían tener más allá del objetivo puramente funcional. El uso responsable de la tecnología ha guiado el enfoque general del trabajo, apostando por soluciones sostenibles, eficientes y adaptadas al entorno en el que el sistema se desplegará.

Uno de los aspectos clave ha sido el compromiso con un diseño que permita la reutilización de componentes, la facilidad de reparación y la mínima generación de residuos, tanto en el proceso de fabricación como en el de operación. Esto no solo reduce la huella ambiental del sistema, sino que contribuye a un uso más racional de los recursos. A ello se suma el hecho de haber optado por procesos accesibles como la impresión 3D, que permite fabricar con precisión, a pequeña escala y sin depender de grandes infraestructuras industriales.

Por otro lado, se ha considerado la posible aplicación de este tipo de sistemas en tareas como la monitorización ambiental, la investigación subacuática o incluso la detección de residuos o vertidos. En ese sentido, el desarrollo de este módulo no solo representa una contribución técnica, sino también una oportunidad de aportar herramientas a proyectos con un enfoque claramente orientado al bien común.

Del mismo modo, se ha evitado deliberadamente diseñar componentes o sistemas que puedan tener un uso directo en operaciones ofensivas o con fines destructivos, optando por una visión centrada en la exploración, la sostenibilidad y el conocimiento.

En resumen, el desarrollo del módulo de propulsión se ha llevado a cabo con una visión ética clara, siendo consciente del contexto en el que se inserta y del tipo de impacto —positivo o negativo— que puede tener una tecnología como esta cuando se traslada al mundo real.

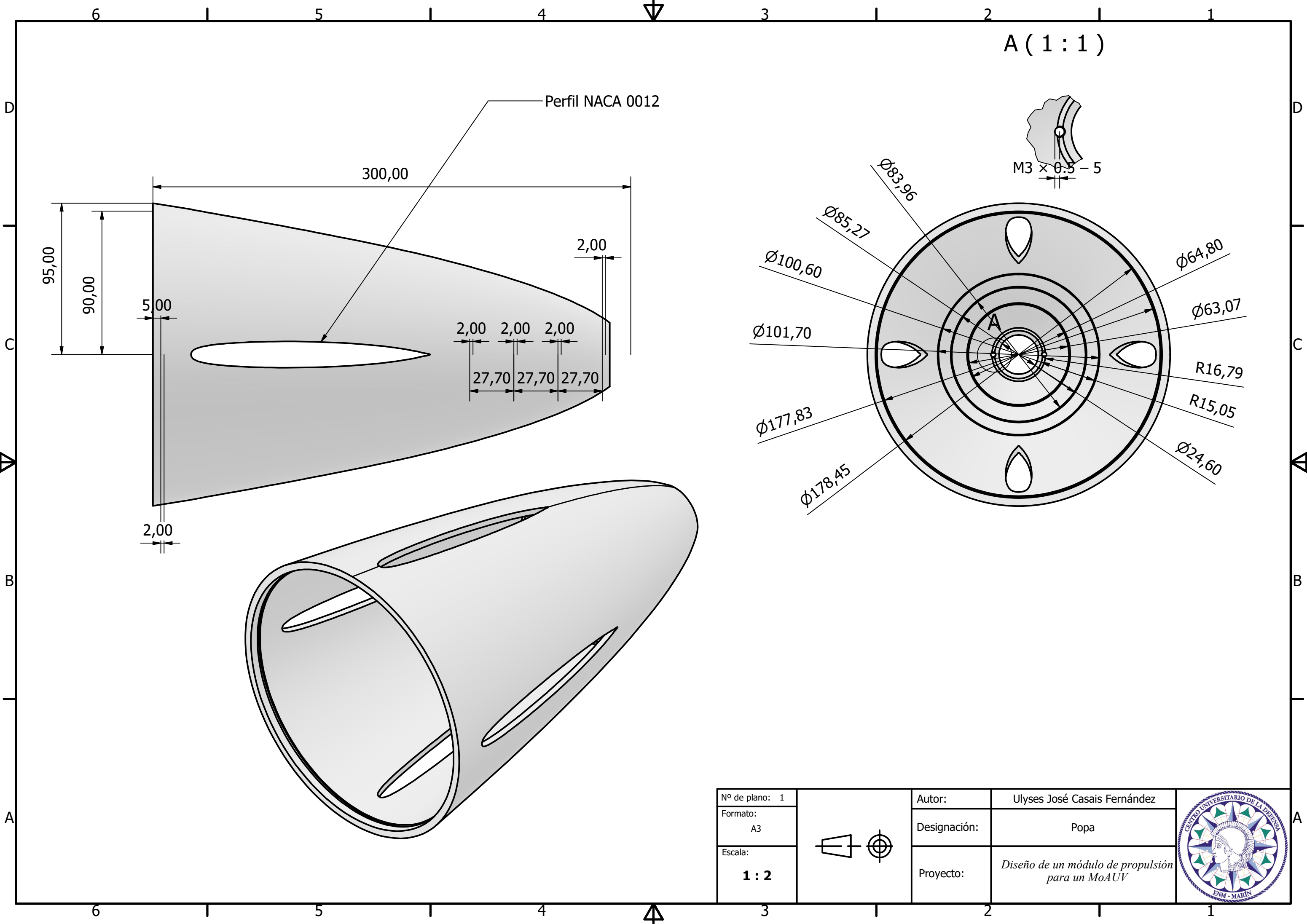
ANEXO III: TABLA NACA

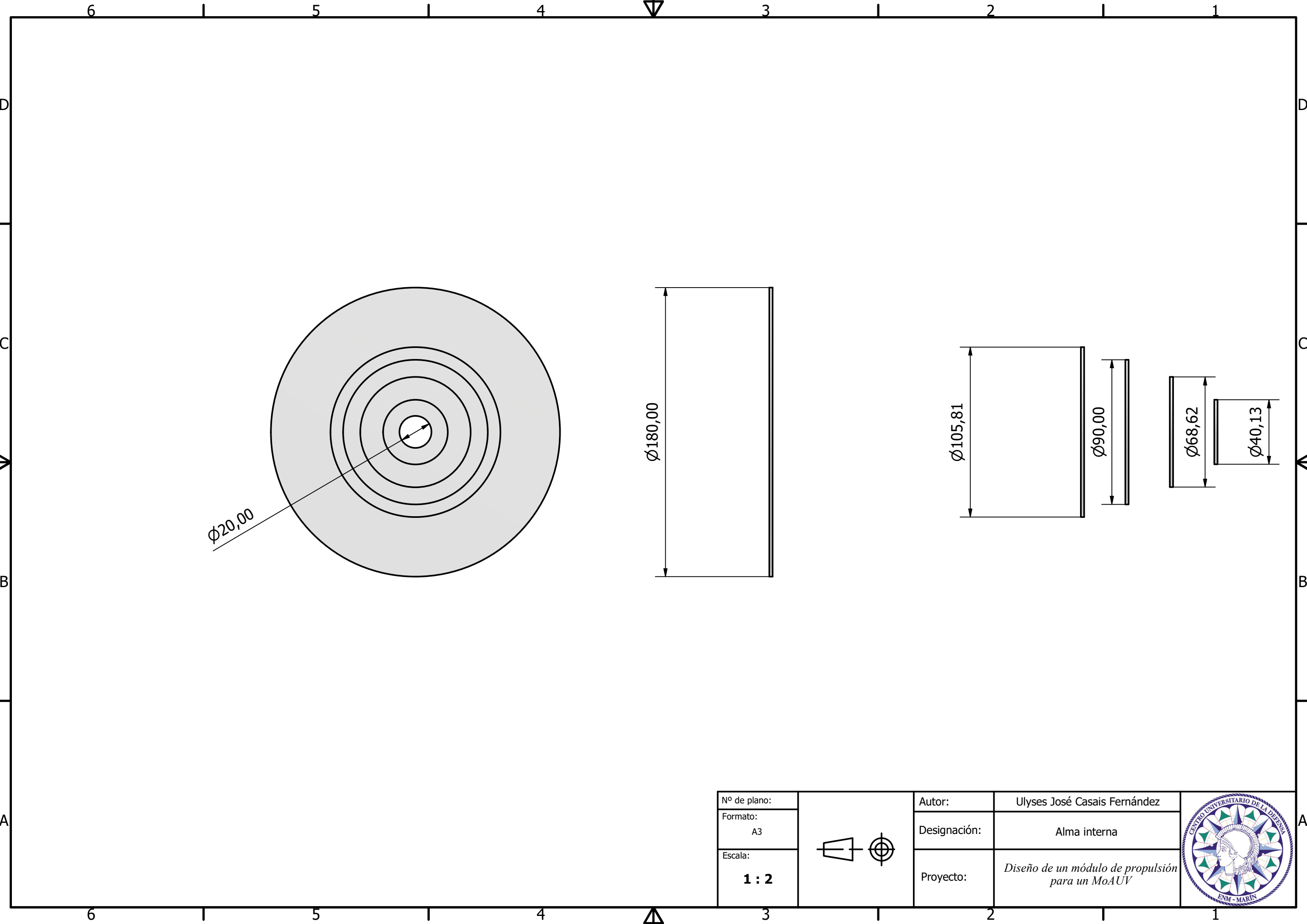
En este anexo se incorporan la tabla con los datos con los que se obtienen los puntos para el perfil NACA 0012.

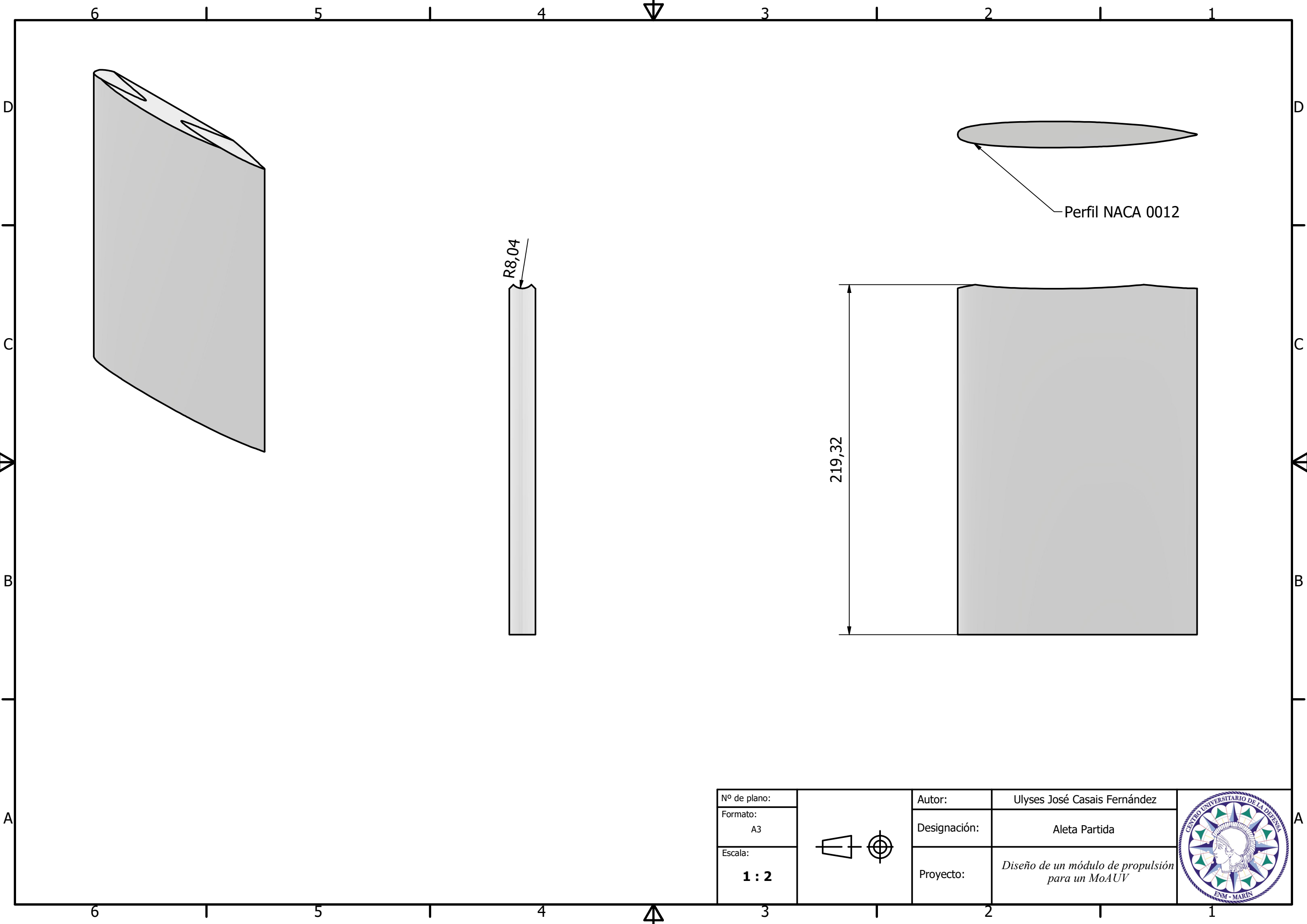
DATOS EN X	DATOS EN Y
0	0
0,3	1,38375
0,978645	2,36265
1,875	3,04845
3,75	3,9312
5,625	4,5363
7,5	5,00595
11,25	5,71755
15	6,24645
18,75	6,66
22,5	6,99225
26,25	7,26315
30	7,48575
37,5	7,81875
45	8,0382
52,5	8,17005
60	8,21745
67,5	8,18565
75	8,0637
82,5	7,8564
90	7,5615
93,75	7,3797
97,5	7,1736
101,25	6,94215
105	6,6834
108,75	6,39525
112,5	6,07485
116,25	5,71905
120	5,3238
123,75	4,8846
127,5	4,3959
131,25	3,8514
135	3,24375
138,75	2,56485
142,5	1,8051
146,25	0,95415
150	0
0,3	-1,38375
0,978645	-2,36265
1,875	-3,04845
3,75	-3,9312
5,625	-4,5363

7,5	-5,00595
11,25	-5,71755
15	-6,24645
18,75	-6,66
22,5	-6,99225
26,25	-7,26315
30	-7,48575
37,5	-7,81875
45	-8,0382
52,5	-8,17005
60	-8,21745
67,5	-8,18565
75	-8,0637
82,5	-7,8564
90	-7,5615
93,75	-7,3797
97,5	-7,1736
101,25	-6,94215
105	-6,6834
108,75	-6,39525
112,5	-6,07485
116,25	-5,71905
120	-5,3238
123,75	-4,8846
127,5	-4,3959
131,25	-3,8514
135	-3,24375
138,75	-2,56485
142,5	-1,8051
146,25	-0,95415
150	0

ANEXO IV: PLANOS







Nº de plano:		Autor:	Ulyses José Casais Fernández	
Formato:		Designación:	Aleta Partida	
Escala:		Proyecto:	<i>Diseño de un módulo de propulsión para un MoAUV</i>	

