

Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño del casco de un submarino de propulsión humana para competición

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Iván Elejabeitia Moreno

DIRECTORES: Carlos Pérez Collazo

Pedro Carrasco Pena

CURSO ACADÉMICO: 2021-2022

Universidade Vigo



Centro Universitario de la Defensa
en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño del casco de un submarino de propulsión humana para competición

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universidade Vigo

RESUMEN

Desde los años 90, diferentes instituciones han venido organizando carreras de submarinos de propulsión humana que enfrentan a estudiantes universitarios de todo el mundo. Estas son la *International Submarine Race* y la *European International Submarine Race*, regatas que tienen lugar en los Estados Unidos y en el Reino Unido respectivamente. En estas regatas, los estudiantes deben ser capaces de diseñar y construir un submarino de propulsión humana completamente inundado para competir contrarreloj a través de un recorrido predefinido contra el resto de equipos. El objetivo de este trabajo es dar el primer paso hacia la futura construcción de un submarino de propulsión humana capaz de participar en estas competiciones representando al CUD-ENM. Para ello se revisará en primera instancia el estado del arte para identificar características comunes de diseños anteriores y se valorarán las necesidades de propulsión y ergonomía del piloto dentro de la cabina. Estas necesidades posteriormente serán tenidas en consideración para el diseño de la carena, que será posteriormente analizada empleando el software CFD Ansys FLUENT con el fin de optimizarla mediante el empleo de perfiles hidrodinámicos.

PALABRAS CLAVE

Submarino de propulsión humana, hidrodinámica, coeficiente de arrastre, diseño, computational fluid dynamics

CONTENIDO

Contenido 1

Índice de Figuras 3

Índice de Tablas 5

1 Introducción y objetivos 7
1.1 Motivación del trabajo 7
1.2 Objetivos 7
1.3 Estructura del trabajo 8

2 Estado del arte 9
2.1 Introducción 9
2.2 International Submarine Races 9
2.2.1 Diseño de los submarinos 10
2.2.2 Certificaciones de los buceadores 13
2.2.3 Informe de diseño 13
2.2.4 Premios 14
2.2.5 Recorrido de la regata 14
2.3 European International Submarine Race (eISR) 16
2.3.1 Normas eISR 17
2.3.2 Diseño del submarino 17
2.3.3 Elegibilidad de los equipos 19
2.3.4 Certificaciones de los buceadores 20
2.3.5 Informe de diseño 20
2.3.6 Premios 20
2.3.7 Recorrido de la regata 21
2.4 Diseños previos 21

3 Materiales y métodos 24
3.1 Software empleado 24
3.1.1 Autodesk AutoCAD 24
3.1.2 Autodesk Inventor 24
3.1.3 Ansys FLUENT 24
3.2 Cálculos previos 25
3.2.1 Requisitos previos 25
3.2.2 Análisis estadístico de diseños previos 25
3.2.3 Dimensiones del piloto 28
3.3 Primer modelo del casco 29
3.3.1 Análisis de la planta y alzado del casco en software CFD Ansys Fluent 31
3.4 Optimización de la carena 35
3.4.1 Nomenclatura NACA de los perfiles 35
3.4.2 Perfiles NACA simétricos 36
3.4.3 Escalado de los perfiles 38
3.4.4 Análisis de los perfiles NACA propuestos para el alzado en Ansys Fluent 40
3.4.5 Análisis de los perfiles NACA propuestos para la planta en Ansys Fluent 42
3.4.6 Generación del casco del submarino 43
3.4.7 Análisis CFD del casco del submarino 45
3.4.8 Posible mejora de la popa 47
3.5 Diseño de los apéndices del submarino 48
3.5.1 Superficies de control 48

3.5.2 Adaptadores de las aletas al casco....50
3.5.3 Salida de aire....50

4 Fabricación del submarino....52
4.1 Introducción....52
4.2 Fabricación del casco....52
4.2.1 Poliéster reforzado con fibra de vidrio....52
4.2.2 Modelo y molde....52
4.2.3 Procesos de laminado....53
4.3 Fabricación de la ventana de proa....54
4.4 Fabricación de las aletas y sus adaptadores al casco....55

5 Resultado, conclusiones y líneas futuras....56
5.1 Resultados....56
5.2 Conclusiones....56
5.2.1 Diseño de los componentes....57
5.2.2 Simulación en Ansys FLUENT....57
5.3 Líneas futuras....57
5.3.1 Perfeccionamiento de la forma de las aletas y su integración al casco....57
5.3.2 Sistema de gobierno....57
5.3.3 Sistema de transmisión de potencia....57
5.3.4 Hélice y sistema de propulsión alternativo....58
5.3.5 Desarrollo del proyecto....59
5.3.6 Aplicaciones militares....59

6 Bibliografía....60

Anexo I: Planos....62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Submarinos en la zona de espera en la ISR [1]. 7
Figura 2-1 Logotipo ISR [1]. 10
Figura 2-2 David Taylor Model Basin, NSWC [3]. 10
Figura 2-3 Vista del piloto a través de la proa del submarino [5]. 12
Figura 2-4 Detalle de la luz de posición de un submarino [5]. 13
Figura 2-5 Circuito de regatas ISR [4]. 15
Figura 2-6 Cuenca del centro de experiencias hidrodinámicas de QinetiQ en Haslar [6]. 16
Figura 2-7 European International Submarine Race [2]. 16
Figura 2-8 Institute of Marine Engineering, Science & Technology [7]. 16
Figura 2-9 Dimensiones del submarino [2], [8]. 17
Figura 2-10 Equipo de escafandra autónoma [9]. 19
Figura 2-11 Circuito de regatas eISR [2]. 21
Figura 2-12 Vista de frente del OMER 8 [10]. 22
Figura 2-13 Posición del piloto en el WASUB V [11]. 22
Figura 2-14 Disposición de los ocupantes en el OMER 9 [12]. 22
Figura 2-15 Submarino TANIWHA [13]. 23
Figura 3-1 Diagramas de cajas y bigotes. 27
Figura 3-2 Alzado y perfil del maniquí. 28
Figura 3-3 Esquematización del pedaleo del piloto. 29
Figura 3-4 Planta y alzado del primer boceto. 30
Figura 3-5 Desarrollo del diseño tridimensional del primer modelo. 31
Figura 3-6 Esquema del proyecto en Fluent. 31
Figura 3-7 Región de fluido y refinado análisis 2 dimensiones. 32
Figura 3-8 Mallado análisis dos dimensiones. 32
Figura 3-9 Panel de configuración Ansys Fluent. 33
Figura 3-10 Panel de resolución Ansys Fluent. 33
Figura 3-11 Contorno de velocidad alzado. 34
Figura 3-12 Contorno de turbulencia alzado. 34
Figura 3-13 Contorno de velocidad planta. 34
Figura 3-14 Contorno de turbulencia planta. 35
Figura 3-15 Partes de un perfil alar [32]. 35
Figura 3-16 Etapas dibujo de un perfil NACA [32]. 36
Figura 3-17 Tubo Venturi [33]. 36
Figura 3-18 Perfil NACA 4 dígitos. 37
Figura 3-19 Perfil NACA 0022. 37
Figura 3-20 Perfil NACA serie 1. 37
Figura 3-21 NACA 16-021. 38
Figura 3-22 Perfil NACA serie 6. 38
Figura 3-23 NACA 66(4)-021. 38
Figura 3-24 NACA 63(3)-018. 38
Figura 3-25 NACA 0022 con el piloto. 39
Figura 3-26 NACA 63(3)-018 con el piloto. 39
Figura 3-27 NACA 63(3)-024 con el piloto. 39
Figura 3-28 NACA 66(4)-027 con el piloto. 40
Figura 3-29 NACA 16-026 con el piloto. 40
Figura 3-30 Contornos de velocidad (izquierda) y turbulencia (derecha) NACA 66(4)-027 (superior) y 16-026 (inferior). 41
Figura 3-31 Salida del flujo de popa NACA 66(4)-027 (superior) y NACA 66(4)-025 (inferior). 42
Figura 3-32 Separación de la capa límite sobre una superficie [38]. 42

Figura 3-33 Contornos de velocidad (izquierda) y turbulencia (derecha) del perfil NACA 0020 (superior), NACA 63(3) 022 (medio) y perfil preliminar (inferior). 43
Figura 3-34 Diagramas de cajas y bigotes con los datos del submarino generado. 44
Figura 3-35 Geometría definitiva del casco en 3D. 44
Figura 3-36 Región de fluido análisis en 3 dimensiones. 45
Figura 3-37 Mallado análisis 3 dimensiones. 46
Figura 3-38 Contornos de velocidad (izquierda) y turbulencia (derecha) del modelo 3D (superior), planta (medio) y alzado (inferior). 47
Figura 3-39 Propuesta de mejora del casco. 48
Figura 3-40 Perfil NACA 64-008 [35]. 48
Figura 3-41 Sección de cola del torpedo MK-46. 49
Figura 3-42 Diferentes geometrías para las aletas. De izquierda a derecha, recta, elíptica y de barrido invertido [17]. 49
Figura 3-43 Aleta generada para el submarino. 50
Figura 3-44 Adaptadores de las aletas verticales (izquierda) y tranversales (derecha). 50
Figura 3-45 Efecto del apéndice en el flujo alrededor del submarino (WASUB V) [11]. 51
Figura 3-46 Apéndice para la luz estroboscópica y la salida de aire. 51
Figura 3-47 Integración del apéndice en el casco. 51
Figura 4-1 Láminas de fibra de vidrio. 52
Figura 4-2 Modelo obtenido mediante CNC en el astillero de Rodman Polishipss. 53
Figura 4-3 Molde del astillero de Rodman Polishipss. 53
Figura 4-4 Resultado del proceso de laminado en el astillero de Rodman Polishipss. 54
Figura 4-5 Molde (izquierda) y ventana ya desmoldada (derecha) del equipo UWHPS [17]. 55
Figura 4-6 Fabricación de las aletas [17]. 55
Figura 5-1 Diseño final del submarino de propulsión humana del CUD-ENM. 56
Figura 5-2 Sistema de transmisión OMER 8 [10]. 58
Figura 5-3 Hélice del submarino MAYFLOWER [21]. 58
Figura 5-4 Aletas oscilantes del submarino WASUB VII [42]. 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Categorías de diseño [4]. 10
Tabla 2-2 Certificaciones de buceo mínimas [2]. 20
Tabla 3-1 Resumen diseño submarinos anteriores. 26
Tabla 3-2 Dimensiones preliminares del casco. 28
Tabla 3-3 Puntos críticos alzado 29
Tabla 3-4 Puntos críticos planta. 29
Tabla 3-5 Perfiles NACA simétricos. 36
Tabla 3-6 Dimensiones y relaciones planta 40
Tabla 3-7 Dimensiones y relaciones alzado 40
Tabla 3-8 D y Cd en el alzado. 41
Tabla 3-9 D y Cd en la planta. 43
Tabla 3-10 Dimensiones y relaciones diseño definitivo. 44

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación del trabajo

Las carreras de submarinos de propulsión humana (Figura 1-1) se han venido realizando desde hace más de dos décadas enfrentando a estudiantes universitarios de todo el mundo, principalmente de Europa y América del Norte. El principal atractivo que lleva a las universidades a apuntarse a estas competiciones es el desafío de ingeniería que supone diseñar y construir una de estas plataformas y que sea capaz de completar el recorrido exitosamente. Existen dos competiciones diferentes, la *International Submarine Races* (ISR) [1] y la *European International Submarine Races* (eISR) [2] en las que los diferentes equipos podrán participar presentando las propuestas de sus submarinos. Estas dos competiciones tienen lugar cada dos años en los Estados Unidos y en el Reino Unido respectivamente y, tras la estabilización de la situación sanitaria generada por la pandemia de la COVID-19, la organización de la eISR ya ha confirmado la reanudación de la carrera para julio del 2022 y se espera que la ISR se retome durante el verano del 2023.



Figura 1-1 Submarinos en la zona de espera en la ISR [1].

1.2 Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo de fin de grado es dar los primeros pasos hacia la creación de un submarino de propulsión humana desarrollado íntegramente por los futuros oficiales de la Armada Española y que sea capaz de participar tanto en la ISR como en la eISR representando al Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar. En concreto el presente trabajo

pretende abordar el diseño de la carena del casco, así como dar una primera aproximación de las superficies de control del submarino y diferentes apéndices necesarios para minimizar la fuerza de arrastre a la que estará sometida el submarino. Para esto, se plantean los siguientes objetivos intermedios:

1. Revisión de los diseños empleados previamente por otros equipos.
2. Análisis de los requerimientos de espacio y ergonomía del piloto.
3. Generación de la geometría del casco.
4. Optimización de la carena.
5. Diseño de las superficies de control.

Para alcanzar los objetivos detallados en el apartado anterior, se comenzará analizando las instrucciones publicadas el pasado mes de enero para la eISR de 2022 y las de la última edición de la ISR. De ambos documentos, se obtendrán aquellas limitaciones en el diseño que deberán tenerse en consideración a la hora de desarrollar la geometría del casco. Seguidamente, se analizarán aquellas características generales de los modelos de submarinos que se presentan a estas competiciones y se realizará un análisis estadístico de las dimensiones de un total de 15 submarinos de ediciones anteriores. De este análisis se obtienen las dimensiones preliminares a partir de las que se desarrollará el submarino del CUD-ENM. Una vez obtenidas dichas dimensiones, y tras analizar los requerimientos de espacio en lo concerniente a la ergonomía del piloto, se generará el primer boceto en del casco del submarino, que será analizado en el software CFD Ansys FLUENT con el fin de optimizarlo más adelante mediante la generación de una nueva carena a partir de perfiles NACA.

Tras obtener la carena optimizada, se procederá a diseñar una primera aproximación de las aletas que conformarán las superficies de control del submarino. Además, se pretende analizar un método para que los requerimientos de drenaje de agua y salida de los gases afecten en la menor medida posible al rendimiento hidrodinámico del submarino.

1.3 Estructura del trabajo

El presente trabajo de fin de grado se estructura como sigue: Sección 2, abarca una descripción del estado del arte, donde se recogen las instrucciones y particularidades que definen este tipo de competiciones, así como características generales de los submarinos empleados en las carreras. Sección 3, se genera un primer modelo del casco del submarino en base a diseños previos y las dimensiones del piloto; este modelo se analiza en Ansys FLUENT con el propósito de optimizarlo buscando reducir su coeficiente de arrastre. Además, se generan diversos apéndices exteriores que pueden afectar a la hidrodinámica del casco. Sección 4: abarca la explicación de los procesos de fabricación de las piezas diseñadas. Sección 5: presenta los resultados del trabajo además de las conclusiones y posibles líneas futuras del mismo.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

En este capítulo se detallará la información relevante y las reglas de las dos competiciones en las que se pretende poder participar con un submarino desarrollado por los futuros oficiales de la Armada Española como resultado del presente trabajo de fin de grado y los sucesivos que se desarrollen para complementarlo. A su vez, se analizarán factores de diseño comunes a los submarinos ya empleados en las competiciones.

Con este propósito, el capítulo se dividirá en tres apartados, los dos primeros correspondientes a las dos competiciones existentes, la *International Submarine Races* y la *European International Submarine Race (eISR)*. En ambas dos el desarrollo se realizará de manera similar, dando en primer lugar una visión general de las mismas, así como su organización y emplazamiento, para dar pie a la explicación de las reglas que limitan el diseño del submarino y la participación de los equipos. Estas reglas especifican aspectos tales como son las dimensiones, la propulsión, el soporte vital de los participantes (botellas de aire), diversos aspectos de seguridad, los criterios de elegibilidad de los equipos, las certificaciones de buceo admitidas para los participantes, los requisitos de los informes de diseño, los premios a entregar y el desarrollo de la competición. El tercer apartado detallará aquellos aspectos característicos del diseño de los submarinos empleados en estas competiciones, además de sus sistemas de propulsión.

2.2 International Submarine Races

La *International Submarine Races* (Figura 2-1) es una carrera de submarinos de propulsión humana organizada por la *Foundation for Underwater Research and* Education (FURE). La FURE es una organización sin ánimo de lucro dedicada a la promoción de la tecnología marina y la ingeniería oceánica; invirtiendo en la juventud interesada en la investigación científica e ingenieril en el ámbito marítimo. La FURE ha organizado multitud de actividades científicas y educativas y es la institución organizadora de la *International Submarine Races*, competición que celebró su primera edición en el año 1988 resultando ganador el submarino "Squid" de la Academia Naval de los Estados Unidos. Estas carreras se celebran cada dos años para posibilitar el completo desarrollo de un submarino de una edición a otra, habiendo tenido lugar la decimoquinta y última edición, en el año 2019. La decimosexta edición correspondiente al año 2021 se sustituyó por lo que la organización denominó *virutal International Submarine Races* (vISR) debido a la pandemia del COVID-19, estando prevista su reanudación con la decimoséptima edición en junio de 2023 [1].

Figura 2-1 Logotipo ISR [1].

Las competiciones organizadas por la FURE se desarrollan en la *David Taylor Model Basin* (Figura 2-2), una de las instalaciones de experiencias hidrodinámicas de agua dulce más grandes del mundo. Esta cuenca se encuentra en la *Carderock Division of the U.S. Naval Surface Warfare Center* (NSWC) emplazado en Bethesda, en el Estado de Maryland [1], [3].

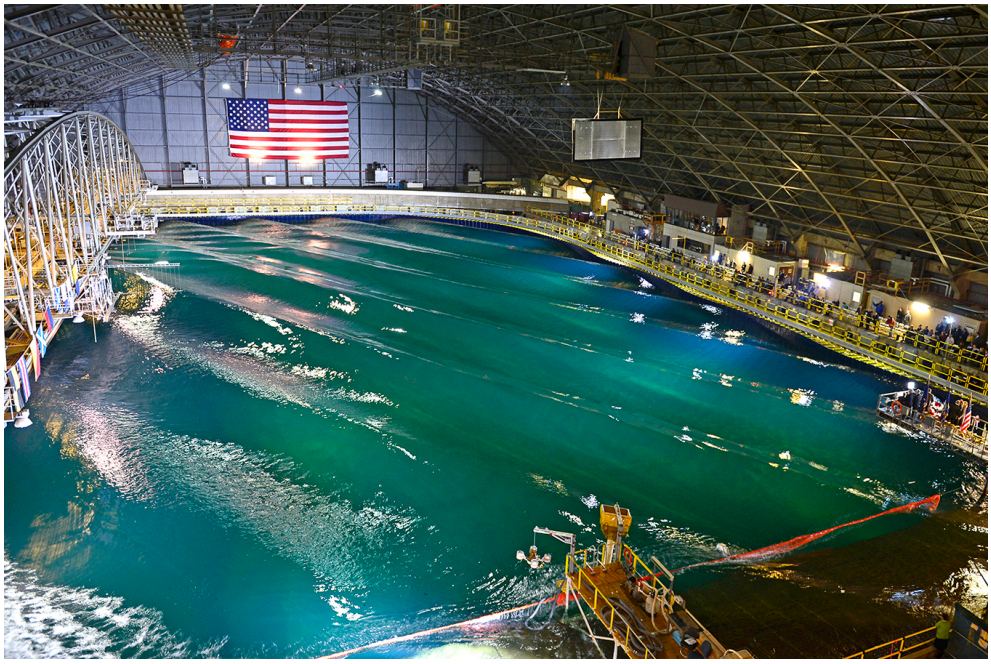


Figura 2-2 David Taylor Model Basin, NSWC [3].

2.2.1 Diseño de los submarinos

Para la ISR, un submarino se define como un vehículo completamente inundado que encapsula por completo a su(s) ocupante(s) y opera completamente sumergido. Estas limitaciones deben cumplirse durante toda la carrera, no estando permitida la liberación de la escotilla ni la salida a superficie durante la misma, siendo motivo de descalificación. La única restricción dimensional que deberán tener en cuenta los equipos será que la manga no supere los 2,13 metros, para permitir el empleo del elevador de las instalaciones. Los equipos se inscribirán en una de las categorías que figuran en la Tabla 2-1 según el diseño que hayan decidido realizar [4].

Categorías de diseño
Una persona, propulsión mediante hélice
Una persona, propulsión sin hélice
Dos personas, propulsión mediante hélice
Dos personas, propulsión sin hélice

Tabla 2-1 Categorías de diseño [4].

Debido a que las instrucciones para los participantes de la próxima edición no han sido publicadas aún a fecha de la publicación de este trabajo, los datos reflejados en este apartado y los sucesivos correspondientes a la *International Submarine Races* están obtenidos de las instrucciones de la decimoquinta edición [4].

2.2.1.1 Propulsión

Los submarinos podrán ser propulsados con o sin hélice, tal y como se indica en la Tabla 2-1, quedando definida la hélice como un dispositivo acoplado al agua con palas que crean empuje al girar sobre un eje. Por el contrario, un sistema de propulsión sin hélice se define como cualquier otro dispositivo acoplado al agua que crea un empuje al funcionar. En cualquier caso, no se permitirá ningún sistema que emplee el fondo para impulsarse, al no son considerados dispositivos acoplados al agua [4].

Cualquiera que sea el sistema de propulsión empleado, éste se acoplará directamente a la persona que esté en su interior, estando prohibido el empleo de dispositivos de energía externos además de los embragues. Es de vital importancia diseñar un sistema de escape para el aire del buceador, ya que el atrapamiento del mismo en el interior del submarino aumentará su flotabilidad y producirá variaciones en el trimado. Teniendo en cuenta lo anterior, queda totalmente prohibido el empleo de este aire para producir una fuerza de propulsión [4].

2.2.1.2 Soporte vital

Todos los buceadores durante la ISR deberán emplear un equipo de escafandra autónoma de circuito abierto, debiendo tener suministros separados para cada uno de los siguientes supuestos:

Depósito de aire primario:

- Deberá llevarse a bordo del submarino y tener la capacidad suficiente para una carrera más una reserva del 150% para cada miembro, incluyendo estos cálculos en el informe de diseño.
- El manómetro debe ser visible para el piloto en todo momento, no debiendo dejar que la presión baje de los 34,47 bar (500 psi). Se podrán realizar controles aleatorios un cualquier momento por el personal de buceo de la ISR [4].

Depósito de aire secundario:

- Cada piloto deberá llevar un depósito independiente de aire que le permita salir del submarino y llegar a superficie a la velocidad adecuada al finalizar el recorrido.
- Este depósito se llevará en el cuerpo o estará asegurado en un lugar accesible del submarino [4].

Depósito de aire para buceadores de apoyo:

- Todos los buceadores de apoyo deben estar equipados con un regulador extra (octopus) por seguridad y apoyo para asistir a los pilotos durante la entrada y salida del submarino.
- La presión de sus equipos no debe descender de 50 bar.
- Las sucesivas infracciones en este último punto pueden resultar en la expulsión del piloto/buceador de apoyo de la competición. Las presiones se comprobarán a la entrada y salida del agua, teniendo el Supervisor de Buceo la autoridad para vetar la entrada al agua de los participantes por motivos de seguridad [4].

2.2.1.3 Requerimientos de seguridad

Coloración del submarino:

- Con el fin de facilitar el control y supervisión de los submarinos durante la carrera, se recomienda emplear colores de alta visibilidad (amarillo, blanco o naranja) para el casco del mismo [4].
- Será obligatorio que la superficie dorsal del submarino sea enteramente de color claro. No se asignarán números de casco, por lo que para la correcta identificación de los submarinos se recomienda que los submarinos lleven su nombre o el del equipo de forma visible en el casco.
- Las puntas de las hélices deben estar pintadas de color naranja brillante para facilitar la visibilidad de los buceadores y del personal de apoyo [4].

Salidas de emergencia:

- Todas las salidas que puedan ser empleadas como salidas de emergencia por la tripulación del submarino deberán estar marcadas con un marche cuadrado de color naranja y de 4" con la

palabra “RESCUE”. Si no es posible, el mecanismo de liberación deberá estar claramente marcado con cinta fluorescente; este mecanismo debe ser fácilmente accesible tanto desde el interior como desde el exterior del submarino [4].

Métodos de sujeción:

- Todo método de sujeción que emplee el piloto dentro del submarino, como por ejemplo para los pies en los pedales, debe tener el sistema de liberación claramente marcado con pintura naranja o fluorescente [4].

Visibilidad de la tripulación:

- Se emplazarán secciones transparentes en el submarino de forma que la tripulación tenga una visión lo más libre posible, especialmente hacia delante y hacia abajo en el caso del piloto. Las zonas de la cara y la cabeza de la tripulación en los submarinos biplaza también deberán ser visibles para los buzos de apoyo y de seguridad en todo momento [4].



Figura 2-3 Vista del piloto a través de la proa del submarino [5].

Luz estroboscópica de posición:

- Los submarinos deberán llevar una luz estroboscópica blanca todo horizonte, colocada un su parte superior para que sea posible su localización desde arriba (Figura 2-4).
- La luz deberá permanecer en funcionamiento siempre que el submarino se encuentre sumergido, siendo motivo de descalificación el empleo de una luz que no funcione correctamente [4].



Figura 2-4 Detalle de la luz de posición de un submarino [5].

Boya de emergencia:

- Todos los submarinos llevarán una boya de alta visibilidad que se desprenderá del casco y flotará hacia la superficie en caso de emergencia.
- La boya estará unida al submarino por un cabo resistente de y 1,6 mm de mena y 9,14 m.
- Cada miembro de la tripulación tendrá un interruptor de "hombre muerto" que deberá mantener presionado para evitar que se libere automáticamente la boya de emergencia.
- Se podrá inhibir el funcionamiento de este sistema para evitar que se libere la boya de manera involuntaria durante la preparación de la carrera, pero debe estar activado siempre que el submarino esté operando.
- En cualquier caso, cuando la boya se libere los buceadores de la Armada de los EEUU procederán a llevar a superficie a la tripulación lo más rápido posible y quedando anulado el intento [4].

2.2.2 Certificaciones de los buceadores

Todos los miembros del equipo que deseen bucear deben tener una certificación válida de una organización reconocida a nivel nacional (NAUI, PADI, FEDAS…) o bien poder documentar una experiencia y formación equivalentes de carácter militar [4].

2.2.3 Informe de diseño

Cada equipo de submarinos deberá presentar un informe de diseño al jurado del ISR. Este informe deberá documentar completamente los esfuerzos del equipo en la concepción, diseño, construcción y pruebas de su submarino. Se otorgará un premio a la tripulación del submarino que desarrolle el informe más completo e informativo para su proyecto. La FURE considera que uno de los aspectos más importantes de las regatas es el beneficio educativo que ofrecerán estos informes que, como mínimo, debe cubrir los siguientes apartados [4]:

- Resumen.
- Filosofía y objetivos del diseño.
- Diseño y fabricación del casco.
- Sistema de propulsión.
- Sistema de control.
- Sistemas de soporte vital.
- Sistemas de seguridad.
- Pruebas del submarino
- Formación de la tripulación.
- Lecciones aprendidas.

- Presupuesto.

2.2.4 Premios

Los premios que se entregan durante el eISR son los siguientes:

- Campeón y subcampeón ISR:
  - Se entrega un trofeo y un premio de 1000 $ al equipo que muestre un mayor rendimiento general.
  - El subcampeón recibirá una placa.
- Velocidad máxima:
  - Se entrega una placa al equipo que registre la velocidad más alta de la competición, y, en caso de batir el record vigente, se entregarán 500 $ además de la placa.
- Velocidad máxima por categorías:
  - Se entregan diplomas al primero y segundo clasificado de cada categoría de diseño (ver Tabla 2-1), salvo en el supuesto de que haya menos de tres inscritos en una categoría, entregando entonces diploma únicamente al primer clasificado.
- Premio a la innovación:
  - Se entrega una placa al equipo de cualquier categoría que, según el jurado, incorpore el diseño y la construcción más innovadora.
- Tecnología:
  - Se entrega una placa al equipo que muestre el más exitoso uso de la tecnología para apoyar el diseño, la construcción y el rendimiento del submarino.
- Mejor informe de diseño:
  - Se entrega una placa al equipo que presente el mejor informe de diseño sobre su submarino.
- Premio al mejor operador:
  - Se entrega una placa al equipo más eficaz en la preparación para el recorrido, en la carrera y en la resolución de problemas.
- Mejor espíritu de las carreras:
  - Se entrega una placa en reconocimiento al equipo que muestre el mayor entusiasmo, fortaleza, apoyo a los demás equipos y mejor espíritu de competición. El ganador será elegido por votación de los equipos, y se entrega en memoria del concursante fallecido Steve Barton del equipo “Sublime” [4].

2.2.5 Recorrido de la regata

El centro del recorrido estará marcado en toda su longitud por luces lastradas para permanecer en el fondo. Habrá una zona de aceleración de 30 metros hasta la línea de salida. Las puertas de cronometraje estarán a 45 y 55 metros y la línea de llegada a 100 metros. Estas puertas se construirán con tubos de PVC blancos a una distancia de aproximadamente 8 metros y se medirán y ubicarán con precisión [4].

La primera puerta y segunda puerta estarán claramente marcadas con luces de un color determinado para diferenciarla de las puertas centrales y de la línea de llegada. Desde la puerta de salida hasta la segunda puerta hay una distancia de 45 metros. La tercera puerta marca el final de la carrera de diez metros a contar desde la segunda puerta. El final del recorrido se encuentra a 45 metros de la tercera puerta. La longitud total del recorrido desde la primera hasta la última puerta es de 100 metros. La velocidad se registrará tanto en la distancia de 100 metros como en la de 10 metros; ver Figura 2-5 [4].

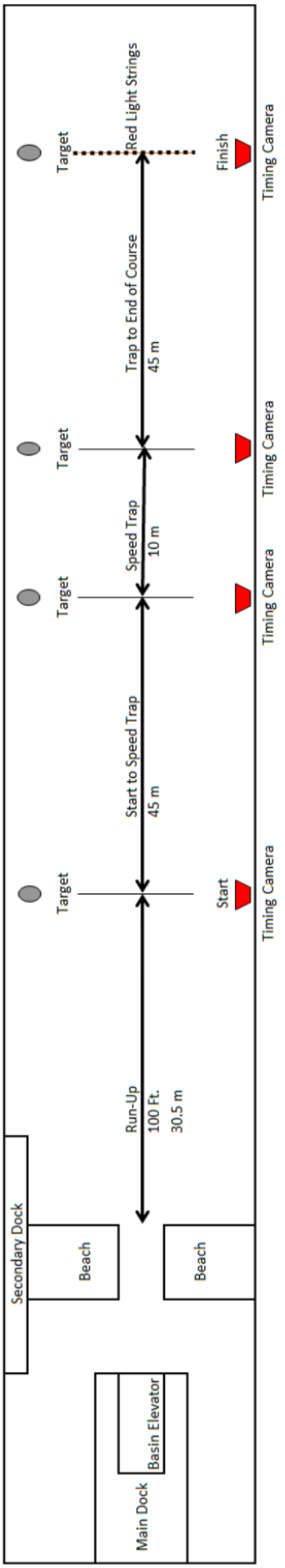


Figura 2-5 Circuito de regatas ISR [4].

2.3 European International Submarine Race (eISR)

La *European International Submarine Race* (Figura 2-7) es organizada con carácter bienal por el *Institute of Marine Engineering, Science &* Technology (IMarEST) (Figura 2-8) con la colaboración de la multinacional británica del sector de la defesa QuinetiQ, no guardando ningún tipo de relación de patrocinio, respaldo ni asociación con la *International Submarine Race*. La eISR tendrá lugar del 4 al 15 de Julio de 2022 en las instalaciones de experiencias hidrodinámicas de QinetiQ en el parque Tecnológico Haslar, Gosport, Inglaterra (Figura 2-6) en una cuenca con unas dimensiones de 122m x 61m x 5,5m de profundidad [2].

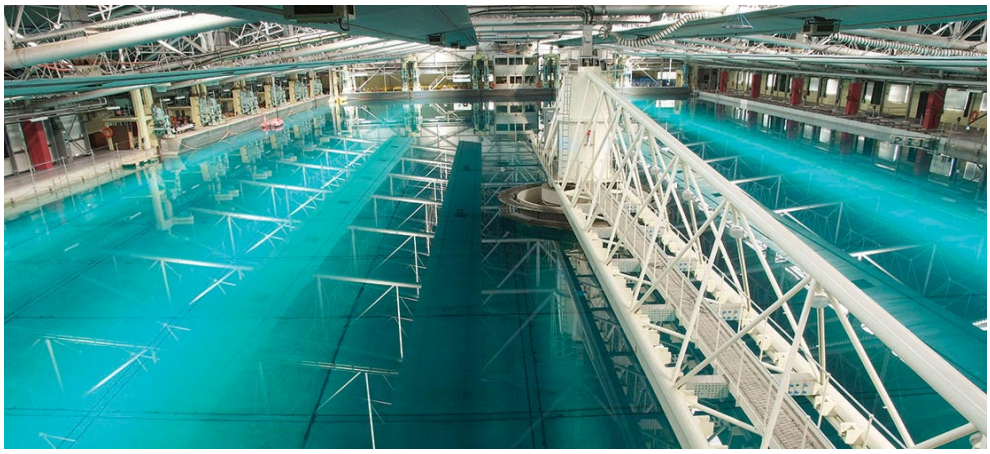


Figura 2-6 Cuenca del centro de experiencias hidrodinámicas de QinetiQ en Haslar [6].

El objetivo de esta competición es desafiar a equipos de estudiantes universitarios en el diseño y construcción submarinos de propulsión humana para competir contrarreloj en un circuito predefinido; combinando el reto de ingeniería que supone el diseño del casco con el desarrollo de habilidades técnicas necesarias para completar el recorrido, definiendo la eISR como una competición técnico-deportiva única y emocionante. Debido a que se trata de una competición con un marcado carácter técnico, los equipos deberán presentar dos documentos escritos y una presentación que serán evaluados por el jurado.

EUROPEAN INTERNATIONAL SUBRACE
POWERED BY IMAREST

Figura 2-7 European International Submarine Race [2].

INSTITUTE OF MARINE
Engineering, Science & Technology

Figura 2-8 Institute of Marine Engineering, Science & Technology [7].

2.3.1 Normas eISR

Para la eISR, un submarino se define de la siguiente manera [2]:

> *"Vehículo subacuático inundado que encierra por completo al piloto/s y todos los mecanismos de control y propulsión. Debe operar completamente sumergido y debe ser propulsado por un dispositivo acoplado a un flujo (hélice, chorros o aletas)."*

Las reglas básicas son las siguientes:

- Un submarino se define como un vehículo subacuático inundado que encierra completamente al piloto/s.
- Los equipos deben diseñar, construir y competir con submarinos inundados.
- Los submarinos deben ser pilotados por uno o dos pilotos, que deben estar completamente envueltos por el casco.
- El submarino debe estar sumergido durante toda la duración de la prueba.
- Toda la potencia para la propulsión debe ser proporcionado por el/los piloto/s, quedando terminantemente prohibido el uso de dispositivos de almacenamiento de energía.

Los diseños resultantes son submarinos con una clara limitación: El casco no puede en ningún caso ser estanco, debiendo estar completamente inundado. El objetivo de los estudiantes encargados del diseño es minimizar la resistencia, maximizar el empuje y optimizar la transmisión para aprovechar al máximo la limitada capacidad de producción de energía del piloto [2].

2.3.2 Diseño del submarino

2.3.2.1 Dimensiones

- Las dimensiones máximas que podrá tener el submarino son 5500 mm de eslora y 1500 mm de manga. Estas dimensiones están determinadas por el elevador empleado para botar el submarino al agua y recuperarlo.
- Los apéndices del submarino que se extiendan más allá de las dimensiones máximas están permitidos, pero debe ser posible colocarlos y retirarlos por los buceadores de apoyo una vez que el submarino esté en el agua.
- El submarino debe diseñarse de tal manera que el centro de masas cuando está fuera del agua se sitúe entre 2100 y 3100 mm del extremo de proa/popa del submarino.
- El submarino debe tener un orificio que permita su inundación y posterior drenaje cerca del centro de masas longitudinal del casco. Este orificio debe tener como mínimo una superficie de 11700 mm^2 para un submarino de un solo piloto.
- El calado del submarino y su carro no debe superar los 1200 mm.
- La distancia transversal entre las ruedas del carro deberá ser de entre 500 mm y 750 mm.
- El carro deberá tener un método de fijación al suelo del ascensor [2].

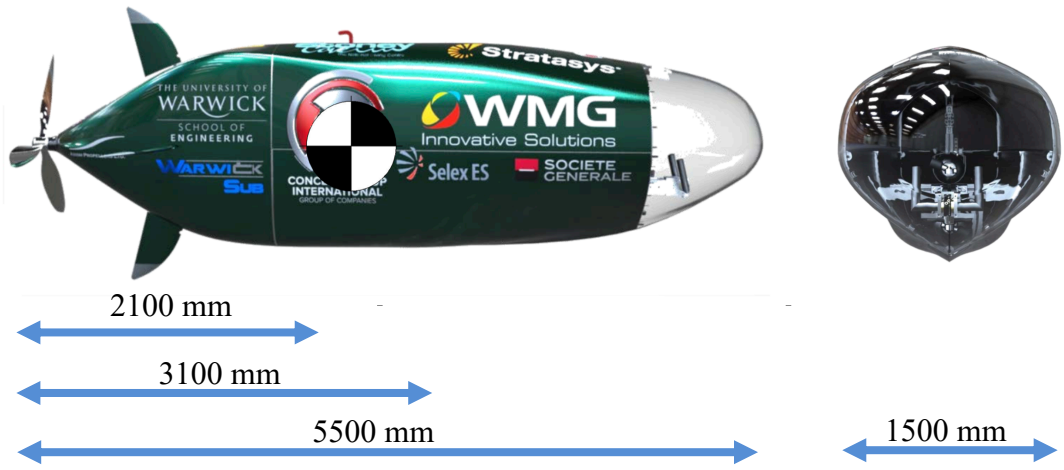


Figura 2-9 Dimensiones del submarino [2], [8].

2.3.2.2 Propulsión

- Los submarinos deben ser propulsados mediante una hélice o algún otro sistema siempre y cuando esté acoplado al agua.
- Está prohibido el empleo de ruedas o cualquier mecanismo que genere movimiento por fricción con el fondo o las paredes de la cuenca.
- Se puede cambiar el método de propulsión y/o control sin restricciones a lo largo de la competición. Las puntuaciones serán atribuidas al casco, independientemente de la propulsión empleada.
- Los sistemas de propulsión deben estar acoplados directamente al piloto, no se permiten embragues.
- Los sistemas de almacenamiento de energía solo se permiten cuando toda la energía se almacena y disipa durante la regata, estando prohibidos los volantes de inercia y cualquier otro dispositivo de almacenamiento de energía que pueda cargarse antes de que el barco cruce la línea de salida.
- Se permiten sistemas de transmisión hidráulica, neumática y eléctrica siempre que toda la energía empleada en la propulsión sea generada por el/los piloto/s.
    - Queda prohibido el empleo del aire respirable del buceador para los sistemas neumáticos.
    - El aire expirado por el piloto no puede emplearse para crear empuje en ninguna dirección.
    - Se permiten sistemas eléctricos de no más de 24 V de tensión de corriente continua.
    - Si se instalan baterías, su ubicación debe haber una señal que indique su ubicación, tipo y medios de aislamiento.
- No se permite el uso de aceites ni en el submarino ni en la zona de los equipos alrededor de la cuenca. Únicamente está permitido el uso de grasa resistente al agua para lubricar los engranajes. Estas medidas están destinadas a evitar la contaminación de la cuenca [2].

2.3.2.3 Soporte vital

Depósito de aire primario:

- Cada piloto debe llevar un depósito de aire con el doble de la capacidad requerida para completar el recorrido a velocidad de competición.
- Los pilotos no deben permitir que el depósito de aire entre en reserva, es decir, por debajo de los 50 bar.
- El manómetro debe ser visible para el piloto en todo momento, y debe ser capaz de comunicarle la presión del aire a los buceadores de apoyo [2].

Depósito de aire secundario:

- Cada piloto deberá llevar un depósito independiente de aire de 3 L que le permita salir del submarino y llegar a superficie al finalizar el recorrido.
- Las botellas de rescate no están permitidas.
- El depósito de aire secundario no debe emplearse en las tareas preparación previas a la carrera y no debe permitirse que su presión descienda de 50 bar [2].

Depósito de aire para buceadores de apoyo:

- Todos los buceadores de apoyo deben estar equipados con un regulador extra (octopus) por seguridad y apoyo para asistir a los pilotos durante la entrada y salida del submarino.
- La presión de sus equipos no debe descender de 50 bar.
- Las sucesivas infracciones en este último punto pueden resultar en la expulsión del piloto/buceador de apoyo de la competición. Las presiones se comprobarán a la entrada y salida del agua, teniendo el Supervisor de Buceo la autoridad para vetar la entrada al agua de los participantes por motivos de seguridad [2].

Reguladores de presión:

- Todo el aire respirable debe suministrarse mediante un equipo de escafandra autónoma de circuito abierto, estando prohibidos los sistemas de reentrada (Figura 2-10).

- El equipo debe presentar una prueba de la revisión de los reguladores [2].



Figura 2-10 Equipo de escafandra autónoma [9].

Botellas de aire:

- Todas las botellas deben mostrar claramente las fechas de inspección. Deben estar correctamente etiquetadas de acuerdo a la norma EN 1089-2 con un diamante verde de peligro de gas comprimido.
- Todas las botellas de aire serán inspeccionadas al comienzo de la competición.
- Las botellas deben tener la certificación CE según las normas EN o BS adecuadas para los equipos de respiración.
- En las botellas de aire solo está permitido el empleo de aire atmosférico comprimido, estando prohibido el uso de mezclas de gases especiales, por ejemplo, el nitrox o trimix [2].

2.3.2.4 Requerimientos de seguridad

Partes y apéndices móviles:

- Todas las partes móviles y piezas pequeñas que se extiendan fuera del casco deben tener sus puntas pintadas de naranja (aletas y hélices).

Salida de rescate:

- Los mecanismos de liberación de las salidas deben estar claramente marcados con la palabra "RESCUE".
- El asa o mecanismo de liberación debe ser fácilmente accesible tanto desde dentro como desde fuera del submarino.

Visibilidad de la tripulación:

- La cara y cabeza del piloto deben ser visibles para los buceadores de apoyo.

Boya emergente de seguridad:

- Los submarinos deberán llevar una boya emergente de alta visibilidad que será liberada por el piloto en caso de que necesite ayuda.
- La longitud de la línea de la boya deberá ser de 10 m y tendrá flotabilidad positiva.
- La fijación debe ser lo suficientemente resistente para poder desplazar el submarino desde el fondo hasta la superficie.
- La boya debe poder desplegarse automáticamente si el piloto está incapacitado.

Retención de la escotilla:

- Todas las escotillas deben estar unidas permanentemente al casco [2].

2.3.3 Elegibilidad de los equipos

La eISR está abierta a equipos de estudiantes y ex alumnos universitarios, debiendo ser todos mayores de 18 años en el momento de la competición y no deben recibir ninguna remuneración por

participar en el evento. Está permitida la asistencia de profesores, pero éstos no pueden entrar a la cuenca [2].

2.3.4 Certificaciones de los buceadores

Los miembros del equipo que deseen bucear deben estar certificados por alguna de las organizaciones de formación de buceo recogidas en la Tabla 2-2. Además de ello, deben de disponer de un seguro vigente que les permita realizar la actividad subacuática, entregar un certificado médico que les cualifique para la realización de la actividad y un mínimo de diez entradas correctamente archivadas en su libro de inmersiones, sin contar las requeridas para la obtención del título [2].

Organización	Certificación mínima
BSAC	Ocean Diver
PADI	Open Water Diver
NAUI	Scuba Diver
FEDAS	1 Estrella
NASDS/SSI	Open Water Diver
SDI	Open Water Diver

Tabla 2-2 Certificaciones de buceo mínimas [2].

2.3.5 Informe de diseño

Los equipos deberán presentar un informe de diseño en el que se describa por completo el submarino, debiendo incluir una matriz de verificación del cumplimiento de las reglas de diseño. Este diseño tendrá los siguientes apartados [2]:

- Introducción.
- Filosofía de diseño.
- Casco.
- Propulsión.
- Estabilidad.
- Superficies de control.
- Ergonomía y biomecánica.
- Seguridad.
- Pruebas.
- Mantenimientos y reparaciones.
- Disposición de los componentes.
- Mejoras futuras.
- Conclusiones.
- Resumen.

2.3.6 Premios

Los premios que se entregan durante el eISR son los siguientes [2]:

- Campeón y subcampeón de eISR:
    - Se determinará mediante una fórmula que combine el informe de díselo, la inspección en seco, el rendimiento en la carrera y la fiabilidad.
- Velocidad máxima:
    - Este premio se entregará al equipo que realice el tránsito más rápido entre las puertas de cronometraje.
- Premio de agilidad y resistencia:
    - El último día de competición, los equipos clasificados realizarán un recorrido del doble de longitud, pasando dos veces por las puertas de cronometraje. El equipo que cometa menos faltas y lo realice más rápido será el ganador.
- Premio a la innovación:

  - Será entregado al equipo que, según el jurado, haya llevado más lejos la innovación en ingeniería.
- Mejor presentación.
- Sostenibilidad.

2.3.7 Recorrido de la regata

Los submarinos competirán de uno en uno, es decir, en formato contrarreloj a lo largo de un circuito predefinido de 175 metros de longitud. Este circuito (Figura 2-11) está compuesto por los siguientes elementos [2]:

- Línea de salida.
- Puertas de cronometraje a 42 y 55 metros de la línea de salida.
- Giro de 180º con un radio aproximado de 25 m.
- Una serie de 4 postes de eslalon situados a 13 m unos de otros.
- Línea de llegada.

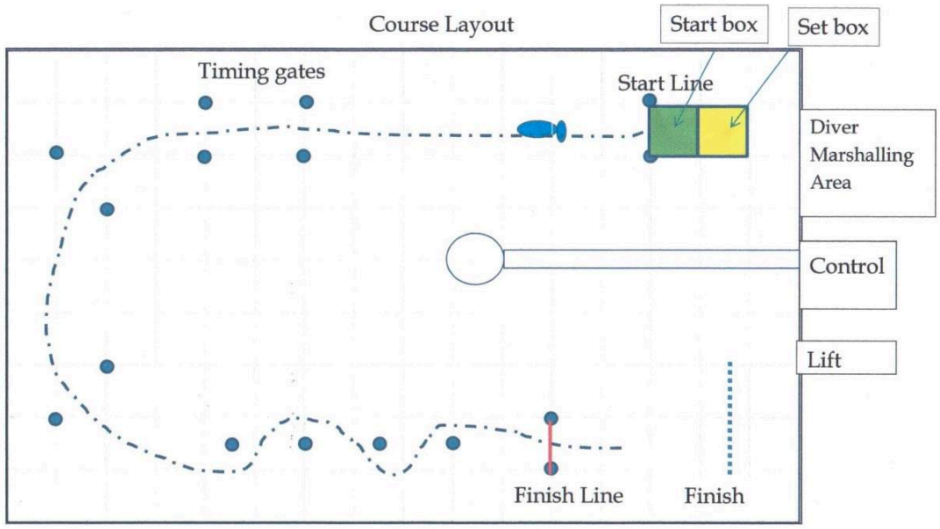


Figura 2-11 Circuito de regatas eISR [2].

2.4 Diseños previos

En ambas competiciones, los diseños de los submarinos guardan ciertas similitudes entre ellos. Como es lógico, los equipos optan en su mayoría por emplear perfiles hidrodinámicos para generar la superficie de los submarinos de manera que consigan disminuir al máximo el arrastre debido al avanza del submarino a través del agua. Estas superficies son generalmente simétricas con respecto al plano horizontal y vertical, pero no siempre superficies de revolución, ya que en un gran número de submarinos el puntal es mayor que la manga debido a los requerimientos de movimiento del piloto en su interior además de otros parámetros, ver Figura 2-12. En la gran mayoría de los casos, con el propósito de maximizar la potencia de pedaleo y facilitar la visibilidad del piloto y el gobierno del submarino, el piloto adopta una posición en la que su cuerpo se encuentra tumbado hacia debajo, con la cabeza situada hacia proa, ver Figura 2-13. Esta postura del buceador, es normalmente recreada para el tripulante en aquellos submarinos biplaza, con la salvedad de que únicamente el piloto será el que vaya observando el recorrido y dirigiendo al submarino a través del mismo, limitándose la función del tripulante exclusivamente al pedaleo, ver Figura 2-14.

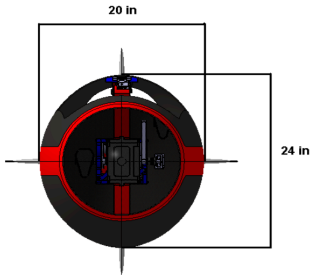


Figura 2-12 Vista de frente del OMER 8 [10].

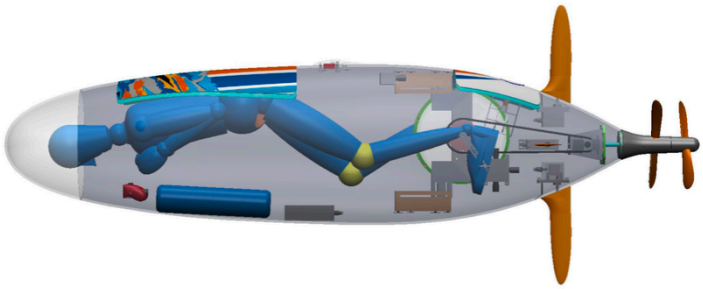


Figura 2-13 Posición del piloto en el WASUB V [11].

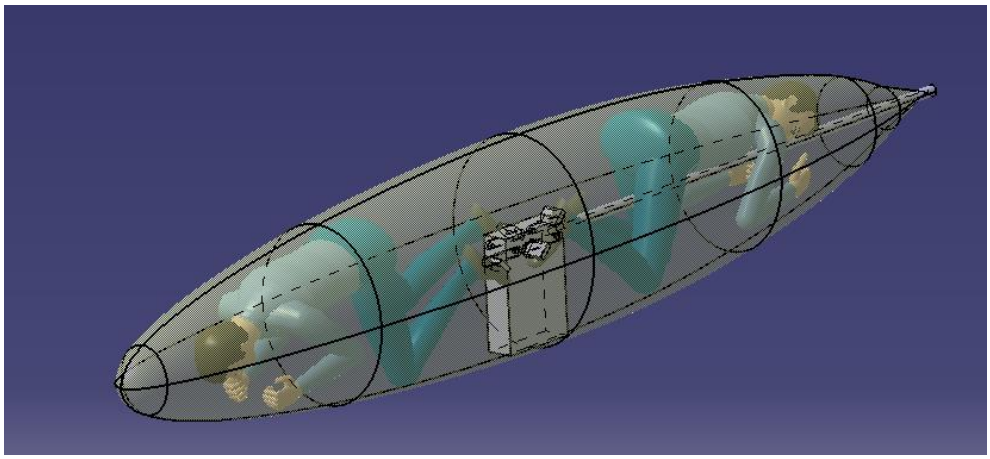


Figura 2-14 Disposición de los ocupantes en el OMER 9 [12].

En lo que respecta al sistema de propulsión elegido, los registros de velocidades más altas se corresponden a los submarinos dotados de hélice como método para impulsarse por el agua, categoría en la que se inscriben el mayor número de equipos. Sin embargo, cabe destacar la existencia de equipos que optan por un sistema de propulsión no convencional, generalmente mediante sistemas de aletas oscilantes como el de la Figura 2-15.



Figura 2-15 Submarino TANIWHA [13].

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Software empleado

En este apartado, se detallarán los diferentes programas que se han empleado para la realización de este proyecto, como son AutoCAD e Inventor, ambos de la firma Autodesk para el diseño del submarino y sus componentes y para el posterior ensamblaje de los mismos. La diferencia entre estos dos programas es clara, mientras que Inventor fue concebido para el diseño tridimensional, AutoCAD se encarga del diseño en 2D, aunque posee herramientas para modelado 3D que serán empleadas para los primeros modelados 3D del casco. Además de estos dos programas de Autodesk, para el análisis de las formas generadas se empleará el programa Ansys FLUENT.

3.1.1 Autodesk AutoCAD

AutoCAD es el software de diseño asistido por ordenador (Computer-Aided Design) desarrollado por la empresa Autodesk. Este programa es ampliamente empleado tanto por arquitectos como por ingenieros y profesionales de la construcción para la creación de dibujos técnicos y planos en dos y tres dimensiones. Como prestaciones principales, AutoCAD permite crear, anotar y editar geometría en 2D y modelos en 3D con sólidos, superficies y objetos de malla. Es en este programa donde se dibujan los bocetos de las vistas del submarino, el maniquí del piloto y donde se generen las primeras formas tridimensionales del casco. Por último, el plano de formas del casco se generará también con esta herramienta al finalizar su modelado [14].

3.1.2 Autodesk Inventor

Inventor es un software CAE (Computer-Aided Engineering) desarrollado por Autodesk que ofrece herramientas profesionales para el diseño mecánico 3D, documentación y simulación de productos. Inventor permite crear piezas de un conjunto por separado, modelar ensamblajes y observar su funcionamiento, generar los planos para el sector de la fabricación, además de poseer herramientas de simulación tales como simulaciones dinámicas, análisis de tensiones y vistas explosionadas. Este software será empleado para, una vez obtenida la geometría del submarino, obtener las diferentes piezas que conformarán el casco y sus apéndices [15].

3.1.3 Ansys FLUENT

La compañía Ansys posee una oferta de software que abarca todas las ramas de la física, y cuenta con las herramientas más avanzadas en el área de la dinámica de fluidos (FLUENT). Además de esta herramienta de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) que permiten simular con precisión el comportamiento de flujos de fluido, Ansys ofrece herramientas tales como análisis estructural, multifísica, electromagnética y diseño en tres dimensiones. Ansys FLUENT será el software empleado para correr las simulaciones del casco del submarino avanzando a través del agua y así obtener el

contorno de velocidad y turbulencia del fluido a su alrededor, además del coeficiente y la fuerza de arrastre.

3.2 Cálculos previos

3.2.1 Requisitos previos

Antes de comenzar a desarrollar el perfil hidrodinámico que tendrá el submarino, se tendrán en cuenta las siguientes restricciones de diseño que deberá cumplir el diseño del submarino para poder participar en cualquiera de las dos competiciones existentes.

- El casco deberá contener completamente al piloto.
- El casco tendrá espacio suficiente para permitir el pedaleo del piloto.
- La cabeza del piloto deberá ser visible desde el exterior.
- El casco no tendrá una anchura mayor de 2,13 m para la "*ISR*" o de 1,5m para la "*eISR*".
- El submarino debe diseñarse de tal manera que el centro de gravedad cuando están fuera del agua se sitúe entre 2,1 m y 3,1 m de cualquiera de sus extremos.
- El casco deberá tener un orificio de inundación o una abertura de escotilla de drenaje situados en la zona inferior del submarino, en una zona próxima al centro de gravedad del mismo. Este orificio será, como mínimo, de 117 cm^2.
- El agua deberá drenarse automáticamente al sacar el submarino del agua.
- El casco deberá estar completamente lleno de agua.
- El exterior será de un color de alta visibilidad.
- El submarino deberá tener flotabilidad neutra.
- El submarino tendrá espacio suficiente para añadir plomos o espuma.

3.2.2 Análisis estadístico de diseños previos

Antes de comenzar, se establecen las dimensiones iniciales de las que obtener el perfil hidrodinámico del submarino. Para ello, se ha realizado un estudio de un total de 15 submarinos de propulsión humana utilizados en competiciones de años anteriores (ver Tabla 3-1). De los informes finales de diseño que los equipos deben presentar antes de la competición, se obtienen los datos de eslora (L), manga (B) y puntal (D) de aquellos equipos que los han especificado. De estos datos se obtienen posteriormente los diagramas de cajas y bigotes correspondientes a cada una de las dimensiones y las relaciones entre las mismas (ver Figura 3-1); obteniendo los datos estadísticos de los que se derivarán las dimensiones iniciales del submarino del CUD-ENM.

Submarino	L (mm)	B (mm)	D (mm)	L/B	L/D	B/D
Universidad Simón Bolívar [16]	3500	907	907	4	4	1
Omer 8 [10]	2667	508	610	5	4	0,8
Wasub V [11]	2569	520	634	5	4	0,8
Warwick [8]	2700	650	950	4	3	0,7
UWHPS 18-19 [17]	2720	491	736	6	4	0,7
UWHPS 16-17 [18]	2440	510	640	5	4	0,8
UWHPS 14-15 [19]	2438	508	635	5	4	0,8
UWHPS 10-11 [20]	2946	610	711	5	4	0,9
Mayflower [21]	2440	680	680	4	4	1,0
Phantom 7 [22]	3048	610	610	5	5	1,0
Salacia [23]	2700	900	900	3	3	1,0
FAU Boat [24]	4877	610	610	8	8	1,0
Sultanah II [25]	2700	670	670	4	4	1,0
Taniwha [13]	3073	860	693	4	4	1,2
Mantaray [26]	3139	671	671	5	5	1,0
Newcastle [27]	2554	666	774	4	3	0,9

Tabla 3-1 Resumen diseño submarinos anteriores.

En el diagrama de cajas y bigotes de la Figura 3-1, se representa de forma gráfica la distribución de las medidas de cada variable, apartando del diagrama aquellos datos considerados atípicos. Los límites de la caja son el Q1, primer cuartil (25% de la muestra), y el Q3, tercer cuartil (75% de la muestra); de manera que cada cajón constituye el 50% de la muestra. La línea que se encuentra dentro de cada cajón, representa la mediana, es decir, su valor central, mientras que los límites superior e inferior corresponden a los valores máximos y mínimos respectivamente, descartando los valores atípicos.

En los informes de diseño de los equipos analizados, un 40% de los mismos optaron por no especificar sus medidas concretas de manga y puntal, detallando únicamente la mayor de ambas, o bien porque tomaban el mismo valor al ser superficies de revolución. Por este motivo, la relación entre la manga y el puntal obtenida en el diagrama correspondiente estará claramente sesgada, siendo su valor real menor del indicado en el diagrama y por ende no se empleará para obtener las dimensiones preliminares del submarino. Por consiguiente, se emplearán las dos relaciones restantes para la primera aproximación del perfil hidrodinámico del submarino. Se descarta la elección de la manga como medida de referencia por lo expuesto anteriormente, ya que en muchos casos el valor representado como la manga del submarino, será realmente el puntal. Para esta primera aproximación, se fijará indistintamente una eslora de 2700 mm o bien un puntal de 675 mm, correspondiente a la mediana de las muestras en sendos diagramas. A partir de estos datos y de las relaciones correspondientes obtenidas de los diagramas de cajas, se obtienen las siguientes dimensiones preliminares del casco del submarino (ver Tabla 3-2).

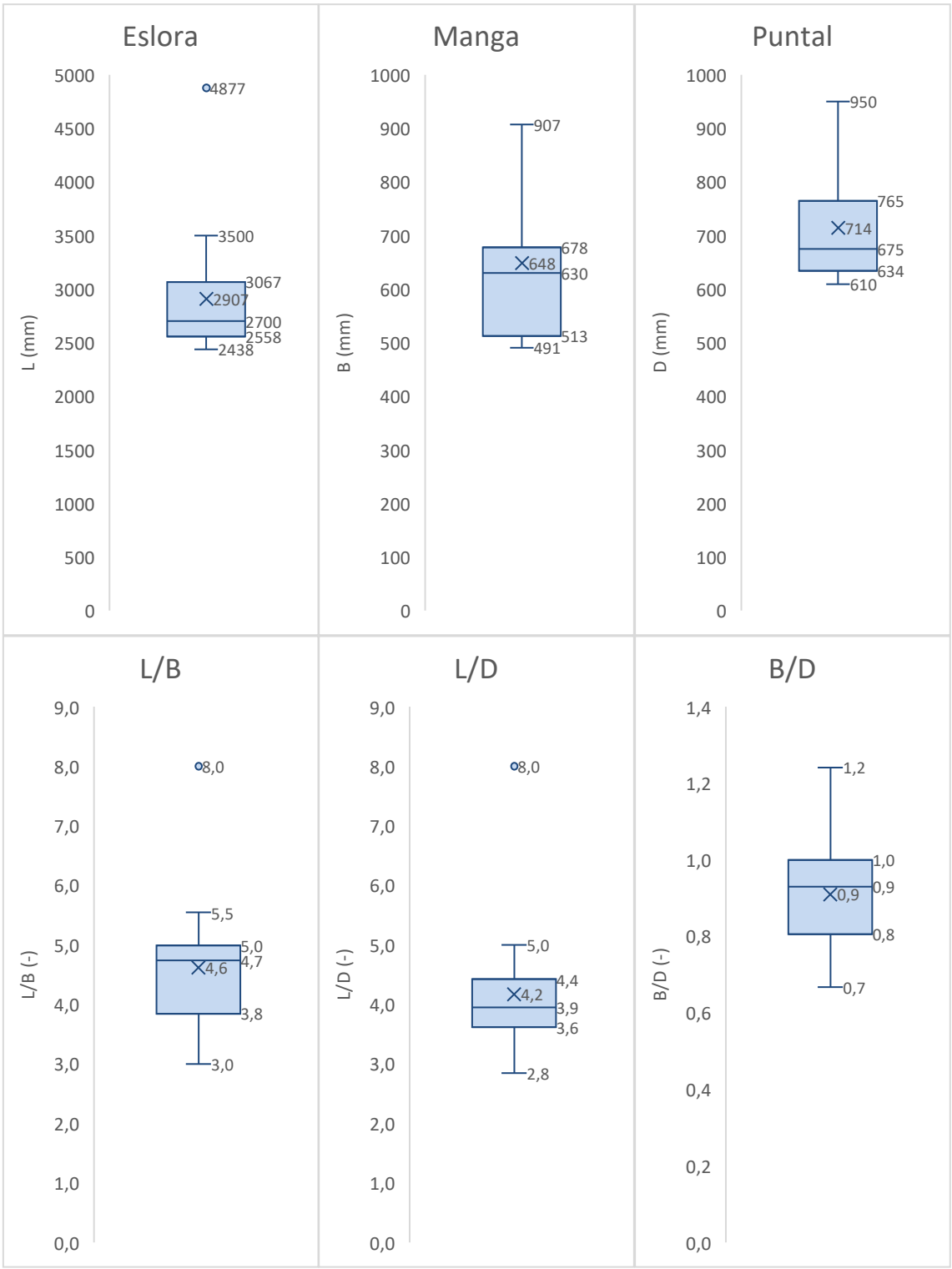


Figura 3-1 Diagramas de cajas y bigotes.

Dimensiones/relaciones	Propuesta (mm)	Teórica (mm)
L	2700	2700
B	540	630
D	675	675
L/B	5	5
L/D	4	4
B/D	0,8	0,9

Tabla 3-2 Dimensiones preliminares del casco.

3.2.3 Dimensiones del piloto

Con el fin de seleccionar la planta y el alzado de la superficie del submarino, y para conseguir una forma lo más compacta posible, se esquematizará un modelo del piloto del submarino en AutoCAD. Para ello se ha empleado un maniquí online [1]y se ha escalado hasta una estatura de 1750 mm (ver Figura 3-2).

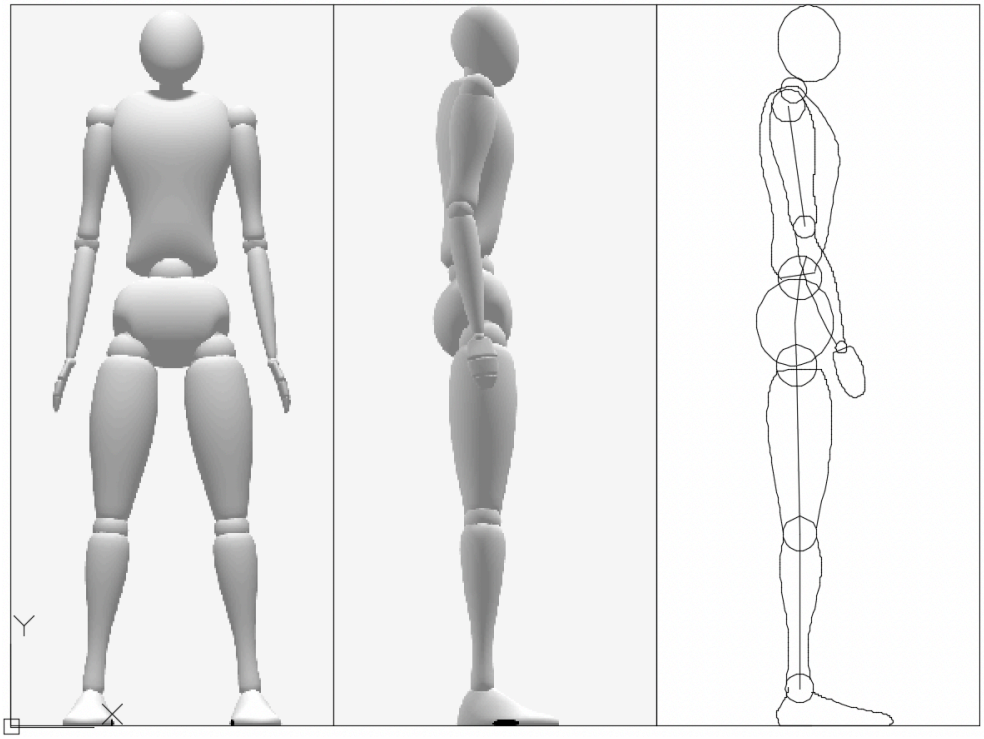


Figura 3-2 Alzado y perfil del maniquí.

Para establecer la posición de pedaleo el primer paso será conocer la distancia a la que se encontrarán los pies al pedalear, para esto se ha establecido una longitud de 170 mm para las bielas de los pedales, es decir, los pies separados una distancia de 340 mm. Esta medida está considerada como la óptima para un ciclista de entre 168 y 183 cm de estatura [28]. Además, y con el fin de no desaprovechar la potencia de pedaleo del piloto, se empleará el método *Holmes*, este método establece un ángulo de extensión máximo de 145º en la rodilla en su posición más estirada. Estirando más las piernas, los músculos de la parte anterior de las piernas y el flexor de la ingle se estirarán más, y dado que los músculos trabajan bien hasta una determinada extensión, el pedaleo dejará de ser eficiente cuando el pie del piloto vaya llegando a su posición más alejada [29].

[1] https://setpose.com/

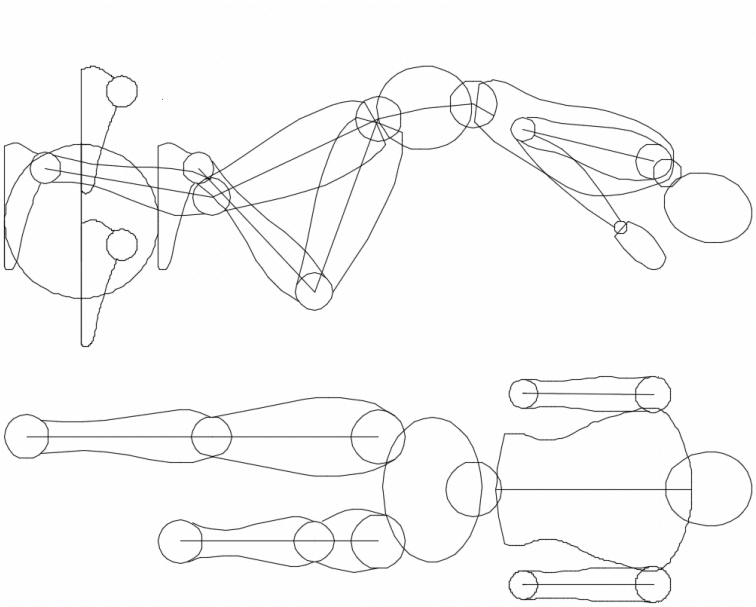


Figura 3-3 Esquematización del pedaleo del piloto.

3.3 Primer modelo del casco

Sobre los modelos en AutoCAD de la planta y el alzado del piloto en su posición de pedaleo, Figura 3-3, se dibujaron también las posiciones de los pies en el punto intermedio de la carrera de subida y bajada. De la posición de los pies en dichos puntos, se observa que representan los puntos más desfavorables en lo que se refiere a dimensiones necesarias. Por lo tanto, se fuerza que el eje del submarino se sitúe en el punto medio de la distancia entre el talón del pie que realiza la carrera de subida y la puntera del que realiza la de bajada. Desde ese punto medio, se traza una horizontal que representará el eje del submarino, desde donde calcular la altura necesaria para los puntos críticos del cuerpo del piloto (ver Tabla 3-3 y Tabla 3-4). Una vez obtenidos los puntos críticos y la distancia del eje a la que se encuentran, se dibuja la *SPLINE* que representará la primera aproximación de la planta y el alzado del submarino (ver Figura 3-4) teniendo presentes los datos obtenidos en la Tabla 3-2. Sobre estas dimensiones, se dejará un margen de 10 mm [11] correspondiente al espesor de la fibra del casco y los refuerzos anulares que se instalarán en el posterior proceso de laminado.

Punto crítico	Altura necesaria (mm)	Distancia desde la proa (mm)
Cadera	314	1007
Pies y pedales	312	1768

Tabla 3-3 Puntos críticos alzado

Punto crítico	Anchura necesaria (mm)	Distancia desde la proa (mm)
Hombros	362	500 [11]
Pedales y pies	166	1768

Tabla 3-4 Puntos críticos planta.

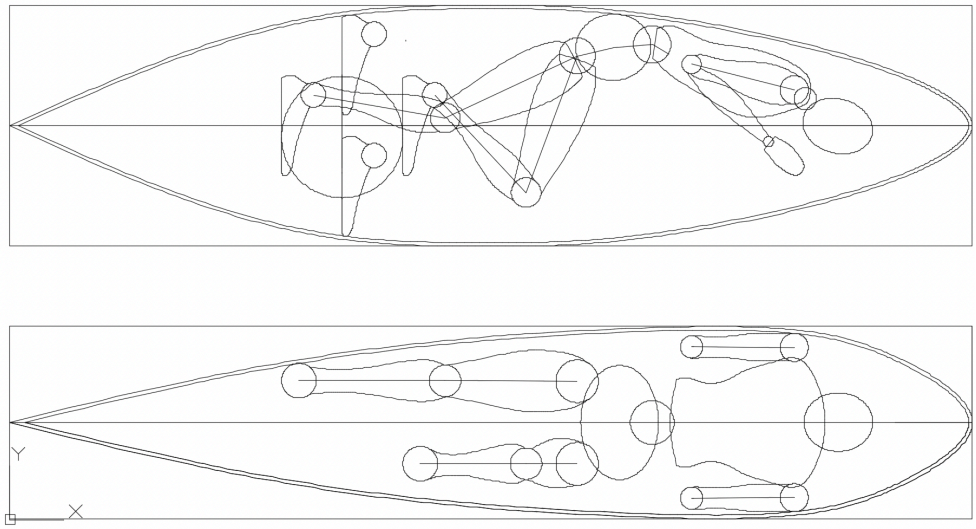


Figura 3-4 Planta y alzado del primer boceto.

Para la obtención del modelo en 3D en vistas al posterior análisis en el software de análisis de dinámica fluidos (*CFD*), se traslada a un nuevo lienzo de dibujo en tres dimensiones un perfil compuesto por la *SPLINE* del alzado en la parte superior y la *SPLINE* de la planta en la parte inferior. El eje que separa ambos perfiles, se divide mediante un total de 20 líneas perpendiculares al mismo y que se cruzan con los perfiles. Estas líneas están separadas 100 mm los primeros 700 mm de proa a popa, 250 mm los siguientes 1000 mm y nuevamente 100 mm los 100 mm restantes. El motivo es la diferencia entre la variación de la curvatura en los extremos del submarino con respecto a la variación de la misma apreciable en el centro. De esta manera se consigue una mayor concentración de elipses en los extremos y, por consiguiente, mayor exactitud.

Posteriormente, se ejecuta el comando *3D ROTATE* para posicionar el boceto del alzado en posición vertical, formando un ángulo de 90º con el boceto de la planta. Sobre esta geometría, se ejecuta el comando *ELLIPSE* un total de 20 veces, es decir, una por cada línea realizada anteriormente. La longitud del eje vertical de la elipse se corresponderá con el doble de la distancia desde el eje del submarino hasta la *SPLINE* del alzado, de igual manera que la longitud el eje horizontal se corresponderá con el doble de la distancia desde el eje del submarino hasta la *SPLINE* de la planta. Por último, se ejecuta el comando *LOFT* para representar la superficie del casco. Al ejecutar este comando se seleccionan, de proa a popa, el punto de la proa, las 20 elipses y el punto de la popa. Antes de cerrar la superficie, se abren los ajustes del comando para establecer un ajuste suavizado mediante la opción *Smooth fit*, estableciendo un henchimiento de 25 en la proa para aproximarla a la forma de las *SPLINE* de la planta y el alzado.

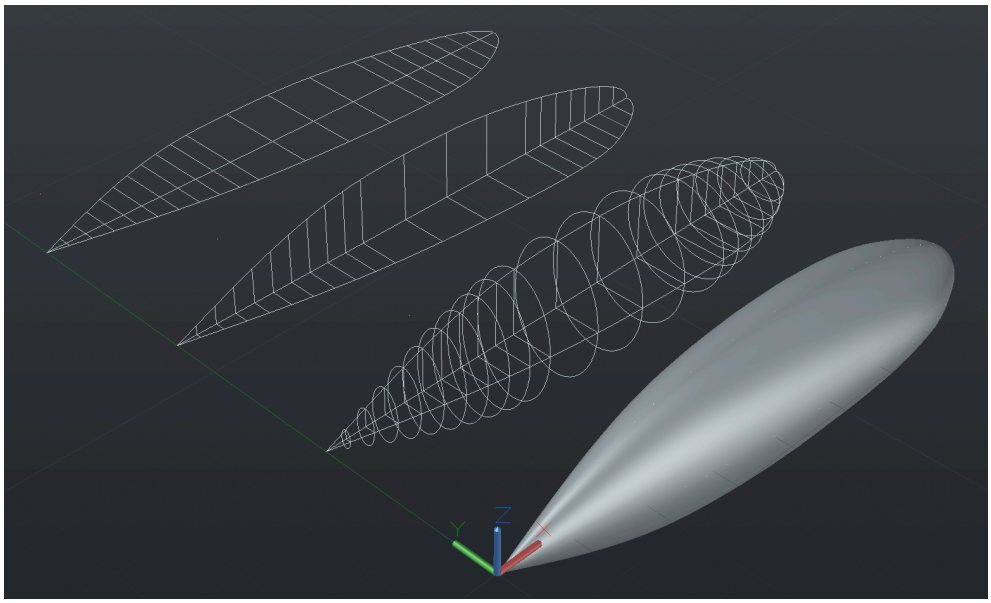


Figura 3-5 Desarrollo del diseño tridimensional del primer modelo.

3.3.1 Análisis de la planta y alzado del casco en software CFD Ansys Fluent

Para realizar el análisis CFD en Ansys Fluent, el primer paso es seleccionar el sistema de análisis "Fluid Flow (Fluent)", tras lo cual se abrirá el entorno de trabajo de Fluent. El esquema del proyecto en Fluent se divide en seis etapas (ver Figura 3-6).

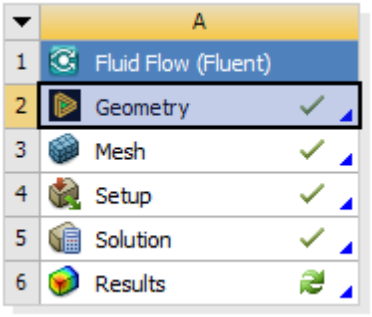


Figura 3-6 Esquema del proyecto en Fluent.

3.3.1.1 Geometría

El proceso de establecimiento de las regiones de fluido es imprescindible para el posterior análisis hidrodinámico. En esta etapa del proyecto, se genera la región de fluido que rodea al submarino y que será posteriormente mallada para el análisis. En primer lugar, se debe importar el fichero ".dwt" del alzado del submarino, seleccionando el alzado por ser menos esbelto que la planta y que, por consiguiente, se le presupone un peor comportamiento hidrodinámico. Tras importar el archivo de AutoCAD, se abre el editor de la geometría en dos dimensiones "Design Modeler" donde se va a generar la región de fluido. Para ello, se crea un "sketch" en el que se dibuja un rectángulo haciendo coincidir su centro con el del submarino y de unas dimensiones de diez veces la eslora y puntal del submarino (27 x 6,75 m). Con este rectángulo se genera una superficie con la opción "Surface from sketch", seleccionando la operación "add frozen" en lugar del "add material" predefinido. Seguidamente se crea un nuevo "sketch" que se empleará para refinar posteriormente el Mallado; en este "sketch" se dibuja una circunferencia de radio igual a la eslora del submarino centrada en la proa del mismo. Posteriormente se dibujan líneas horizontales tangentes a la circunferencia hasta llegar a 55 cm de la frontera a popa del submarino de la primera superficie, cerrando el perfil para generar una nueva superficie de igual manera que la anterior. Llegados a este punto, se dispone de tres superficies en el proyecto, las dos generadas y la importada, debiendo realizar operaciones Booleanas de substracción para obtener únicamente las dos superficies de la Figura 3-7.

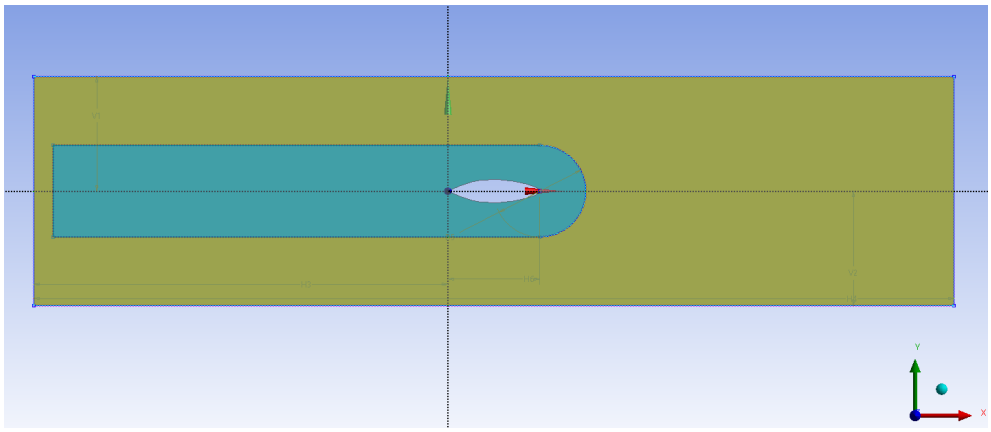


Figura 3-7 Región de fluido y refinado análisis 2 dimensiones.

3.3.1.2 Mallado

Una vez definidas las superficies de la región de fluido (zona amarilla en la Figura 3-7) y la región de refinado de la malla (zona azul en la Figura 3-7), se procede a mallar ambas. La región de fluido se malla con un tamaño de celda de 50 mm habilitando la opción "adaptative sizing". Para mallar la región de refinado se añade la opción "face sizing" seleccionando un tamaño de celda de 25 mm. Por último, y con la finalidad de obtener una mayor precisión en el análisis CFD en la zona más próxima al casco del submarino, se añade la opción "inflation" para simular mejor el comportamiento de la capa límite. Para definir el mallado en esta región, se selecciona la región de refinado como geometría y el alzado del submarino como frontera, estableciendo un total de siete capas. En este paso también se nombrarán las diferentes fronteras con el fin de poder aplicar correctamente las condiciones de contorno en el siguiente apartado. Los nombres otorgados a las fronteras son los siguientes: submarino, velocity inlet, pressure outlet, cielo y bottom.

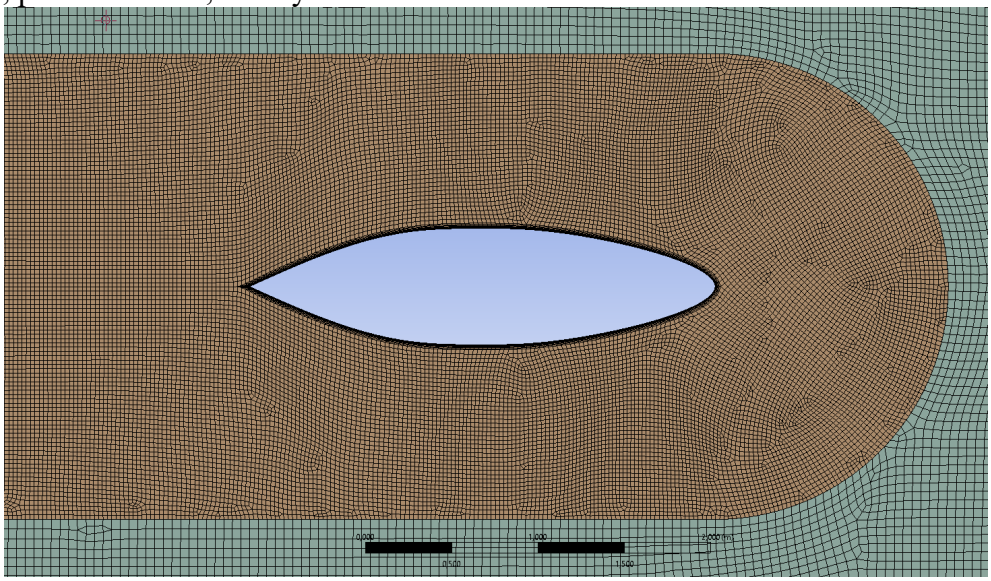


Figura 3-8 Mallado análisis dos dimensiones.

3.3.1.3 Configuración

Este menú recoge todas las opciones en cuanto a definición del fluido y su comportamiento se refiere. En primer lugar, en el desplegable de los modelos, se deja todo por defecto excepto el modelo de turbulencia, estableciendo el "SST k-omega". Éste es un modelo de viscosidad-turbulencia basado en dos ecuaciones y ampliamente empleado en estudios aerodinámicos. Es un modelo híbrido que combina los modelos k-omega cerca del casco del submarino y k-epsilon en el flujo libre manera que se emplea el modelo adecuado en todo el campo de flujo [30].

El siguiente paso es definir los materiales de las dos superficies del proyecto, debiendo sustituir el aire que está definido por defecto por el agua líquida en ambas. Posteriormente se establecen las condiciones de las fronteras existentes en el mallado, comenzando por la entrada de velocidad. A la frontera "velocity inlet" se le establece una velocidad de entrada de 3,817 m/s, máxima velocidad alcanzada hasta ahora en la competición (7,42 nudos) [1]. Seguidamente se establece una condición de interface en la frontera de las dos superficies con el fin de que el programa no interprete dicha frontera como una barrera que obstaculice al fluido posteriormente en la simulación. Por último, se atribuye a las fronteras "cielo" y "bottom" una condición de simetría y a la denominada "submarino" la condición de muro.

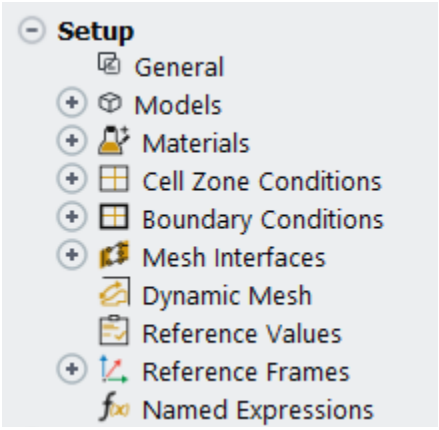


Figura 3-9 Panel de configuración Ansys Fluent.

3.3.1.4 Resolución

Es en este apartado donde se solicitará al solucionador la obtención del coeficiente de arrastre y la fuerza de arrastre (drag), magnitudes a comparar entre los perfiles planteados en el primer boceto y los propuestos en la Tabla 3-5. El coeficiente de arrastre expresa la relación entre la fuerza de arrastre y la fuerza producida por la presión dinámica multiplicada por el área según la siguiente ecuación [31]:

$$Cd = \frac{D}{\rho\, A\, \frac{V^2}{2}} \tag{1}$$

Ecuación 3-1 Coeficiente de arrastre [31].

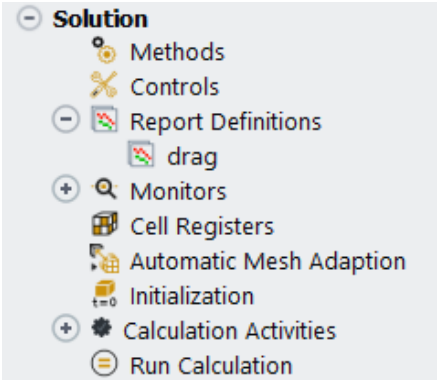


Figura 3-10 Panel de resolución Ansys Fluent.

3.3.1.5 Resultados

Una vez se ha terminado con todos los pasos anteriores, se ejecuta la simulación estableciendo un total de cien iteraciones, obteniendo una fuerza y un coeficiente de arrastre de 522,1492 N y 852,4884 respectivamente y obteniendo los siguientes gráficos de contorno.

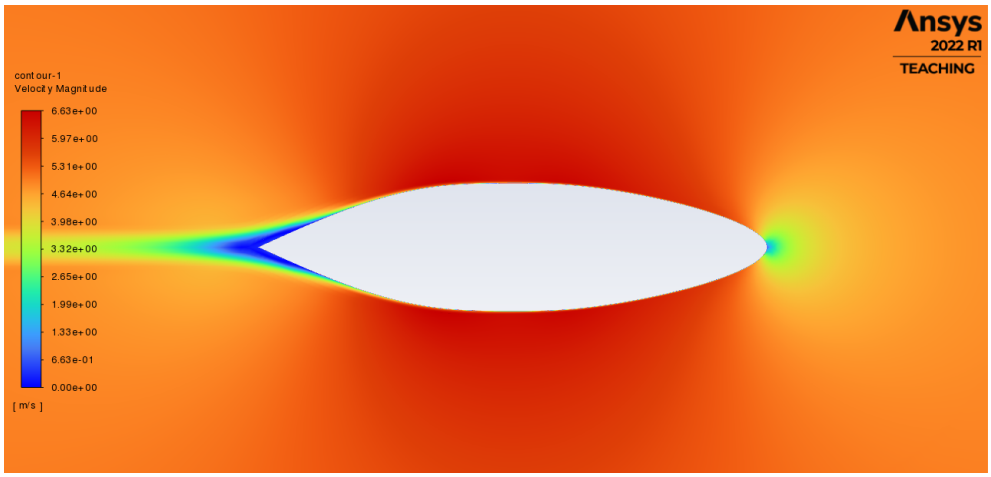


Figura 3-11 Contorno de velocidad alzado.

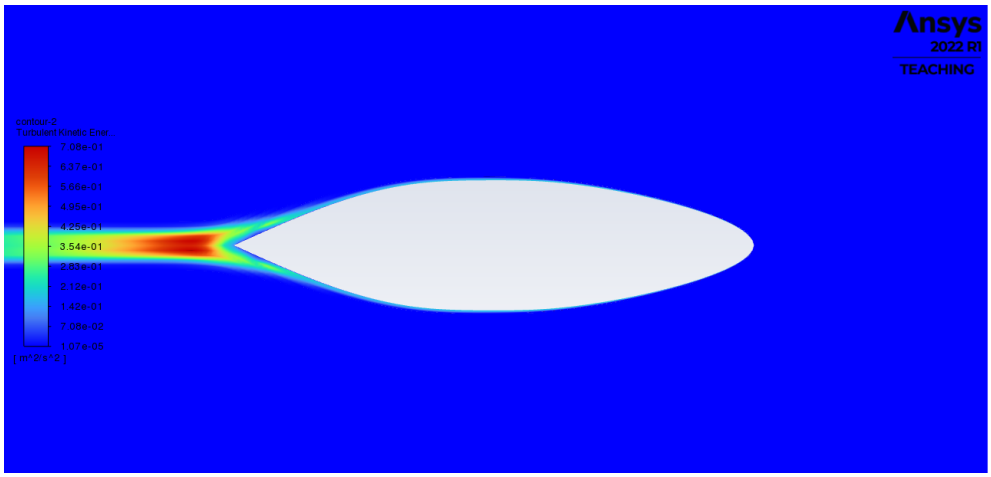


Figura 3-12 Contorno de turbulencia alzado.

Se realizan los pasos anteriores nuevamente para el perfil correspondiente a la planta del submarino obteniendo una fuerza y un coeficiente de arrastre de 213,7159 N y 348,9239 respectivamente y obteniendo los siguientes gráficos de contorno:

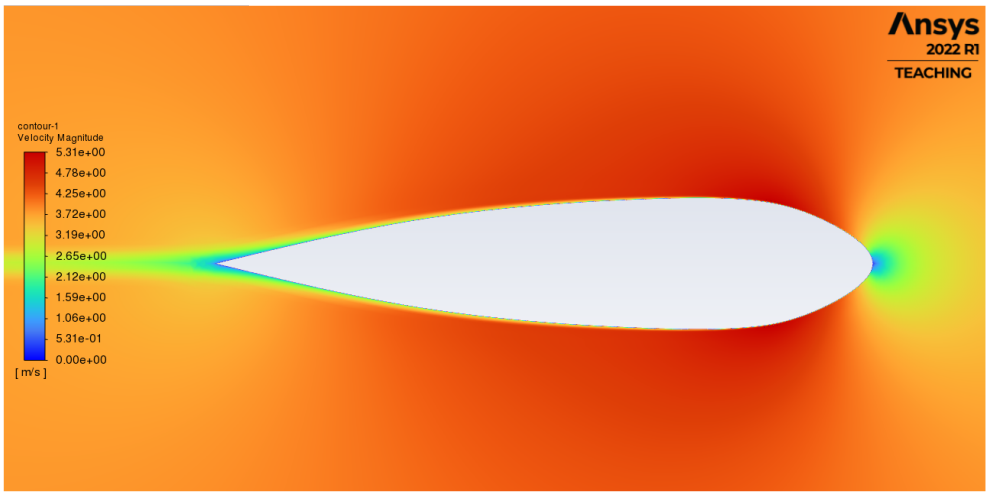


Figura 3-13 Contorno de velocidad planta.

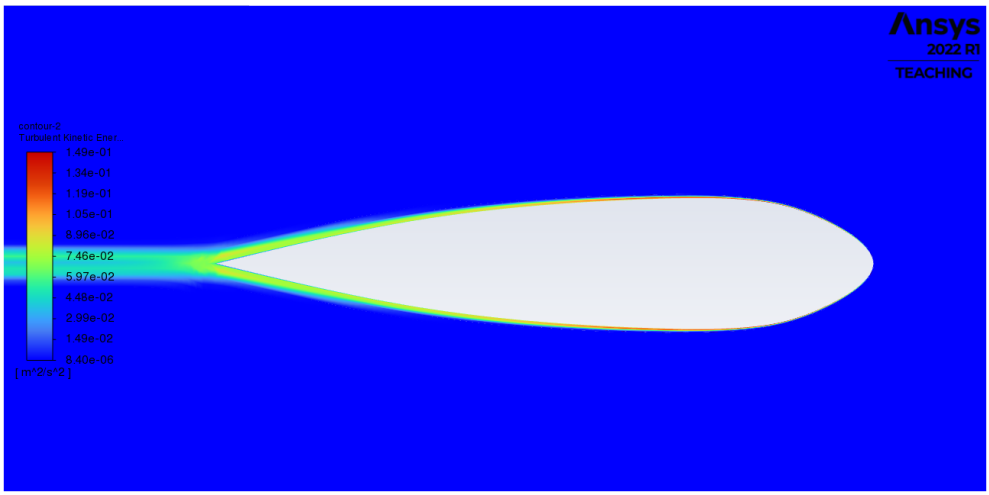


Figura 3-14 Contorno de turbulencia planta.

3.4 Optimización de la carena

Dado que la primera geometría del casco se ha realizado siguiendo criterios únicamente de aprovechamiento del espacio interior, es conveniente plantear un rediseño del mismo para minimizar su arrastre. Además, se observa en el alzado una región a popa con velocidad nula, afectando a la turbulencia y por lo tanto empeorando la hidrodinámica del modelo. Para perfeccionar esto, y teniendo en cuenta la geometría de la planta y el alzado obtenidos en el Primer modelo del casco, se emplearán perfiles *NACA* imitando así lo realizado por multitud de equipos participantes con sus submarinos.

3.4.1 Nomenclatura NACA de los perfiles

En primer lugar, en pos de comprender la nomenclatura de perfiles *NACA*, se define a continuación la terminología de los perfiles alares.

a) Cuerda: Es la línea recta que une el borde de ataque (b.a.) con el borde de salida (b.s.). Es una dimensión característica del perfil.
b) Línea de curvatura media: Es una línea equidistante entre el extradós y el intradós. La forma de esta línea fija la curvatura del perfil.
c) Ordenada máxima de la línea de curvatura media: Es la máxima distancia entre la línea de curvatura media y la cuerda. Este valor y su posición suelen darse en forma de porcentaje de la cuerda.
d) El espesor y la distribución del espesor: Son dos características que se expresan en porcentaje de la cuerda.
e) Radio de curvatura del borde de ataque: Es un círculo tangente al extradós e intradós y con su centro situado en la línea tangente en el origen a la línea de curvatura media.
f) Resistencia: componente paralela al flujo de la fuerza producida por la corriente del fluido.[32]

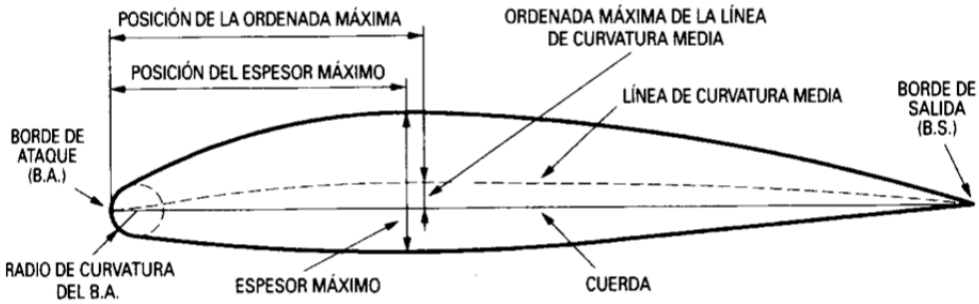


Figura 3-15 Partes de un perfil alar [32].

Los perfiles *NACA* reciben su nombre del *National Advisory Commitee for Aeronautics*, actual *NASA* y se nombran con las siglas *NACA* seguidos de una serie de dígitos que definen su geometría. Las cifras

indican por su cantidad y por su valor los datos necesarios para poder determinar o construir el perfil, dibujando primero la línea de curvatura media [32].

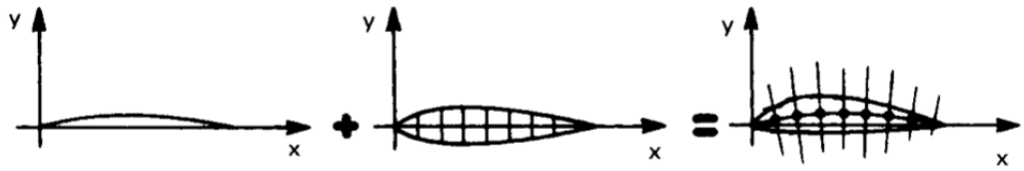


Figura 3-16 Etapas dibujo de un perfil NACA [32].

3.4.2 Perfiles NACA simétricos

Los perfiles *NACA* son ampliamente empleados en la industria naval, teniendo un claro ejemplo de los mismos en el diseño de hélices y timones, siendo simétricos los de este último supuesto. Debido a que en el submarino no se requiere generar ninguna fuerza de sustentación, los perfiles *NACA* asimétricos como el de la Figura 3-15 quedan directamente descartados para generar la forma del casco. Al emplear perfiles simétricos, el incremento de la velocidad que experimenta el flujo en ambas caras del perfil provocará una depresión en el fluido que será igual en ambas bandas, aportando estabilidad al submarino. Esta disminución de la presión provocada por el aumento de la velocidad es conocido como "efecto Venturi" (ver Figura 3-17)y se basa en la ecuación de Bernoulli (ver Ecuación 3-2).

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2}V_1^2 + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2}V_2^2 + gz_2 = cte \qquad (2)$$

Ecuación 3-2 Ecuación de Bernoulli para un flujo estacionario incompresible y despreciando la fricción a lo largo de una línea de corriente [33].

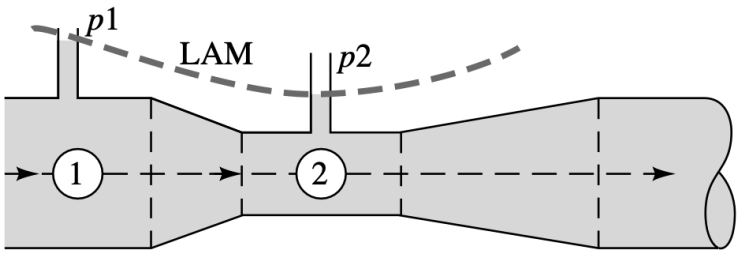


Figura 3-17 Tubo Venturi [33].

De esta manera, se seleccionan los perfiles detallados en la Tabla 3-5, obtenidos de los recursos web [34], [35] y que son escalados en AutoCAD mediante el comando *SCALE* hasta una longitud de la cuerda de 2700 mm, correspondiente a la eslora del submarino.

Perfil *NACA*	Grupo
0022	4 dígitos
63(3)-018	Serie 6
66(4)-021	Serie 6
16-021	Serie 1

Tabla 3-5 Perfiles NACA simétricos.

3.4.2.1 Perfil alar *NACA* 4 dígitos

En los perfiles *NACA* de 4 dígitos (ver Figura 3-19), los dos primeros se corresponden con la ordenada máxima de la línea de curvatura media en porcentaje de la cuerda y con la localización de ese

punto en décimas de la cuerda respectivamente. Al tratarse el perfil empleado de un perfil simétrico, para el perfil *NACA* 0022 estos dígitos toman un valor de cero. Los dos últimos dígitos representan el espesor máximo en porcentaje de la cuerda, en este caso un 22%. Este espesor máximo se encuentra por defecto al 30% de la longitud de la cuerda medido desde el borde de ataque (ver Figura 3-18) [36].

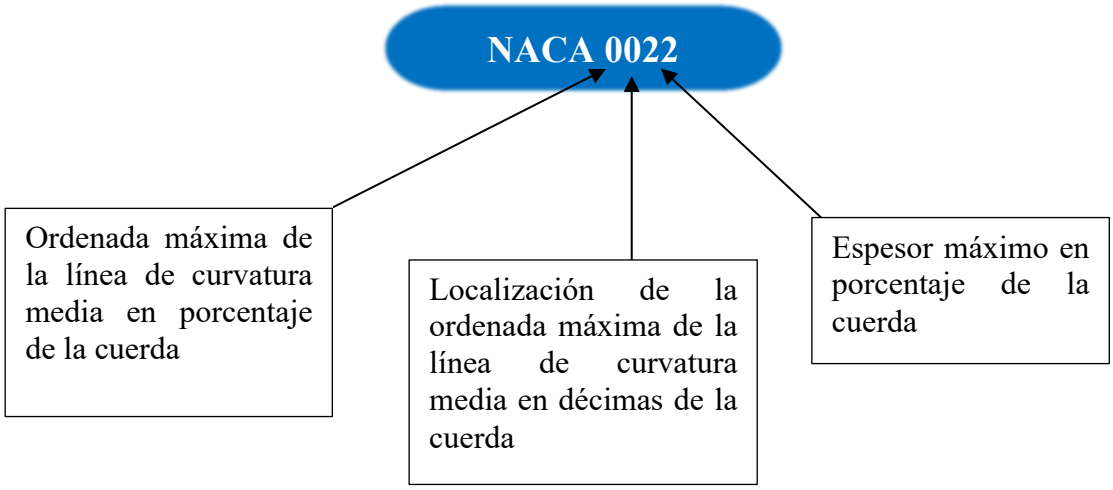


Figura 3-18 Perfil NACA 4 dígitos.

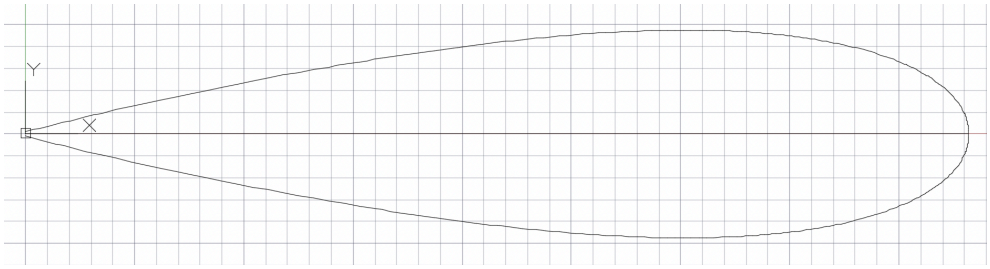


Figura 3-19 Perfil NACA 0022.

3.4.2.2 Perfil alar *NACA* serie 1

En la serie 1 (ver Figura 3-21), el primer dígito identifica la serie (1) mientras que el segundo dígito indica la ubicación del punto de mínima presión en décimas de la cuerda medidas desde el borde de ataque, este punto es analizado desde un perfil simétrico. El tercer dígito se corresponde con el coeficiente de sustentación de diseño en décimas de la cuerda (valor nulo para perfiles *NACA* simétricos). Finalmente, los dos últimos dígitos representan, al igual que en los perfiles *NACA* de 4 dígitos, el espesor máximo en porcentaje de la cuerda (ver Figura 3-20) [36].

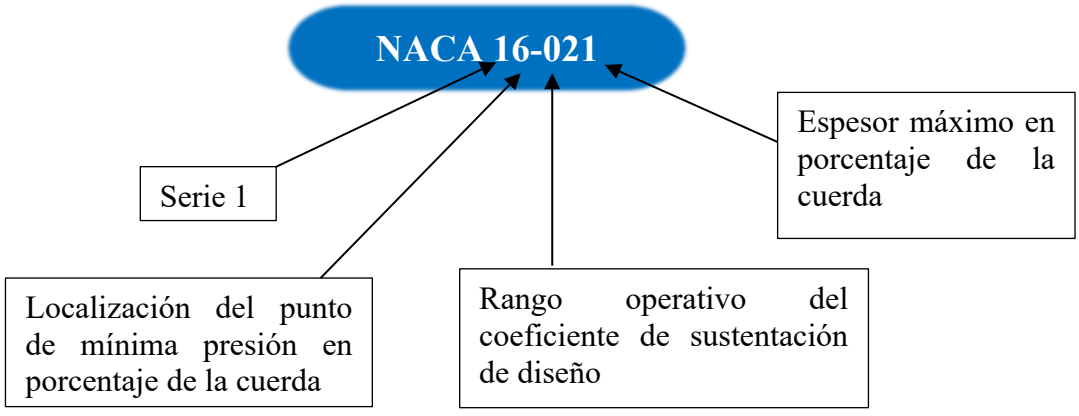


Figura 3-20 Perfil NACA serie 1.

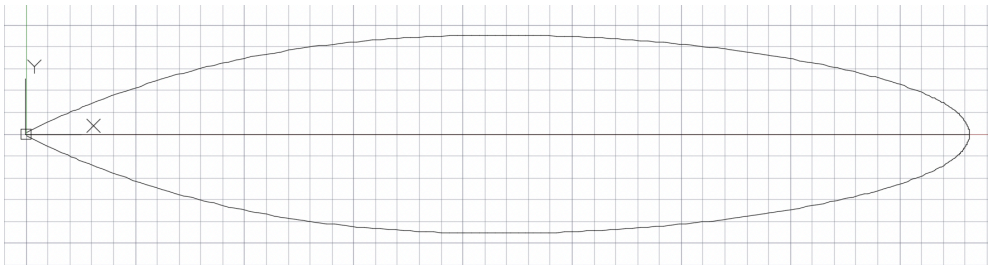


Figura 3-21 NACA 16-021.

3.4.2.3 Perfil alar *NACA* serie 6

En los perfiles *NACA* de la serie 6 (ver Figura 3-23 y Figura 3-24), el primer dígito (6) indica la serie mientras que el segundo dígito indica la ubicación del punto de mínima presión en décimas de la cuerda medidas desde el borde de ataque. El tercer dígito se corresponde con el coeficiente de sustentación de diseño en décimas de la cuerda (valor nulo para perfiles *NACA* simétricos). Finalmente, los dos últimos dígitos representan, al igual que en los perfiles *NACA* de 4 dígitos y de la serie 1, el espesor máximo en porcentaje de la cuerda; siendo el dígito representado entre paréntesis el rango operativo del coeficiente de sustentación (ver Figura 3-22). Los perfiles de la serie 6 tienen como objetivo minimizar la resistencia fomentando el flujo laminar, obteniendo mejoras del 33% respecto a los perfiles de 4 dígitos [36].

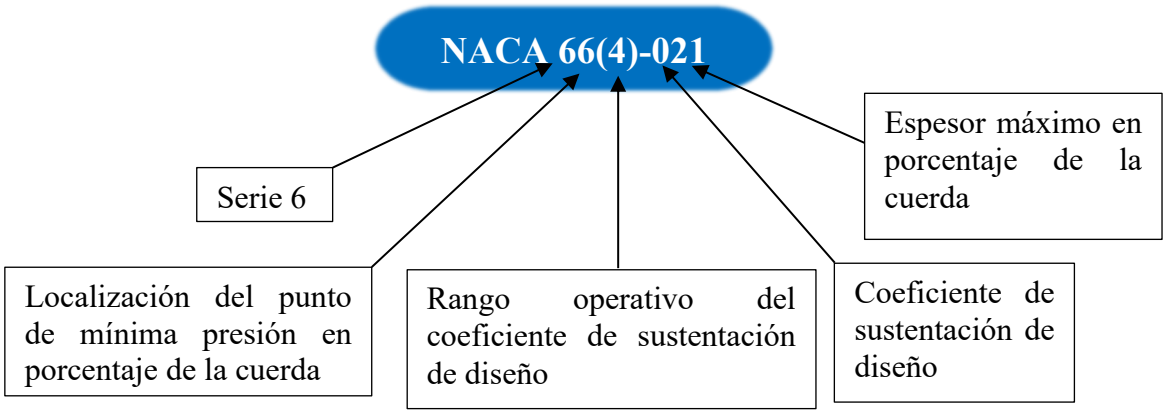


Figura 3-22 Perfil NACA serie 6.

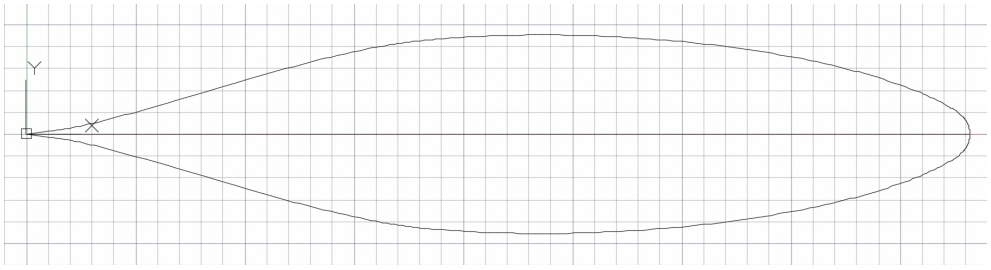


Figura 3-23 NACA 66(4)-021.

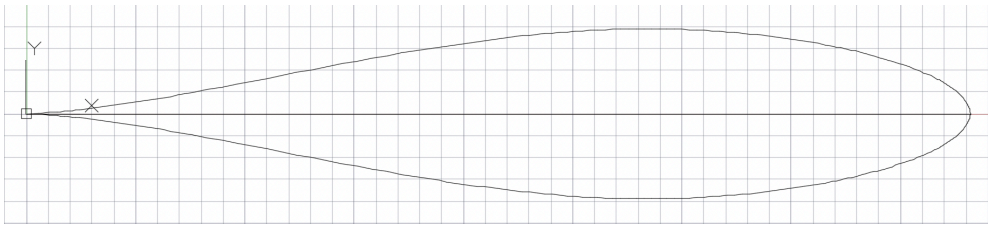


Figura 3-24 NACA 63(3)-018.

3.4.3 Escalado de los perfiles

La geometría que se seleccione para la planta debe tener su anchura máxima desplazada hacia la proa, ya que el punto crítico que necesita un mayor espacio son los hombros del piloto (ver Tabla 3-4)

que se encuentran a 500 mm de la misma [11]. Por lo tanto, las dos opciones que se considerarán serán la Figura 3-19 Perfil NACA 0022 y la Figura 3-24 NACA 63(3)-018. Se observa que con la Figura 3-25 NACA 0022 con el piloto no es necesario aplicar ningún factor de escala ya que ha sido dimensionado teniendo presentes las necesidades del piloto. Sin embargo, con la Figura 3-26 NACA 63(3)-018 con el piloto este dimensionado previo no es posible, por lo que se debe modificar la anchura máxima en porcentaje de la cuerda del perfil *NACA*, o bien aplicar un factor de escala a todo el conjunto, lo que aumentaría tanto la eslora como la manga. Debido a que no es necesario más espacio en el submarino, se descarta la opción de aumentar la eslora, por lo que las modificaciones se realizan únicamente en el eje perpendicular a crujía.

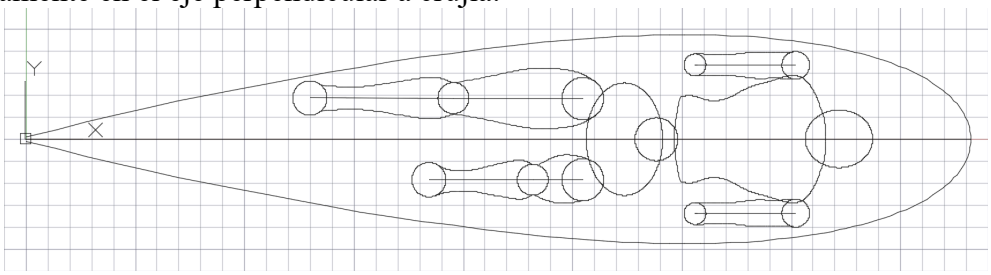


Figura 3-25 NACA 0022 con el piloto.

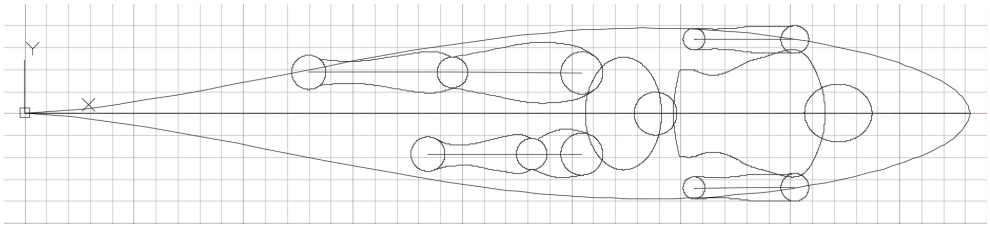


Figura 3-26 NACA 63(3)-018 con el piloto.

La primera modificación consiste en ajustar el factor de escala en el eje y, ya que con el perfil *NACA* 63(3)-018 la manga del casco es de 486 mm, insuficientes para albergar el cuerpo del piloto. Por lo tanto, se irá modificando la escala del eje vertical hasta comprobar que el casco tiene las dimensiones necesarias para albergar el cuerpo del piloto; con el correspondiente margen de 10 mm. Posteriormente se ajusta la escala hasta un valor de 1,33, de esta manera, se obtiene que la anchura máxima es de 646,38 mm, correspondiente a un 23,94% de la longitud de la cuerda. Para esta operación, se adelanta el cuerpo del piloto hacia proa 67,16 mm con el fin de aprovechar el espacio disponible. Debido a que la nomenclatura *NACA* se compone de unidades exactas, se aproxima al 24%, para lo que se obtiene un factor de escala de 1,3324, siendo el perfil resultante el *NACA* 63(3)-024 y obteniendo una manga de 648 mm (ver Figura 3-27).

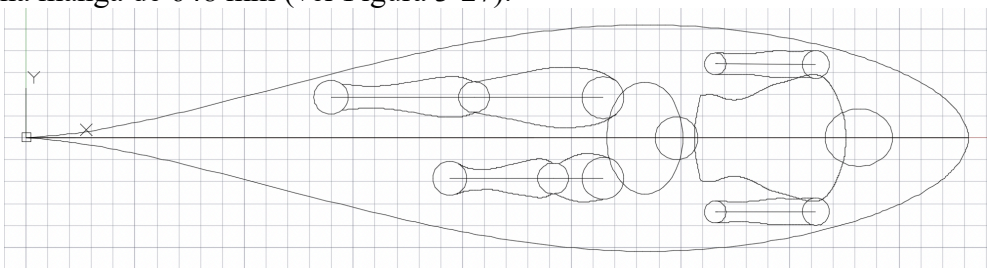


Figura 3-27 NACA 63(3)-024 con el piloto.

El caso contrario ocurre para la elección del perfil del alzado, el empleo de un perfil con la anchura máxima situada hacia proa forzaría que el submarino fuera excesivamente ancho para permitir el movimiento de los pies, por este motivo se seleccionan los perfiles de la Figura 3-21 NACA 16-021 y la Figura 3-23 NACA 66(4)-021. En ambos perfiles el punto de mayor anchura se encuentra próximo al centro del mismo, ofreciendo un mejor aprovechamiento del espacio para la cadera y los pies del piloto. En el caso del perfil *NACA* 66(4)-021, se repite la operación del párrafo anterior, debiendo establecer un factor de escala de 1,28. Con este factor de escala, se obtiene una altura máxima correspondiente al 26,88% de la longitud de la cuerda. Este dato se aproxima al 27%, generando un

perfil con un puntal de 729 mm debiendo aplicar un factor de escala de 1,2857; siendo el perfil resultante el *NACA* 66(4)-027 (ver Figura 3-28). Siguiendo el mismo proceso para el perfil *NACA* 16-021, estableciendo inicialmente un factor de escala de 1,23. Con este factor de escala, la altura máxima toma el valor del 25,83% de la longitud de la cuerda, valor que se aproxima al 26% para establecer la nomenclatura *NACA*. Con este perfil, el puntal es de 702 mm, debiendo aplicar un factor de escala de 1,2381 y resultando en un perfil *NACA* 16-026 (ver Figura 3-29).

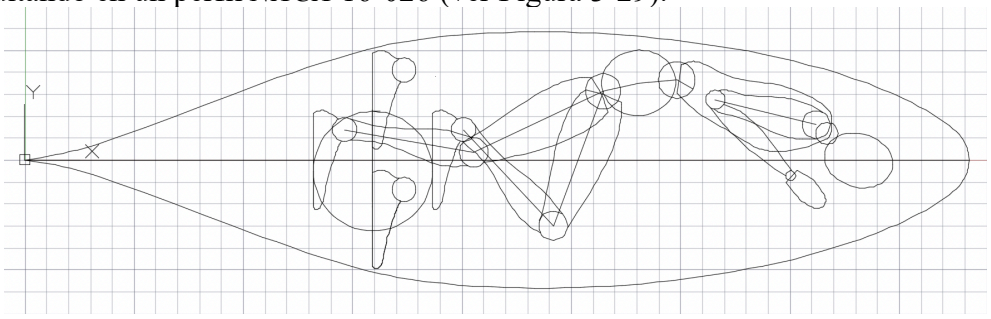


Figura 3-28 NACA 66(4)-027 con el piloto.

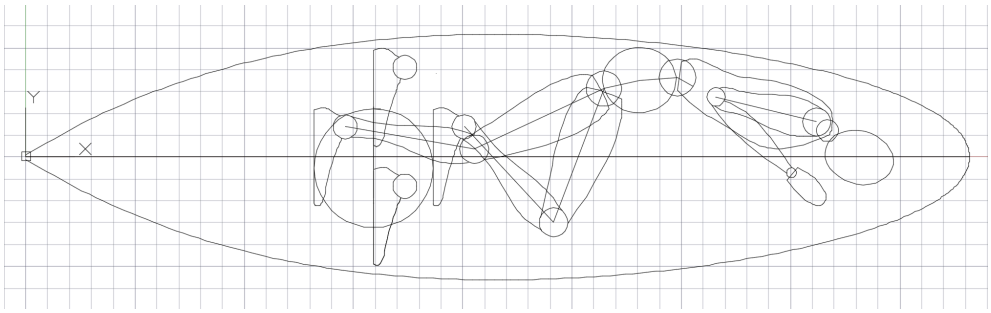


Figura 3-29 NACA 16-026 con el piloto.

Con los cuatro perfiles *NACA* generados, se obtienen dimensiones y relaciones entre la manga/puntal y la eslora (2700 mm) para cada uno de ellos detalladas en la Tabla 3-6 y la Tabla 3-7 comparando las relaciones con las obtenidas en la Tabla 3-2.

Perfil	Manga (mm)	L/B
NACA 0022	594 mm	4,545
NACA 63(3)-024	648 mm	4,167
Perfil preliminar	540 mm	5

Tabla 3-6 Dimensiones y relaciones planta

Perfil	Puntal (mm)	L/D
NACA 66(4)-027	729 mm	3,704
NACA 16-026	702 mm	3,846
Perfil preliminar	675 mm	4

Tabla 3-7 Dimensiones y relaciones alzado

3.4.4 Análisis de los perfiles NACA propuestos para el alzado en Ansys Fluent

Realizando exactamente las mismas simulaciones detalladas en el punto 3.3.1 y con las mismas propiedades en las fronteras y en el fluido, se realiza en primer lugar el análisis CFD en los 2 perfiles NACA propuestos para el alzado al ser los que generen una fuerza de arrastre mayor. De estas simulaciones se obtienen los resultados detallados en la Tabla 3-8 además de los siguientes contornos de velocidad y turbulencia en la Figura 3-30.

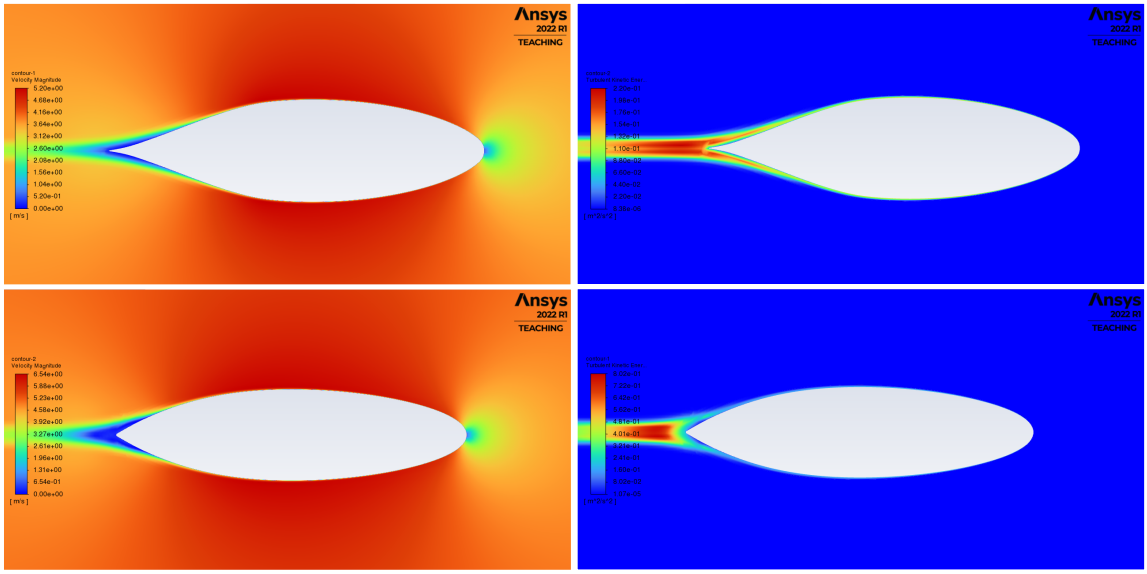


Figura 3-30 Contornos de velocidad (izquierda) y turbulencia (derecha) NACA 66(4)-027 (superior) y 16-026 (inferior).

Perfil Alzado	Fuerza de arrastre (D)	Coeficiente de arrastre (Cd)
NACA 66(4)-027	278,8416 N	455,2516
NACA 16-026	604,1714 N	986,4022
Perfil preliminar	522,1492 N	852,4884

Tabla 3-8 D y Cd en el alzado.

Se observa en la Tabla 3-8 que el perfil que genera una menor fuerza de arrastre es el NACA 66(4)-027, por lo que es el que se empleará para generar el casco del submarino. Sin embargo, se observa que en la zona cercana a la popa existe una región de fluido con velocidad nula, provocando que el submarino al avanzar deba arrastrar esa masa de fluido y, por lo tanto, perder rendimiento. Con el propósito de solucionar este inconveniente, se importa la imagen superior izquierda de la Figura 3-30 al proyecto de AutoCAD del perfil NACA 66(4)-027 con el fin de ocupar con el casco del submarino ese volumen de fluido. La manera de proceder será aumentar la escala en el eje horizontal, reduciendo así el espesor máximo en porcentaje de la cuerda y, por lo tanto, resultando en un nuevo perfil. Además, se forzará que el perfil del alzado cumpla la relación eslora/puntal obtenida en la Tabla 3-2 (4) manteniendo el puntal del perfil anteriormente propuesto, ya que es el que requiere el movimiento del piloto no siendo necesario aumentarlo. De esta manera, el perfil resultante es el NACA 66(4)-025 con 2916 mm de eslora. Tras realizar la simulación CFD, se obtiene un arrastre de 263,4267 N y un coeficiente de 430,0844; además, se observa una mejor salida del flujo por la popa, reduciendo el volumen de fluido con desplazamiento nulo y estrechando la estela como se observa en la comparativa de la Figura 3-31.

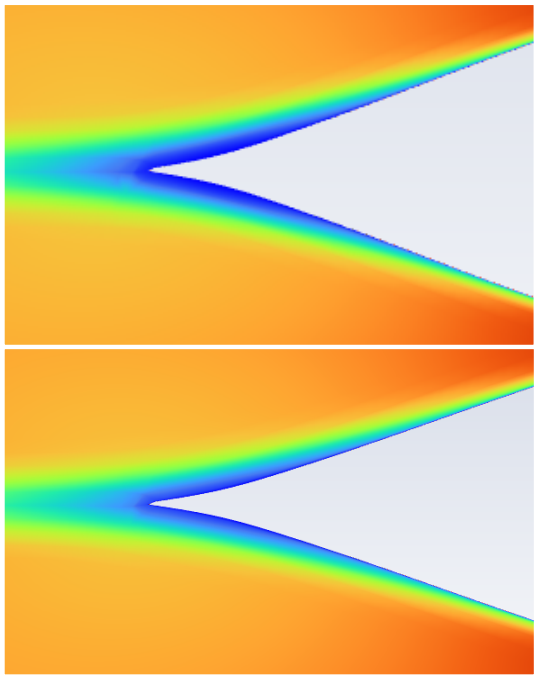


Figura 3-31 Salida del flujo de popa NACA 66(4)-027 (superior) y NACA 66(4)-025 (inferior).

Esto es debido a que en la sección situada más hacia proa del perfil propuesto, el fluido experimenta un gradiente de presión favorable, es decir, el fluido aumenta su velocidad y disminuye su presión. Por el contrario, en la sección de popa, el flujo exterior desacelera, aumentando su presión y resultando en un gradiente de presión desfavorable. En este último supuesto, este gradiente de presión es lo suficientemente intenso provocando que la capa límite se separe de la pared generando una corriente cerrada de recirculación por debajo de la misma denominada burbuja de separación, ver Figura 3-32 [37]. Esta región es fácilmente identificable en la Figura 3-31 en color azul.

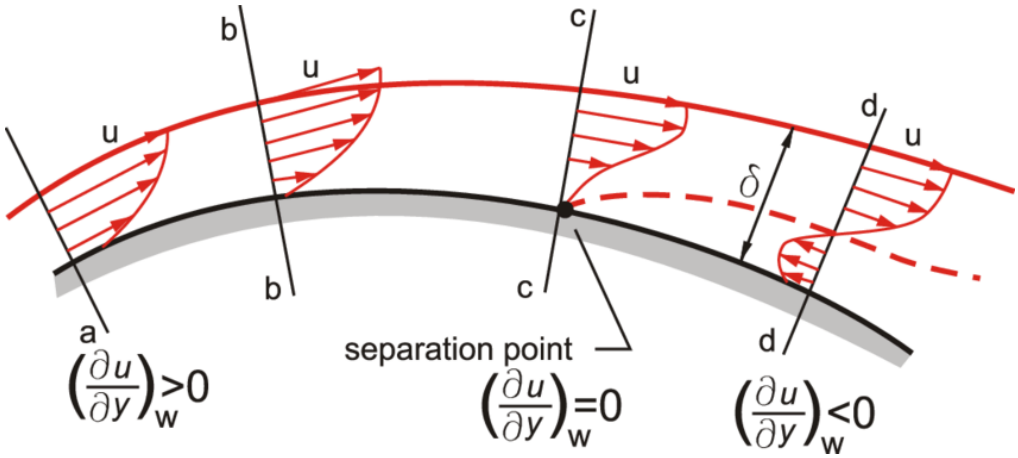


Figura 3-32 Separación de la capa límite sobre una superficie [38].

3.4.5 Análisis de los perfiles NACA propuestos para la planta en Ansys Fluent

Al realizar una modificación en la eslora del submarino, es necesario a su vez modificar los perfiles NACA que se habían propuesto inicialmente para la planta del submarino. Esta modificación consiste únicamente en aumentar la eslora y disminuir el espesor máximo en porcentaje de la cuerda para ajustarlo al cuerpo del piloto. De esta manera, se generan los mismos perfiles con la modificación de sus dos últimas cifras, correspondiente al espesor máximo en porcentaje de la cuerda, siendo estos perfiles los reseñados en la Tabla 3-9 y representados en la Figura 3-33.

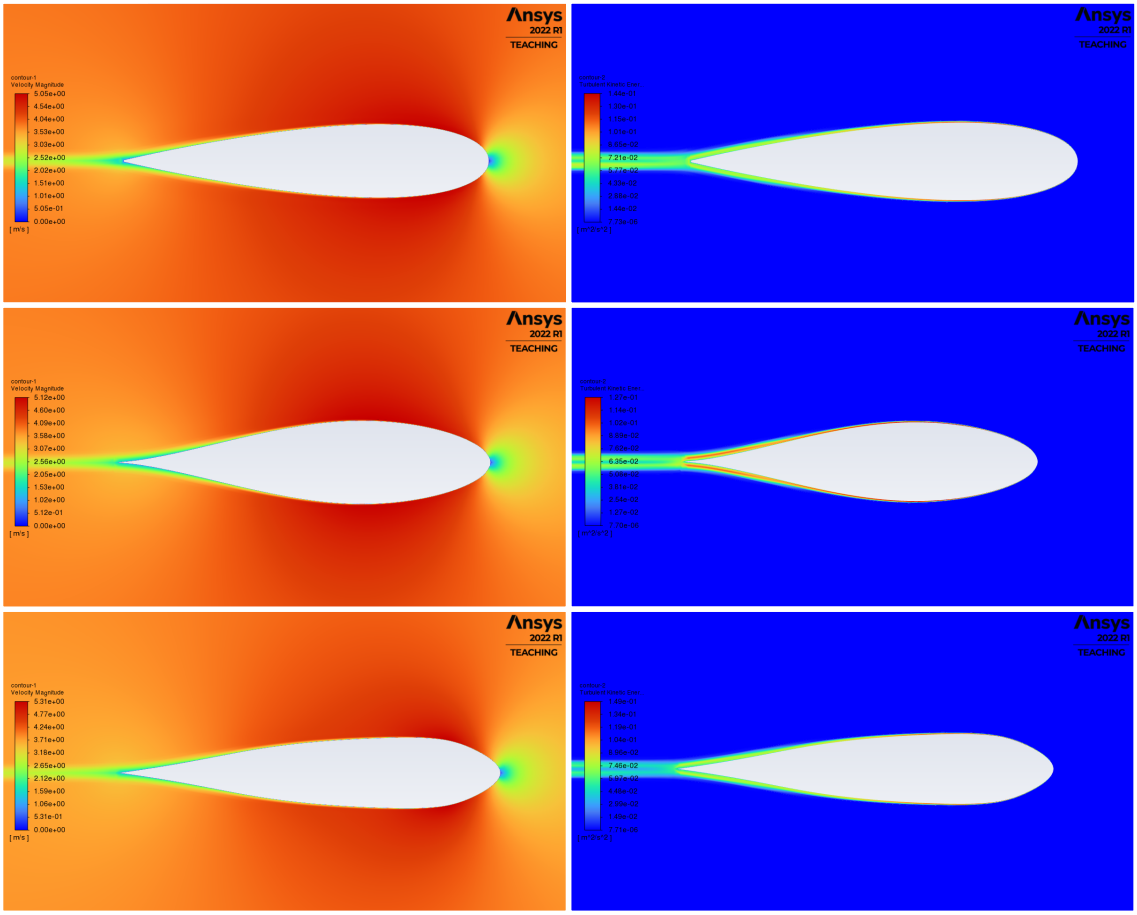


Figura 3-33 Contornos de velocidad (izquierda) y turbulencia (derecha) del perfil NACA 0020 (superior), NACA 63(3) 022 (medio) y perfil preliminar (inferior).

Perfil	Fuerza de arrastre (D)	Coeficiente de arrastre (Cd)
NACA 0020	231,3754 N	377,7557
NACA 63(3)-022	221,7399 N	362,0243
Perfil preliminar modificado	210,8718N	344,2804

Tabla 3-9 D y Cd en la planta.

3.4.6 Generación del casco del submarino

Una vez realizadas las simulaciones en Ansys Fluent, se selecciona para la planta el perfil preliminar modificado hasta adaptarlo a la nueva eslora y para el alzado el perfil NACA 66(4)-025. De esta manera, las dimensiones resultantes del submarino son las detalladas en la Tabla 3-10. Con estos dos perfiles, se realiza la misma secuencia de pasos que en el apartado 3.3. obteniendo el volumen de la Figura 3-35 y su correspondiente plano de formas del Anexo I: Planos. A su vez, se representan en los diagramas de cajas y bigotes de la Figura 3-34 las dimensiones del submarino propuesto en una comparativa con las de los 15 submarinos analizados.

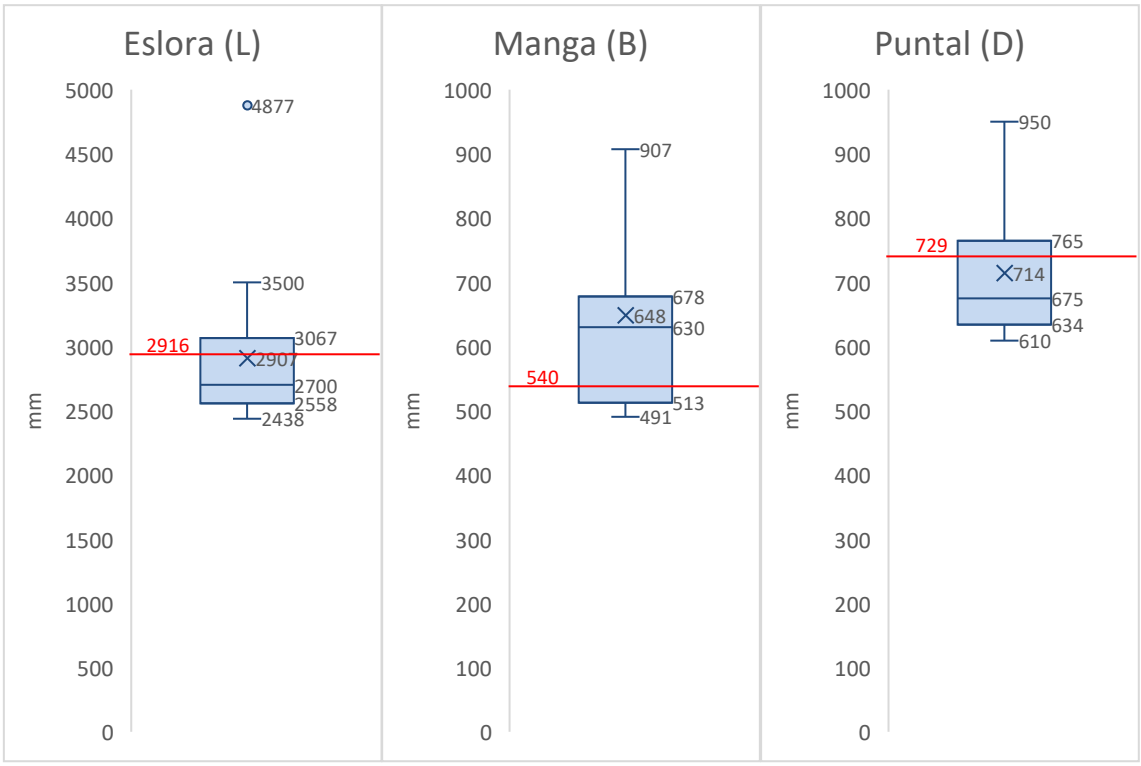


Figura 3-34 Diagramas de cajas y bigotes con los datos del submarino generado.

Dimensiones y relaciones	Submarino generado	Diagramas de la Tabla 3-2
L (mm)	2916	2700
B (mm)	540	540
D (mm)	729	675
L/B	5	5
L/D	4	4
B/D	0,7	0,8

Tabla 3-10 Dimensiones y relaciones diseño definitivo.

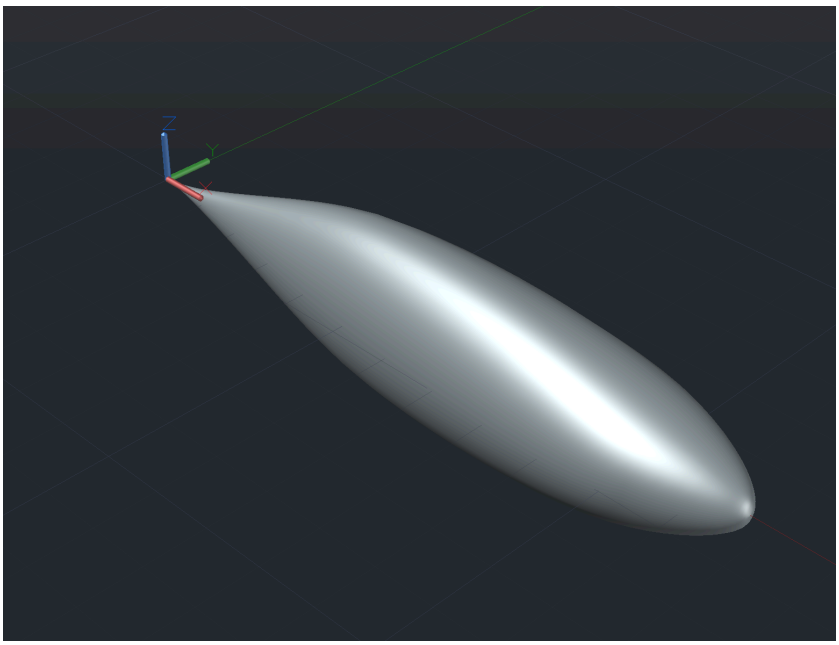


Figura 3-35 Geometría definitiva del casco en 3D.

3.4.7 Análisis CFD del casco del submarino

Una vez obtenida la carena del submarino, se procede al análisis de la misma en Ansys Fluent. Para la primera simulación, se intenta realizar el mallado de la misma manera en la que se procedió en el análisis en dos dimensiones; observando que el ordenador no es capaz de soportar la carga que supone este proceso y generando numerosos avisos de error y cierres espontáneos. Por este motivo, se procede a generar un corte de simetría en el plano XY de manera que se obtiene únicamente medio submarino, reduciendo los recursos necesarios para resolver la operación de mallado y su posterior simulación. Una vez obtenida la malla y realizada la simulación con las mismas propiedades de contorno que en el análisis en dos dimensiones, se ejecuta la simulación obteniendo una fuerza de arrastre de 58,547134 Newtons, correspondiente al arrastre generado únicamente por la mitad del casco, siendo el arrastre total de 117,094268 Newtons. Tras la simulación y posterior generación de los de velocidad y turbulencia generados, se observa que puede resultar más eficiente el empleo de una región de fluido de menores dimensiones con el fin de disminuir la demanda de recursos del ordenador. Para ello se vuelve a editar la geometría en el primer paso de la manera que se detallará a continuación y, tras ejecutar el simulador, se obtiene un arrastre de 58,096455 Newtons para medio submarino, es decir, 116,19291 Newtons. Magnitud aproximadamente igual a la obtenida con la malla anterior, pero con unos tiempos de simulación significativamente menores. De esta manera, el proceso de simulación a realizar es el detallado a continuación.

3.4.7.1 Geometría

En esta ocasión, y a diferencia de lo realizado en el apartado 3.3.1.1, se genera únicamente una región de fluido, es decir, sin refinado de malla debido a la disminución de las dimensiones de la región de fluido. Para generar dicha región, se ejecuta un "encapsulamiento" del submarino con unos márgenes de 1,5 m y 3 m a proa y popa respectivamente, y un margen de 1 m en ambas direcciones del eje vertical y transversal del submarino. Seguidamente, se realiza un corte de simetría en el plano XY que dividirá el submarino a la mitad y posteriormente se realiza una operación Booleana de substracción para obtener únicamente la región de fluido sin el submarino como se aprecia en la Figura 3-36.

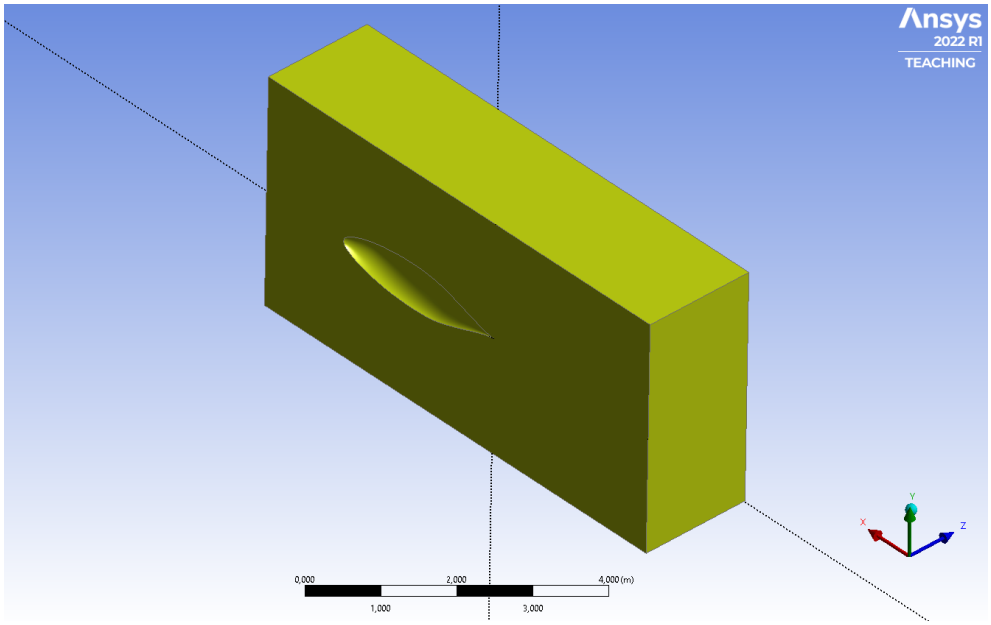


Figura 3-36 Región de fluido análisis en 3 dimensiones.

3.4.7.2 Mallado

Una vez definida la región de fluido se procede al mallado de la misma. La región de fluido se malla con un tamaño de celda de 25 mm, de igual manera que la región de refinado de mala que en el apartado 3.3.1.2. Además, también se añade la opción "inflation" con 7 capas para simular de manera más fehaciente el comportamiento de la capa límite, como se aprecia en la esquina inferior izquierda de la Figura 3-37.

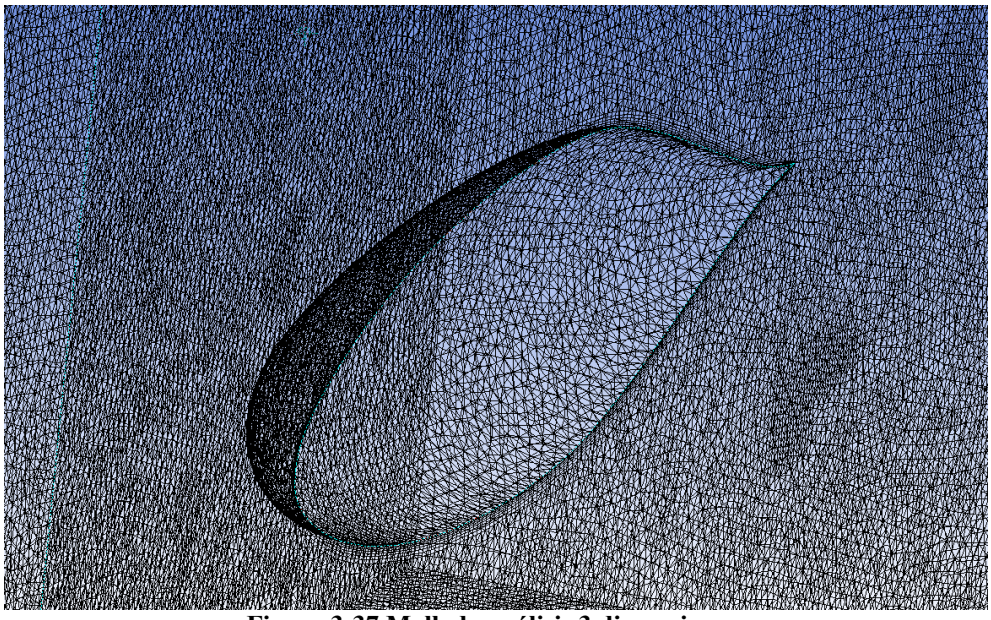


Figura 3-37 Mallado análisis 3 dimensiones.

3.4.7.3 Configuración

En este apartado se establecen exactamente las mismas condiciones que en el 3.3.1.3.

3.4.7.4 Resolución

En este apartado se establecen exactamente las mismas condiciones que en el 3.3.1.4.

3.4.7.5 Resultados

Una vez se ha terminado con todos los pasos anteriores, se ejecuta la simulación estableciendo un total de cien iteraciones, obteniendo una fuerza y un coeficiente de arrastre de 116,19291 N y 94,851 respectivamente y obteniendo los gráficos de contorno de la Figura 3-38.

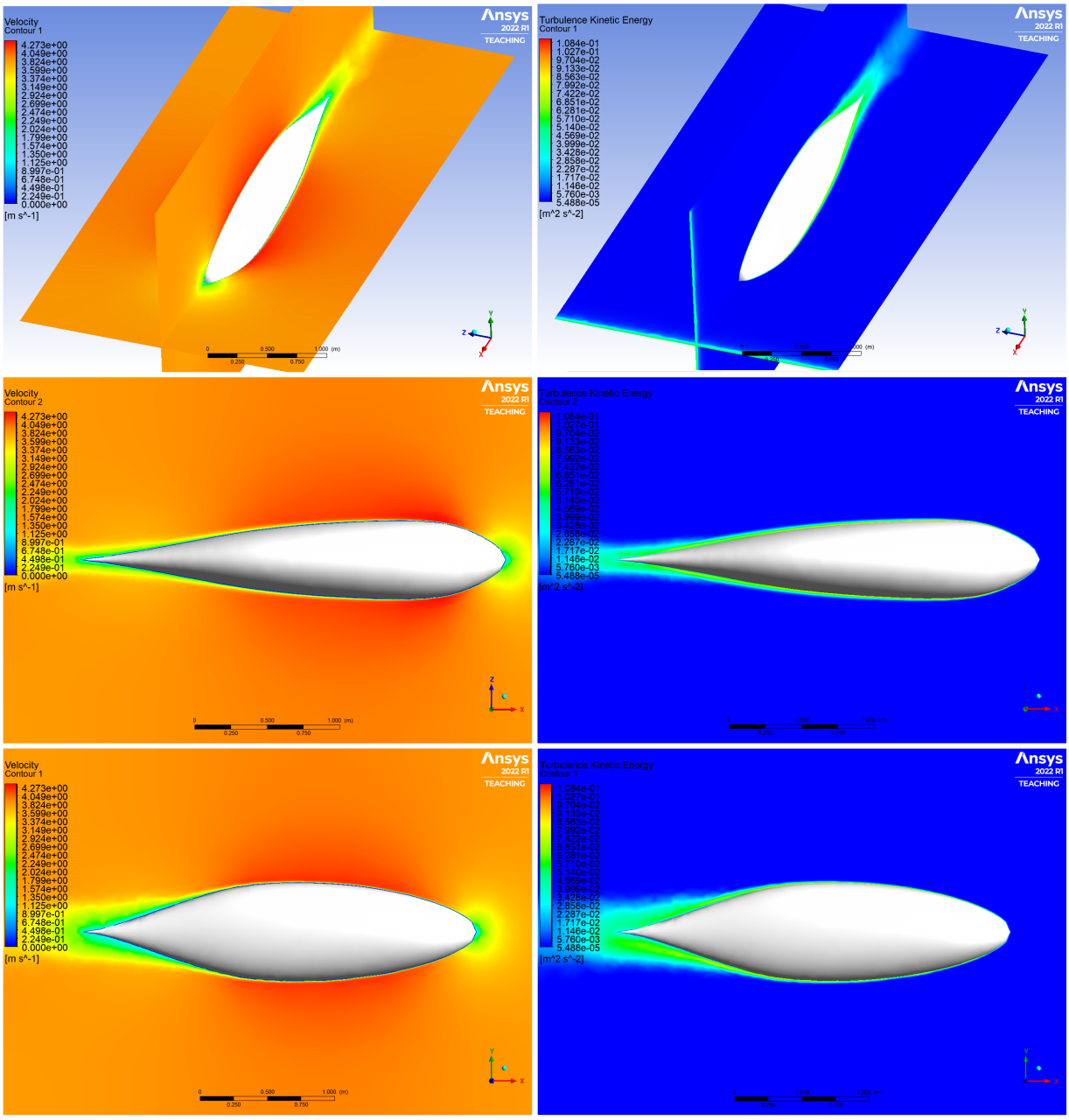


Figura 3-38 Contornos de velocidad (izquierda) y turbulencia (derecha) del modelo 3D (superior), planta (medio) y alzado (inferior).

3.4.8 Posible mejora de la popa

En un intento de disminuir el coeficiente de arrastre y la turbulencia generada en la popa del submarino, se desarrolla una nueva carena con la popa rematada en una línea vertical en lugar de en un punto (**Figura 3-39**). Esto se realiza mediante un perfil NACA 66(4)-022 escalado hasta los 3313 mm de eslora, pero rematado con una línea vertical a 613 mm de la popa, manteniendo de esta manera el puntal máximo y aproximando la popa al perfil de separación de la capa límite. Con esta nueva carena, no se consigue el resultado buscado y por lo tanto queda finalmente descartada.

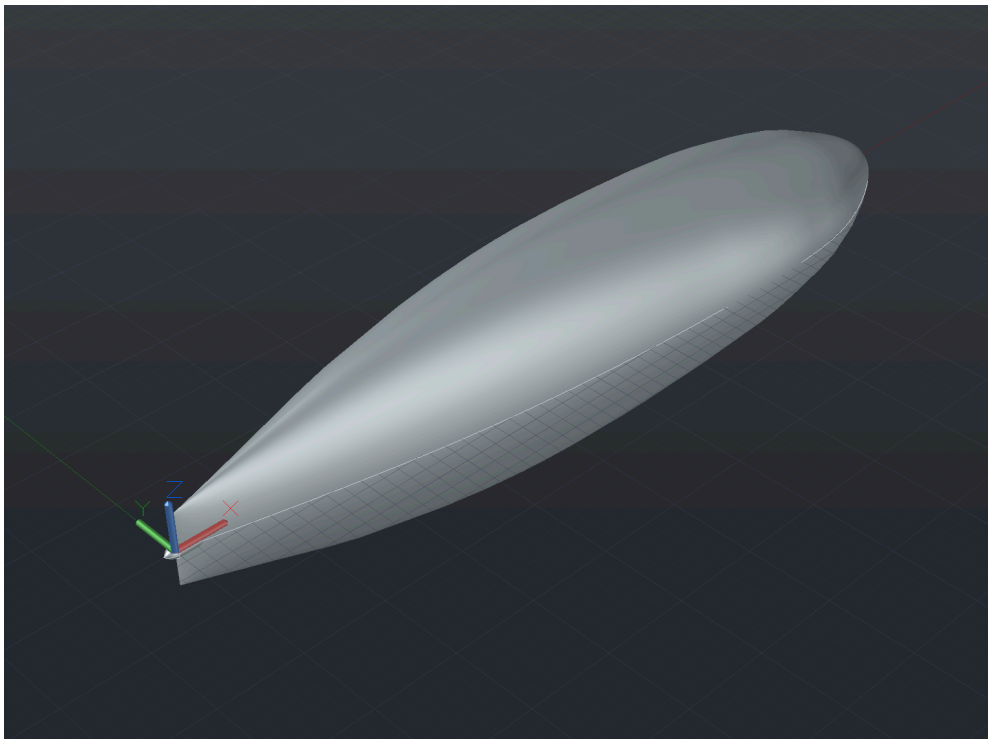


Figura 3-39 Propuesta de mejora del casco.

3.5 Diseño de los apéndices del submarino

Tras haber realizado todas las geometrías anteriores en AutoCAD, en este apartado se procede a trabajar en Inventor para modelar y ensamblar en tres dimensiones todos los apéndices que se desarrollarán para el submarino.

3.5.1 Superficies de control

La generación de las superficies de control del submarino se basa en primera instancia en la selección del perfil hidrodinámico de las mismas. Para ello, se selecciona el perfil NACA 64-008 (ver Figura 3-40), perfil que genera las aletas del torpedo MK-46 empleado por la Armada Española en las fragatas de la clase Santa María y Álvaro de Bazán y en el helicóptero SH-60B Sea Hawk (ver Figura 3-41).

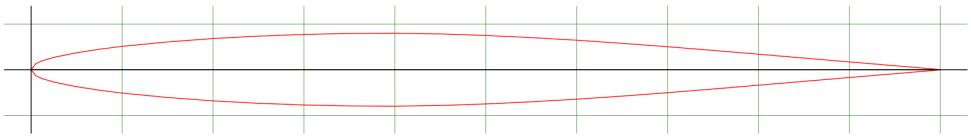


Figura 3-40 Perfil NACA 64-008 [35].



Figura 3-41 Sección de cola del torpedo MK-46.

Para el modelado de las aletas, se opta por la elección de una geometría generada a raíz de arcos de elipses (Figura 3-42). Para ello, en un boceto en dos dimensiones se generan dos arcos de elipses que se intersequen entre sí, separados en la base de la aleta 150 mm; longitud de la cuerda del perfil NACA 64-008. Tras esto se ejecuta una solevación entre los sucesivos perfiles NACA escalados a lo largo de la vertical de la aleta, generando finalmente la geometría de la aleta que se empleará en el submarino (Figura 3-43). Al modelo de la aleta ya generado, se le instalará un eje para posteriormente permitir la correcta orientación de la misma; posicionando este eje en el centro de gravedad de la aleta.

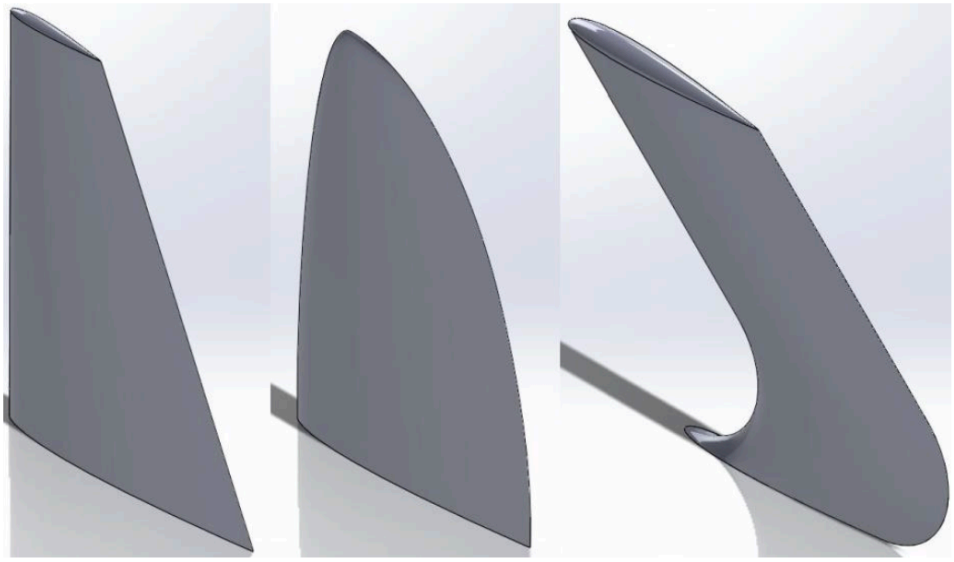


Figura 3-42 Diferentes geometrías para las aletas. De izquierda a derecha, recta, elíptica y de barrido invertido [17].

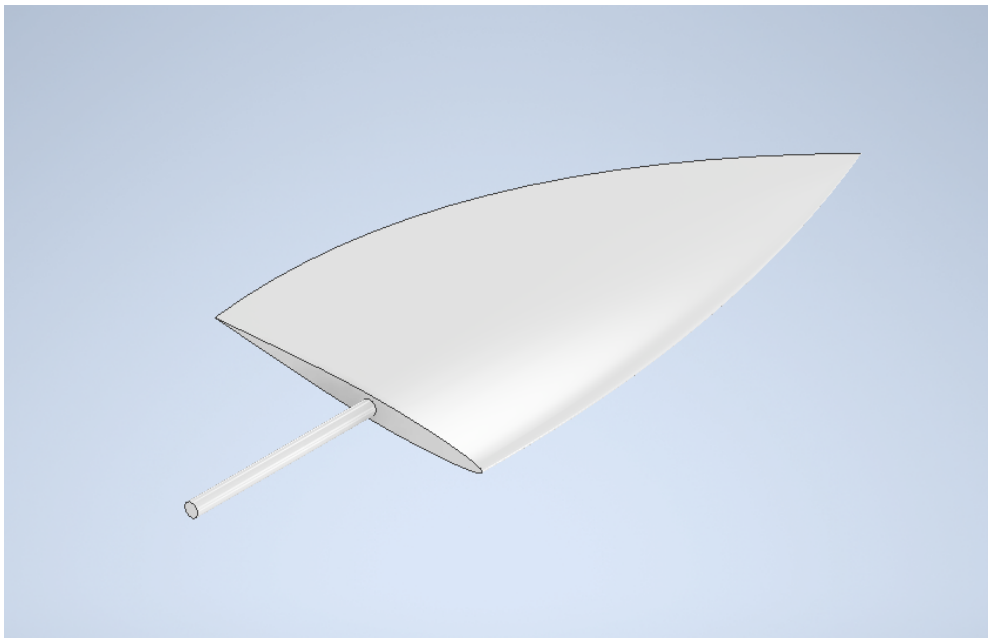


Figura 3-43 Aleta generada para el submarino.

3.5.2 Adaptadores de las aletas al casco

Con el propósito de abaratar costes y permitir un repuesto más rápido en caso de rotura de alguna aleta, se emplearán 4 aletas iguales. Esto genera un problema añadido, y es que debido a que el submarino no es una superficie de revolución, la curvatura a la que se tendrán que adaptar las aletas verticales no es la misma que la requerida para las aletas horizontales. Por este motivo, se diseñan unos adaptadores que permitirán la correcta instalación de las aletas en su localización correspondiente. Estos adaptadores se generan en Inventor a partir del perfil hidrodinámico de las aletas, ajustando la extrusión hasta permitir su salida por el casco para después instalarle un reborde que se adapte a la curvatura del interior del submarino. Estos adaptadores disponen de un agujero pasante que permitirá el correcto ensamblaje de las aletas ver Figura 3-44.

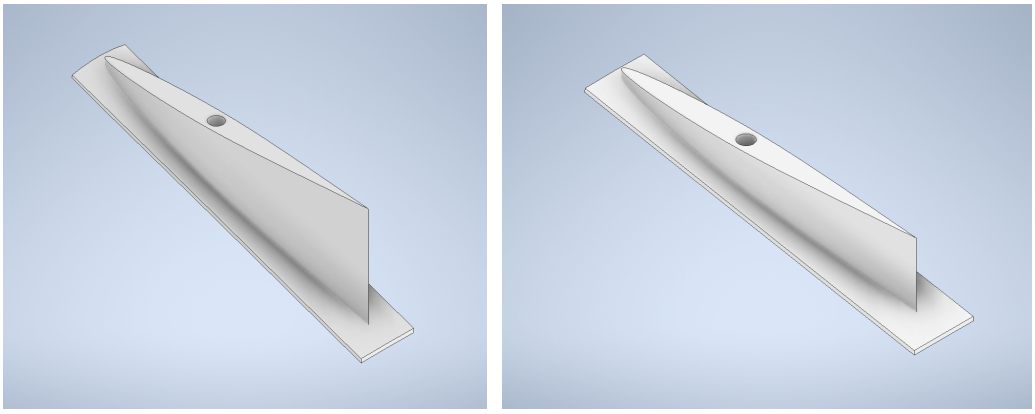


Figura 3-44 Adaptadores de las aletas verticales (izquierda) y tranversales (derecha).

3.5.3 Salida de aire

Con el fin de favorecer la salida del aire expirado por el buceador y así evitar posibles inconvenientes en el trimado del submarino, se diseña un apéndice que mejorará la hidrodinámica con respecto a la realización de un orificio. Además, este apéndice podrá emplearse también para la instalación en su interior de la luz estroboscópica que exige el reglamento (ver punto 2.2.1.3). El apéndice propuesto contempla estas dos opciones, sin embargo, en el supuesto de que se opte por instalar las luces integradas en la propia tapa del submarino y cubiertas con resina, bastaría con eliminar la cúpula disponible para la luz y reducir sus dimensiones. Este apéndice deberá emplazarse en el punto más alejado del plano central del casco para permitir la completa evacuación del aire, pero

además para evitar que el aire salga del submarino por debajo de la capa límite, lo que provocaría que las burbujas llegasen a la hélice con la consecuente pérdida de rendimiento que ello supone (ver Figura 3-45). Para la generación de este apéndice se ha realizado una revolución de 180º de un perfil NACA 0020 con una cuerda de 150 mm y se ha instalado la cúpula en la que se emplazará posteriormente la luz. También se realiza agujero pasante y se extiende el mismo hacia popa para favorecer la evacuación del aire del interior del submarino (ver Figura 3-46 y Figura 3-47). Este mismo apéndice se emplazará de igual manera en la zona inferior del submarino para permitir su llenado de agua y el posterior drenaje de la misma una vez el submarino abandone la cuenca. El orificio cumple con las dimensiones establecidas en el apartado 3.2.1 (117 cm^2).

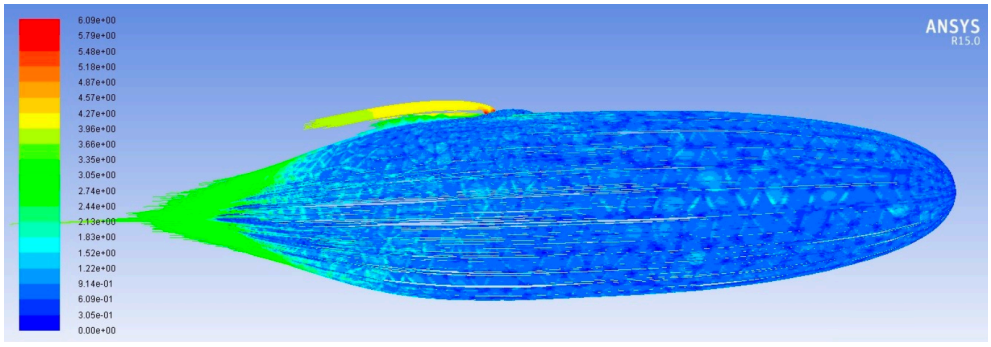


Figura 3-45 Efecto del apéndice en el flujo alrededor del submarino (WASUB V) [11].

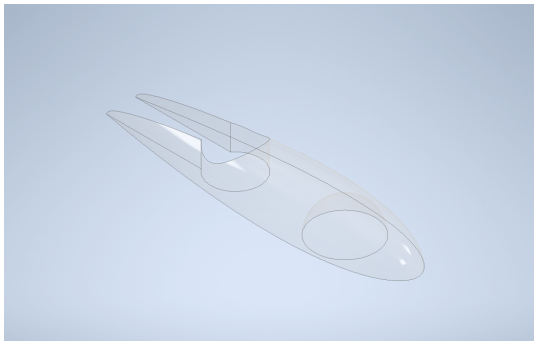


Figura 3-46 Apéndice para la luz estroboscópica y la salida de aire.

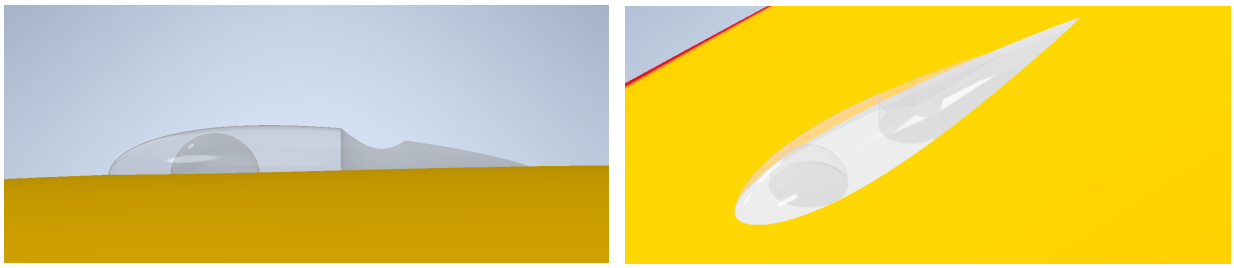


Figura 3-47 Integración del apéndice en el casco.

4 FABRICACIÓN DEL SUBMARINO

4.1 Introducción

En este apartado se detallarán los procesos de producción que se emplearán para la fabricación de aquellos componentes que han sido generados, ofreciendo además una explicación más detallada de los procesos de laminado de la fibra de vidrio, material que se empleará para construir el casco del submarino.

4.2 Fabricación del casco

4.2.1 Poliéster reforzado con fibra de vidrio

El poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) es un material compuesto formado por resinas termoestables y plásticos técnicos combinados con láminas de fibra de vidrio, ver Figura 4-1. Las resinas que se emplean son muy resistentes a la compresión, sin embargo, no son flexibles y presentan poca resistencia a la tracción. Para mejorar este inconveniente, es necesario el empleo de la fibra de vidrio, material muy ligero y altamente flexible además de presentar gran resistencia a la tracción. [39]

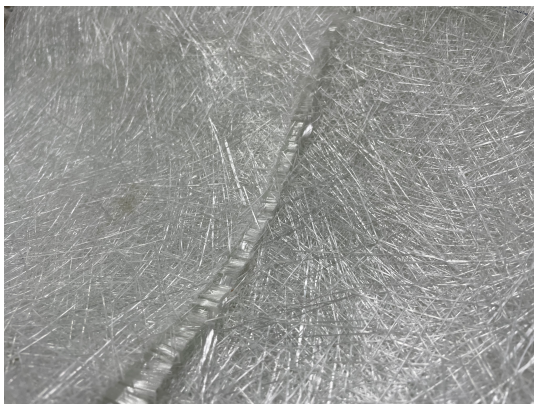


Figura 4-1 Láminas de fibra de vidrio.

El PRFV es ampliamente empleado en la industria naval de recreo y en menor medida en la industria naval militar con ejemplos como los cazaminas de la clase Segura de la Armada Española, construidos con este material.

4.2.2 Modelo y molde

Para la posterior operación de laminado, es imprescindible el empleo de un molde. La fabricación de este molde comienza a partir de la obtención de un modelo de iguales dimensiones que las del submarino; cabe destacar que de la exactitud en las dimensiones de este modelo dependerá la calidad del molde y, por consiguiente, la del producto final. El modelo puede producirse de diferentes

maneras, siendo la más precisa la obtención del mismo a partir de un bloque de polímero fresado mediante una máquina de CNC (ver Figura 4-2).

Una vez obtenido el modelo, se procede a producir el molde (ver Figura 4-3). Éste se genera laminando fibra de vidrio sobre el modelo tras la aplicación de un agente desmoldante para, posteriormente, instalar los refuerzos necesarios para aguantar el peso del producto final sin que el molde pueda sufrir deformaciones.



Figura 4-2 Modelo obtenido mediante CNC en el astillero de Rodman Polishipss.



Figura 4-3 Molde del astillero de Rodman Polishipss.

4.2.3 Procesos de laminado

Los procesos de laminado (Figura 4-4) consisten en obtener el PRFV a partir de dos materiales, la resina de poliéster y la fibra de vidrio. Existen distintos procesos de laminación, dependiendo la elección de éste a los requerimientos del producto a fabricar además del presupuesto y del número de unidades a producir. Los procesos más empleados en producción naval son los siguientes:

- Pre-impregnación.
- Inyección por vacío.
- Proyección con pistola.
- Vía húmeda, moldeo por contacto o laminado manual.

El proceso que se emplearía para laminar el casco del casco del submarino sería el laminado manual, moldeo por contacto o vía húmeda, por ser el más extendido y conocido además del más sencillo y económico. Este proceso consiste en la aplicación de sucesivas capas de fibra sobre un molde impregnándolas posteriormente con resina mediante el empleo de brochas y rodillos. Posteriormente se consolida el laminado para repartir homogéneamente la resina y eliminar posibles burbujas de aire. Previo al proceso de laminado se debe tratar el molde con un agente desmoldante y aplicar una capa de gel-coat para el acabado de la superficie exterior. Tras varias capas de fibra de vidrio, se procedería a instalar los anillos de refuerzo y laminar sobre ellos para mantener la estructura del submarino sin deformaciones; además, se instalarán tramos de madera en aquellas zonas donde será necesario más adelante atornillar los componentes interiores del submarino tales como el sistema de propulsión y gobierno y los soportes para la botella de aire del buceador.

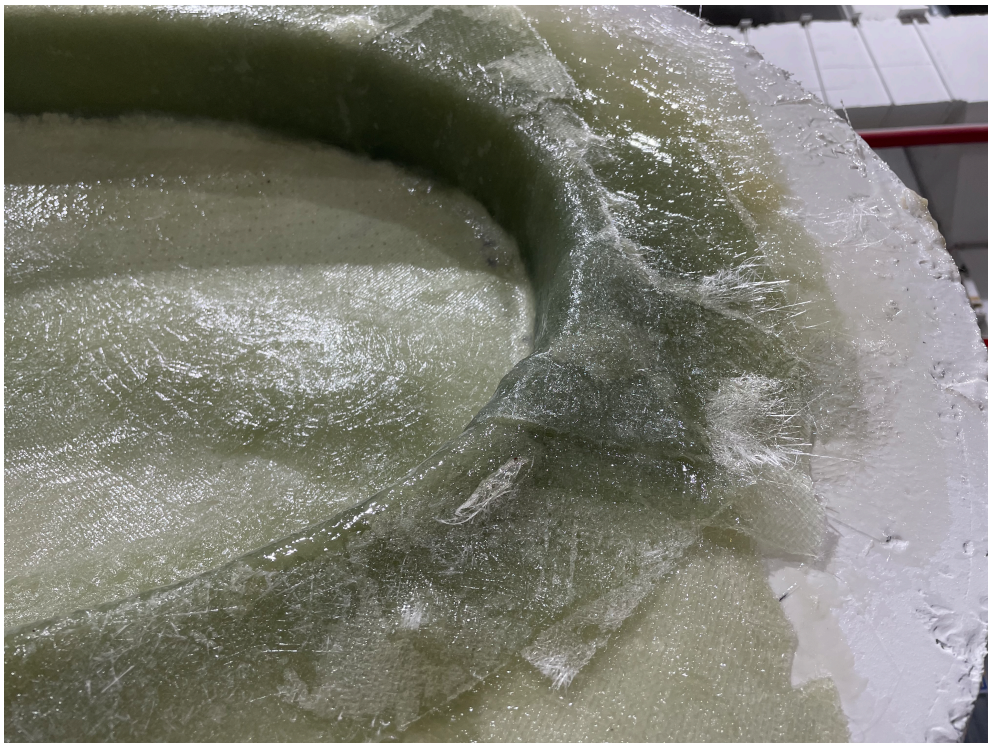


Figura 4-4 Resultado del proceso de laminado en el astillero de Rodman Polishipss.

4.3 Fabricación de la ventana de proa

Para la fabricación de la ventana de proa, se generará un molde de iguales dimensiones que los primeros 400 mm del casco, pero con un desfase hacia el interior correspondiente al espesor deseado para la ventana. El material empleado será acrílico (metacrilato) o policarbonato y la técnica empleada el termoformado. En el proceso del termoformado se calienta el material sobre el molde para posteriormente aplicar la presión necesaria para que el material tome la forma deseada [40].

En este proceso de obtención de la ventana del submarino, se plantea el uso de acrílico (metacrilato) o policarbonato. Entre estas dos opciones, si bien ambas son válidas, se empleará preferiblemente el metacrilato ya que, pese a tener una resistencia menor, ofrecerá una mejor visión al piloto al ser más transparente además de ser fácil de moldear y un 25% más económico. La elección del acrílico como material para la ventana en lugar del policarbonato, implicará que no sea posible atornillarla a la fibra del casco ya que se rompería cerca de los bordes al hacerlo, debiendo utilizarse adhesivos para ello [41].



Figura 4-5 Molde (izquierda) y ventana ya desmoldada (derecha) del equipo UWHPS [17].

4.4 Fabricación de las aletas y sus adaptadores al casco

Para la fabricación de las aletas se empleará un molde de aluminio para el vertido de poliuretano en su interior. La forma ideal de proceder sería mediante el fresado con una máquina CNC del bloque de aluminio para la generación de las dos mitades del molde de las aletas. Seguidamente el molde se cerrará y se introducirá el eje de la aleta en su posición para proceder al llenado del molde con poliuretano mediante un embudo (ver Figura 4-6) [17]. Este proceso también se empleará para la fabricación del apéndice para la luz estroboscópica y la salida de aire.

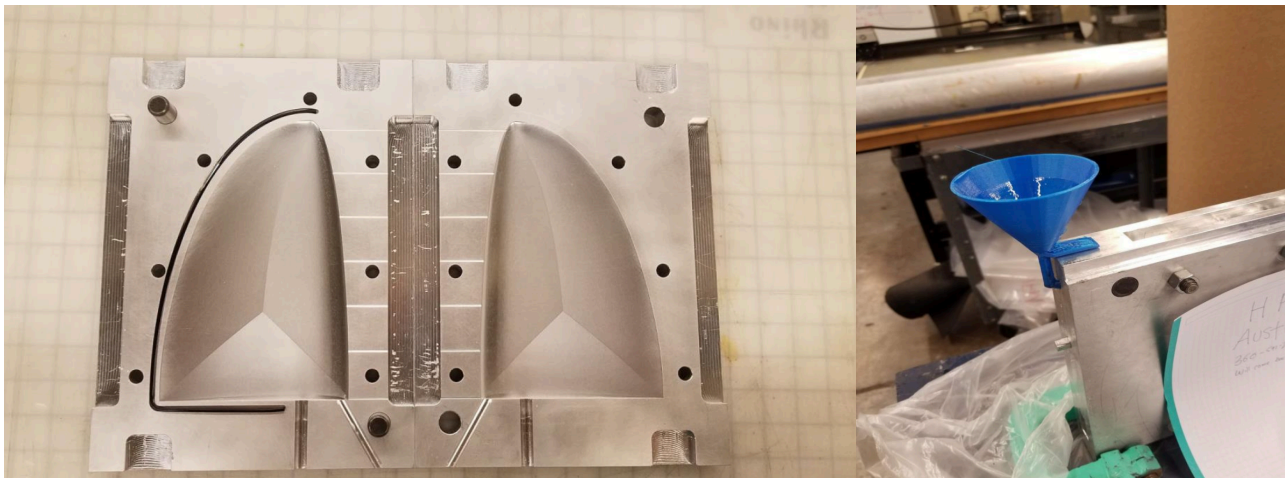


Figura 4-6 Fabricación de las aletas [17].

5 RESULTADO, CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Resultados

Como resultado del presente trabajo de fin de grado, se obtiene el casco de un submarino de propulsión humana (Figura 5-1) de 2916 mm de eslora, 540 mm de manga (774 mm con las aletas) y un puntal de 729 mm (974 mm con las aletas) y que cumple con los requerimientos de diseño para poder participar en la *International Submarine Races* y en la E*uropean International Submarine Race* representando al Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar.

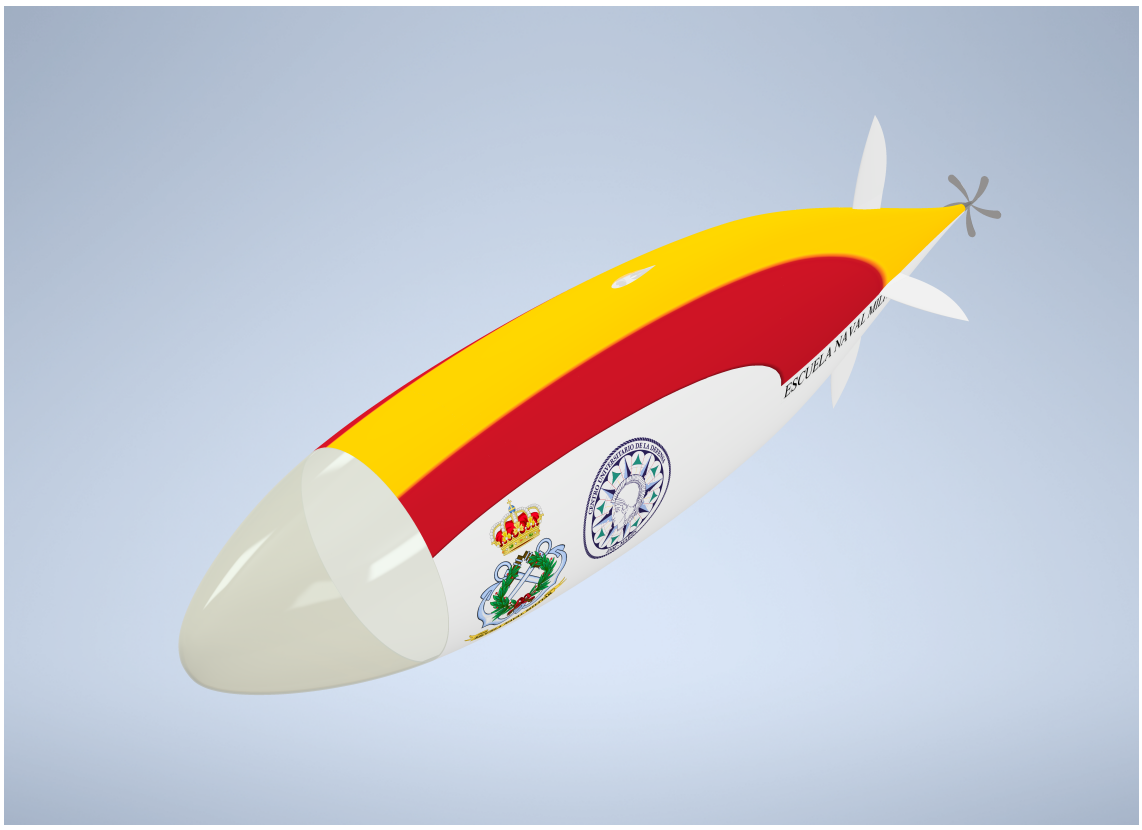


Figura 5-1 Diseño final del submarino de propulsión humana del CUD-ENM.

5.2 Conclusiones

De la realización del presente trabajo de fin de grado, se concluye la consecución de los objetivos planteados, los cuales eran principalmente la generación de la carena del submarino de propulsión humana que pudiera representar en un futuro al CUD-ENM en las *International Submarine Races* y *European Submarine Races*.

5.2.1 Diseño de los componentes

El diseño del casco del submarino ha sido realizado teniendo en cuenta las necesidades de movimiento del piloto dentro de la cabina, además de estar basadas en un análisis estadístico de un total de 15 submarinos que participaron en pasadas ediciones. En el diseño del casco, se han obtenido también diversos elementos auxiliares como son las aletas, sus adaptadores al casco y el apéndice que permitirá reducir el arrastre generado por la luz estroboscópica, por el orificio necesario para la expulsión del aire de expiración del piloto, y por el de drenaje del submarino una vez salga del agua.

Si bien esto supone un avance en lo inicialmente planteado en el título de este trabajo, resultaría conveniente realizar un análisis posterior mediante simulaciones del comportamiento que tendrán estos apéndices sometidos al flujo de agua. Concretamente, convendría realizar simulaciones de la sustentación generada por las aletas para diferentes ángulos de ataque y así poder dimensionarlas según los requerimientos de cada competición.

5.2.2 Simulación en Ansys FLUENT

Para la consecución de estos objetivos ha sido necesario el empleo del software de dinámica de fluidos computacional Ansys FLUENT, programa en el que se ha ido desarrollando un aprendizaje continuo a lo largo del desarrollo del trabajo. Durante las sucesivas fases de simulación, se ha experimentado lo exigentes que son este tipo de programas para los ordenadores, sufriendo varios cierres repentinos que fueron solventados modificando los parámetros de malla de la región de fluido. Entre estos parámetros se destacan el refinado de la malla en la región cercana del submarino, la aplicación del comando “inflation” en la frontera del casco para simular con mayor exactitud la capa límite y la aplicación de un corte simétrico que permitió reducir considerablemente los tiempos de simulación.

5.3 Líneas futuras

Debido a la complejidad que entraña el desarrollo completo de un submarino apto para competir con garantías, el presente Trabajo de Fin de Grado se ha limitado a la generación del casco del submarino y a dar una primera aproximación de la forma de las aletas. Es por este motivo que el submarino de propulsión humana del CUD-ENM requiere aún de diversos proyectos hasta la completa conclusión del mismo. Como posibles líneas futuras se proponen las siguientes:

5.3.1 Perfeccionamiento de la forma de las aletas y su integración al casco

Debido a la importancia de las aletas en el futuro rendimiento del submarino en competición, deberá analizarse en profundidad en Ansys FLUENT el efecto de las mismas en el submarino. Además, sería conveniente analizar si es preferible continuar con el sistema propuesto de adaptadores al casco o, por el contrario, emplear aletas diferentes en cada uno de los planos. Se propone a su vez realizar un estudio del coeficiente de sustentación obtenido para diferentes ángulos de ataque con el fin de dimensionar correctamente las aletas. Una vez realizado este estudio, y teniendo en cuenta las particularidades de cada una de las competiciones, se valorará emplear unas aletas en caso de participar en la ISR (recorrido en línea recta) y otras para el caso de la eISR (circuito con eslalon y giros).

5.3.2 Sistema de gobierno

Una vez obtenida la forma de las aletas, se propone un proyecto para el diseño del sistema de gobierno del submarino. Se valorará la posibilidad de diseñar un sistema eléctrico para esta función dentro de las limitaciones del reglamento.

5.3.3 Sistema de transmisión de potencia

Se propone un futuro trabajo de fin de grado que aborde el diseño mecánico del sistema de transmisión de potencia desde las piernas del piloto hasta la hélice del submarino. Este sistema de potencia deberá adaptarse a la geometría ya generada para el casco.

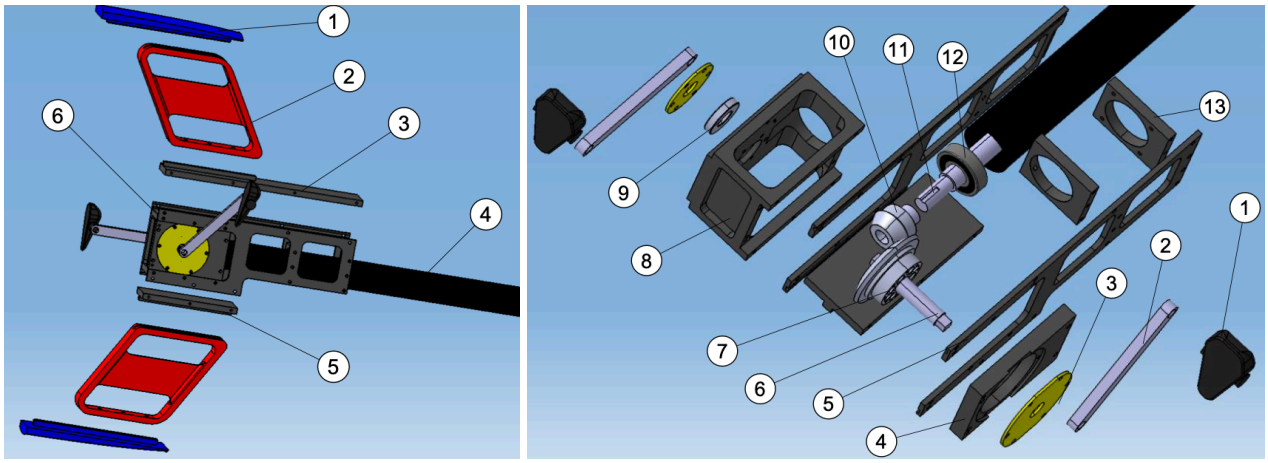


Figura 5-2 Sistema de transmisión OMER 8 [10].

5.3.4 Hélice y sistema de propulsión alternativo

Debido a que las entidades organizadoras de las carreras ofrecen la posibilidad de diseñar sistemas de propulsión con hélice (Figura 5-3) y sin ella (Figura 5-4), se proponen los proyectos de diseño de los mismos, abordando la posibilidad de introducir hélices contrarrotativas estableciendo a su vez las correspondientes modificaciones que habría que realizar en el sistema de transmisión para hacer esto posible.



Figura 5-3 Hélice del submarino MAYFLOWER [21].



Figura 5-4 Aletas oscilantes del submarino WASUB VII [42].

5.3.5 Desarrollo del proyecto

Una vez se haya realizado por completo el diseño de todos los componentes, y como cierre al conjunto de trabajos de fin de grado relacionados con el submarino de propulsión humana del CUD-ENM, se propone un proyecto que aglutine toda la información relativa a los diseños para generar el informe de diseño que solicita la organización de las carreras. Además, del informe de diseño, se elaborará un informe sobre los requerimientos necesarios para la materialización del proyecto por parte del CUD-ENM, incluyendo un presupuesto global del proyecto.

5.3.6 Aplicaciones militares

A largo plazo, y una vez concluido el proyecto del submarino para las competiciones, se propone realizar un estudio de posibles adaptaciones de la plataforma para su uso en el ámbito militar. Principalmente podría valorarse su empleo como vehículo no tripulado estableciendo aquellas modificaciones que requieran este tipo de operaciones.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] «INTERNATIONAL SUBMARINE RACES», *INTERNATIONAL SUBMARINE RACES*. https://internationalsubmarineraces.org/ (accedido 28 de febrero de 2022).
[2] «SubRace 2022», *European International Submarine Races*, 15 de enero de 2022. https://www.subrace.eu/ (accedido 26 de febrero de 2022).
[3] «Carderock Division Naval Surface Warfare Center». http://www.navsea.navy.mil/Home/Warfare-Centers/NSWC-Carderock/ (accedido 27 de enero de 2022).
[4] «15th ISR», *INTERNATIONAL SUBMARINE RACES*. https://internationalsubmarineraces.org/15th-isr/ (accedido 26 de enero de 2022).
[5] «Photos», *INTERNATIONAL SUBMARINE RACES*. https://internationalsubmarineraces.org/photos/ (accedido 25 de enero de 2022).
[6] «Ocean Basin and Rotating Arm». https://www.qinetiq.com/en/what-we-do/services-and-products/ocean-basin-and-rotating-arm (accedido 26 de febrero de 2022).
[7] «IMarEST: Institute of Marine Engineering, Science & Technology». https://www.imarest.org/ (accedido 26 de febrero de 2022).
[8] «ISR13-Warwick-Sub-Design-Report-2015.pdf».
[9] «B1E FEDAS Manual del Alumno.pdf».
[10] «ISR13-OMER 8-Final Design Report», p. 77.
[11] «ISR13-Final-Design-Report-WASUB-V.pdf».
[12] «ISR13-OMER9-DESIGN-REPORT.pdf».
[13] «ISR13-Taniwha-Design-Report.pdf».
[14] «Software AutoCAD | Obtener precios y comprar software oficial de AutoCAD 2022». https://www.autodesk.es/products/autocad/overview (accedido 11 de marzo de 2022).
[15] «Software Inventor | Obtener precios y comprar software oficial de Inventor 2022 | Autodesk». https://www.autodesk.es/products/inventor/overview (accedido 11 de marzo de 2022).
[16] J. Vásquez y U. S. Bolívar, «DISEÑO DE UN PERFIL HIDRODINÁMICO PARA UN SUBMARINO DE PROPULSIÓN HUMANA», p. 9.
[17] «2018-19+UWHPS+Design+Report.pdf».
[18] «2016-17+Design+Report.pdf».
[19] «2014-15+UWHPS+Design+Report», p. 23.
[20] «2010-11+UWHPS+Design+Report.pdf».
[21] «ISR13-Mayflower-full_report_PLYMOUTH-2.pdf».
[22] «ISR13-PHANTOM-7-REPORT.pdf».
[23] «ISR13-Salacia- Final Design Report -University of Bath», p. 22.
[24] «ISR13-FAU-Boat-II-Report.pdf».

[25] A. A. Saadi, A. A. Kharousi, K. A. Jabri, S. A. Wahaibi, N. A. Bulushi, y W. A. Washahi, «DESIGN AND CONSTRUCTION OF HUMAN POWERED SUBMARINE SULTANAH III», p. 102.
[26] «ISR13-Mantaray-TAMU-Design-Report.pdf».
[27] «ISR13-Under-Achiever-Newcastle-University-Submarine-Report.pdf».
[28] «Como saber la longitud de bielas que necesitas», 30 de noviembre de 2020. https://tuvalum.com/blog/como-calcular-longitud-bielas/ (accedido 27 de enero de 2022).
[29] «El largo de tus piernas – Enbiciados». https://enbiciados.bike/el-largo-de-tus-piernas/ (accedido 27 de enero de 2022).
[30] «SST K-Omega Turbulence Models | CFD | Autodesk Knowledge Network». https://knowledge.autodesk.com/support/cfd/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2014/ENU/SimCFD/files/GUID-0F5C4828-9F91-46B6-A16A-2578D72DCFCC-htm.html (accedido 28 de febrero de 2022).
[31] «The Drag Coefficient». https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragco.html (accedido 28 de febrero de 2022).
[32] A. I. Carmona, *Aeronáutica y Actuaciones del avión*, 10ª. Madrid: Thomson Paraninfo, 1999.
[33] F. M. White, *Fluid mechanics*, 6th ed. Boston: McGraw-Hill, 2010.
[34] «UIUC Airfoil Data Site». https://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html#N (accedido 14 de marzo de 2022).
[35] «Airfoil Tools». http://airfoiltools.com/ (accedido 13 de marzo de 2022).
[36] S. P. Paz, «El perfil alar y su nomenclatura NACA», *Cienc. Poder Aéreo*, vol. 8, n.º 1, Art. n.º 1, sep. 2013, doi: 10.18667/cienciaypoderaereo.4.
[37] Y. A. Çengel y J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill, 2006.
[38] «Figure 2.10: Development of the Boundary layer over an airfoil surface.», *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/figure/Development-of-the-Boundary-layer-over-an-airfoil-surface_fig20_305044784 (accedido 10 de marzo de 2022).
[39] «Aportación de los plásticos reforzados para la industria», *PH Technology*, 21 de mayo de 2021. https://ph-technology.net/aportacion-de-los-plasticos-reforzados-para-la-industria/ (accedido 12 de marzo de 2022).
[40] «Termoformado y Embutido de Materiales Plásticos», *Plasticexpress*. https://plasticexpress.es/procesos-de-manufactura-de-materiales-plasticos/termoformado-y-embutido-de-materiales-plasticos/ (accedido 12 de marzo de 2022).
[41] A. Vink, «¿Metacrilato o policarbonato? Diferencias y cuál elegir», *Lermont Plastics*, 13 de noviembre de 2020. https://vinkplastics.es/metacrilato-o-policarbonato-ventajas-e-inconvenientes/ (accedido 11 de marzo de 2022).
[42] «WASUB». https://www.facebook.com/teamWASUB/photos/a.273296499455474/1302865203165260/?type=3 (accedido 15 de marzo de 2022).

ANEXO I: PLANOS