



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de dron submarino autónomo para inteligencia y minado

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: AF Brais Hidalgo Mera

DIRECTORES: TN Pedro Carrasco Pena

CF Gerardo González-Cela Echevarría

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño de AUV submarino autónomo para inteligencia y minado

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

El presente TFG consiste en el estudio conceptual de un AUV modular con autonomía ilimitada, diseñado para ampliar las capacidades de la Armada en operaciones encubiertas en aguas de litoral enemigas.

A lo largo de este trabajo se han estudiado, calculado y resuelto las cuestiones necesarias para validar el concepto de este tipo de vehículos. Una de las conclusiones principales de este estudio es que la construcción de un AUV con las características propuestas es viable, tanto en términos de peso y desplazamiento volumétrico como de necesidades energéticas.

Además, se ha determinado una disposición modular del AUV con un espacio multimisión y se ha propuesto una estrategia energética basada en la energía mareomotriz para lograr una gran autonomía. El coste estimado de fabricación por unidad se sitúa alrededor de los 4,85 millones de euros como valor aproximado.

PALABRAS CLAVE

AUV, inteligencia, autonomía, submarino, mina

AGRADECIMIENTOS

Agradecer primero a mis padres que siempre me han enseñado valores fundamentales que han marcado mi vida. Han estado a mi lado apoyándome incondicionalmente en todas mis ideas, ilusiones y proyectos, dándome la confianza para seguir adelante. Gracias a ellos, he aprendido la importancia de la perseverancia, el respeto y la disciplina. Cada lección que me transmitieron se ha convertido en un pilar en mi camino. Su guía ha sido crucial para mi crecimiento y desarrollo.

Además, agradezco profundamente que me hayan enseñado a desarrollar mi capacidad de lógica y razonamiento. Gracias a ellos, he aprendido a pensar de manera crítica, a resolver problemas con claridad y a tomar decisiones fundamentadas. Esta habilidad ha sido clave no solo en mis estudios, sino también en mi vida cotidiana, permitiéndome afrontar desafíos con una perspectiva más amplia y estratégica.

Quiero también expresar mi gratitud al resto de mi familia, que siempre ha sido un verdadero apoyo, estando siempre unidos como una piña en los momentos buenos y en los difíciles. En especial, a mi hermano Iago, por hacerme reír y por los momentos tan divertidos que compartimos. Su capacidad para sacar una sonrisa en cualquier momento y su compañía han sido siempre una fuente de alegría en mi vida.

También quiero agradecer al TN Carrasco por su paciencia, dedicación y por estar siempre dispuesto a apoyarme, incluso cuando a veces me costaba ver más allá de mi propio enfoque. Aprecio su habilidad para mantener la calma y seguir guiándome, a pesar de mi insistencia en algunos puntos. Gracias por creer en mí, por motivarme a superarme y por ayudarme a seguir avanzando, incluso cuando mis ideas no siempre eran las más claras.

Finalmente, quiero agradecer a la dotación de la fragata Santa María por su interés en el proyecto. En especial, quiero reconocer a su comandante, el CF García Flores, por sus valiosos consejos y su guía, que me han permitido ver el proyecto desde una perspectiva más estratégica y lograr avances significativos. Gracias por su tiempo, compromiso y por confiar en la idea.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Caracterización del problema.....	6
1.1.1 La necesidad de aproximarse a costa	6
1.1.2 Contexto internacional	7
1.2 Motivación para realizar este TFG.....	7
1.3 Objetivos de este TFG.....	7
1.4 Metodología	8
1.5 Estructura del trabajo	8
2 Estado del arte	10
2.1 Qué son los UUV	10
2.1.1 Aplicaciones de los UUV	10
2.1.2 Tipos de UUV.....	11
2.1.3 Grados de autonomía	11
2.1.4 Sensores de un AUV.....	12
2.2 Ventajas de los AUV.....	13
2.3 Inconvenientes de operar AUV.....	14
2.4 Inteligencia submarina	15
2.5 AUVs submarinos existentes	15
2.6 Drones de guerra en la actualidad y en el futuro.....	17
2.7 La guerra de minas	17
2.7.1 Clasificación de las minas	17
2.7.2 Mecanismos especiales.....	18
2.7.3 Letalidad y eficacia de las minas	18
2.7.4 Minas españolas de última generación	18
2.8 Energía mareomotriz.....	19
2.8.1 Formas de energía mareomotriz	19
2.8.2 Predicción de energía mareomotriz	20
3 Desarrollo del TFG.....	21
3.1 Estudio del Concepto	21
3.1.1 Roles del submarino	21
3.1.2 Zonas de interés	21

3.1.3 La forma de emplear este AUV	22
3.1.4 Características especiales.....	22
3.1.5 Requisitos del submarino.....	24
3.1.6 Normativa a la que deberá estar sujeto el AUV y limitaciones.....	25
3.1.7 Equipamiento del AUV “payload”	26
3.1.8 Cuenta de control de peso y asignación de masas	27
3.2 Desarrollo del Concepto.....	30
3.2.1 Limitaciones de las dimensiones	30
3.2.2 Estimación inicial de dimensiones.....	30
3.3 Desplazamientos y volúmenes	32
3.3.1 Explicación de conceptos.....	32
3.3.2 Dimensionamiento del submarino	33
3.3.3 Volúmenes de cascos y tanques.....	33
3.4 Geometría preliminar	34
3.4.1 Introducción al concepto gota de agua	36
3.4.2 Los requisitos que debe cumplir el diseño del casco	37
3.4.3 Definición de la forma del casco	38
3.4.4 Determinación de dimensiones longitudinales y transversales	38
3.4.5 Casco hidrodinámico resultante.....	39
3.5 Superficies de Control.....	40
3.5.1 Control de rumbo (yaw).....	41
3.5.2 Control de profundidad (pitch y heave).....	41
3.6 Estimación de la potencia propulsora	41
3.6.1 Basada en la experiencia.....	42
3.6.2 Cálculo por el método de Freud.....	42
3.6.3 Potencia de propulsión.....	44
3.7 Gestión de la energía.....	45
3.7.1 Consumo de “hotel”	45
3.7.2 Consumos en situaciones operativas	47
3.7.3 Consumo de propulsión	48
3.7.4 Producción de energía mareomotriz	49
3.7.5 Selección de baterías.....	49
3.7.6 Dimensionamiento de baterías.....	51
3.7.7 Cálculo de tiempos, operatividad y eficiencia energética.....	51
3.8 Disposición general del casco	54
3.8.1 Descripción de compartimentos	54

3.8.2 Estabilidad estática	57
3.9 Casco de presión	57
3.9.1 Formas del casco de presión	58
3.9.2 Resistencia a la presión.....	58
3.9.3 Selección del material de construcción del casco resistente.....	59
3.10 Estudio de factibilidad	59
3.10.1 Costes del proyecto.....	60
3.10.2 Análisis de resultados del coste del proyecto	62
3.10.3 Coste operativo	66
3.10.4 Análisis MEA	66
4 Resultados	67
4.1 Comprobación de cumplimiento de requisitos.....	67
4.2 Características finales de la plataforma	67
4.3 Comparación y compatibilidad con los submarinos de la Armada.....	68
5 Conclusiones y líneas futuras	70
5.1 Conclusiones	70
5.2 Líneas futuras	71
6 Bibliografía.....	72
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales	75
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	76
Anexo III: AUVs conocidos.....	77
Anexo IV: Plano de formas	79
Anexo V: Disposición general	81
Anexo VI: Análisis CFD	83
Anexo VII: Resultados de resistencia al avance por el método de Freud	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Pirámide de fases en el desarrollo de un submarino (tomada de [4])	8
Figura 2-1 Incremento en el número de AUVs (tomada de [15])	16
Figura 2-2 Ejemplos existentes de AUVs (tomadas de Boeing y Revista Forbes)	16
Figura 3-1 Intensidad de corriente promedio en el Mediterráneo (tomada de [24])	23
Figura 3-2 Localización de contactos (elaboración propia)	24
Figura 3-3 Valores límite referentes a la estabilidad de submarinos (tomada de [26]).....	26
Figura 3-4 Relación Desplazamiento superficie/Eslora (elaboración propia).....	30
Figura 3-5 Relación Manga/Desplazamiento en superficie (elaboración propia)	31
Figura 3-6 Relación Velocidad/Eslora (elaboración propia).....	32
Figura 3-7 Distribución de presión sobre el casco de un submarino (tomada de [35]).....	35
Figura 3-8 Resistencia al avance de un submarino en función del ratio eslora/diámetro (tomada de [25]).....	35
Figura 3-9 Configuraciones de casco en submarinos (tomada de [7])	36
Figura 3-10 Forma de gota de agua y de cuerpo intermedio (tomada de [25]).....	37
Figura 3-11 Forma de popa de submarinos rusos para 2 hélices (tomada de [7]).....	38
Figura 3-12 Casco hidrodinámico del AUV (elaboración propia)	39
Figura 3-13 Desglose de Resistencia al avance (tomada de [36]).....	43
Figura 3-14 Coeficiente de casco (tomada de [36])	43
Figura 3-15 Consumo en las situaciones operativas (elaboración propia)	47
Figura 3-16 Consumo respecto a velocidad (elaboración propia).....	49
Figura 3-17 Tiempos de permanencia del AUV en función del escenario (elaboración propia)	52
Figura 3-18 Espesores y pesos del casco de presión (elaboración propia).....	59
Figura 3-19 Presupuesto desglosado (elaboración propia).....	62
Figura 3-20 Distribución de los costes (elaboración propia).....	63
Figura 3-21 Distribución de costes sin ingenierías (elaboración propia)	63
Figura 3-22 Coste unitario de fabricación de cada submarino (elaboración propia)	65
Figura 0-1. Velocidad de flujo alrededor del casco (elaboración propia)	84
Figura 0-2. Presión hidrostática alrededor del submarino (elaboración propia)	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Distribución de pesos en un submarino convencional (tomada de [4])	28
Tabla 3-2 Distribución de pesos dentro del AUV (elaboración propia).....	28
Tabla 3-3 Relación de pesos de equipos del payload (elaboración propia)	29
Tabla 3-4 Dimensiones longitudinales (elaboración propia)	39
Tabla 3-5 Dimensiones transversales (elaboración propia).....	39
Tabla 3-6 Volúmenes del AUV (elaboración propia)	39
Tabla 3-7 Potencia efectiva del AUV en función de la velocidad (elaboración propia).....	42
Tabla 3-8 Potencia efectiva para velocidades de 0 a 11 kn (elaboración propia)	44
Tabla 3-9 Potencia motor para velocidades de 0 a 11 kn (elaboración propia)	45
Tabla 3-10 Consumo de equipos embarcados (elaboración propia)	46
Tabla 3-11 Pesos de baterías en caso de emplear estrategia 2 (elaboración propia).....	53
Tabla 3-12 Ventajas cruzadas de las estrategias 1 y 2 (elaboración propia)	53
Tabla 3-13 Ahorro debido al aprendizaje (elaboración propia)	64
Tabla 3-14 Coste anual operativos (elaboración propia).....	66
Tabla 4-1 Características finales del AUV (elaboración propia)	68
Tabla 4-2 Comparación S-80 y AUV (elaboración propia)	69

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

España y la Armada siempre han sido un foco de innovación tanto en la construcción naval como en la investigación científico-técnica a nivel mundial. En estos campos resulta imprescindible destacar la figura del oficial de la Armada Isaac Peral, quien en 1888 desarrolla el primer submarino de propulsión eléctrica. Su innovadora creación representa, hasta la fecha, la mayor aportación que se ha hecho en la construcción de submarinos, pues Isaac Peral fue el primero en comprender que los submarinos necesitaban de un sistema que les permitiese operar bajo la superficie sin depender de la fuerza humana para propulsarse. De esta forma, Isaac Peral diseña completamente el primer submarino torpedero a propulsión eléctrica completamente funcional, conocido como el submarino Peral.

En la actualidad estamos ante el siguiente gran salto en el diseño de submarinos convencionales, también dado por España, con la construcción del submarino con AIP basado en bioetanol, el S-81, que según el fabricante puede estar 21 días en inmersión.

1.1 Caracterización del problema

España cuenta con una fuerza submarina limitada, compuesta por un único submarino de la clase S80 (el S-81), aunque a la espera de que nuevos sumergibles de esta clase se den de alta en la lista de buques de la Armada. Haciendo un repaso de sus características, este submarino convencional es excepcional para realizar operaciones de patrulla en alta mar gracias al tiempo en inmersión del que dispone y del silencio de su sistema de propulsión, sin embargo, también destaca por ser un submarino con un desplazamiento de 2.965 toneladas (más de 500 toneladas de peso es lo que ha crecido el S-80+ respecto al proyecto inicial, que se había diseñado para 2.426 toneladas), siendo superado únicamente por algunos submarinos convencionales como el japonés ‘Soryu’, de 4.200 toneladas. Además, han sido 9,76 metros lo que al final se ha alargado la eslora del buque, hasta llegar a los 80,81 metros, de acuerdo con [1].

Estas características, es decir, su gran tamaño, junto con su elevado desplazamiento y la necesidad de aprovisionamiento debido a su amplia dotación, hacen que se limite su capacidad para poder realizar incursiones próximas a costas enemigas. Por ello, se hace necesario contar con unidades de menores dimensiones que estén preparadas para realizar estas operaciones complementarias.

1.1.1 La necesidad de aproximarse a costa

La información es un recurso estratégico y vital para la seguridad nacional. Todas las operaciones militares dependen de la calidad y cantidad de información. A través de la historia, los líderes militares siempre han buscado obtener mayor información con el objeto de reducir las incertidumbres. En este contexto, el submarino proporciona una significativa ventaja de alerta, informando de actividades en

áreas marítimas no accesibles o que implican riesgos no asumibles por otras plataformas aeronavales, ya que posee unas cualidades únicas para la obtención de inteligencia de manera encubierta.

En estas condiciones, las operaciones costeras con submarinos adquieren una relevancia estratégica significativa, y el minado es un recurso importante de bajo coste para neutralizar fuerzas enemigas. Su impacto es considerable, ya que a pesar de su bajo coste, impone al adversario un esfuerzo significativo, obligándolo no solo a afrontar la pérdida de buques, sino también a destinar medios para la limpieza de minas de sus costas y la seguridad de sus rutas de navegación.

1.1.2 Contexto internacional

La guerra entre Rusia y Ucrania ha demostrado la eficacia del empleo de drones como fuerza desestabilizadora. Actualmente, existe una importante carrera armamentística a nivel mundial para el desarrollo de drones de defensa, destacando a las fuerzas armadas de Estados Unidos, que según su departamento de defensa, operan más de 11.000 drones distintos, contando además su país con miles de programas de desarrollo de nuevos drones, mientras que se cree que el ejército chino posee muchos más drones, aunque no se tiene constancia de ello.

En lo que concierne a España, actualmente, nuestro ejército del aire dispone de 4 SIVA, 10 Scan eagle y 4 MQ-9 Reaper (4 más para el futuro próximo); el ejército de tierra de un dron Themis (dron terrestre) y de 5 proyectos para el desarrollo de drones aéreos; mientras que en el ámbito de la guerra de superficie o la guerra submarina, la Armada posee únicamente 6 ROVs para la guerra de minas, controlados remotamente por cordón umbilical, existiendo además un único proyecto de desarrollo de vehículo submarino autónomo, también destinado a la detección de minas.

Los drones que posee España son muy pocos en comparación con países de nuestro entorno, como es el caso de Marruecos, que cuenta con 233 drones de fabricación estadounidense, china e israelí, aunque es de destacar que no poseen ningún AUV submarino. A este respecto, hay que señalar que las potencias que van a la vanguardia en la carrera armamentística en el desarrollo de drones son las que poseen AUVs submarinos completamente autónomos. Actualmente, únicamente los poseen pocos países, entre los que se encuentran EEUU, China, Corea del Sur, Rusia o Reino Unido, según [2].

1.2 Motivación para realizar este TFG

En la realización de este TFG ha servido de inspiración el Documental “El submarino Peral, una conspiración...”, donde se muestra la historia del desarrollo del submarino de Isaac Peral y del gran salto que supuso el empleo de baterías y motores eléctricos para la autonomía de los submarinos. Este proyecto supuso una revolución tecnológica en el campo de batalla naval sin precedentes, que se tuvo que enfrentar no sólo a retos tecnológicos sino a retos políticos como se explican en [3], que fueron el motivo por el que este gran invento español no llegó a emplearse en guerras en las que sin duda hubiese supuesto inclinar la balanza hacia la victoria española.

Este proyecto, junto con el desarrollo exponencial en la actualidad de los AUVs y las energías renovables, y el conocimiento técnico de la materia, llegó a la conclusión de que sería posible diseñar un submarino con autonomía ilimitada y de muy bajo coste, capaz de infiltrarse en aguas enemigas y llevar a cabo todo tipo de misiones que para un submarino convencional supondrían un gran riesgo.

Además, la situación actual del arma submarina en España y el contexto de desarrollo armamentístico global apoyan la necesidad de desarrollar esta idea, que con un relativo bajo coste supone un gran salto y modernización no sólo del arma submarina, sino de la obtención de información, minado y de la preparación para llevar a cabo asaltos anfibios y operaciones especiales.

1.3 Objetivos de este TFG

El objetivo principal es presentar la viabilidad del concepto de vehículo autónomo submarino como ventaja asimétrica potencial para realizar inteligencia y operaciones de minado en aguas enemigas. Para

ello, se realiza el desarrollo conceptual del AUV, la viabilidad del diseño y cálculo de su coste económico, con los siguientes objetivos intermedios:

- a) Determinar el rol, misiones del submarino y por ende requisitos que debe cumplir el diseño.
- b) Determinar las dimensiones del submarino.
- c) Disposición general del casco.
- d) Descripción de la carga útil a incorporar (buscando que sea fabricada en España).
- e) Diseño estructural general.
- f) Peso, flotabilidad y estabilidad del submarino.
- g) Velocidad, potencia propulsora y análisis de resistencia (incluyendo la selección del sistema de propulsión).
- h) Diseño del sistema de posicionamiento dinámico.
- i) Análisis de viabilidad del proyecto.

1.4 Metodología

Las fases que hay que seguir para construir el diseño del submarino son las que aparecen en la Figura 1-1. Los tres primeros pisos superiores de la pirámide representan el “Estudio del Concepto”. El primero de ellos servirá para darle un rol general al AUV, en este caso, como se ha descrito anteriormente, se busca dotar a la Armada con un submarino costero que complemente al moderno S80.

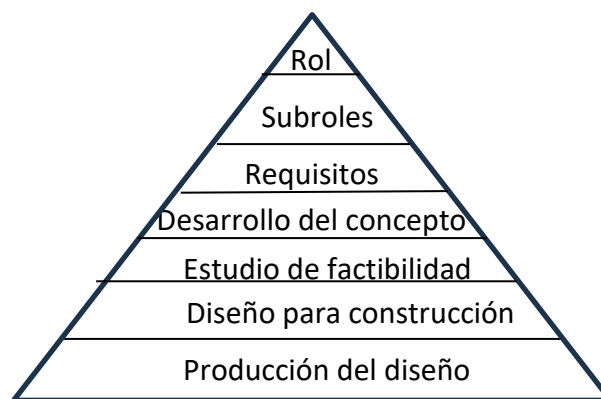


Figura 1-1 Pirámide de fases en el desarrollo de un submarino (tomada de [4])

En la siguiente fase se definirán los subroles, es decir, las pequeñas misiones que debe ser capaz de cumplir el AUV para ejecutar la misión principal de forma satisfactoria. Esta fase se concreta en varios de los apartados del TFG, en los que se definirán cada una de estas misiones, así como el funcionamiento general proyectado para este AUV. De estas pequeñas misiones se desarrollarán en la siguiente fase los “Requisitos operacionales”, donde se definirá el tipo de carga que debe llevar el AUV, así como otras características que deberá cumplir.

En la siguiente fase, el “Desarrollo del Concepto”, se determinarán las dimensiones del submarino, la carga que debe llevar, el rendimiento esperado y cómo se comportará. También es en esta fase en la que se generarán distintos diseños y el coste.

Por último, llegaremos al “Estudio de factibilidad”, fase hasta la cual se pretende llegar en este TFG, en la que se analizará la inversión necesaria para realizar el proyecto en relación con los beneficios que este pueda aportar.

1.5 Estructura del trabajo

Este TFG aborda el diseño conceptual de un AUV para realizar diferentes operaciones en litoral enemigo. Para ello, se estudiará en el “Estado del arte” lo que es un AUV, su clasificación y los AUVs existentes. Además, se estudiarán las tecnologías relacionadas con este proyecto conceptual como son

las operaciones submarinas de inteligencia, las operaciones para las que se pueden emplear los AUVs y la guerra ofensiva de minas para la que está destinado este AUV. Destacar, que se analizará la energía mareomotriz como fuente de obtención de energía, factor que convertirá a este AUV en el primer vehículo no tripulado permanentemente autónomo.

Durante el desarrollo se seguirán los pasos establecidos en la documentación consultada [4], [5], [6] y [7]. Esto requiere, como primer paso, establecer los objetivos operativos del submarino, el ámbito de operación y el modo de operar. Con ello, se definen los requisitos técnicos que debe cumplir el desarrollo conceptual. Estos requisitos determinarán el payload con el que se podrá esbozar el peso de la carga útil.

En un siguiente paso, se estimarán las dimensiones principales del submarino, entre las que se incluirán tanto dimensiones longitudinales como desplazamientos y volúmenes de tanques. Con esta información se desarrollará una forma del submarino cumpliendo con los requisitos anteriormente establecidos. El desarrollo de esta forma nos permitirá realizar cálculos de resistencia al avance, para posteriormente poder dimensionar la planta propulsora del vehículo, así como los recursos energéticos.

Una vez dimensionada la carga útil y los compartimentos de energía y propulsión, se llevará a cabo la disposición general de los compartimentos, locales y equipos dentro del submarino. La disposición junto con la estimación de los pesos de cada compartimento nos ayudará a hacer los primeros cálculos de estabilidad, además de una primera estimación de donde se encontrarán los centros de carena y de gravedad. Además, se establecerá y definirá el casco de presión necesario para proteger los equipos del submarino.

Finalmente, se estimará el presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto, que junto a las capacidades y rendimiento esperado calculado a lo largo del desarrollo conceptual, se utilizarán para realizar el análisis económico-militar que permitirá tomar la decisión de continuar con el proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Qué son los UUV

Según [2], los vehículos submarinos no tripulados (UUV, por sus siglas en inglés) se dividen en dos categorías principales: los vehículos operados remotamente (ROV, por sus siglas en inglés) y los vehículos submarinos autónomos (AUV, por sus siglas en inglés).

Los ROVs son aquellos vehículos que requieren de una operación remota. Están conectados a su unidad controladora mediante un cable umbilical, el cual les proporciona potencia eléctrica, datos y señales de control. Además, estos vehículos transmiten la información que recogen a la plataforma controladora, la cual suele estar ubicada en una embarcación de superficie. Aunque esta configuración facilita el manejo y control de los ROVs, también limita su alcance, lo que restringe su uso en situaciones que requieran operaciones de mayor discreción o en áreas de difícil acceso.

Por su parte, los AUVs son vehículos que operan de manera autónoma, lo que implica que pueden ejecutar sus funciones sin necesidad de intervención humana directa. En este contexto, la autonomía de los AUVs se refiere a su capacidad para llevar a cabo misiones sin depender de un control externo constante.

2.1.1 Aplicaciones de los UUV

Según [8], los vehículos submarinos no tripulados (UUV) presentan una amplia gama de aplicaciones en los ámbitos de defensa y seguridad, destacando principalmente inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR). Estos vehículos permiten: la monitorización detallada del “patrón de vida”, tanto el militar con la obtención de inteligencia continua y el conocimiento de las unidades que se encuentran dentro de un arsenal como del patrón de vida civil, monitoreando áreas cercanas a la costa y puertos; detección y localización de sustancias NBQE (nucleares, biológicas, químicas y explosivas); y por último, el reconocimiento de un entorno específico. Estos atributos los hacen idóneos para ser la vanguardia en operaciones, ya que los datos que se obtienen en misiones ISR, tales como el patrón de vida, intervalos de funcionamiento de radares y comunicaciones son vitales para aumentar las posibilidades de éxito de un Task Group que pretenda navegar en una zona determinada o para la preparación de desembarcos anfibios dado que los UUV pueden recopilar información sobre el relieve submarino, el tipo de fondo marino y la presencia de minas en áreas donde se planea realizar un desembarco anfibio, contribuyendo a la planificación y seguridad de estas operaciones.

En cuanto a la guerra contra minas (MCM), los UUV se utilizan para establecer de manera segura y eficiente rutasQ, (pasillos seguros previamente definidos para asegurar el comercio marítimo en caso de amenaza de minado). Las misiones MCM pueden incluir tareas como: reconocimiento previo, identificación de artefactos y desminado.

En lo referente a la guerra antisubmarina (ASW), los UUV funcionan como elementos disuasorios mediante el patrullaje, la detección, el rastreo, el seguimiento y la disuasión de submarinos enemigos. Las misiones ASW abarcan el monitoreo de submarinos en entornos específicos y la protección de grupos de ataque ante la amenaza submarina. Asimismo, pueden actuar como nodo de red de navegación (CN3), ya que los UUV tienen la capacidad de establecer redes de comunicación subacuáticas y apoyar la navegación submarina, operando como nodos en redes de transmisión de datos. Entre sus funciones se encuentran el despliegue de transpondedores y el funcionamiento como marcadores o indicadores de ruta, lo que facilita la interoperabilidad en enjambres de vehículos con elementos dedicados a tareas específicas.

Por otro lado, pueden realizar operaciones auxiliares como el apoyo logístico. Los UUV de gran tamaño se emplean para proporcionar cobertura logística a otras misiones de forma clandestina, sin poner en riesgo plataformas de alto valor, por lo que pueden desempeñar un papel crucial en operaciones especiales, entregando cargas esenciales. También pueden ser el vehículo de inserción o extracción e incluso la plataforma para el despegue de drones aéreos para apoyar la misión.

Por último, los vehículos submarinos no tripulados también pueden aproximarse a infraestructuras críticas, como cables submarinos o gaseoductos para causar daños significativos a estas instalaciones estratégicas. Por tanto, todas estas aplicaciones reflejan el potencial de los UUV en el ámbito de la defensa y la seguridad, demostrando su versatilidad y eficacia en diversas operaciones submarinas.

2.1.2 Tipos de UUV

Los UUV se pueden clasificar en función del tamaño, pues dependiendo de este, el UUV tendrá unas capacidades y limitaciones determinadas. A continuación se expone la clasificación según [2].

- a) SUUV (Small UUV o UUV pequeños): son aquellos vehículos submarinos cuyo diámetro no excede de 10 pulgadas (aproximadamente 25 centímetros), lo que les permite ser transportados por una sola persona. Debido a sus dimensiones reducidas, estos UUV poseen limitaciones significativas, especialmente en términos de autonomía (el tiempo que pueden operar sin necesidad de recarga) y de carga útil (el peso o los equipos que pueden transportar).
- b) MUUV (Medium UUV o UUV medianos): tienen un diámetro que oscila entre 10 y 21 pulgadas (de 25 a 53 cm). El límite superior de esta categoría, 21 pulgadas (533 mm), corresponde al diámetro estándar de los torpedos pesados. Esto implica que los MUUV están diseñados para ser lanzados desde submarinos, lo que les confiere una mayor capacidad operativa en comparación con los SUUV.
- c) LUUV (Large UUV o UUV grandes): su diámetro varía entre 21 y 84 pulgadas (53 a 213 cm). Estos UUV no pueden ser lanzados desde tubos estándar de torpedos, pero existen mecanismos para acoplarlos a submarinos o embarcaciones de superficie. Un ejemplo de ello es el Dry Deck Shelter (DDS), un módulo que puede instalarse en submarinos de la clase Astute británica, así como en varias unidades de las clases Virginia, Seawolf, Los Ángeles y Ohio de la Marina de los Estados Unidos.
- d) XLUUV (Extra Large UUV o UUV extra grandes): con un diámetro superior a las 84 pulgadas (213 cm), estos vehículos submarinos pueden considerarse como pequeños submarinos. Debido a su tamaño, es poco probable que puedan ser lanzados desde submarinos convencionales, sin embargo, podrían operar desde tierra o incluso desde diferentes plataformas “madre” (buques o aviones). Los XLUUV son los vehículos con mayores capacidades, contando con una planta propulsora y eléctrica que les proporciona una extensa autonomía.

2.1.3 Grados de autonomía

Si bien la clasificación anterior es fundamental, también es de gran importancia definir el nivel de autonomía que tiene un UUV, ya que dadas las circunstancias del medio en el que opera, la comunicación

operador-UUV está muy limitada. En función de cómo son los inputs del operador, los UUV según [2] y [8] pueden ser:

- a) Operado: el funcionamiento del UUV depende completamente de los inputs proporcionados por un ser humano. En este caso, el operador tiene el control directo de todas las acciones del vehículo.
- b) Asistido: el UUV opera de manera paralela a la actividad humana, mejorando o ampliando la capacidad del operador para llevar a cabo ciertas tareas, pero el control sigue siendo en gran parte humano.
- c) Delegado: el vehículo submarino ejecuta tareas sencillas de forma autónoma, como controlar el gobierno y la propulsión. El operador puede introducir una ruta y el submarino la seguirá sin intervención adicional. Asimismo, otras funciones automatizadas podrían incluir la ejecución de ciertas acciones basadas en señales específicas detectadas por sus sensores.
- d) Supervisado: el UUV realiza tareas asignadas de manera autónoma, pero está limitado a un conjunto de funciones específicas. Aunque podría ser capaz de ejecutar varias tareas, el operador debe autorizar la ejecución de cada una de ellas de manera individual.
- e) Mixta: en este modelo, tanto el humano como el sistema pueden iniciar acciones, pero el controlador mantiene la capacidad de verificar y corregir las decisiones del UUV conforme se desarrollan las operaciones.
- f) Completa: el UUV opera sin ninguna intervención humana, independientemente de las circunstancias, llevando a cabo sus misiones de manera totalmente autónoma.

Adicionalmente, otra clasificación basada en la necesidad de comunicación y las implicaciones éticas de otorgar independencia al sistema incluye los siguientes niveles:

- a) Man in the loop: el operador es quien decide el objetivo a atacar, y el sistema ejecuta el ataque siguiendo esta decisión. El ser humano tiene control total sobre el proceso de ataque.
- b) Man on the loop: en este caso, el sistema selecciona el objetivo y ejecuta el ataque, pero el operador supervisa el proceso, asegurándose de que se realice correctamente y con la posibilidad de abortar la acción si es necesario.
- c) Man out of the loop: el sistema decide de manera autónoma qué objetivo atacar, llevando a cabo el ataque sin que el operador pueda intervenir ni detenerlo.

Esta clasificación del nivel de autonomía es esencial para entender la interacción entre el operador y el UUV, así como para evaluar los riesgos y beneficios de delegar ciertas tareas a los sistemas autónomos, especialmente en el ámbito de la defensa y seguridad.

2.1.4 Sensores de un AUV

Es fundamental recordar que una de las funciones primordiales de un AUV de inteligencia es actuar como un sensor capaz de detectar, recopilar, registrar y transmitir al operador la información obtenida del entorno y de los contactos. En este sentido, los trabajos presentados en [2], [8] y [9] definen diversos tipos de sensores empleados en las misiones que puede realizar un vehículo submarino no tripulado.

- Sensores acústicos: existen dos tipos principales: activos y pasivos. Con los avances tecnológicos en el ámbito de los sistemas de sonar, los AUVs pueden integrar sofisticados sistemas de sonar activo que les permiten mapear áreas y detectar objetos de interés. El sonar pasivo, por su parte, se utiliza principalmente en operaciones antisubmarinas, aunque también puede emplearse para la detección e identificación de contactos en la superficie. Además, los sonares actúan como sistemas de detección de obstáculos. En la actualidad, se utilizan sonares de apertura sintética para este propósito, los cuales envían múltiples pulsos en diferentes direcciones y, mediante correlaciones estadísticas generan imágenes de alta resolución. En el contexto de la guerra antisubmarina (ASW) se sugiere que los AUVs utilicen su sonar activo para detectar submarinos enemigos sin revelar la

ubicación del submarino tripulado aliado que opera en conjunto con el AUV, al que le comunica la posición del enemigo.

- Sensores magnéticos: hay 2 formas de emplear los sensores magnéticos en AUVs, la primera es como compás magnético, como parte de los sensores del sistema de navegación inercial. La segunda es para encontrar objetos metálicos en el fondo marino. Gracias a estos sensores, el AUV puede encontrar gaseoductos y cables submarinos.
- Sensores electromagnéticos: los submarinos deben ser capaces de detectar las firmas electromagnéticas de los buques, incluidas aquellas generadas por el magnetismo de su casco. Estas firmas resultan particularmente valiosas para el despliegue de minas submarinas que se activan al detectar la firma electromagnética de un buque objetivo. Esta capacidad no sólo facilita la identificación de los buques, sino que también contribuye a la construcción de una base de datos. Los sensores electromagnéticos son fundamentales para la obtención de inteligencia electrónica (ELINT) y para la recopilación de información relacionada con las comunicaciones de inteligencia (COMINT).
- Sensores optoelectrónicos: estos sensores pueden emplearse tanto para recolectar imágenes como para medir distancias o claridad del agua mediante láser. Estos ayudan al reconocimiento de costa e identificación de minas. Pese a que está bien desarrollada la tecnología para almacenar imágenes y videos, existe gran dificultad para transmitir estos en tiempo real al operador.
- Sensores NBQR: montar en un AUV un sensor capaz de detectar agentes químicos en el agua debería ser relativamente sencillo, pues se encontrarían estos agentes dispersos en el agua. Además, esta capacidad permite realizar este tipo de vigilancias sin arriesgar vidas humanas. Sin embargo, la instalación de radiómetros puede ser complicada.
- Sensores CTD (Conductivity, Temperature and Depth): estos sensores sirven para obtener información oceanográfica y para realizar predicciones de los sonares embarcados, ya que la conductividad del sonido, está ligada directamente a la salinidad. También la temperatura y la profundidad son factores que determinan la velocidad del sonido, así que pueden servir como herramienta de calibración para los sónares acústicos activos.

2.2 Ventajas de los AUV

El empleo de submarinos es ampliamente reconocido por las marinas militares globales como un factor decisivo en el incremento de su capacidad bélica. La mera presencia de un submarino en una zona operativa puede neutralizar completamente la flota enemiga, tal como se evidenció durante la Guerra de las Malvinas, según se expone en [10]. No obstante, la incorporación de AUVs para desempeñar determinadas funciones representa un avance significativo en las capacidades submarinas como se detalla en [11].

El empleo de vehículos submarinos no tripulados en contextos bélicos ofrece notables ventajas. Desde una perspectiva geopolítica, las sociedades occidentales suelen adoptar una postura post-heroica, lo que implica un esfuerzo por evitar bajas humanas incluso en escenarios de combate. El capital humano se considera el recurso más costoso dentro de los departamentos de defensa en los países occidentales, lo cual se refleja en el uso de armas como misiles de crucero y sistemas de mando y control. Los vehículos no tripulados, en este sentido, constituyen el ejemplo más destacado de esta tendencia. Este argumento adquiere aún mayor relevancia en el caso de los submarinos, dado que los daños ocasionados por el combate en esta área son sumamente catastróficos.

Además, la ausencia de dotación humana a bordo incrementa la capacidad de carga útil, ya que no es necesario disponer de espacios habitables ni sistemas destinados a mantener la vida humana a bordo. Esto implica que el submarino no necesitará obtener aire respirable ni cumplir con estrictas medidas de seguridad. La independencia de tripulación también resulta ventajosa cuando se deben tomar decisiones

en situaciones en las que los sentidos humanos tienden a verse fatigados debido a la duración o repetitividad de las tareas como se menciona en [11].

En cuanto a las misiones de un submarino, se destacan las que se realizan en áreas A2AD (Anti-Access/Area Denial), siendo los submarinos la mejor opción para vulnerar tales zonas. Sin embargo, los submarinos son costosos y transportan valiosas vidas humanas, por lo que el riesgo se reduce considerablemente al emplear vehículos no tripulados. Además, la penetración en una zona A2AD por medio de un AUV podría considerarse menos provocativa o escalatoria en comparación con el uso de un submarino tripulado. Asimismo, como se afirma en [12], los AUVs son considerablemente más difíciles de detectar debido a su reducido tamaño.

Desde un punto de vista técnico, la eliminación de la tripulación y los equipos asociados permite reducir el tamaño del submarino, lo que incrementa su furtividad y dificulta su detección por parte del enemigo. Este menor tamaño también conlleva un coste inferior como se señala en [13]. Además, esta reducción en el desplazamiento facilita su transporte por otras unidades navales o incluso su despliegue aéreo, permitiendo un despliegue táctico en la zona de operaciones.

Una ventaja destacable de los submarinos en formato XLUSV (Extra-Large Unmanned Underwater Vehicle) radica en su capacidad para operar indefinidamente en la zona de operaciones, ya que no requieren provisiones como alimentos u oxígeno, ni necesitan reabastecimiento de combustible. Esto les permitiría mantenerse sumergidos de manera prolongada, mejorando su discreción. Para asegurar su autonomía, el submarino podría recargar sus baterías mediante energía mareomotriz, aprovechando las corrientes marinas presentes en la zona operativa para la que ha sido diseñado.

En términos operacionales, el uso de vehículos submarinos ofrece una notable ventaja para operar en zonas costeras, ya que su reducido tamaño les permite acceder a áreas en las que los submarinos convencionales no pueden operar debido a limitaciones de profundidad. Según [10], los submarinos tradicionales requieren zonas con sondas mínimas de 30 metros, lo cual restringe su acceso a determinadas áreas. En este sentido, [13] refiere que: “Las operaciones costeras en aguas poco profundas son prácticamente exclusivas de los UUV, donde las embarcaciones tradicionales corren el riesgo de varar”.

Finalmente, [14] define el concepto de “letalidad distribuida”, adoptado por la US Navy, como la utilización dispersa de la fuerza naval mediante plataformas pequeñas y especializadas, conectadas en red para operar desde múltiples ejes con tácticas difíciles de prever y contrarrestar. Esta estrategia busca evitar la concentración de plataformas de alto valor, cuya destrucción representaría una pérdida significativa para la fuerza de combate. En este contexto, la US Navy ha comenzado a producir unidades de menor coste. En el caso de este TFG, se pasa de construir submarinos grandes y costosos a la construcción de AUVs, más pequeños, de bajo coste y totalmente independientes, como se refleja en [13]: “Su necesidad es indiscutible y se alinea con la nueva doctrina de letalidad distribuida”.

2.3 Inconvenientes de operar AUV

Pese a que las operaciones con AUV pueden presentar grandes ventajas, también tienen inconvenientes. El mayor inconveniente es la dificultad para comunicarse con ellos. Primeramente, se ha intentado solucionar con comunicación por cable, pero dificulta en gran medida la operatividad. La segunda solución, que es mucho más prometedora, es el empleo de la inteligencia artificial, aunque esta tecnología aún está muy poco desarrollada y plantea dudas de cómo dejar que el AUV tome ciertas decisiones, que podrían implicar por ejemplo una escalada de tensiones entre dos naciones como se refleja en [2] y en [13].

En lo referente a la autonomía, depende del AUV. Aunque sí es cierto que la gran parte de los AUVs tienen una autonomía muy limitada, siendo útiles únicamente para ser herramientas empleadas por los buques para la realización de determinadas tareas como puede ser la caza de minas.

2.4 Inteligencia submarina

Según se explica en [9], las operaciones de inteligencia asignadas a los submarinos se dividen en dos categorías principales: I&W (Indication and Warning) y ISR (Intelligence, Surveillance and Reconnaissance).

Las operaciones I&W, o de indicación y advertencia, tienen como objetivo la obtención de una alerta temprana sobre las actividades del enemigo, proporcionando información para la interpretación de sus operaciones. La alerta temprana implica la transmisión de datos sobre la presencia y actividad enemiga en el menor tiempo posible a fin de que su explotación táctica sea efectiva.

Por otro lado, las operaciones ISR se enfocan en la recopilación y actualización de información acerca de las actividades enemigas. Aunque el enemigo realice acciones de exploración para confirmar que no está siendo observado, este llevará a cabo sus emisiones y actividades en su creencia errónea de que no hay ninguna plataforma de inteligencia en la zona. La capacidad de operar con discreción de los submarinos los convierte en plataformas únicas para este tipo de misiones. Esta discreción se ve aún más potenciada en áreas litorales, donde el tráfico marítimo, la vida marina y la reverberación de las olas dificultan considerablemente la detección de posibles submarinos.

Como explica Conte de los Ríos [9], los submarinos tienen la capacidad de penetrar en aguas territoriales de manera sigilosa, evitando ser detectados o avistados, con el objetivo de recopilar inteligencia sobre infraestructuras portuarias, playas y redes de telecomunicaciones. Además, pueden correlacionar diversos tipos de emisores con plataformas de inteligencia, como las imágenes (IMINT), la inteligencia electrónica (ELINT), la inteligencia de comunicaciones (COMINT) y la inteligencia acústica (ACINT).

- IMINT (Intelligence of Images): los submarinos tienen la capacidad de capturar fotografías digitales de buques a distancias de hasta 7.000 yardas, lo cual resulta útil para la identificación de contactos, aunque no permite obtener detalles sobre antenas u otros componentes específicos del buque. Para obtener estos detalles, es necesario acercarse a aproximadamente 1.500 yardas.
- ELINT (Electronic Intelligence): esta forma de inteligencia resulta especialmente adecuada para detectar señales provenientes de aeronaves y radares de vigilancia basados en tierra, proporcionando información crítica sobre las actividades enemigas.
- COMINT (Communications Intelligence): los submarinos pueden utilizar sistemas de inteligencia de comunicaciones para interceptar mensajes cifrados del enemigo, estudiar los patrones de envío de dichos mensajes, analizar su contenido y, en algunos casos, incluso descifrar los códigos utilizados por las fuerzas enemigas.
- ACINT (Acoustic Intelligence): la inteligencia acústica se basa en la capacidad de escuchar los sonidos emitidos por los buques enemigos al pasar cerca del submarino, pues los buques tienen una firma acústica derivada de la configuración de su propulsión y del diseño de sus hélices, además de poder ser consecuencia de defectos en su construcción y de posibles averías que haya podido sufrir.
- OSINT (Open-Source Intelligence): el submarino puede integrarse de forma encubierta en la red AIS (Sistema de Identificación Automática), limitándose a recibir datos de otras unidades. Esto le permite diferenciar entre el tráfico mercante, los contactos de interés (COIs) y los buques enemigos sin comprometer su posición.

2.5 AUVs submarinos existentes

Los últimos conflictos militares han demostrado que los AUVs son un avance tecnológico que puede suponer una gran ventaja para quien los utiliza, además de no requerir de un gran capital económico para disponer de ellos. A pesar de que son pocos los países que poseen submarinos autónomos, podemos apreciar la creciente importancia en la industria militar en el gran número de AUVs submarinos que se

están desarrollando en los últimos años y la cantidad de nuevos países que han empezado a desarrollarlos. Como prueba podemos ver la diferencia en el número de AUVs desarrollados hasta 2019 y los AUVs submarinos conocidos en 2022 como se muestra en la Figura 2-1.

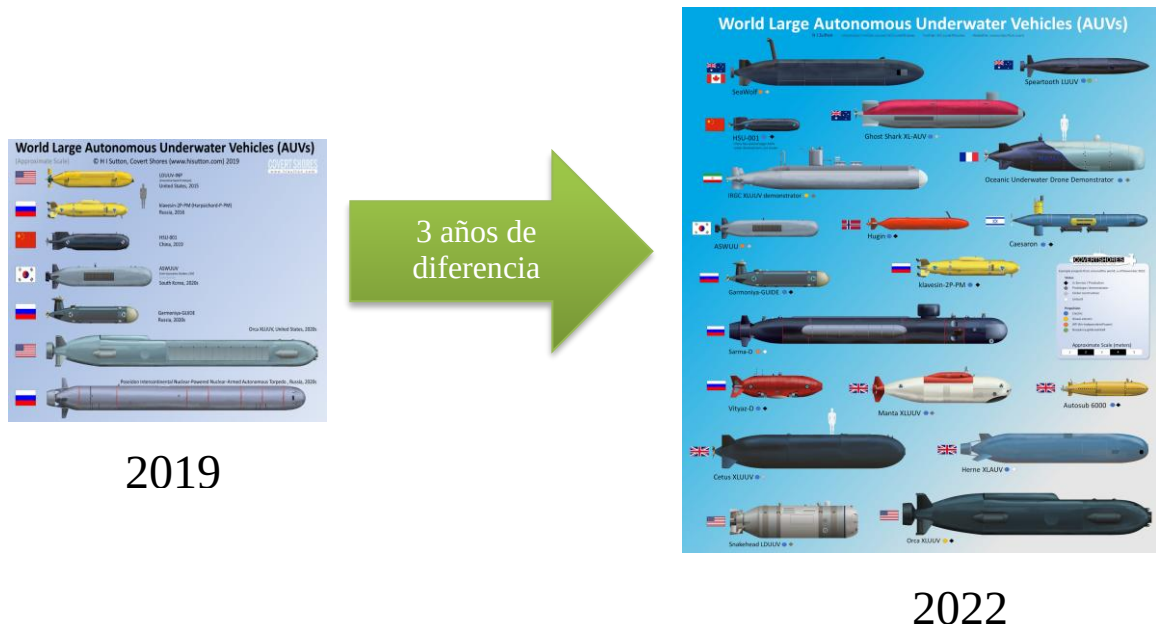


Figura 2-1 Incremento en el número de AUVs (tomada de [15])

En el Anexo III: AUVs conocidos de este TFG, se describen los submarinos autónomos que se conocen en la actualidad según [15]. Puesto que la industria de AUVs está experimentando un crecimiento exponencial, existen diversas configuraciones experimentales. De todos ellos se destacan 2 de los AUVs estudiados por estar más avanzados respecto al resto y tener ciertas cualidades que podrían parecerse al AUV en estudio. Estos son, por una parte, el “Orca”, que se puede ver en la Figura 2-2 (a), de la empresa estadounidense Boeing, de 25 m de eslora modular, con la capacidad de minar y transportar cargas a un punto indicado.



(a)



(b)

Figura 2-2 Ejemplos existentes de AUVs (tomadas de Boeing y Revista Forbes)

Por otra parte, tenemos el HSU-001 chino, que se destaca por ser un submarino diseñado para realizar misiones en el litoral. Es por ello, que tienen un reducido tamaño y que cuentan con 2 hélices, como se puede ver en la Figura 2-2 (b) para tener una mayor maniobrabilidad.

2.6 Drones de guerra en la actualidad y en el futuro

La OTAN ya prevé la transición de grandes y costosos sistemas navales hacia plataformas autónomas con el objetivo de aumentar la versatilidad y capacidad de las marinas de guerra. Para ello, ha lanzado el programa MUS (Maritime Unmanned Systems), cuyo propósito es identificar soluciones conjuntas y garantizar la interoperabilidad de los sistemas que se describen en [16]. Asimismo, la Armada de los Estados Unidos ha establecido recientemente la “US Navy Unmanned Maritime Systems Program Office”, mencionado en [12], encargada de gestionar los proyectos enfocados en el desarrollo de UUVs.

Peter Singer, reconocido experto en tecnología militar contemporánea, ha afirmado en relación a los drones que: “Una tecnología revolucionaria es una tecnología que cambia el juego a un nivel histórico. Es tecnología como la pólvora, la máquina de vapor o la bomba atómica... Soy de la opinión de que ciertas tecnologías cambian las reglas del juego, y los drones están en esa categoría” [17].

El combate tradicional se encuentra cada vez más desplazado en los conflictos modernos, siendo sustituido por enfrentamientos de baja intensidad, más prolongados y menos decisivos. En este escenario, los drones aportan tres ventajas: primero, reducen la necesidad de despliegue terrestre y permiten sostener conflictos de larga duración; segundo, el adversario asume la certeza de no poder escapar al castigo de precisión, lo que condiciona su actuación; y tercero, su reducido coste de producción y operación hace creíble una respuesta militar sostenida en el tiempo. De esta forma, “los países que poseen drones armados y con capacidad de destrucción podrían cambiar el comportamiento de un adversario sin necesidad de atacarlo” [18].

Por otro lado, los drones también poseen la capacidad de capturar imágenes, lo que facilita la edición y difusión de contenido audiovisual, convirtiendo plataformas como YouTube en un espacio de confrontación en el cual los actores buscan ganar apoyo para su causa entre la opinión pública. En el ámbito digital se libra la guerra del relato: mostrar la destrucción y el sufrimiento causado por el adversario o destacar la perseverancia propia en la defensa, generan una conciencia colectiva que influye en la opinión pública y favorece la intervención de los gobiernos.

2.7 La guerra de minas

Basándonos en [19] y [20], la mina es un artefacto explosivo que se coloca en el agua con la intención de hundir o causar daños a buques o submarinos, o bien con el propósito de hacerlos desistir de que naveguen por una zona determinada. Asimismo, destaca por ser un arma barata con gran poder disuasorio a disposición de cualquier marina. Se utilizan en la guerra asimétrica de modo eficaz, ya que son fáciles de colocar, discretas y con elevado poder destructivo, aunque existen minas más sofisticadas con una gran capacidad sensorial cuya posesión está más limitada. Por otra parte, podemos concluir de ambas referencias que se trata de un arma con multitud de configuraciones y de empleo sencillo y flexible. Además, pueden ser fondeadas por aviones, por barcos de superficie, submarinos y por buceadores de combate, y ser colocadas a diferentes profundidades, tanto en las playas para impedir los desembarcos como a gran profundidad.

2.7.1 Clasificación de las minas

Como se muestra en [20], se hace una primera clasificación de las minas según su posición en:

- Minas de fondo: tienen flotabilidad negativa y descansan en el fondo o enterradas, hasta ser activadas.
- Minas de orinque: al contrario que las anteriores tienen flotabilidad positiva, y se unen por medio de una cadena (orinque) a un muerto de flotabilidad negativa que las mantiene a la profundidad deseada.
- Mina Móvil: no permanece fija en el mismo sitio y pueden ser:
 - A la deriva.

- Oscilante: oscila entre profundidades determinadas.
- Deslizante: se desplaza por el fondo.
- Propulsada: se mueve de forma activa entre su despliegue y actuación.
- Ascendente: se dirige hacia el blanco después de detectarlo.
- Colocación a distancia.

Por otra parte, también se pueden clasificar en función de su mecanismo de activación [19]. De esta manera podemos distinguir entre:

- Mina de contacto.
- Mina de influencia: esta influencia puede ser magnética, acústica y de presión, detectando la bajada de presión debido al efecto de succión producido por los buques que pasen por encima.

2.7.2 Mecanismos especiales

Como se muestra en [20], existen una serie de mecanismos que dificultan las operaciones de cazaminas del enemigo y que incrementan la efectividad de la mina. Estos son:

- Contador de buques: detona al haber pasado un número de buques, lo que genera un importante daño psicológico, teniendo además más probabilidades de impactar en el HVU (High Value Unit).
- Retardo de armado: permite que la unidad minadora mine una zona y pueda salir de ella antes de que se activen las minas.
- Armado intermitente: hace que las minas se activen en intervalos de tiempo distintos, lo que impide el uso de rastras y su detección, haciendo que el enemigo gaste más recursos en limpiar la ruta.
- Obstructores: minas vacías diseñadas para dañar las rastras y buques MCM.

2.7.3 Letalidad y eficacia de las minas

Como escribe el CF. José Miguel Máiquez Lax en su artículo de la Revista General de Marina [21]: “En la última década, el stock de minas navales de las naciones litorales se ha multiplicado debido a su bajo coste, discreción y el efecto psicológico que produce en el adversario. Esta circunstancia ha sido aprovechada por la industria para desarrollar y lanzar al mercado nuevos modelos. El riesgo asociado a este aumento se ve, a su vez, incrementado por el hecho de la necesidad de desarrollar contramedidas específicas contra los nuevos modelos. Con suerte, en una década habrá nuevas contramedidas efectivas, pero su coste, debido a la dificultad técnica, sobrepasará con creces al de la nueva mina a neutralizar.” Lo que podemos sacar de conclusión en este texto es que las minas son un recurso efectivo, de bajo coste y muy difícil de neutralizar para el enemigo.

Muestra de la efectividad de las minas se puede apreciar en [22]: “las minas colocadas por Corea del Norte causaron el 70% de los daños sufridos por los buques de Estados Unidos, provocando 4 hundimientos directos”. En este sentido, también es de destacar que “Desde la Segunda Guerra Mundial, las minas han dañado o hundido cuatro veces más unidades de la Armada de los Estados Unidos que todas las demás armas” [19].

2.7.4 Minas españolas de última generación

Del estudio de minas modernas [19], queremos destacar la mina naval de SAES, por ser una mina de fabricación española, por ser una mina ya probada por la Armada en los submarinos S-80 y por ser una mina multi-influencia, lo que le permite identificar buques antes de detonar. Existen diversas versiones de la mina: cilíndrica de fondo, para ser fondeada por submarinos; de perfil bajo, lo que hace que sea difícil de detectar; y la de orínque.

Un aspecto a destacar de esta mina es que también puede estar destinada a la obtención de inteligencia. Profundizando en como detecta las distintas firmas de un buque, se explica en [22] que la

firma eléctrica se compone de dos componentes: una estática y una alterna. La componente estática se denomina UEP (Underwater Electric Potential) y representa la influencia en campo cercano. Esta se mide cuando el buque pasa sobre un sensor o una antena de sensores de campo eléctrico, y su variación temporal depende de la velocidad y el tamaño del buque. Por otro lado, la firma eléctrica alterna se denomina ELFE (Extremely Low Frequency Electric). Por último, añadir que estas firmas se pueden grabar con detectores como el MIRS.

2.8 Energía mareomotriz

Como se explica en [23], la energía mareomotriz consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial de la masa de agua que cubre el planeta Tierra. Las mareas son una variación periódica que influyen en el nivel del mar y del océano, provocado por las fuerzas de atracción gravitatoria que la Luna y el Sol ejercen en las partículas líquidas y por el movimiento de rotación de la Tierra, también conocido como aceleración de Coriolis. Cuando la Luna se encuentra por encima del horizonte, la fuerza atractiva que ejerce será superior que la centrífuga, ocasionando en el mar o en el océano dos olas globales, dos pleamares y dos bajamares, esto es conocido como marea semidiurna, sin embargo, si la Luna no alcanza el horizonte, corresponderá a una pleamar y una bajamar, esto es conocido como marea diurna.

No obstante, las mareas mencionadas anteriormente se ven afectadas por las mareas vivas y mareas muertas. Las primeras se producen cuando se alinean el Sol, la Tierra y la Luna en su fase nueva y llena. En este caso las pleamares serán más superiores y las bajamares serán inferiores a la media. Del mismo modo, cuando la Luna este en su fase de primer cuadrante o tercer cuadrante, se formará lo que se conoce como marea muerta, donde las pleamares serán inferiores y las bajamares superiores al promedio. Todos estos movimientos de partículas líquidas provocan corrientes marinas denominadas corrientes de marea.

Por otra parte, las capacidades de las fuentes de energía eléctrica se basan en 3 factores: la predictibilidad, que consiste en que se puede predecir cuanta energía va a producir y en qué momento; la fiabilidad, que asegura producir un mínimo de potencia; y que sea despachable, que significa que sea una fuente energética que se pueda aumentar o reducir su producción a conveniencia sin problema alguno. En el caso de la energía mareomotriz, se puede afirmar que es muy buena en estos 3 factores, ya que es: muy predecible, pues depende únicamente de la fuerza gravitacional de la Tierra y de la Luna; es fiable; y es despachable, pues únicamente supone trincar o dejar mover la turbina.

2.8.1 Formas de energía mareomotriz

En [23] se describen las técnicas existentes para la obtención de energía a partir de los movimientos globales de las masas de agua:

- Presa de marea: en este tipo de central se aprovecha la energía potencial creada por la diferencia de altura en la pleamar y la bajamar. Estas presas requieren la construcción de diques en estuarios o zonas de costa.
- Energía mareomotriz dinámica: es un tipo de energía que no ha sido aplicada, estando aun en desarrollo. Se basa en una tecnología que incluye un dique perpendicular a la costa en forma de T, el cuál interferirá creando zonas de diferentes niveles de agua en los dos lados del dique para posteriormente utilizar turbinas bidireccionales.
- Generador de corriente de marea: en este tipo de central se utiliza la energía cinética del movimiento del agua para poner en movimiento las turbinas, siendo muy similar a la energía eólica. Dentro de este tipo de generador, se encuentran:
 - Turbinas de eje horizontal: se basa en los mismos principios que un generador eólico. Sin embargo, no se tienen que tener en cuenta velocidades extremas ni sistemas de seguridad por ser esta una energía más predecible.

- Turbinas de eje vertical: utilizadas en regiones donde es difícil predecir la dirección de la corriente.
- Hidroplano oscilante: uno o más hidroplanos unidos a un brazo que acciona un sistema hidráulico para producir energía. Normalmente utilizado en aguas poco profundas.
- Turbinas de efecto Venturi: dirigen el flujo de agua a través de un canal angosto, incrementando la velocidad y reduciendo la presión. Son útiles para emplear en zonas de menor intensidad de corriente y se pueden emplear en zonas de menor profundidad que las de eje horizontal.
- Cometas mareomotrices: consiste en una cometa que aprovecha la fuerza de sustentación generada por la corriente. Constan de un timón para maniobrarla haciendo trayectorias en forma de ocho mientras produce energía.
- Arrays: consiste en poner varios sistemas de generación en un mismo lugar. Tiene claras ventajas a la hora de reducir el material necesario, pues habrá equipos que utilicen todos los elementos del array, construyendo así una planta eléctrica más eficiente.

2.8.2 Predicción de energía mareomotriz

Como se muestra en el apartado 8 de [23], ya existen métodos de predicción de corrientes en los que se generan mallas tanto horizontales (variación con la posición geográfica) como verticales (variación con profundidad). Los datos que se emplean para realizar estas estimaciones son: los datos del relieve de la costa; los datos batimétricos de la región, significando que pese a que estos datos no son esenciales, resulta favorable incluirlos para aumentar la precisión del modelo, pues existe información abierta para obtenerlos fácilmente (página del NOAA); los límites del modelo, pues será necesario introducir información de estas fronteras, para ello existen atlas de corrientes como TPXO; y el tiempo de estudio del modelo.

En cuanto a los métodos de cálculo, el método más empleado para el cálculo de corrientes mareomotrices es el método de elementos finitos, que genera una malla triangular para adaptarse a todo tipo de costas, lo que la hace eficiente a la hora de obtener una mayor resolución, siendo un ejemplo el modelo ADCIRC. Destacar también, que ya existen varios métodos computacionales para la predicción de la corriente mareomotriz, tanto comerciales como de fuente abierta, existiendo para ambos modelos 2D y 3D como aparecen expuestos en [23].

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Estudio del Concepto

En los siguientes apartados se estudiarán las misiones y los objetivos que debe cumplir el submarino. Para conseguirlo, se empezará analizando el objetivo del submarino y la forma en que será operado para conseguir sus objetivos. Sabiendo esto, se hará una búsqueda de los equipos que necesitará el AUV y que podrían ser incorporados. Asimismo, será necesario realizar un estudio de la normativa que debe cumplir el proyecto. Como producto de esta fase se definirán los requisitos que debe cumplir el concepto.

3.1.1 Roles del submarino

Este AUV tiene el objetivo de ser el complemento del S80 para realizar operaciones de inteligencia próximas a la costa enemiga, en su mayor parte posándose en el fondo, permaneciendo activo durante periodos indefinidos. En estas operaciones no será necesario que el AUV tome decisiones complejas por cuenta propia, sino que se limitará a obedecer órdenes preprogramadas, algunas de ellas podrían ser canceladas o pospuestas por el AUV ante la posibilidad de ser detectado, lo cual podrá conocer por medio de sus sensores. El AUV podrá emplearse para distintas misiones:

- a) Operaciones de minado próximas al puerto enemigo o incluso dentro de este, impidiendo que la flota enemiga salga a la mar o evitando que entre a reabastecerse en puerto.
- b) Operaciones de recogida de inteligencia, próximas a puertos. Esta información podrá ser:
 - Imagen: óptica, infrarroja y térmica.
 - Recogida de firmas acústicas.
 - Recogida de firmas magnéticas.
 - Recogida de ELINT.
 - Recogida de COMINT.
 - Control NBQR.
 - Recogida de firma sísmica.
- c) Recogida de datos para desembarco Anfibio: tipo de fondo, reconocimiento de canal para LCM, reconocimiento de costa con la posibilidad de lanzar un AUV aéreo para un reconocimiento más profundo de la costa.
- d) Control total de las salidas y entradas en puerto de las unidades enemigas.
- e) Operaciones de sabotaje, como la destrucción de cables e infraestructuras submarinas.

3.1.2 Zonas de interés

El AUV está pensado para operar en zonas de litoral, sin embargo, las características de las que se le dota lo hacen especialmente efectivo en regiones de baja profundidad y con fuertes corrientes. Este es el caso de importantes zonas de interés para la OTAN, como es el mar del Norte, caracterizado por tener

una profundidad de 200 m y por presentar fuertes corrientes. Este es un punto importante, pues estas características le dan ventaja a nuestro AUV frente a submarinos convencionales que suelen navegar en la zona. Otra zona de importancia es el indo-pacífico, caracterizado por fuertes corrientes y multitud de islas y kilómetros de litoral. Es por ello, que el AUV también sería de amplia aplicación en esta última zona por su alta capacidad de permanencia y por la posibilidad de realizar operaciones de inteligencia y de alerta temprana.

Por último, pasando al plano nacional, en el mar Mediterráneo pese a no presentar fuertes corrientes como en los anteriores escenarios mencionados, el AUV podría llevar a cabo operaciones de inteligencia sin mayores complicaciones, pudiendo transitar entre zonas de recarga y con energía suficiente para llevar a cabo las misiones que se le encomienden.

3.1.3 La forma de emplear este AUV

Para llevar a cabo las misiones descritas en el apartado anterior, el AUV debe ser completamente autónomo en diferentes aspectos:

- Energéticamente: ser capaz de producir energía posado en el fondo marino o bien a través de generadores diésel que alarguen en gran medida su autonomía.
- Navegación: ser capaz de ir desde un punto A a otro B sin intervención humana.
- Toma de decisiones: ser capaz de tomar decisiones para la recolección de inteligencia sin perder su discreción.

Para comprender la forma de operar del AUV, se describirá la evolución de la misión, comenzando desde el inicio de esta.

1. El AUV será configurado para la misión que va a realizar. Esto quiere decir que se le incorporará la serie de órdenes que se quiere que se ejecuten una vez desplegado. Esto significa cargarle datos como: las coordenadas a las que debe dirigirse y parámetros de profundidad; a qué hora o dónde tiene que realizar superficie o comunicarse con la base para poder recibir órdenes o modificaciones a estas; indicar el punto en el que se debe posar en el fondo y la inteligencia que tiene que realizar; y qué tipo de inteligencia y bajo qué criterios (estas órdenes preconfiguradas, podrán ser pospuestas por el AUV, de acuerdo a sus criterios de discreción).
2. Será desplegado en una zona geográfica. Esto puede ser:
 - Desde puerto base.
 - Desde cualquier plataforma naval, por medio de un contenedor modular.
 - Desde un avión de transporte A400M.
3. Una vez en la zona, el AUV realizará sus acciones preprogramadas. Durante el transcurso de la operación, el AUV podrá comunicarse mediante comunicación satélite con la base para la modificación, cancelación o ampliación de órdenes. Esta comunicación se realizará a una hora predeterminada o al llegar a una zona geográfica preprogramada. El AUV se comunicará vía satélite por medio de un mástil o una boya que emerja a superficie, de manera que pueda enviar la inteligencia recogida a base y recibir órdenes.

3.1.4 Características especiales

Para realizar estas operaciones de manera satisfactoria e indefinidamente se deben tener en cuenta 2 aspectos fundamentales y que diferencian a este AUV de cualquier tipo de submarino diseñado hasta la fecha, la independencia energética y la discreción.

En cuanto a la independencia energética, la primera opción es la de auxiliarse en plataformas que generen energía y los AUVs vayan a ellas para recargarse, aunque además de estas plataformas, podrían emplearse buques o submarinos para cargarlos. Sin embargo, para aumentar la discreción y no tener que gastar recursos en desplegar otras unidades, en este TFG se propone la solución que a continuación se expone.

Para la obtención de energía durante la operación, el AUV desplegará turbinas hidrocinéticas para la producción de energía eléctrica a partir de la energía mareomotriz inherente a todas las masas de agua comunicadas en el planeta Tierra, pues siempre se posará en el fondo para recargar sus baterías. La intención es la de utilizar esta energía generada por la ola global, con 2 crestas generadas por la rotación de la Tierra junto a los efectos gravitatorios del Sol y la Luna. Esta ola se ve frenada por el efecto del relieve marino, pero aun así genera efectos de resonancia que la aumentan.

Es por ello, que para resolver el problema energético durante una operación podríamos optar por establecer dentro del área de operaciones 2 tipos de zonas. Primero, las zonas de interés, que serán aquellas zonas próximas a costa en las que se quiere realizar algún tipo de acción, como podría ser reconocimiento de costa, reconocimiento de fondo para realizar un desembarco anfibio posteriormente, minado, espera en zonas costeras o incluso en zonas portuarias para realizar inteligencia a buques de interés. Mientras la segunda zona será la zona de recarga, una zona próxima a las zonas de interés, pero lo suficientemente alejada, y en la que la fuerza mareomotriz, que es fácil de predecir y con baja desviación típica mediante modelos ya existentes, sea mayor para permitir una rápida recarga. Como se muestra más adelante en el apartado 3.7.7, podría establecerse un turno de patrullas entre 4 submarinos con permanencia de al menos 1 de ellos operativo 24/7 con intensidades de corriente de 0,7 m/s, una velocidad de corriente fácilmente conseguible incluso en el Mediterráneo, como se puede ver en la Figura 3-1, pues es el mar que presenta una mayor dificultad a este modelo de operación.

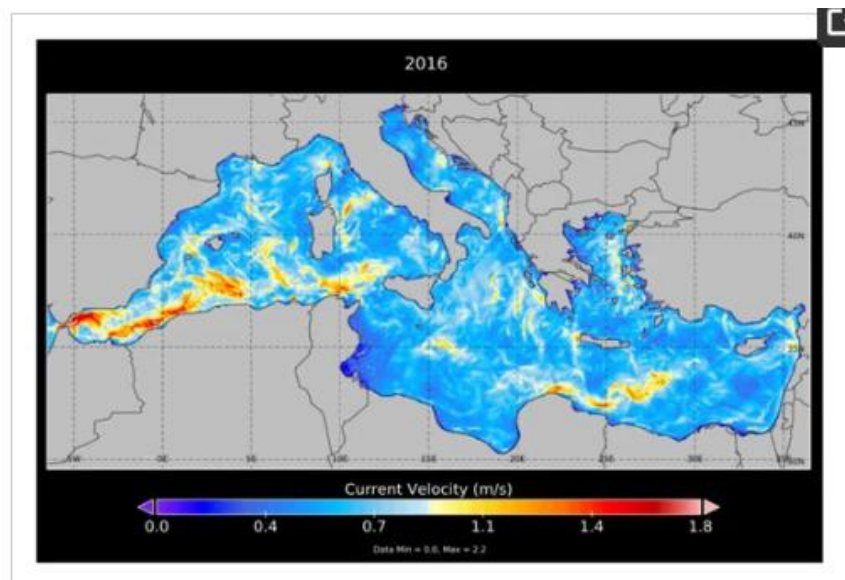


Figura 3-1 Intensidad de corriente promedio en el Mediterráneo (tomada de [24])

Como se explicó anteriormente, en el área de operaciones se definen 2 zonas, una zona de interés y una zona de recarga. En la zona de recarga el AUV es vulnerable, ya que genera mucho más ruido. Es por ello, que se propone que esta zona de recarga se encuentre a unas 20-40 MN del área de interés. Adentrándonos en la situación en el área de operaciones, es importante señalar que es un AUV multifunción, siendo realmente importante definir estas funciones para desarrollar el AUV. Viendo la misión que va a tener que realizar el AUV, se hace evidente que el aspecto más esencial para el cumplimiento de la misión es la de poder llevarla a cabo sin ser detectado. Para analizar la resistencia a ser detectado, se estudiarán las distintas situaciones a las que se va a enfrentar la unidad. En este sentido, podemos diferenciar 2 situaciones:

La primera, en la que el AUV tiene que navegar hasta la zona de operaciones. Este es el caso más sencillo, pues el submarino navegará a una profundidad de 150 m, y siempre que deba comunicarse y se cumplan los parámetros de discreción preestablecidos para la misión (distancia mínima a contacto más cercano) enviará la boya satélite a superficie para comunicarse con el sector tierra y la antena GPS para obtener la posición y seguir navegando por estima.

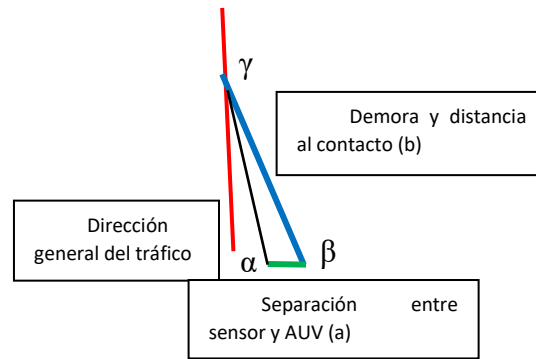


Figura 3-2 Localización de contactos (elaboración propia)

La segunda situación, bastante más compleja, es en la que el submarino se encuentre en una zona A2AD, ya que existirán un gran número de unidades enemigas alerta y serán zonas de baja profundidad, en las que el AUV tendrá menos posibilidades de evadirse, además de la cercanía a costa, que restringirá en gran medida la movilidad del AUV. Es por ello, que en estas operaciones el AUV desplegará un sonar pasivo a 500 m de la posición en la que se pose, permaneciendo conectado al AUV mediante un cable, quedando este en perpendicular a la dirección habitual del tráfico en esa zona como se puede apreciar en la Figura 3-2. De esta forma, el AUV será capaz de ubicar contactos mediante 2 demoras simultáneas a los contactos que se encuentren a varias millas, pudiendo tomar la decisión de tener los sensores (las cámaras y las antenas de ELINT y COMINT) en superficie o retirarlas hacia las profundidades. Asimismo, se intentará que estos sensores sean lo más pequeños posible, a la vez que se camuflarán con coberturas de camuflaje que simulen troncos o aves marinas.

Los datos que tenemos para hallar la demora y distancia a un contacto cualquiera serán las 2 demoras detectadas por el submarino y por el sonar. Por otro lado, el calculador del submarino también sabrá que ha dejado el sonar por su popa a 500 metros, por lo que conocerá en que demora está el sensor, así como la demora inversa que es a la que el sensor tiene al submarino. Sabiendo las marcaciones entre ambos, conoceremos los ángulos α y β de la base del triángulo, y la longitud entre el AUV y el hidrófono, presentándose el problema de geometría representado en la Figura 3-2. Conociendo los 2 ángulos inferiores, obtendremos el tercer ángulo $\gamma = 180 - (\alpha + \beta)$. Después de aplicar esta igualdad y el teorema del seno, obtenemos la ecuación para saber la distancia a la que se encuentra el AUV del contacto (1).

$$b = \frac{a}{\sin \gamma} \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

3.1.5 Requisitos del submarino

Del apartado anterior se deduce que este proyecto trata el diseño de un vehículo submarino (XLUUV o LUUV) costero para la recolección de inteligencia en aguas enemigas someras y el minado de estas, que pueda ser desplegado desde una unidad naval o desde una aeronave. Para ello, debe dotarse de una serie de características que podrían estar sujetas a posteriores cambios, aunque en un primer concepto serán las siguientes:

- Tener un tamaño suficientemente pequeño como para poder ser transportado desde un avión A400M, y poder ser containerizado para desplegar desde unidades navales. Para ello, no podrá superar el peso de 36,5 toneladas (máxima carga en la bodega de un A400M), y tendrá que adaptarse a las dimensiones de la bodega.
- Capaz de desplegar la boya para comunicaciones satélite.
- Capaz de minar zonas.
- Tener sensores para seguridad en la navegación y detectar contactos.
- Gran capacidad de maniobra para lo que se plantean dos ejes.

- f) La cota máxima de inmersión será 200 metros, pues esta es la profundidad recomendada en [25] para un submarino destinado a operar en zonas costeras.
- g) El submarino debe poder mantenerse sin necesidad de reparaciones durante meses, por lo que debe tener equipos redundantes y ser resistente a las condiciones del mar y la vida marina.
- h) Debe ser capaz de recargar las baterías con energía mareomotriz.
- i) Tener una autonomía de 200 MN sin recargar las baterías.
- j) Dado que se trata de un sumergible que estará la mayor parte del tiempo bajo la superficie y que sólo hará emersión para ser recogido, se utilizará una reserva de flotación (ROB) del 10% recomendada en [4].
- k) La sección transversal del submarino será un área formada por 2 círculos solapados, de esta forma el submarino tendrá una mayor estabilidad a la hora de posarse en el fondo y tendrá una mayor área horizontal para desplegar las turbinas de generación de corriente mareomotriz, además de poder tener una estabilidad transversal mucho mayor al aumentar la inercia en gran medida.

3.1.6 Normativa a la que deberá estar sujeto el AUV y limitaciones

La normativa consultada para el diseño del AUV ha sido la ANEP 77 de la OTAN [5], centrada en los pasos que se han de seguir para asegurar la operatividad y supervivencia del submarino, tanto en entornos normales como hostiles, en la que se definen una serie de directrices generales que se han de cumplir en el diseño. Además, también se ha seguido la normativa civil de Bureau Veritas [26], destinada a describir como determinar de forma cuantificable el cumplimiento de los requisitos de seguridad.

En cuanto a la operatividad, [5] hace referencia a que se deben establecer unos objetivos operativos para el diseño, el CONOPS (Concept of Operation Statement), que el submarino final debe cumplir. El CONOPS incluirá las áreas de operaciones y la filosofía de operaciones. Este será el primer documento necesario del submarino al que más tarde se le añadirán el certificado de seguridad y los documentos técnicos de los sistemas del submarino.

El segundo documento, el certificado de seguridad, se centra en: asegurar la estanqueidad del submarino, tanto total como de cada sección; ser capaz de soportar los esfuerzos estructurales a los que estará sometido; la degradación por corrosión o erosión; y seguridad ante daños (colisión, incendio, explosión, fallo en el funcionamiento o un fallo estructural).

De ambas publicaciones podemos concluir que es de gran relevancia en un submarino: asegurar el buen funcionamiento de los equipos, especialmente los dedicados a la maniobra del submarino por ser críticos, protegiéndolos en locales estancos respecto al resto del vehículo; asegurar que le lleguen las órdenes a estos equipos desde el ordenador central; la redundancia de estos equipos o en su defecto, sistemas suplementarios que puedan satisfacer sus necesidades es vital; y por último, resulta de gran importancia asegurar la correcta división del submarino, de tal forma que pueda seguir navegando con alguna sección inundada. Asimismo, se le dotará tanto de sistemas de drenaje para achicar los espacios estancos como sistemas de control de incendios a bordo.

Para el diseño de tuberías se debe tener en cuenta las temperaturas a las que se va a encontrar, la posibilidad de que se generen cargas electrostáticas, y más importante, asegurarse de instalar válvulas de seguridad en los circuitos hidráulicos. En cuanto a los materiales a emplear para la construcción de la estructura se plantean el acero, el aluminio, fibras y polímeros. Además, se recuerda prestar atención a los comportamientos de los materiales utilizados tanto para la estructura como para componentes internos ante elevadas temperaturas que se podrían dar en caso de incendio.

En cuanto a la estabilidad y control, debe demostrarse que el submarino es capaz de volver a su posición inicial. Además, [5] establece que si este control depende de un ordenador, deberá haber un segundo ordenador secundario en caso de que ocurra un error en el primario, debiendo existir la posibilidad de bloquear los elementos de control en una posición en caso de error. Por otra parte, los

elementos de control deben dar “feedback” de que se ha cumplido la orden recibida al ordenador central, preferiblemente mediante sensores independientes.

En lo referente al recurso energético, deben existir recursos energéticos redundantes separados y asegurar la alimentación continua a los equipos vitales, teniendo en cuenta la transición de uno a otro con componentes como baterías auxiliares que aporten esta energía hasta que llegue la energía de la fuente secundaria. El circuito eléctrico debe ser capaz de seccionarse sin afectar al resto, además de estar protegido contra sólidos, líquidos o gases. Asimismo, los elementos críticos del circuito deberán tener un sistema secundario de refrigeración. Por último, debe haber un sistema de alarma en caso de que exista un nivel de batería crítico.

Pasando a la seguridad en el software, este debe estar protegido contra virus, código no autorizado, la instalación, y cambio o borrado de parte del software sin autorización, por lo que debe existir una justificación de medidas contra estos ataques y la efectividad de estas medidas.

En cuanto a la seguridad en navegación, lo más importante son los sensores que deben darle al submarino: el tiempo, la posición geográfica, rumbo, velocidad, profundidad y las condiciones medioambientales en las que se encuentra, así como detectar los contactos cercanos. Estos sensores por su importancia deben ser fiables y redundantes. Además, estos sensores servirán para controlar que los sistemas de dirección y propulsión están trabajando correctamente.

Con el objetivo de analizar los datos del submarino en caso de una colisión, [5] establece el requisito de que el submarino tiene que grabar los datos recibidos por los sensores, las decisiones de gobierno tomadas por el ordenador central y los movimientos realizados durante las últimas 12 horas de navegación.

Centrándonos ahora en la publicación [26], seguiremos el orden en el que ha sido redactada esta publicación, empezando así por la consideración de las condiciones medioambientales límite, de las que destacaremos los límites de densidad ($1,005$ a $1,035 \text{ t/m}^3$) y los parámetros máximos tolerables en lo referente a la estabilidad mostrados en la Figura 3-3. Otros principios de diseño serían dividir los servicios esenciales en dos subsistemas, de tal forma que tengan la mitad de la función cada uno de los sistemas, separados y con distintas fuentes de energía y servicios hidráulicos, además de poseer una reserva de emergencia.

Motion	Normal environment	Exceptional environment
Roll	$\pm 30^\circ$ Period: 10 seconds	$\pm 45^\circ$ Period: 10 seconds (during one hour)
Pitch	$\pm 10^\circ$ Pseudo-period: 1 minute	$\pm 15^\circ$ Pseudo-period: 1 minute (during one hour)
Heel	Maximum angle: 18° (during 10 minutes)	Maximum angle: 45° (during 1 minute)
Trim	Maximum angle: 30° (during 10 minutes)	Maximum angle: 45° (during 5 minutes)

Figura 3-3 Valores límite referentes a la estabilidad de submarinos (tomada de [26])

3.1.7 Equipamiento del AUV “payload”

El payload o carga útil del submarino son los equipos necesarios para llevar a cabo las misiones del submarino. Se intentará que los equipos que se lleven a bordo sean de fabricación española para tener mayor seguridad de la información y asegurar lo máximo posible la cadena de suministro. También se buscará emplear productos comerciales, es decir, que no sean específicos de la industria de defensa, pues estos pueden cumplir los requisitos con un precio más competitivo. Para organizar los equipos y enumerarlos en orden, dividiremos el payload en los siguientes grupos y subgrupos:

- 1) Recolección de inteligencia

- Sónar pasivo: en un principio, se plantea emplear el SOCILSUB, pero es un equipo caro y que tiene más capacidades que las requeridas para este AUV, pues lo que se busca es reducir peso y realizar una detección únicamente pasiva, es por ello, que se descarta este equipo. Sin embargo, se opta por crear un sistema omnidireccional de arrays de hidrófonos Smart Digital Hydrophone de SAES. Se busca que estos arrays formen en el submarino un sonar distribuido (PRS, Passive Ranging Sonar), lo que le aportará al submarino la capacidad de localizar contactos con mayor precisión.
 - Sensores de campo electromagnético SET-200 P-SAES, ya que se necesita crear un array con estos sensores para recoger la firma magnética de los buques de interés que naveguen por la zona.
 - Sensores ópticos e infrarrojos. En cuanto a este equipo, dado la gran variedad, se buscará resistencia a presión y agua, resolución de imagen y tener un bajo coste económico.
 - Sensores ELINT/COMINT. Para poder interceptar este tipo de inteligencia se plantea utilizar el PEGASO RESM CESM system – INDRA, empresa con la que ya trabaja la Armada para la mayor parte de sus equipos de guerra electromagnética.
 - Recolección de inteligencia para desembarco anfibio. En este aspecto, se necesita recabar información de la topografía del fondo marino, para ello harán falta sonares que levanten el fondo marino, pero sin afectar a la discreción del submarino. Se propone utilizar un array de sónares activos de baja potencia, es decir, un sonar de barrido lateral de apertura sintética. El sónar escogido es el HISAS1030 de la empresa Kongsberg, mientras que para el reconocimiento de costa se utilizarán los sensores electro ópticos.
- 2) Procesador de datos, identificación y seguimiento de blancos. Existe en España el SICLA-SAES, pese a que se decide prescindir de este equipo, pues por el momento no se tiene intención de que el submarino ataque a un buque en concreto con torpedos o misiles, ya que la labor del submarino es obtener información para contribuir a la generación de una base de datos y no identificar blancos a partir de una base de datos.
- 3) Control de plataforma
- Calculador de navegación por estima MARINSS para que el AUV conozca su posición mientras navega en inmersión y sepa que rumbo seguir para llegar a las coordenadas deseadas.
 - Control de estado de baterías UPC POWER. Este es un sistema que proporciona la misma empresa murciana NCPOWER que desarrolla baterías de litio a medida.
 - Antena GPS incluida en el equipo de comunicación satélite TSUB40-INDRA.
 - Sensores de navegación. Sonar activo de muy baja intensidad para detección de obstáculos cercanos para lo que se propone utilizar el sónar Vigilant Forward Look Sonar (Vigilant FLS) de la empresa Sonardyne.
 - Hardware controlador del estado de la plataforma y toma de decisiones.
- 4) Comunicaciones
- Comunicaciones satélite por la antena TSUB40-INDRA. Esta antena además de permitir la comunicación con la base cuenta con equipo GPS.
- 5) Armas/espacio multifunción. Este espacio es el destinado a llevar el equipo necesario para realizar acciones tácticas como el minado, despliegue de AUVs o incluso lanzamiento de misiles. Se dimensionará este espacio para llevar una carga de 10 minas MINEA-SAES en distintas versiones. Estas minas tienen el objetivo de negar la navegación a unidades enemigas.

3.1.8 Cuenta de control de peso y asignación de masas

Lo primero para poder dimensionar el submarino es hacer una estimación inicial del payload del submarino, a partir del cual se estimará el peso total. Para esto último, necesitaremos saber cómo está

repartida la distribución del peso, por lo que nos basaremos en la Tabla 3-1, que muestra la distribución de los pesos que estadísticamente suele tener un submarino convencional.

	Peso (%)	Espacio (%)
Carga útil	9	28
Estructura	43	-
Propulsión	35	56
Espacio para la dotación	4	11
Almacenaje	1	5
Lastre permanente	8	-

Tabla 3-1 Distribución de pesos en un submarino convencional (tomada de [4])

Para nuestro submarino, dado que no cuenta con dotación a bordo, se puede prescindir del peso asignado a almacenaje de provisiones y del espacio para dotación. Además, vamos a reducir el peso asignado al lastre permanente al 3 % y reducir el peso de la estructura al 33 % ya que la Tabla 3-1 está pensada para submarinos con una cota máxima de más de 300 metros, y nuestro AUV tendrá una cota de 200 metros. Por todo ello, le asignaremos a la carga útil un 29 % del peso total del submarino, y lo mismo ocurrirá con el espacio, quedando la distribución de peso y espacio como se muestra en la Tabla 3-2.

	Peso (%)	Espacio (%)
Carga útil	29	44
Estructura	33	-
Propulsión	35	56
Lastre permanente	3	-

Tabla 3-2 Distribución de pesos dentro del AUV (elaboración propia)

El siguiente paso será estimar el peso de la carga útil teniendo en cuenta los equipos que deban ser embarcados en el submarino como carga útil, asignándoles pesos para posteriormente calcular el peso total del submarino, quedando la relación que se muestra en la Tabla 3-3.

Equipo	Peso (kg)
Control de Plataforma	413
INS (MARINSS)	40
Comunicación satélite (TSUB-40 INDRA)	250
Sónar frontal	23
Procesador de información	100
Sensores Inteligencia	610
Hidrófonos pasivos (50 arrays de 9 hidrófonos HDS SAES)	200
Detector campo electromagnético (15×SAES-SET 200/P)	150
Sensor (ELINT/COMINT) Pegaso RESM CESM	150
Sensor óptico/IR	50
Sonar de barrido lateral	60
Armas	5285
MINEA-SAES (orinque)	613×5
MINEA-SAES (perfil bajo)	346×5
Lanzador de minas	490
Total	6308

Tabla 3-3 Relación de pesos de equipos del payload (elaboración propia)

En la Tabla 3-3 podemos ver que los equipos están divididos en las 3 ramas que componen el payload. Empezando por el control de plataforma, que en total pesa 413 kg, entre los que están el navegador inercial, la antena satélite y el sónar de detección de obstáculos, de los que tenemos conocimiento de cuanto pesan por sus fichas técnicas, [27], [28] y [29] respectivamente. Por otra parte, tenemos el hardware de control, en el que incluimos el CPU y todos los controladores (drivers) de los equipos. Dado que desconocemos este peso, haremos una estimación para sobredimensionarlo con un margen del 30% del peso del resto de equipos del control de plataforma, estableciendo el total en 100 kg.

Siguiendo con los sensores de inteligencia, estimaremos el peso del conjunto de hidrófonos, teniendo en cuenta que cada hidrófono pesa 0,39 kg según [30], que cada array estará compuesto por 9 hidrófonos, y que se espera colocar 50 arrays. Destacar que se redondeará este peso de 175 kg a 200 kg como compensación por los elementos necesarios para unir los arrays. Además, estimaremos valores del peso del resto de equipos: del detector de campo magnético SET 200/P, puesto que en [31] no se hace referencia a su peso, estableceremos un peso de 10 kg; del sensor Pegaso RESM/CESM, que es un equipo modular [32] y por tanto no se necesita entero, lo estimamos en 150 kg; del conjunto de sensores ópticos junto con sus respectivas cubiertas para protegerlos de las condiciones del océano, se estimará en 50 kg; y por último del sónar HISAS 1030, [33], de apertura sintética y que tendrá que instalarse en ambas bandas del submarino, se estimará en 60 kg.

Por último, dimensionamos el espacio multimisión. Para calcular este espacio, vamos a suponer que se emplea este espacio para llevar una bahía de minas. Aunque se espera que el submarino pueda embarcar todo tipo de minas, para realizar los cálculos se utilizará la mina inteligente de perfil bajo “MINEA” en sus versiones cilíndrica y mina de perfil bajo, de las que conocemos su peso gracias a la ficha técnica de SAES, [34]. Para estimar el peso de la bodega de minas, cogeremos 5 minas de cada una de ellas. Por otra parte, se ha estimado el peso que podría tener un posible lanzador de minas en 490

kg, todo ello, teniendo en cuenta los tanques de compensación que pudiesen hacer falta después de lanzar las minas, los sistemas hidráulicos y la sujeción de las minas.

De esta forma, podemos ver que el peso total estimado del payload es de 6,31 toneladas, que aplicando un margen del 20% recomendado en [4] por ser un desarrollo experimental que incluye tecnologías nuevas, el peso de cálculo del payload será de 7,57 toneladas. Haciendo caso a la distribución de los pesos mostrada en la Tabla 3-2, por la que el payload representa el 29%, estimamos el desplazamiento total del submarino en 26,10 toneladas, lo que significa que estará 10,9 toneladas por debajo de las 37 que puede transportar un A400M.

3.2 Desarrollo del Concepto

En este apartado y en los siguientes, partiendo de los requisitos definidos en la fase de “Estudio de Concepto”, se desarrollará el concepto. Es decir, buscaremos definir las características generales del submarino, que serán el punto de partida para una ingeniería de detalle posterior del AUV. A lo largo de los siguientes apartados, se hallarán las dimensiones iniciales para el submarino, sus formas y su configuración.

3.2.1 Limitaciones de las dimensiones

El primer paso a la hora de determinar los volúmenes y masas del submarino es determinar las limitaciones que tendremos respecto a este aspecto. Los datos que limitarán las dimensiones serán las dimensiones de la bodega de un A400M y las de un contenedor que podría ir en una unidad de la Armada.

A400M

Dimensiones bodega de carga 17,71 m x 4 m x 3,85 m (largo x ancho x alto) y peso máximo de 37t.

Contenedor de 20”

5,90 metros de largo, 2,35 metros de ancho y 2,39 metros de alto.

Contenedor de 40”

12,19 metros de largo x 2,44 metros de ancho x 2,59 metros de alto.

3.2.2 Estimación inicial de dimensiones

Para realizar una primera aproximación se empleará la estimación de su desplazamiento total y la base de datos elaborada de submarinos anteriores, tanto para AUVs como submarinos costeros. A partir del dato del desplazamiento en superficie anteriormente calculado, que es de 26,10 toneladas, se entra en las distintas gráficas hechas previamente, de las que se empleará la recta de regresión adecuada para obtener valores estimados de eslora, manga y velocidad.

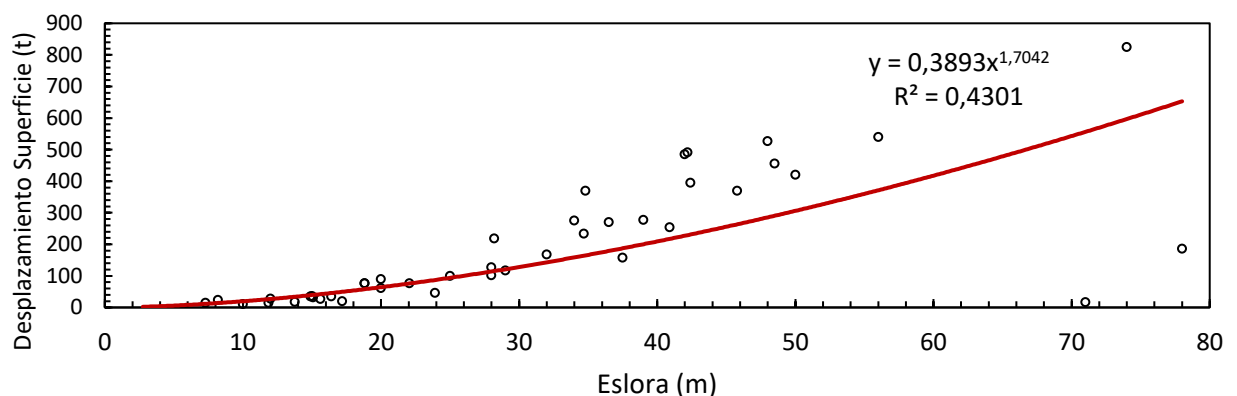


Figura 3-4 Relación Desplazamiento superficie/Eslora (elaboración propia)

Teniendo en cuenta el valor estadístico de la eslora respecto al desplazamiento en superficie calculado en la Figura 3-4, calculamos que para un submarino de 26,10 t se obtiene una eslora de 11,80 metros. Este tamaño es ideal para poder meter el AUV en un contenedor de 40" pero está muy lejos de cumplir los requisitos para transportarse en un contenedor de 20".

Una vez obtenida la eslora se calculará una estimación de la manga por medio de la recta de regresión calculada en la Figura 3-5, establecida gracias a la base de datos elaborada anteriormente. De esta forma, la manga de nuestro submarino será de 1,95 m, que se encuentra dentro de las dimensiones necesarias para poder ser transportado, tanto en el contenedor como en el A400M.

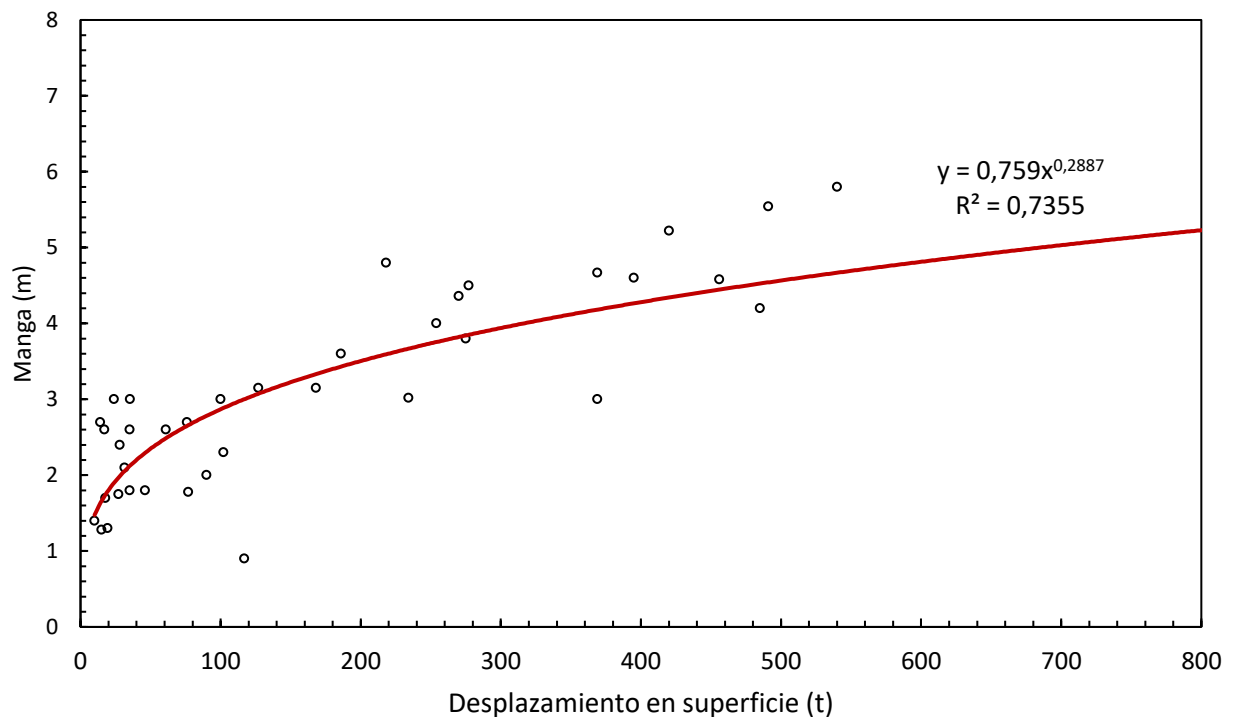


Figura 3-5 Relación Manga/Desplazamiento en superficie (elaboración propia)

Por último, se hará una estimación inicial de la velocidad a la que se desplazaría el AUV, aunque muy probablemente la velocidad resultante sea mayor que la que finalmente empleará el AUV, pues dado el rol del submarino se priorizará la autonomía a la velocidad. También destacar que esta velocidad es en inmersión, pues el AUV permanecerá sumergido la mayor parte del tiempo. Conociendo la eslora de 11,93 metros y la relación estadística que tiene con la velocidad en inmersión representada en la Figura 3-6, podemos concluir que la velocidad estimada del submarino en inmersión para realizar los cálculos será de 7,81 kn.

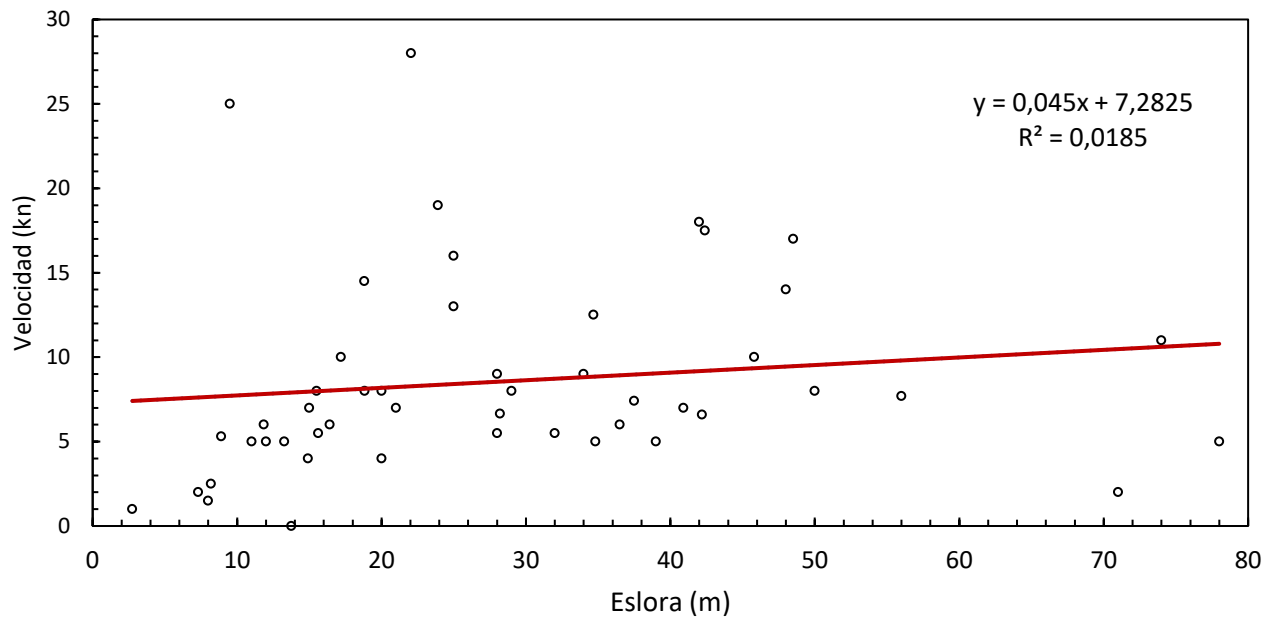


Figura 3-6 Relación Velocidad/Eslora (elaboración propia)

3.3 Desplazamientos y volúmenes

En esta fase, se calcularán las dimensiones de los cascos interno y externo, además de tanques de lastrado, y todas las características generales del submarino para su operatividad. No obstante, serán una referencia inicial pues en giros de la espiral más avanzados estas características se podrán modificar para un mejor diseño.

En nuestra propuesta inicial, el submarino será monocasco. Se toma esta decisión para reducir el peso, pues dado que va a ser un submarino de pequeñas dimensiones y está pensado para operar en zonas de litoral, no se sumergirá a grandes profundidades y su casco no tendrá que soportar grandes presiones. Es por ello, que el casco de presión tendrá directamente la forma hidrodinámica. Además, no se prevé que el submarino tenga que llevar consumibles líquidos, por lo que no son necesarios tanques que podrían ir ubicados en los espacios que existirían entre ambos cascos. Este casco será el encargado de contener la carga útil, y soportar la presión externa.

3.3.1 Explicación de conceptos

Existen distintos tipos de volúmenes a la hora de hablar de un submarino, empezaremos definiéndolos según el orden en el que se dimensionan. Para empezar, tenemos el desplazamiento de superficie, que es el debido al peso del submarino, y por tanto será igual al volumen de agua que desplaza cuando navega en superficie.

El segundo volumen que se calcula es el de los tanques de trimado, estos tanques se utilizan para que teniendo en cuenta las diferencias de densidad del agua o estado de carga que se predice que va a hacer frente el submarino a lo largo de su vida útil, el submarino mantenga el mismo volumen de desplazamiento tanto sumergido como en superficie, pues el volumen de estos tanques se inundará o vaciará para bien recuperar la flotabilidad perdida o bien aumentar el peso si aumenta el empuje.

La suma de los 2 anteriores volúmenes dará como resultado el volumen del casco de presión, que será el volumen físico del casco de presión bajo cualquier condición, como indica [4], este será el volumen del casco resistente único que se debe diseñar.

Para poder sumergir el anterior volumen, tenemos que tener en cuenta el ROB (Reserve Of Buoyancy), este representa el porcentaje de volumen del submarino que queremos que se encuentre fuera de la superficie cuando no esté en inmersión. Este volumen será el mismo que se debe inundar para que

el submarino pueda pasar a estar en inmersión. Es así, que se calculará el volumen de los tanques de lastre principales, y al sumar el volumen de estos tanques al volumen del casco de presión obtenemos el volumen de inmersión.

Por último, tenemos que tener en cuenta en el dimensionamiento del submarino aquellos espacios que o bien necesitan estar en contacto libre con el agua, o bien apéndices que beneficien a la hidrodinámica, pero no se quiere que añadan peso al submarino. Es por ello, que se le aplica un aumento de un porcentaje que suele ser del 15% según [4], obteniendo así, el volumen de forma del submarino, que es lo que se podría definir como el volumen físico total que ocupa el conjunto completo del submarino.

3.3.2 Dimensionamiento del submarino

En cuanto al sistema de trimado, consistirá en un tanque resistente que se encontrará a la altura del centro de carena en inmersión para no provocar momentos longitudinales al inundarlo o achicarlo. Este se llenará con agua del mar y achicará por medio de una bomba de alta presión. Por otra parte, el volumen destinado al tanque de trimado será mayor que el necesario para compensar la diferencia en la densidad del agua, pues lo que se pretende con este tanque es poder emplearlo para aumentar o disminuir el peso del submarino dado que también será el sistema por el cual el submarino pueda ajustar su cota mediante el achique e inundación de este tanque [6].

Los tanques de lastre principal serán más pequeños que lo dimensionado por lo explicado en el apartado anterior. Estos tanques se llenarán por la presión del agua externa y se vaciarán a cota periscópica, evitando así la necesidad de tener tanques de aire comprimido para soplarlos.

3.3.3 Volúmenes de cascos y tanques

La formulación empleada para definir los parámetros de este apartado se ha tomado de los autores de [4], ya que se considera la más idónea para el tipo de submarino que estamos diseñando, pues por análisis comparativo con otras publicaciones, estas fórmulas son las que nos ofrecen las mejores aproximaciones para nuestro proyecto. El primer dato con el que contamos para calcular los volúmenes de los cascos y de los tanques es el peso del submarino en superficie, debiéndose estimar este a partir del peso de la carga útil que se planea transportar. Esto es completamente lógico, pues se empieza a dimensionar el submarino en función del objetivo, que es el transporte de aquellos equipos necesarios para completar la misión, de esta forma, como se calculó en el apartado 3.1.8, el peso total del submarino será de 26,10 t. Al mismo tiempo, la reserva de flotabilidad que hemos establecido es del 10%, pues sólo saldrá a flote para su recogida, y así reduciremos su volumen y por tanto su detectabilidad.

Con los datos anteriores comenzaremos hallando el volumen necesario del casco de presión (casco interno) óptimo, teniendo en cuenta que su masa de desplazamiento en superficie es de 26,10 t y que esta masa tiene que ser igual al desplazamiento del casco de presión. Calculamos el volumen de agua desplazado utilizando la densidad media del agua de 1,0275t/m³ por medio de la ecuación (2).

$$Volumen_{Superficie} = \frac{Masa\ del\ casco\ de\ presión}{densidad\ del\ océano} = \frac{26,10}{1,0275} = 25,41 \quad [m^3] \quad (2)$$

El submarino tendrá un tanque de trimado como se definió anteriormente para lo que se empleará la ecuación (3) descrita en [4]. Dado que se trata de un AUV y no llevará dotación, podemos simplificar la ecuación (3) anulando los términos referentes al peso de dotación y sus pertrechos, quedando así la ecuación (4).

$$Volumen_{Tt} = \left(\frac{V_{casco\ de\ presión} \cdot (\rho_{max} - \rho_{min})}{\rho_{sw}} + \frac{W_T\ of\ Stores}{\rho_{sw}} \right) \cdot \frac{1}{\mu_{uso}} \quad [m^3] \quad (3)$$

$$Volumen_{Tt} = \left(\frac{V_{casco\ de\ presión} \cdot (\rho_{max} - \rho_{min})}{\rho_{sw}} \right) \cdot \frac{1}{\mu_{uso}} \quad [m^3] \quad (4)$$

Conociendo el volumen del casco de presión, la densidad media del mar que es de 1,0275 t/m³ y queriendo diseñar el submarino para que pueda ser utilizado en todos los océanos, se utilizarán las densidades del agua máxima de 1,03 t/m³ en zonas muy saladas y mínima de 1,00 t/m³ que se puede encontrar en entornos cercanos a desembocaduras de ríos. Mientras que para el factor de utilidad, el factor utilizado para representar la capacidad de los tanques de trimado de expulsar e inundar toda su capacidad de agua sin que se generen burbujas de aire o agua estancada, escogeremos 0,8 pese a que 0,95 es el recomendado en [4]. Sin embargo, cogeremos 0,8 dada la importancia que va a tener el tanque de trimado. Sustituyendo todos estos datos en la ecuación (4) tenemos el resultado presentado en la ecuación (5).

$$Volumen_{Tt} = \frac{25,89 \cdot (1,03 - 1,00)}{1,0275} \cdot \frac{1}{0,8} = 0,93 \quad [m^3] \quad (5)$$

El volumen del casco de presión será la suma del desplazamiento en superficie, al que le tenemos que añadir el volumen del tanque de trimado, pues es el único volumen que no permite el libre paso de agua con el mar. Representada esta igualdad en la ecuación (6).

$$V_{casco\ de\ presión} = Volumen_{superficie} + Volumen_{Tt} \quad (6)$$

Sustituyendo el desplazamiento en superficie, 25,41 m³, y el volumen del tanque de trimado, 0,93 m³ en la ecuación (6), tenemos que el volumen del casco de presión será de 26,33 m³. El siguiente volumen que se debe calcular es el que deben tener los tanques de lastre principales, cuyo lastre compensará el volumen del casco de presión que se encuentra fuera del agua cuando está en superficie. Esta igualdad está representada en la ecuación (7).

$$MBT.Vol = (PH\ Vol * ROB) / \mu_{uso} \quad (7)$$

Teniendo en cuenta que se ha determinado una reserva de flotabilidad del 10%, y sustituyendo los valores anteriormente calculados en la ecuación (7), tenemos que los tanques principales de lastre tendrán un volumen de 3,29 m³. Al sumar esta cifra a la del casco de presión, podemos conocer el volumen en inmersión que será de 29,62 m³.

El siguiente paso a tener en cuenta en el cálculo de los desplazamientos es el desplazamiento de forma. En este desplazamiento se tendrán en cuenta las partes exteriores del submarino que son las aletas de dirección del submarino y de sustentación, destacando que este submarino no tendrá una aleta central. Además, existen márgenes de espacio, en los que el agua entra y sale libremente, por lo que no afectarían a la flotabilidad del submarino, son ejemplo de ello las zonas de sonares y equipos desplegables. Para ello, aumentaremos el volumen de inmersión en un 10%, pues está planeado que el submarino tenga numerosos espacios libres para albergar los equipos largables, quedando un total de 32,59 m³.

3.4 Geometría preliminar

Según la documentación consultada para este fin [4], [7], [35], y [36], el diseño hidrodinámico de un submarino se divide en 3 cuerpos distintos, cuerpo de proa, popa y cuerpo central. Empezando por la proa, el objetivo es evitar el paso a flujo turbulento en esta parte, puesto que produciría ruido y limitaría en gran medida la operatividad del sonar según [6], [7] y [36]. El principio utilizado para evitar el paso a flujo turbulento es aumentar la presión del flujo, lo cual se consigue aumentando el coeficiente prismático de proa como se ve en la Figura 3-7, donde se ha ilustrado la distribución de presión del flujo alrededor del submarino.

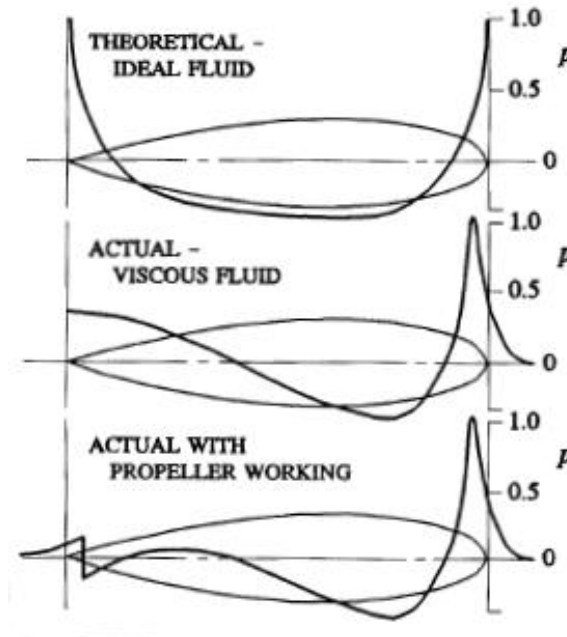


Figura 3-7 Distribución de presión sobre el casco de un submarino (tomada de [35])

Siguiendo con el cuerpo central, lo que se busca es reducir al máximo la resistencia por fricción. Esto se consigue reduciendo la superficie mojada. Es por ello, que se recomiendan secciones circulares, que dan un mayor volumen con una menor superficie mojada. Sin embargo, muy pocos submarinos emplean esta forma, pues no resulta operativa. Aun así, se emplea para esta parte del diseño el criterio de que la relación entre la eslora y la manga sea entre 6 y 7, pues se ha demostrado que los submarinos que guardan esta relación presentan una menor resistencia hidrodinámica como se puede apreciar en la Figura 3-8. Asimismo, se respaldada esta afirmación en [4] y [25].

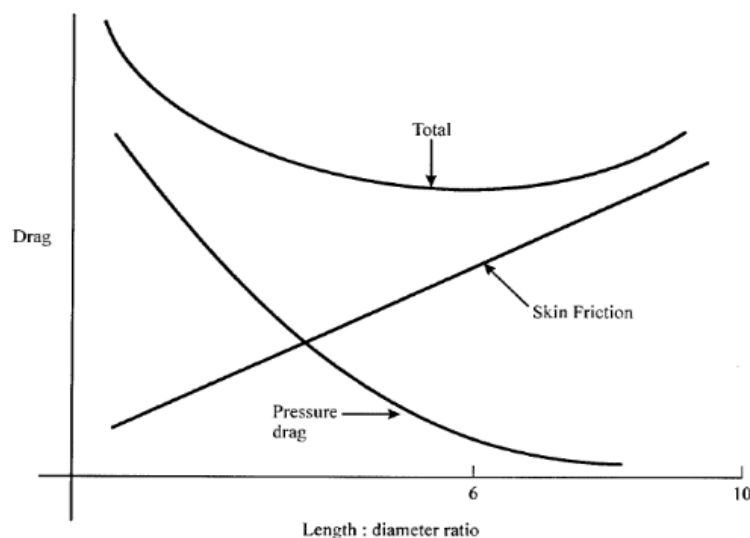


Figura 3-8 Resistencia al avance de un submarino en función del ratio eslora/diámetro (tomada de [25])

Por último, para el cuerpo de popa, lo más importante para esta parte es la interacción del flujo de agua alrededor del submarino (wake) con el propulsor. Es por ello, que los submarinos suelen emplear la ecuación (9) para definir la forma hidrodinámica de su popa aunque se profundizará más en el diseño de esta parte y su relación con el conjunto propulsor en el apartado de propulsión.

Según las fuentes [4], [6], [7] y [25], existen distintos tipos de cascos para submarinos en función del casco de presión y el casco hidrodinámico, representados en la Figura 3-9. Estos son:

- Casco simple (a): en el que no existe el casco hidrodinámico, los tanques de lastre se encuentran en los extremos y existen algunos espacios de flujo libre.
- Casco doble (b): cuando el casco hidrodinámico cubre completamente el casco de presión y los tanques de lastre se sitúan entre ambos cascos.
- Combinado (c): hay zonas de casco simple y de casco doble.
- Multicasco (d): hay un casco externo que cubre varios cascos de presión internos.

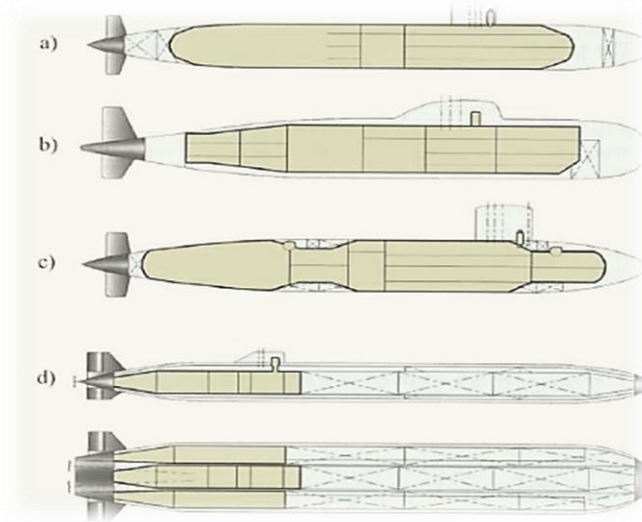


Figura 3-9 Configuraciones de casco en submarinos (tomada de [7])

3.4.1 Introducción al concepto gota de agua

En las referencias que hablan sobre la hidrodinámica de submarinos, [4], [6], [25] y [35] coinciden en que la mejor forma hidrodinámica para un submarino que navega en inmersión es la de gota de agua. Esta forma fue probada experimentalmente con el submarino “Albacore”. Desde entonces los submarinos actuales, que navegan la mayor parte del tiempo en inmersión, intentan aproximarse lo máximo posible a esta forma.

Los cascos hidrodinámicos de los submarinos suelen tener forma de gota de agua o tener un cuerpo paralelo central, mostrados en la Figura 3-10. Aunque la forma ideal es la de gota de agua, nosotros diseñaremos un submarino con cuerpo central paralelo pese a presentar una mayor resistencia, pues el submarino navegará a velocidades bajas y no será tan determinante. En segundo lugar, esta forma permitirá tener un mayor espacio interior, menor coste de producción y más flexibilidad para elaborar el diseño según [25].

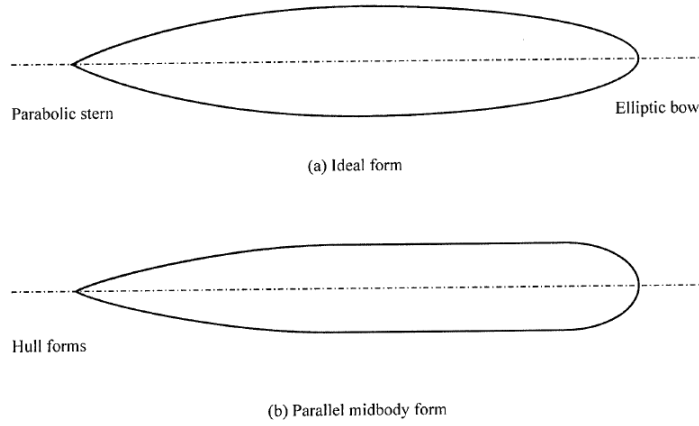


Figura 3-10 Forma de gota de agua y de cuerpo intermedio (tomada de [25])

A pesar de que nuestro submarino no tendrá completamente la forma de agua, sí que se empleará en la proa y en la popa. Esto es lo que pasa en todos los submarinos actuales. Es así, que se seguirán las ecuaciones explicadas en [35] para conseguir que los diseños se aproximen a la forma de gota de agua. Para la proa, el autor define un elipsoide con la función (8). Se observa como la función depende del parámetro exponencial n_f . Esta función define la coordenada y_f (en dirección de la manga) del elipsoide para todos los valores de x_f , que representa la coordenada en la dirección de la eslora, en función del diámetro (D) que se quiera tener y de la longitud de la eslora del cuerpo de proa L_f .

$$y_f = \frac{D}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_f} \right)^{n_f} \right]^{\frac{1}{n_f}} \quad (8)$$

Mientras que para la popa se define un paraboloide por medio de la función (9). Se observa como la función depende del parámetro exponencial n_a . Esta función define la coordenada y_a (en dirección de la manga) del elipsoide para todos los valores de x_f , que representa la coordenada en la dirección de la eslora, en función del diámetro (D) que se quiera tener y de la longitud de la eslora del cuerpo de popa L_a .

$$y_a = \frac{D}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{x_a}{L_a} \right)^{n_a} \right] \quad (9)$$

3.4.2 Los requisitos que debe cumplir el diseño del casco

Lo primero para decidir cómo debe ser el casco es pensar cuales son los objetivos que pretendemos conseguir, para ello nos basaremos tanto en los requisitos planteados en este TFG como en los requisitos para cascos de submarinos de Rusia, EEUU, Francia, Reino Unido, Australia y Alemania, reflejados en [25]. Es así, que los objetivos del casco hidrodinámico serán:

- La discreción, reduciendo el ruido producido. Esto se consigue manteniendo el flujo laminar alrededor de todo el casco, por lo que está directamente relacionado con la hidrodinámica.
- Reducir el rozamiento para mejor aprovechamiento de la energía, que está ligada con el requisito anterior.
- Evitar la producción de ruidos por paso a régimen turbulento en la proa, puesto que reduciría la capacidad del sónar como se explica en [7].
- Poder tener 2 ejes, lo que aumentará la supervivencia y la maniobrabilidad como se defiende en [7], pues no habrá personal en la zona de operaciones para repararlo.
- Que sea capaz de apoyarse en el fondo.

3.4.3 Definición de la forma del casco

Teniendo en cuenta las publicaciones consultadas y los requisitos del submarino proyectado, se llega a la conclusión de que la mejor forma del casco para el submarino tiene las siguientes características:

- Es un submarino monocasco con los tanques de lastre situados en sus extremos fuera o dentro de él, puesto que es un submarino de pequeñas dimensiones.
- El submarino tendrá 2 ejes para poder tener una mayor maniobrabilidad, además de aumentar así su supervivencia en caso de fallar uno de ellos, pues no tendrá personal para reparar los posibles problemas que pudiese tener el submarino.
- Dado que el submarino tendrá 2 ejes, el diseño de la popa será de 2 conos alargados. Este diseño ha sido ampliamente probado por los submarinos rusos, en los que predomina el diseño de 2 ejes precisamente para que pudiesen tener una mayor supervivencia. Podemos ver el diseño de popa descrito en la Figura 3-11. Es con este diseño con el que se pueden conseguir mejores rendimientos para un submarino de 2 hélices según [7].

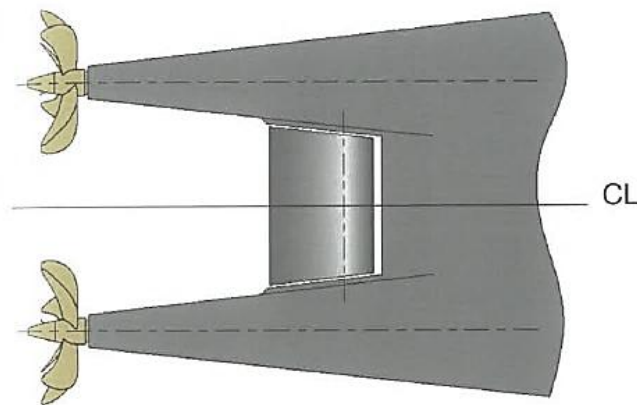


Figura 3-11 Forma de popa de submarinos rusos para 2 hélices (tomada de [7])

- El cuerpo de proa es en el que se alojará el sónar pasivo, que es el principal medio para detectar, localizar y clasificar contactos. Es por ello, que el objetivo del diseño de la proa será el de causar las menores perturbaciones posibles en el flujo de agua para causar el menor ruido posible y no mermar las capacidades del sónar.
- La forma transversal del cuerpo central será la de 2 círculos, en forma de “ocho horizontal” que se superponen parcialmente. Se escoge esta forma porque aporta varios aspectos beneficiosos para la operabilidad:
 - Reduce el calado, lo que mejora la maniobrabilidad en zonas de menor sonda [6].
 - Mejora la estabilidad del submarino al posarse en el fondo.
 - Aumenta la manga, aportando una gran estabilidad transversal al submarino en superficie.
 - Reduce el puntal, reduciendo la resistencia hidrostática al viraje.
 - Aumenta la superficie de la cubierta, lo que permite que pueda llevar un mayor número de turbinas para la producción de energía eléctrica.

3.4.4 Determinación de dimensiones longitudinales y transversales

Para poder conocer las dimensiones del submarino tenemos que tantear las dimensiones correctas para correlacionarlas con el volumen total buscado, permitiendo que excedan un poco este para darle más margen al peso empleado para el diseño del submarino. Después de aplicar las interrelaciones necesarias entre todas las dimensiones, se obtienen los resultados para todos los parámetros de los 3 cuerpos, anteriormente definidos, en los que se divide el submarino. Primero se estiman las dimensiones

lineales, tanto las longitudinales mostradas en la Tabla 3-4 Dimensiones longitudinales (elaboración propia) como las transversales exhibidas en la Tabla 3-5, y con estas obtenemos los volúmenes de cada uno de los cuerpos, estimados en la Tabla 3-6.

Dimensión	Valor (m)
Eslora del cuerpo central	6,50
Eslora del cuerpo de popa	4,10
Eslora del cuerpo de proa	1,00
Eslora total	11,60

Tabla 3-4 Dimensiones longitudinales (elaboración propia)

Dimensión	Valor (m)
Puntal/diámetro	1,5
Reducción de Manga	0,2
Manga total	2,8
Área de sección maestra	3,72

Tabla 3-5 Dimensiones transversales (elaboración propia)

Dimensión	Valor (m³)
Volumen de cuerpo de proa	2,92
Volumen de cuerpo de popa	4,83
Volumen de cuerpo central	24,16
Volumen total	31,91

Tabla 3-6 Volúmenes del AUV (elaboración propia)

3.4.5 Casco hidrodinámico resultante

Con las definiciones y condiciones impuestas en las formas del casco hidrodinámico y las dimensiones lineales estimadas en la Tabla 3-4 Dimensiones longitudinales (elaboración propia) y en la Tabla 3-5, realizamos la forma del casco hidrodinámico con Inventor ®, obteniendo el casco mostrado en la Figura 3-12.

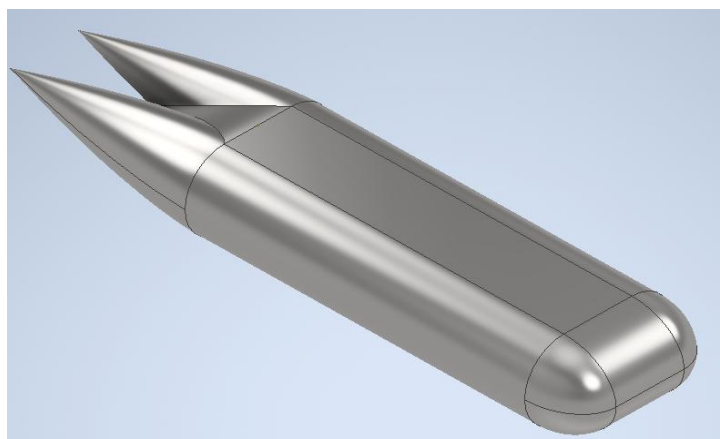


Figura 3-12 Casco hidrodinámico del AUV (elaboración propia)

Comenzando por la proa, se le ha dado una forma de gota de agua, empleando la ecuación (8) del elipsoide, utilizando los parámetros que se definen a continuación:

- Diámetro (D): 1,5 m
- Eslora de proa (L_f): 1 m
- Coeficiente del elipsoide (n_f), le hemos dado un valor de 2. Esto se debe a lo explicado en [36], pues a mayor valor de n_f , mayor será la resistencia experimentada por el submarino. Sin embargo, al aumentar n_f , aumenta el coeficiente prismático de la proa. Esto evita que el flujo laminar pase a turbulento en la proa, pues aplicando la ecuación de Bernoulli, aumenta la presión y por tanto disminuye la velocidad.

El cuerpo central tiene una sección definida por 2 círculos con un diámetro de 1,5 m que se superponen 0,2 m y que se extiende a lo largo de 7 metros. Este remata en 2 conos de 1,5 metros de diámetro correspondientes a cada uno de los círculos que forman el cuerpo central. Es por ello, que se produce la superposición de ambos conos en los 0,2 m centrales. Además, a cada uno de los conos se les ha querido dar una mejor hidrodinámica, para lo que se utiliza la ecuación (9), de manera que cada uno de los conos actuará como la popa de un submarino de un solo eje, concentrando el flujo hacia su hélice, empleando los parámetros que se definen a continuación:

- Diámetro (D): 1,5 m
- Eslora de proa (L_a): 4,1 m
- Coeficiente de parábola (n_a), lo hemos definido en 1,5

Para mejorar la hidrodinámica y no hacer que la popa central del submarino sea perpendicular, se hace una popa central prismática y con un perfil similar al que tendría la popa de un submarino mono eje, definida por la parábola de la ecuación (9). Además, este cuerpo evitará que se produzcan remolinos y dirigirá el flujo hacia las hélices. De esta forma, la popa queda definida por 2 figuras cónicas y una prismática con el coeficiente de parábola (n_a) de valor 1,5, con el mismo diámetro (1,5 m) y que se alarga 2 m. Finalmente, se puede apreciar la eficiencia de la forma hidrodinámica en el estudio realizado en el Anexo VI: Análisis CFD.

3.5 Superficies de Control

Pese a que el control dinámico no es de consideración a la hora de desarrollar un proyecto conceptual de un submarino, vamos a describir brevemente como se plantea que el AUV controle sus movimientos para tenerlo en consideración en los siguientes apartados. En este aspecto, como se describe en la documentación consultada [4], [6] y [35], el submarino tiene 6 grados de libertad, tres desplazamientos (avance, abatimiento y pesantez), que en inglés se corresponden con (surge, sway y heave) y puede rotar respecto a todos los ejes (balanceo, cabeceo y guiñada), que en inglés se corresponden con (roll, pitch y yaw). Es entonces cuando nos tenemos que plantear varias posibilidades para controlar estos movimientos, este es el tema que trataremos en este apartado. Sin embargo, hay algunos grados de libertad de los que no nos debemos ocupar en este apartado. Primero, el avance “surge” dependerá de la propulsión, estudiada en el apartado 3.6. Segundo, el abatimiento, que supone el desplazamiento lateral, es fruto del cambio de rumbo y de las corrientes, y no supone una preocupación a la hora de diseñar un submarino. Por último, según [4], no es usual controlar el balanceo o “roll” en submarinos porque a diferencia de los buques de superficie, en los submarinos cualquier momento es contrarrestado por el momento restaurador generado al estar el centro de gravedad por debajo del centro de flotación. Para controlar los movimientos restantes (yaw, pitch y heave), las posibilidades que se plantean son las que se explican en este apartado.

3.5.1 Control de rumbo (yaw)

El control del rumbo supone ser capaz de controlar la rotación del AUV respecto al eje vertical, conocida esta rotación como (yaw). Para conseguir este control, se podrían emplear diversas alternativas. Para empezar, que el submarino tenga timones de cola. Existen diversas configuraciones posibles para los timones de cola de un submarino, estudiados en [4], pasando por timones en cruz y timones en aspa, además de existir diseños complementarios a estos al añadirle a estos “flaps” que se despliegan en el momento de cambiar el rumbo y se contraen para navegar a rumbo constante, reduciendo así la resistencia al avance. Otra alternativa, es que las hélices dispongan de toberas dirigibles, estas toberas no sólo ayudarían al AUV a maniobrar, sino que también aumentarían la eficiencia de la propulsión y protegerían las hélices de golpes, especialmente importante a la hora de posarse en el fondo. Una última opción, sería el empleo de hélices empujadoras, como las que se pueden apreciar en la Figura 2-2 (b), del AUV chino.

Valorando todas estas posibilidades y pensando en las características operativas del vehículo autónomo, descartamos el uso de timones, pues al navegar en la mayoría del tiempo a una velocidad relativamente baja (del orden de 2 ó 4 nudos), necesitaremos un gran timón para que sea efectivo, suponiendo un aumento en el peso, en la resistencia al avance y en el volumen, afectando a la discreción contra sónares activos. Al mismo tiempo, descartamos el empleo de hélices empujadoras, por suponer: mayor complejidad del diseño, mayor peso y una fuente de ruido, además de no ser realmente necesaria. Por otra parte, la configuración de 2 ejes permite al AUV realizar giros incluso permaneciendo estático. Además, no se pretende que el AUV se tenga que desplazar con tanta precisión como para necesitar una hélice empujadora.

3.5.2 Control de profundidad (pitch y heave)

Es un requisito fundamental que el AUV sea capaz de mantenerse a una profundidad estable para llevar a cabo su misión. Es de destacar que los submarinos suelen ser inestables en este aspecto mayoritariamente cuando se acercan a la superficie por los efectos de succión producidos por las olas [4]. Además, a velocidades bajas, las fuerzas hidrostáticas tienen más importancia que las hidrodinámicas, resultando estas últimas despreciables. Es por ello, que el submarino debe estar correctamente trimado. En el caso de este proyecto, este objetivo es fácil de conseguir, pues el submarino no precisa de consumibles, no existen componentes interiores móviles y el movimiento de fluidos es mínimo. Además, la forma del submarino tiene una planta rectangular, por lo que la hidrodinámica ejercerá más resistencia a que se produzcan ángulos de pitch.

Para controlar la profundidad, las alternativas son muy diversas. Para ello, el movimiento que suelen realizar los submarinos es generar una componente de fuerza vertical por medio del ángulo de elevación (pitch). Para lograr el ángulo de elevación deseado, se podrían emplear los siguientes conceptos: generar momentos respecto al centro de flotación del submarino que generen este (pitch), pudiendo ser generados por el trasvase de agua entre tanques como se afirma en [6]: “En un submarino de baja velocidad en inmersión la estabilidad se obtiene por la estabilidad del peso”. La segunda posibilidad es emplear las toberas dirigibles en las hélices en conjunción con hidroplanos en la proa para facilitar el control, especialmente a velocidades bajas. Sin embargo, en este caso se optará por la opción de que el submarino controle su profundidad aumentando su peso o disminuyéndolo, admitiendo o expulsando agua del tanque de compensación, mientras que el “pitch” se mantendrá estable gracias a las fuerzas hidrostáticas, pues el centro de gravedad y el centro de carena estarán a la misma distancia de la popa, y únicamente podrían producirse pequeños momentos debido a pequeñas diferencias en la distribución de los pesos, cuyos efectos serían despreciables.

3.6 Estimación de la potencia propulsora

El primer paso que debemos dar para calcular la potencia propulsora será calcular la resistencia al avance del submarino en inmersión, que permitirá conocer la energía necesaria que el submarino

necesitará para navegar durante su vida operativa. Para ello, calcularemos esta resistencia con distintos métodos de predicción.

3.6.1 Basada en la experiencia

A continuación pasaremos a hacer una estimación inicial de la potencia necesaria para la propulsión siguiendo la ecuación (10) descrita en [4] para este fin. En esta ecuación introduciremos el volumen de forma calculado por medio del SW Inventor ® en la Figura 3-12 (33,61 m³), mientras que para el valor K_P , se explica en [4] que para un submarino con la forma ideal de gota de agua tendría un valor de 20 y que para otros este valor sería ligeramente mayor. Es por ello, que cogeremos un valor de 23, pues pese a que el perfil tiene forma de gota de agua, la planta no la tiene.

$$P_{eff} = K_P \cdot V_{Forma}^{0.64} \cdot U_{max}^{2.9} \cdot \frac{1}{1000} \quad [kW] \quad (10)$$

Como se puede observar, la ecuación (10) depende de la velocidad. Puesto que nos interesa analizar un rango de velocidades de entre (1-11 kn), elaboramos la Tabla 3-7 Potencia efectiva del AUV en función de la velocidad (elaboración propia) introduciendo cada velocidad en la ecuación (10).

Velocidad	Potencia efectiva (kW)
1	0,03
2	0,24
3	0,77
4	1,76
5	3,37
6	5,72
7	8,94
8	13,17
9	18,53
10	25,15
11	33,15

Tabla 3-7 Potencia efectiva del AUV en función de la velocidad (elaboración propia)

3.6.2 Cálculo por el método de Freud

Como se define en [6]: “La resistencia del agua, en inmersión, al casco del submarino se compone de la resistencia por fricción o roce y de la resistencia de forma”. Por un lado, la resistencia por fricción es aquella generada por el roce entre el agua y la chapa del casco, y dependerá de la rugosidad del casco. Por otro lado, la resistencia de forma es aquella que según [7], es la debida a la viscosidad del agua, y refleja la influencia de la forma del casco y los ratios utilizados.

Como también se define en [35], los métodos empleados para calcular la resistencia al movimiento del casco de un submarino son los mismos que los que se emplearían para un buque, por lo que procederemos a calcular la resistencia al avance en inmersión por el método de Freud explicado en [36], de donde sacamos las ecuaciones a emplear. Las resistencias según esta publicación siguen la distribución exhibida en la Figura 3-13.

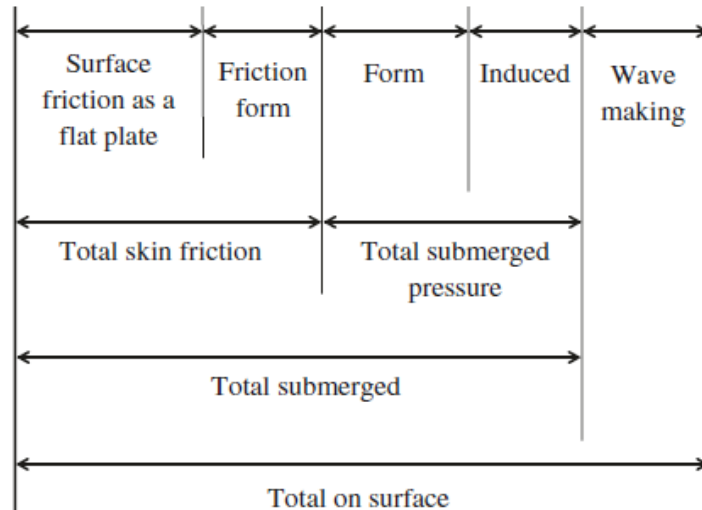


Figura 3-13 Desglose de Resistencia al avance (tomada de [36])

De esta manera calcularemos las diferentes resistencias a las velocidades a las que podría navegar el submarino en inmersión. Para ello, calcularemos los coeficientes de fricción para cada una. Empezaremos calculando el número de Reynolds con la fórmula (11) necesario para calcular los coeficientes de fricción.

$$Re = \frac{V \cdot L}{\text{Viscosidad cinemática}} \quad (11)$$

Para la Resistencia a fricción en superficie plana, que es la resistencia que tendría la superficie del submarino teniendo una superficie totalmente plana, utilizaremos el coeficiente adimensional de fricción de plancha plana por medio de la ecuación (12).

$$C_{flat} = \frac{0,067}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (12)$$

Además, calcularemos la resistencia friccional de forma del submarino. Esta es una corrección a la resistencia de la superficie plana, que calcularemos con el número adimensional C_{form} , que incluye la resistencia debida a la forma por no ser plana y que se calcula empleando la ecuación (13).

$$C_{form} = \frac{0,075}{(\log_{10} Re - 2)^2} \quad (13)$$

Por último, el coeficiente de forma, que es la resistencia debida a la diferencia de presiones y pérdida energética en el flujo de agua, será la porción K_p del coeficiente C_{form} . El primer valor lo calcularemos teniendo en cuenta el factor de forma, ε_{hull} , que según [36] y [7] se estima en función de la forma del casco asignándole los valores de la Figura 3-14, por lo que el valor de ε_{hull} , lo estableceremos en 4.

Description	ξ_{hull}
Teardrop shape	3
Modern submarine shape	4-5
PMB hull form	6

Figura 3-14 Coeficiente de casco (tomada de [36])

Una vez establecido el factor de forma, calcularemos el valor de la constante K_p según la ecuación (14) proporcionada en [36].

$$K_p = \varepsilon_{hull} \cdot \left(\frac{L}{D}\right)^{-1.7} \quad (14)$$

Por último, a estos coeficientes habría que sumarles los coeficientes de la resistencia debida a los apéndices. Sin embargo, puesto que el submarino no tendrá una aleta central ni apéndices como métodos de control dinámico, según el apartado 3.5 no añadiremos resistencia debida a apéndices. Por último, se calculará la resistencia de cada coeficiente utilizando la ecuación (15), para la que obtenemos los valores de superficie y volumen del modelo de la Figura 3-12 realizado en Inventor ® anteriormente, correspondiéndose estos valores con 76,7 m² para la superficie y 33,61 m³ para el volumen de forma.

$$R_{Total} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C \cdot Vol^2 \quad (15)$$

Con las ecuaciones (12), (13), (14) y (15), realizamos las tablas de cada resistencia al avance a distintas velocidades, exhibidas en el Anexo VII: Resultados de resistencia al avance por el método de Freud. Como se puede apreciar en las tablas del referido anexo, para cada resistencia se calcula la potencia efectiva necesaria para cada una de ellas, calculada como el producto de la fuerza de resistencia por la correspondiente velocidad de avance. Destacar, que esta es la potencia que debe transmitir el submarino al fluido para poder avanzar. Finalmente, sumando la potencia efectiva necesaria para hacer frente a cada una de las resistencias obtenemos la potencia efectiva total necesaria para cada velocidad de 1 a 11 kn mostradas en la Tabla 3-8.

Velocidad (kn)	Potencia efectiva	
1	40,97	W
2	289,53	W
3	911,82	W
4	2,06	kW
5	3,88	kW
6	6,52	kW
7	10,10	kW
8	14,76	kW
9	20,64	kW
10	27,86	kW
11	36,55	kW

Tabla 3-8 Potencia efectiva para velocidades de 0 a 11 kn (elaboración propia)

Comparando ambos métodos, podemos ver que los valores obtenidos son muy similares, aunque seguiremos realizando los cálculos con los valores obtenidos por el método de Freud por ser estos más altos y por tener en cuenta la forma del submarino.

3.6.3 Potencia de propulsión

Lo siguiente será conocer la fuerza que debe ejercer el motor para hacer frente a esta potencia necesaria. Para ello, tendremos en cuenta el rendimiento hidrodinámico del propulsor y del casco, que lo estableceremos en 0,6, que suele ser el rendimiento hidrodinámico de un submarino con dos ejes según [4]. Respecto a este aspecto, hemos establecido que debería ser de dos ejes para tener una mayor maniobrabilidad, aunque afectará en gran medida a la eficiencia energética, sin embargo, tenemos varios argumentos para mantener esta propulsión. Para empezar, las dimensiones del AUV son relativamente pequeñas, por lo que dotarlo de 2 propulsores para la maniobra y que pudiesen tener una tobera direccionable evitaría la necesidad de contar con un timón como ya se defendió en el apartado 3.5.1, lo

que reducirá en gran medida la resistencia al avance. En segundo lugar, el AUV busca tener una mayor maniobrabilidad debido a las misiones para las que estará destinado, moviéndose en zonas angostas, pues con esta configuración podría incluso girar sobre sí mismo. Por último, el hecho de contar con 2 conjuntos independientes de motor, eje y hélice, favorece tener sistemas redundantes en caso de que algo pudiese fallar. Por otro lado, estableceremos el rendimiento de transmisión en 0,98 ya que apenas habrá pérdidas, pues no tendrá una caja de cambios, evitando así pérdidas de eficiencia y más importante de todo, evitar la generación de ruido, ya que como explicamos anteriormente en el apartado 3.1.4, la discreción en los submarinos y en especial para este, es su característica fundamental. Teniendo todos estos datos, podemos calcular la potencia que debe dar cada motor, que es la potencia que tiene que ejercer cada motor para poder alcanzar la potencia efectiva requerida, relacionadas ambas en la ecuación (16).

$$P_{Motor} = \frac{P_{eff}}{\eta_0 \cdot \eta_H \cdot \eta_S \cdot N_{ejes}} \quad [kW] \quad (16)$$

Realizaremos con esta relación la Tabla 3-9, que relaciona la velocidad con la potencia que debe dar cada motor para poder alcanzarla, con lo que podremos dimensionar los motores, que posteriormente seleccionaremos en el apartado 3.8.1, y el sistema de propulsión.

Velocidad (kn)	Potencia motor (W)
1	34,84
2	246,20
3	775,35
4	1752,30
5	3300,71
6	5539,97
7	8586,16
8	12552,76
9	17551,10
10	23690,66
11	31079,31

Tabla 3-9 Potencia motor para velocidades de 0 a 11 kn (elaboración propia)

3.7 Gestión de la energía

Lo siguiente que haremos será calcular el número de baterías que serán necesarias, estas las calcularemos en función de una distancia en millas que el submarino debe ser capaz de recorrer con sus baterías cargadas y sin necesidad de volver a recargarlas. Estableceremos esa distancia en 200 millas náuticas, ya que una aeronave o un buque podría aproximarse a esa distancia de costa sin entrar en aguas territoriales y con baja probabilidad de ser detectado. De esta forma, deberemos tener en cuenta 2 consumos distintos del submarino durante ese tránsito. Por una parte, tenemos el consumo debido a la propulsión, y por otra parte tenemos el consumo debido a la carga útil.

3.7.1 Consumo de “hotel”

El consumo de “hotel” se define en [4] como el consumo debido a los equipos necesarios para el correcto funcionamiento del submarino. Este consumo dependerá de los equipos que estén funcionando en un momento determinado. Así que lo importante es saber lo que consume cada equipo de forma individualizada, como aparecen en la Tabla 3-10. Los consumos de estos equipos aparecen en su ficha técnica y en los que no, los hemos estimado. Destacar que estos equipos son los que se definieron anteriormente en los requisitos en el apartado 3.1.7.

Equipo	Consumo (W)
Control de Plataforma	
Navegador inercial	25
Antena satélite	120
Ordenador Central	120
Sónar de visión frontal (FLS)	50
Carga útil	
Sensores Optoelectrónicos	20
Hidrófonos	100
Medidor de influencias	50
Minador	200
Sónar de barrido lateral (SSS)/(SAS)	150
ELINT/COMINT (Pegaso RESM/CESM)	80
Propulsión	
Bomba tanque de compensación	630
Bomba de servo	120
Circuito refrigerante	40

Tabla 3-10 Consumo de equipos embarcados (elaboración propia)

Los equipos que se exponen en la tabla anterior serán todos los que necesita el AUV para navegar de forma segura y completar su misión. Están clasificados en función de su rama en el árbol de elementos del AUV.

Comenzamos con el control de plataforma, necesario para la navegación y posicionamiento. El navegador inercial, en este caso se ha elegido el “Marinss series” de la empresa exail, con un consumo de 25 W según su ficha técnica [27]. Asimismo, la antena satélite para comunicación, como corrección de posición, TSUB-40KU de Indra, tiene un consumo de 120 W según [28]. Para poder procesar la información y ejecutar acciones, será necesaria una tarjeta gráfica para la que suponemos un consumo de 120W, pues es el consumo promedio de un portátil y la capacidad de computación requerida para el AUV no va a ser excesiva. Por último, para poder evitar obstáculos en inmersión, necesitará un sonar frontal (FLS), el seleccionado es el Vigilant Forward Look Sonar (Vigilant FLS) de Sonardyne, [29].

Pasamos ahora a explicar los equipos de la carga útil. Los sensores optoelectrónicos estarán alojados en una boya que se enviará a superficie para obtener imágenes discretamente de contactos y de puntos de interés. Se estima la cifra de 20 W, teniendo en cuenta que el consumo de una cámara GoPro es de 6/7 W. En cuanto al sónar pasivo principal, está planteado que este sea un array o varios arrays de hidrófonos de la española SAES, “SDH (Hidrófono digital inteligente), y pese a que SAES no da información del consumo en su ficha técnica [30], estimamos el consumo del total de hidrófonos en 100W. Para obtener la firma electromagnética de los buques, dotamos al submarino de un medidor de influencias, el Set-200-P de SAES, que se estima que consumirá 50 W. Hemos denominado minador al sistema o tambor cuya función será la de liberar las minas para que estas se sitúen en el fondo, estimando que para ello haría falta un motor eléctrico de 200 W. Para realizar el reconocimiento del fondo marino emplearemos un sonar de barrido lateral de apertura sintética, en este caso para realizar los cálculos tenemos el HISAS 1030 de Kongsberg, del que no tenemos su consumo en la ficha técnica [33] pero lo estimamos en 150W. Además, para poder realizar ELINT y COMINT utilizaremos algunos módulos del sistema PEGASO RESM/CESM de Indra, para el que hemos estimado su consumo en 80W.

Por último, pasamos al apartado de propulsión, en el que nos referimos a todos los equipos encargados de realizar funciones vitales para el submarino además de mover las diferentes superficies de control. Para empezar, tenemos la bomba del tanque de compensación, esta será la encargada de

admitir y expulsar agua del tanque de compensación mientras el submarino se encuentra en inmersión. Incorporar y expulsar agua de este tanque será necesario tanto para posar el submarino sobre el fondo como para compensar la pérdida o ganancia de flotación al cambiar la densidad del agua en la que se mueve el submarino. Para ello, la bomba ha de ser capaz de expulsar agua en su cota máxima, por lo que calcularemos la potencia de la bomba teniendo esto en cuenta, empleando la ecuación generalizada de Bernoulli (17).

$$\frac{P_1}{\rho \cdot g} + \frac{v_1^2}{2g} + h_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (17)$$

En el cálculo, lo único que nos importará será la diferencia de presiones entre el tanque de compensación y la presión del océano a una cota de 200 m, pues la variación en la velocidad y en la altura son mínimas, y nulas respecto a la diferencia de presiones. Sabiendo que la ecuación para calcular la potencia de la bomba es (18), sustituimos la altura por la profundidad de 200m, el rendimiento de la bomba por un valor de 0.8 y al caudal le asignamos un valor de 0.25 l/s, obteniendo una potencia de la bomba de 630 W.

$$P_{Bomba} = \frac{\rho \cdot g \cdot h_{Bomba} \cdot Q}{\eta_{Bomba}} \quad (18)$$

3.7.2 Consumos en situaciones operativas

Como se ha descrito en apartados anteriores, el submarino se enfrentará a distintas situaciones operativas. Para empezar, se definen 3 principales: tránsito, recarga y operaciones. Es esta última la que se subdivide en 3 operaciones distintas, que son ISR, minado y reconocimiento del fondo marino. Para cada una de estas situaciones se estima un porcentaje de consumo de cada equipo. Este porcentaje representa la fracción de tiempo que ese equipo será utilizado respecto al tiempo total que el submarino está en esa situación operativa. En la Figura 3-15, se puede ver el porcentaje asignado a cada equipo en cada una de las situaciones y el consumo promedio estimado en cada caso.

Consumos del payload		Promedio de uso en situaciones				
Equipo	Consumo (W)	Navegación	Zona de recarga	Zona de operaciones		
				inteligencia	minado	Recon. Fondo
Control de Plataforma						
Navegador inercial	25	100%	0%	0%	100%	100%
Antena satélite	120	5%	3%	30%	5%	5%
Ordenador Central	120	100%	100%	100%	100%	100%
Sónar de visión frontal (FLS)	50	20%	0%	0%	100%	100%
Carga útil						
Sensores Optoelectrónicos	20	0%	0%	40%	0%	0%
Hidrófonos	100	100%	0%	100%	100%	100%
Medidor de influencias	50	10%	0%	60%	20%	20%
Minador	200	0%	0%	0%	10%	0%
Sónar de barrido lateral (SSS)/(SAS)	150	0%	0%	0%	80%	100%
ELINT/COMINT (Pegaso RESM/CESM)	80	0%	0%	20%	0%	0%
Propulsión						
Bomba tanque de compensación	629,99	10%	0%	0%	5%	5%
Bomba de servo	120	30%	0%	20%	100%	100%
Circuito refrigerante	40	100%	0%	0%	100%	100%
		405,00	123,60	334,00	642,50	652,50

Figura 3-15 Consumo en las situaciones operativas (elaboración propia)

Como se puede apreciar en la tabla, el AUV cuando se encuentra en tránsito empleará el 100% del tiempo los sistemas relacionados a la navegación, se empleará la comunicación satélite en intervalos breves, y los sónares activos únicamente en el momento de fondear tanto para entrar en la zona de recarga como para navegar en sondas bajas en la zona de operaciones. También se aprecia que se emplean poco los sistemas de cambio de profundidad y de rumbo durante los tránsitos quedando una carga de 407,24 W.

En la situación de recarga, únicamente se empleará el ordenador del AUV para “mantenerse con vida”, y realizará breves comunicaciones por medio del satélite, quedando un consumo promedio de 123,6 W.

Por último, para la zona de operaciones, cuando realice operaciones de inteligencia posado en el fondo marino, el consumo será del ordenador central y de los sensores empleados para realizar las operaciones de inteligencia, siendo el consumo de 334 W. Cuando realice operaciones de minado, se emplearán los medios de navegación, incluyendo todos los sensores que permiten tener un mayor conocimiento del entorno y los contactos cercanos. Asimismo, todos los sistemas dedicados a cambio de rumbo y profundidad estarán activos para tener una mayor maniobrabilidad y evitar obstáculos. Sin embargo, es de destacar que la bomba de compensación apenas se empleará, esto es debido a que el AUV se moverá durante todo este tiempo dentro de la zona de operaciones, por lo que no se esperan cambios en la densidad del agua, pues el objetivo de esta bomba es compensar estos cambios de densidad. Al mismo tiempo, en este modo de operación, seguirá realizando inteligencia a contactos cercanos, tanto para tomar decisiones para mantener la discreción como para recoger inteligencia, quedando un total de 664,63 W. Por último, cuando se realicen operaciones de reconocimiento del fondo marino, las condiciones son muy similares a las de minado, pero no se utilizará el minador y se empleará en mayor medida el sónar de barrido lateral, quedando un consumo de 674,62 W.

3.7.3 Consumo de propulsión

Este será el consumo energético utilizado por la planta propulsora. Buscamos que el tránsito requiera el menor consumo eléctrico posible. Es por ello, que debemos realizar una gráfica para determinar cuál será la velocidad óptima a la que el submarino debe realizar el tránsito y así poder calcular la carga necesaria de baterías. Esta velocidad óptima dependerá de la distancia de autonomía que se le quiera dar al AUV, pues hay una componente en el consumo de tránsito que es la “carga de hotel”, estimada en 407,25 W, explicada en el apartado anterior.

Esta distancia de autonomía la estableceremos teniendo en cuenta que el AUV se ha de desplegar lejos de la costa enemiga, teniendo en cuenta que las aguas territoriales según la Convención de Ginebra son de 12 MN desde la línea de costa y que queremos mantener la discreción de la plataforma lanzadora. También esta distancia será la distancia máxima a la que pueden estar 2 zonas de recarga, lo que limitará su movilidad. Estableceremos esta distancia en 200 MN.

De esta forma, obtenemos la Figura 3-16, en la que se muestra la energía que debe ser almacenada en kWh para recorrer esa distancia a distintas velocidades (línea verde), mostrando la potencia requerida en la propulsión para las distintas velocidades (línea roja) y cómo le afecta la carga de hotel estimada. Observando el gráfico, la velocidad óptima para desplazarse es de 2 nudos y será a la que se moverá el AUV, sin embargo, para realizar los cálculos de energía vamos a establecer como velocidad mínima 5 nudos, pues en algunas situaciones el submarino tendrá que hacer frente a corrientes. Asimismo, este aumento de capacidad energética proporcionará una mayor flexibilidad a las operaciones. Esto supone que la capacidad de baterías se establece en 280,35 kWh, que con un margen del 20 % para asegurar el cumplimiento de los requisitos se establece en 336,42 kWh.

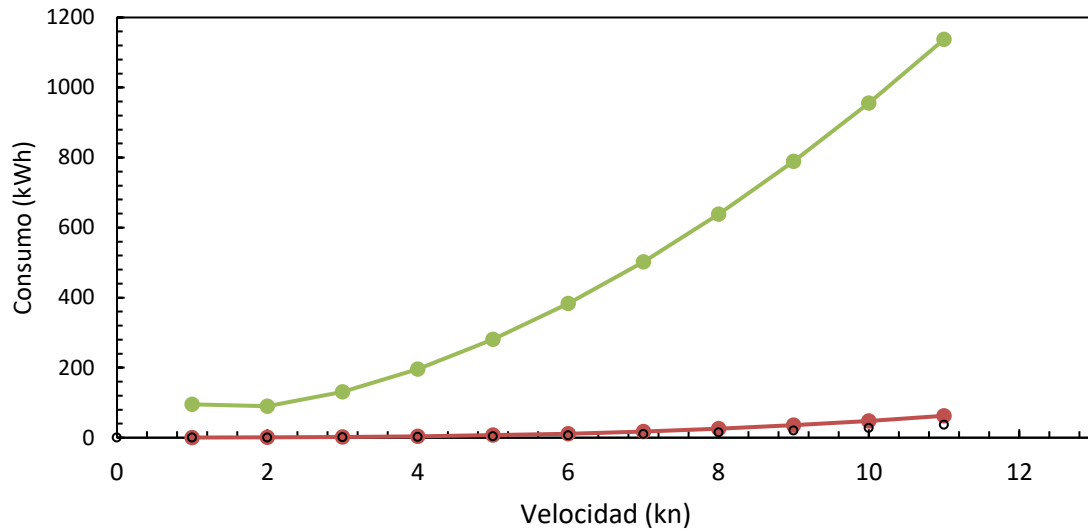


Figura 3-16 Consumo respecto a velocidad (elaboración propia)

3.7.4 Producción de energía mareomotriz

Para producir la energía eléctrica el AUV, como ya se ha adelantado en apartados anteriores, emplea una planta eléctrica de energía mareomotriz, así que, vamos a estimar la energía que podría producir esta planta eléctrica. Para ello, vamos a coger los datos de una región desfavorable para este fin, pero de interés estratégico nacional como es el Mar Mediterráneo. Basándonos en los datos de la Figura 3-1, cogemos como velocidad mínima de la corriente 0,7 m/s, con ello podemos calcular la energía del agua por medio de la ecuación (19) mostrada en [23] para este propósito.

$$P = \frac{A}{2} \cdot \rho \cdot u^3 \quad (19)$$

Siendo P, la potencia de la corriente y A el área de la turbina, en el caso de nuestro AUV, vamos a estimar que la superficie de las turbinas, A, es de un total de 7 m², así obtenemos que la energía de la corriente es de 1233,51 W. Obviamente, la turbina no será capaz de obtener toda la energía de la corriente, deberá tener un rendimiento energético determinado, que en ningún caso será del 100%.

Para calcular el rendimiento de la turbina, como se demuestra en [23], el límite de Betz establece que el coeficiente energético para una turbina puede ser como máximo del 59,3%. Es por ello, que nosotros para realizar los cálculos estableceremos un rendimiento del 40%. De esta forma, podemos estimar que la energía producida por el array de turbinas podría ser de 493,4 W. Además, debemos recordar que el consumo calculado para la situación de recarga es de 123,6 W, por lo que la recarga efectiva de las baterías será de 369,81 W.

3.7.5 Selección de baterías

Para seleccionar las baterías que va a llevar el submarino tenemos múltiples opciones, por lo que a continuación se presentan los criterios que vamos a seguir para la selección de las baterías en orden de prioridad:

1. No tener necesidad de mantenimiento, ya que el AUV se desplegará durante tiempos muy prolongados en territorio hostil sin presencia de dotación, por lo que no es tolerable que necesiten mantenimientos.
2. Reducir al máximo el peso de las baterías.
3. Resistencia a bajas y altas temperaturas, ya que al prescindir de dotación intentará ajustarse al máximo posible la capacidad de refrigeración y calefacción.

4. Resistencia a periodos de carga y descarga incompletos, así como facilidad para soportar cambios en el consumo energético.
5. Tener un largo periodo de vida.
6. Tener una autodescarga muy baja, ya que es un recurso esencial y no podemos permitirnos malgastarlo.

Primero, haremos una breve descripción de los distintos tipos de baterías que barajamos poner en nuestro submarino. Estas son las características para baterías AGM y baterías de gel según [37]:

- Baterías AGM: AGM es la abreviación de Absorption Glass Mat, tecnología moderna en la fabricación de baterías donde el ácido se absorbe mejor y más rápido por placas de plomo de la batería. Sus ventajas son:
 - Mayor eficacia de masa activa debido a la mejor absorción del ácido.
 - Mayor vida útil a causa del desprendimiento mínimo del material activo por el diseño de la batería.
 - Mayores valores de arranque en frío.
 - Libre de mantenimiento.
 - A prueba de derrames y fugas.
 - Compatible con equipos electrónicos sensibles.
- Baterías de gel: las baterías de gel, que concretamente son un tipo de batería de plomo-ácido selladas, utilizan una tecnología de gelificación con el objetivo de mantener el electrolito en su lugar. El gel consiste en una solución de sulfúrico y sílice, que se convierte en una sustancia espesa y gelatinosa durante la carga. Las baterías de gel presentan una serie de ventajas:
 - Baja tasa de autodescarga. Gracias a esto se puede almacenar energía durante largos periodos de tiempo.
 - Larga vida útil. En comparación con otras baterías, estas tienen una vida útil más larga.
 - Resistencia a las vibraciones. Están diseñadas para resistir vibraciones y sacudidas.
 - Alta capacidad de corriente. Las baterías de gel pueden suministrar una gran cantidad de energía en un corto período de tiempo.
 - No requieren mantenimiento.
 - Seguridad. Las baterías de gel son seguras de usar en interiores o en espacios confinados debido a su diseño sellado.

Las ventajas que suponen las nuevas baterías de Litio-Hierro-Fosfato (LiFePO_4) son:

- 1) Alta Seguridad: las baterías LiFePO_4 son conocidas por su alta estabilidad térmica y química, lo que las hace más seguras en comparación con otras baterías de litio, como las de cobalto o manganeso. Su estructura cristalina reduce el riesgo de descomposición y formación de dendritas, lo que a su vez disminuye la probabilidad de incendios o explosiones según [38].
- 2) Estabilidad Térmica: una de las características destacadas de las baterías LiFePO_4 es su excelente estabilidad térmica. Son capaces de soportar altas temperaturas sin perder rendimiento o sufrir daños significativos, lo que es una ventaja en climas calurosos o aplicaciones de alta potencia según [38].
- 3) Larga vida útil: las baterías LiFePO_4 tienen una vida útil más larga que otras tecnologías de baterías de iones de litio debido a su estabilidad electroquímica. Además, tienen una excelente resistencia al ciclo de carga y descarga, lo que las hace ideales para aplicaciones que requieren una larga durabilidad según [39].
- 4) Alta eficiencia en ciclos profundos de descarga: las baterías LiFePO_4 son eficientes incluso con ciclos de descarga profunda, lo que las hace adecuadas para aplicaciones como vehículos

eléctricos donde es necesario aprovechar casi toda la capacidad de la batería sin afectar su rendimiento o vida útil según [39].

3.7.6 Dimensionamiento de baterías

Una vez que sabemos la capacidad energética que se quiere tener, 336.42 kWh, calculada en el apartado 3.7.3 y que sabemos que las baterías que va a utilizar el submarino son de LiFePo4, nos disponemos a realizar el cálculo del número de baterías que son necesarias para cumplir este requisito y estimar el peso total de las baterías. Para realizar este cálculo, tendremos en cuenta que la capacidad de descarga de una batería de litio suele estar entre el 80% y el 100%. Por otra parte, para realizar los cálculos hemos cogido de ejemplo la batería “LFP-Smart 25,6/200a” de la empresa Victron, que pesa 39 kg y trabaja a 25.6 V, aportando 200 Ah, que es lo mismo que decir que aporta 5.12 kWh. Realizamos el siguiente cálculo:

$$N^{\circ} \text{ de baterías} = \frac{\text{Energía necesaria}}{\frac{\text{Energía}}{\text{batería}} \cdot \text{Porcentaje de descarga}} \quad (20)$$

Sustituyendo los valores en la ecuación con un porcentaje de descarga del 80%, y redondeando al mayor entero, tenemos que son necesarias 83 baterías, que pesando 39 kg suponen un total de 3,237 t. Lo que significa un 35% del peso asignado a la propulsión (9,14 t) y un 12% del peso total del submarino (26,10 t).

3.7.7 Cálculo de tiempos, operatividad y eficiencia energética

Habiendo cumplido el primer requisito para el cálculo de la energía almacenada, vamos a por el segundo, que es comprobar si esa energía es óptima para cumplir los requisitos. En este apartado comprobaremos si es mejor aumentar esta capacidad o si por el contrario compensa sacrificar autonomía para tener un vehículo más eficiente. Por otra parte, también comprobaremos las 2 estrategias energéticas posibles:

1. Diseñar un AUV con una capacidad de baterías menor, pero con capacidad de obtener energía mareomotriz dentro del área de operaciones, lo que le permitirá la independencia total de otras unidades para poder operar y mayor discreción.
2. Diseñar un AUV con una gran capacidad de baterías para ser desplegado, dirigirse a la zona de operaciones, realizar la misión y retirarse de nuevo a una zona segura para ser recuperado y recargado por una unidad.

Para decidir estas cuestiones, vamos a realizar cálculos de autonomía y estimación de pesos de los distintos diseños, para ello comenzaremos con la estrategia 1. Partiendo de los consumos para cada una de las operaciones que puede realizar el AUV, la producción estimada de energía mareomotriz, calculada en el apartado 3.7.4, y la capacidad energética total propuesta para el AUV es de 336,42 kWh, calculada en el apartado 3.7.3, se calculan los tiempos que el AUV puede permanecer en la zona de operaciones. Además, es de destacar que uno de los factores determinantes para calcular el tiempo de permanencia en la zona de operaciones es lo lejos que situemos la zona de recarga. Aunque independientemente de esta distancia, el tiempo de recarga siempre será el mismo, estando este estimado en 37,9 días, pues este tiempo únicamente dependerá de la capacidad total de las baterías y de la velocidad de recarga y no de lo lejos o cerca que se encuentre la zona de recarga. Mientras que para calcular el tiempo en la zona de operaciones deberemos quitarle a la capacidad total la energía necesaria para realizar los tránsitos de ida y vuelta a la zona de operaciones para después dividir esta cifra por el consumo estimado en cada una de las situaciones operativas y así poder determinar cuánto tiempo podría el AUV mantenerse en la zona de operaciones realizando cada una de las acciones. Estos tiempos aparecen reflejados en la Figura 3-17 en función de la acción a realizar y de la distancia entre la zona de recarga y la zona de operaciones.

Efectividad en función de zona de recarga					
Distancia zona de recarga	Consumo en tránsito (KWh)	días realizando intel	Tiempo minado (días)	Tiempo recon. Fond. (días)	Ratio oper.
10	9,78	39,53	3,17	3,16	49%
15	14,67	38,31	3,07	3,06	48%
20	19,56	37,09	2,97	2,96	46%
25	24,45	35,87	2,87	2,87	45%
30	29,34	34,65	2,78	2,77	43%
35	34,23	33,43	2,68	2,67	42%
40	39,12	32,21	2,58	2,57	40%
45	44,01	30,99	2,48	2,48	39%
50	48,90	29,77	2,38	2,38	37%
55	53,79	28,55	2,29	2,28	36%
60	58,68	27,33	2,19	2,18	34%
65	63,57	26,11	2,09	2,09	33%
70	68,46	24,89	1,99	1,99	31%
75	73,35	23,67	1,90	1,89	29%
80	78,24	22,45	1,80	1,79	28%
85	83,13	21,23	1,70	1,70	26%
90	88,02	20,01	1,60	1,60	25%
95	92,91	18,79	1,51	1,50	23%
100	97,80	17,57	1,41	1,40	22%
105	102,69	16,35	1,31	1,31	20%

Figura 3-17 Tiempos de permanencia del AUV en función del escenario (elaboración propia)

Como se puede observar en la Figura 3-17, se podría emplear esta estrategia para conseguir mantener una permanencia de vigilancia a una zona de interés o puerto enemigo 24/7 durante períodos muy prolongados, empleando únicamente 3 ó 4 AUVs submarinos, y no solo eso, sino que una vez desplegados, podrían realizarse operaciones complementarias (minado o reconocimiento del fondo marino) cuando se decida que es conveniente realizarlas. Al mismo tiempo, se verifica que la capacidad energética calculada bajo el principio de autonomía, de 336,42 kWh, es compatible con los objetivos operacionales.

Para la segunda estrategia energética, vamos a estudiar el factor determinante que más varía al emplear esta estrategia, es decir, cuánto deberíamos aumentar el peso de las baterías anteriormente calculadas. Hemos de pensar que para realizar estos cálculos, debemos tener en cuenta que el submarino debe tener la energía suficiente como para llegar a la zona de operaciones, permanecer en la zona los días indicados y volver al punto de extracción para ser recogido por una unidad. Lo primero a tener en cuenta es el consumo en los trayectos de ida y vuelta a la zona de operaciones. Este será el doble del consumo que se hace al recorrer 200 MN, por lo que lo estimamos en 560,69 kWh. Además, teniendo en cuenta que el consumo de hotel promedio durante una vigilancia es de 334 W, como se refleja en la Figura 3-15, obtenemos el peso de las baterías en función del número de días de vigilancia, pues son el resultado de sumarle al consumo derivado de hacer ambos tránsitos el consumo promedio durante las operaciones multiplicado por el número de días que se pretenda operar el AUV, obteniendo como resultados los reflejados en la Tabla 3-11. Por todo ello, podemos ver en esta tabla que el empleo de la estrategia 2 manteniendo el número de días de la estrategia 1 supondría triplicar el peso de las baterías del AUV desde las 3,237 toneladas calculadas en el apartado 3.7.6 hasta las 10,101 toneladas.

Días	Peso (t)
40	10,101
44	10,452
48	10,803
52	11,193
56	11,544
60	11,934
64	12,285
68	12,636
72	13,026
76	13,377

80	13,767
84	14,118
88	14,469

Tabla 3-11 Pesos de baterías en caso de emplear estrategia 2 (elaboración propia)

Una vez realizados estos cálculos, continuaremos estudiando las ventajas e inconvenientes de cada una de las estrategias para decantarnos por una de las opciones, para lo que construimos la Tabla 3-12 de ventajas cruzadas de las estrategias 1 y 2.

Características	Estrategia 1	Estrategia 2
1. AUVs necesarios	3-4	1-2
2. Riesgo de quedarse sin batería	Nimio	Moderado
3. Mayor discreción	Independiente de más plataformas	Plataformas de recarga indiscretas
4. Menor ruido	Ruido de turbinas	No tiene turbinas
5. Permanencia inicial	10-30 días	15-40 días
6. Peso de Baterías	3,237 t	10,101 t
7. Independencia de otras unidades	Ilimitado	41 días
8. Permanencia de Vigilancia	24/7	Depende de unidades de apoyo
9. Capacidad de realizar acciones secundarias	De forma inmediata	Necesidad de apoyo de otra unidad

Tabla 3-12 Ventajas cruzadas de las estrategias 1 y 2 (elaboración propia)

Además de lo reflejado en la Tabla 3-12, es necesario profundizar más en algunos aspectos estratégicos. Empezando con el riesgo de quedarse sin batería, resulta obvio que una de las configuraciones puede recargarse sin la necesidad de apoyo de una unidad externa, lo que supone no solo un riesgo de no completar la misión sino la pérdida del AUV o lo que podría ser peor, dejar rastro de operaciones de inteligencia llevadas a cabo.

En el punto 3, la estrategia 2 supone una mayor indiscreción, pues no es capaz de recorrer grandes distancias sin recargarse en una plataforma aliada (fácilmente detectable), mientras que en la estrategia 1, el AUV permanece el 100 % del tiempo en inmersión incluso cuando recarga baterías, lo que hace muy difícil de detectar su presencia en una zona geográfica.

En cuanto al punto 5, una vez se despliegue el submarino, va a depender lo próximo que se encuentre el punto de despliegue de la zona de operaciones, lo que hará que el AUV tenga más o menos energía en sus baterías para realizar operaciones, por lo que el AUV con la estrategia 2 supondrá una ventaja por tener una mayor capacidad de las baterías. Respecto a este tema un aumento en el peso de las baterías supone un aumento del desplazamiento, y por ende de la resistencia al avance. Por último, la estrategia 2 supone la limitación de autonomía a la de diseño, por lo que la estrategia 1 tendrá una mayor capacidad para desplegarse lejos de la zona de operaciones.

En lo referente a las características 7 y 8, la estrategia 1 no depende de ser recogida para recargar sus baterías una vez agotadas. Es por ello, que con la estrategia 1 se puede mantener una presencia total en la zona de operaciones sin estar limitado a la autonomía temporal de 40 días o para los que se diseñe su batería. Esto genera una gran dependencia de unidades que aporten logística para lograr una permanencia del 100 %, sin embargo, con la estrategia 1 y estableciendo las zonas de recarga adecuadas

y dividiendo de forma efectiva las patrullas de los AUV, se puede lograr una permanencia total en la zona de operaciones con unos 3 ó 4 AUVs.

Sin duda alguna el punto 9 es el más importante de todos, pues el AUV que se está diseñando en este TFG pretende ser un vehículo diseñado para desarrollar acciones estratégicas, pues los conflictos ocurren de forma progresiva (escalada de tensión). Esto significa que el AUV o pack de AUVs ya habría sido desplegado en la zona de operaciones para mantener vigiladas las acciones del enemigo y en ese tiempo se podrían realizar acciones para posteriores operaciones, como puede ser el levantamiento del fondo en zonas donde se pudiese hacer un futuro desembarco o RAID y preparar campos minados con minas inteligentes MINEA sin activarlas pero que se podrían activar en cuestiones de minutos a través del AUV, al que se le enviaría una señal por medio de satélite y este a las minas enviando por medio acústico las claves de activación.

Es por todo ello, que escogemos la estrategia 1 para el desarrollo del AUV propuesto en este TFG, y como hemos podido ver en este apartado, la estrategia 2 será mejor en un futuro para desarrollar un AUV cuyo propósito sea el de desarrollar operaciones cortas en las que se tenga que desplegar rápidamente el submarino, llevar a cabo la misión y retirarse para ser recogido por una unidad.

3.8 Disposición general del casco

Según [6], en la elaboración del proyecto de un submarino, determinados los equipos necesarios para cumplir los objetivos de la misión, definidos los volúmenes y desplazamientos, la forma exterior y estimada la energía requerida, es necesario determinar la disposición de las partes del submarino, teniendo en cuenta las necesidades de los sensores, especialmente los acústicos (lejos de ruidos propios, en zonas que no haya flujo turbulento y que puedan tener grandes ángulos de barrido) y finalmente elaborar un “bosquejo orientativo de los pesos”, basándonos en los pesos de los equipos de cada compartimento reflejados en la Tabla 3-3. Para realizar un cálculo aproximado de la estabilidad tanto en superficie como en inmersión intentaremos realizar la distribución de pesos de tal forma que el centro de gravedad se encuentre en la misma posición longitudinal y transversal que el centro de flotación, este último lo conocemos gracias al SW Inventor®, que nos proporciona el centro de gravedad del submarino mostrado en la Figura 3-12. Este centro está situado a crujía, a 0,75 m de la quilla y 2,66 m a proa de la unión de los conos de popa con el cuerpo central.

3.8.1 Descripción de compartimentos

Es necesario describir los compartimentos con los que tiene que contar el AUV y su ubicación dentro de este. Comenzaremos definiendo y ubicando los sensores, como se recomienda en [6], pues estos equipos necesitan ciertos requerimientos para cumplir su misión satisfactoriamente como se especifica en [5]. Es así, que empezaremos ubicando el sónar de visión frontal, el cuál necesitará ubicarse a proa ocupando el espacio inferior central para una mejor visualización del fondo. Sus dimensiones, alto, ancho y longitud son 577,5×118×115,6 mm respectivamente, mientras que su peso es de 23,5 kg, todo ello según [29]. Como se puede observar en el plano de formas, existen amplios espacios a proa para ubicar arrays de sonares pasivos. El espacio y peso de estos arrays pasivos los calcularemos en función del peso de los hidrófonos de SAES de diámetro 48 mm y de largo 177 mm según [30], suponiendo un volumen de 320 cm³, y un peso de 0,39 kg según [30]. Para calcular las dimensiones de los arrays de sónares, vamos a suponer que hay 9 hidrófonos en cada array, quedando un peso de 3,51 Kg por array y un volumen de 2882 cm³. Estos equipos ocuparán la proa y los laterales del AUV.

La proa no será la única zona con arrays sónar, también ubicaremos arrays en las bandas del submarino, tanto pasivos para detección de contactos e inteligencia (anteriormente descritos) como sónares de apertura sintética. Para dimensionar el sónar de apertura sintética cogeremos el sónar HISAS 1030. Este se compone de 1 módulo transmisor con unas dimensiones de 0,32 m de largo y 0,18 m de diámetro y 2 módulos receptores de 1,27 m de largo y 0,11 m de diámetro según [33]. Esto hace que el volumen total del sónar para barrido del fondo marino sea de 32,28 dm³. Para estimar su peso, vamos a coger el peso del array de hidrófonos, y aplicando una regla directamente proporcional empleando los

volúmenes y aumentando el peso en un 30%, por ser este sónar activo, estimamos el peso del sónar HISAS1030 en 51,09 kg.

En lo que concierne a los sensores SET200P de campo electromagnético, los ubicaremos lo más alejados posible, poniendo un conjunto a proa y otro a popa junto con una serie de ellos remolcados que irán en el mismo sistema del array sónar remolcado. Este sensor, pese a que no se tiene constancia de su peso en [31], se le asignará un valor de 10 kg, basado en las imágenes que tenemos de este, pues puede ser transportado fácilmente por un buzo.

El siguiente grupo de equipos del que debe preocuparnos su ubicación es el de aquellos que serán desplegados por el dron y que por ende necesitarán estar sujetos por cables, que al recogerlos recuperen el equipo largado. Estos son 4 conjuntos, el primero es el sónar pasivo y detector de campos magnéticos remolcado; el segundo es el conjunto de antena de comunicaciones satélite junto con los equipos optoelectrónicos, y por último el sistema de turbinas para la generación de energía eléctrica.

Empezamos ubicando el conjunto remolcable en la zona inferior del centro de la popa para facilitar su largado. Pondremos el conjunto de antena satelital y sensores optoelectrónicos encima de este, pues en esa posición no estorbará al trabajo de las turbinas que se planea que se lleven en la proa del AUV. Asimismo, el flotador dedicado a ESM, tanto ELINT como COMINT, estará también situado en la proa, ya que no existe riesgo de interferencia con las turbinas, pues sólo se desplegará realizando ISR. Del conjunto remolcable conocemos sus dimensiones, obtenidas de la suma de un array de hidrófonos y de una serie de sensores SET200P, lo que supone un volumen de $3,88 \text{ dm}^3$ y un peso de 43,51 kg.

En lo referente al conjunto flotador, tenemos que tener en cuenta que estará formado por la antena satélite (250 kg), el conjunto de sensores electroópticos (50 kg), la estructura del flotador y de protección de equipos que estimaremos en 50 kg, alcanzando todo el conjunto un peso total de 350 kg. Puesto que ha de flotar perfectamente, pongamos con un 50 % del volumen del flotador fuera del agua, el conjunto del flotador teniendo en cuenta la densidad del agua de $1,025 \text{ t/m}^3$, ocupará un volumen de 719 dm^3 . Al compartimento se le ha de añadir la bobina de cable junto con el motor para poder recogerla. Por lo que aumentaremos estas dimensiones en un 5%, siendo el peso del compartimento 367,5 kg y el volumen $755,2 \text{ dm}^3$.

Por último, el diseño del sistema de turbinas para la generación de electricidad no es objeto de este TFG, sin embargo, se plantean diversas opciones, como podría ser un array de turbinas de Bernoulli, un array de turbinas de Arquímedes, o cualquiera de los métodos explicados en el apartado 0. Pero tenemos algunos datos para estimar las dimensiones de este array, y es que la superficie de trabajo propuesta es de 7 m^2 . Para ello lo compararemos con la turbina de producción de energía mareomotriz NOVA M100, que tiene una superficie de trabajo con un diámetro de 9 m, que es el equivalente a decir una superficie de $63,62 \text{ m}^2$. Realizando una comparación directa, tenemos que nuestro array de turbinas pesará aproximadamente 1,49 toneladas, y para que este conjunto flote en caso de ser requerido, teniendo en cuenta la densidad del agua, tendría que desplazar como mínimo $1,45 \text{ m}^3$.

En lo referente a los sensores de ESM/ECM, no se utilizarán al mismo tiempo que las turbinas (se usan en zonas de recarga, mientras que los sensores serán utilizados en las zonas de operaciones para estudiar las emisiones de las bases enemigas cercanas a costa). Como se calculó en la Tabla 3-3, estos sensores tienen un peso de 150 kg, que al sumarle la estructura, en torno al 20 % de su peso, se queda en 180 kg, por lo que el flotador para poder tener al menos un 50% del volumen fuera del agua, deberá tener 277 dm^3 . Para el compartimento, aumentaremos en un 5 % estos valores, por lo que será de 189 kg y $291,3 \text{ dm}^3$.

A continuación, describiremos el compartimento multifunción que en el caso de este TFG lo dimensionaremos como 2 bahías destinadas al transporte de minas y empleo de estas. Para dimensionar la primera bahía, hemos calculado el compartimento para estar equipado con 5 minas MINEA-SAES de perfil bajo, cuyo peso en la Tabla 3-3, corresponde a 346 kg que supondrán de volumen 340 dm^3 cada una. A este compartimento habrá que añadirle tanques de lastre que se inundarán según se vayan

lanzando las minas. A estos 5 tanques que tienen que llevar en torno a $1,85 \text{ m}^3$ de agua lastrada en total, vamos a asignarles un peso total de 90 kg. Por último, el sistema minador de ambas bahías ya se estimó en conjunto en la Tabla 3-3, en 400 kg, de los que un 25 % serán del minador de esta bahía, es decir, 100 kg, y vamos a asignarle un volumen de un 40 % del espacio que ocupen las minas, siendo el resultado $69,45 \text{ dm}^3$. Lo que supone que la primera bahía tenga un peso total estimado de 440 kg y un volumen de $34,42 \text{ dm}^3$, que aumentaremos en un 20 % de espacio para posibles tuberías de lastre necesarias que tengan que pasar y para los movimientos del sistema de minado, así determinamos el volumen en $41,3 \text{ dm}^3$.

La segunda bahía será la destinada a las minas cilíndricas (más grandes que las de perfil bajo), para el dimensionamiento de esta, hemos optado por 5 minas MINEA de forma cilíndrica, que pesan 613 kg y ocupan un volumen de 580 dm^3 según [34]. A este compartimento también habrá que añadirle tanques de lastre que se inundarán según se vayan lanzando las minas. A estos 5 tanques que tienen que llevar en torno a $3,28 \text{ m}^3$ de agua lastrada en total, vamos a asignarles un peso total de 250 kg cuando estén vacíos. Por último, el sistema minador de ambas bahías ya se estimó en conjunto en la Tabla 3-3, en 400 kg, de los que un 75 % serán del minador de esta bahía, es decir, 300 kg, y vamos a asignarle un volumen de un 40 % del espacio que ocupen las minas, siendo el resultado $1,16 \text{ m}^3$. Todo ello supone que la primera bahía tenga un peso total estimado de 1,92 t y un volumen de $4,28 \text{ m}^3$, que aumentaremos en un 20 % de espacio para posibles tuberías de lastre necesarias que tengan que pasar y para los movimientos del sistema de minado, así determinamos el volumen en $5,14 \text{ m}^3$. Estos cálculos suponen que el espacio multifunción tendrá un espacio total de $11,62 \text{ m}^3$, que suponen el 34% del desplazamiento del submarino.

Ahora pasaremos a las baterías, como ya se calculó en el apartado 3.7.6, las baterías tienen un peso de 3,237 toneladas, las repartiremos en 2 compartimentos aislados. Además, a estas baterías hay que sumarle los equipos complementarios que necesitan como unidades de control del estado de baterías, circuitos eléctricos y sistemas de refrigeración, es por todo ello que para estimarlo aumentaremos el peso de las baterías en un 30%. Esto supone que cada compartimento pese en torno a 2,10 toneladas. Para calcular el volumen de cada local de baterías, calculamos cuanto ocupan el total de las baterías, sabiendo que cada una ocupa $25,11 \text{ dm}^3$, y aumentando el resultado en un 30%. De esta forma tenemos que el volumen total de cada local de baterías será de $1,04 \text{ m}^3$. La consideración que tendremos a la hora de ubicar estas dependencias será que son equipos bastante densos, lo que afecta al centro de gravedad. Es por este motivo que intentaremos ubicarlos lo más cercanos que sea posible a la quilla.

Para los motores de propulsión utilizaremos motores de corriente continua y sin caja reductora, esto lo hacemos para reducir el ruido de la propulsión y también para evitar tener que emplear transformadores para convertir la energía de las baterías a corriente alterna para el empleo de los motores eléctricos. Para dimensionar estos compartimentos escogemos motores que den la potencia requerida, calculada anteriormente, siendo esta de 3,3 kW. Usando de referencia el motor “HEAVY DUTY DC MOTORS 0 151 WITH COOLING FAN” de la empresa “Hidráulica Rogimar”. Este es un motor que es capaz de dar 4 kW, con un peso de 21,45 kg y dimensiones de 15,1 cm de diámetro y 31,6 cm de largo, por lo que su volumen será aproximadamente el volumen de este cilindro, aunque añadiremos un margen de ampliación del 20% porque no encajará completamente con la forma, permitiendo una mayor comodidad a la hora de diseñar su instalación. Además, en este compartimento tenemos que estimar el peso de los ejes que se acoplan a los motores. Por ser estos ejes cortos y no muy grandes, vamos a estimarlos en el 20% del peso del motor, siendo estos de 4,29 kg, siendo el peso total de la cámara de 25,74 kg. En este compartimento incluiremos el sistema de movimiento de las toberas dirigibles. Al no ser requerido un gran movimiento de ellas, estimaremos el peso y volumen de todo el sistema hidráulico en un 40 % del motor de propulsión, siendo este de 8,58 kg.

En lo referente al control del submarino, es necesario tener en cuenta el sistema de hardware del AUV, que recibe información de los sensores y de las comunicaciones, toma decisiones, y finalmente ejecuta acciones a través de los actuadores. Ya en la Tabla 3-3 se estimó el peso de todo este conjunto en 100 kg, por lo que vamos a estimar su volumen en 15 dm^3 .

El siguiente compartimento, serán los tanques de lastre principales. El volumen de estos ya ha sido calculado en el apartado 3.3.3, siendo este de 3,29 m³. Para calcular el peso, tendremos en cuenta el peso del agua que soportan y el de la estructura que tiene que soportarlos. Es así, que el peso del agua en los tanques será de 3,38 toneladas. Para calcular el peso de la estructura de los tanques, aumentaremos el peso en un 20 %, quedando un total de 4,06 toneladas.

Por último, el tanque de lastre de compensación. En principio, este será un único tanque, aunque si se estima conveniente en una ingeniería de detalle posterior, este podría contar con tanques secundarios que se inundarían o achicarían con el objetivo de trimar correctamente el submarino si este fuese modular y requiriera de este trimado para una configuración concreta. Habiéndose calculado el volumen de agua que puede llegar a albergar en el apartado 3.3.3 en 0,93 m³. Para calcular el volumen ocupado por el propio tanque, aumentaremos en un 5 % el volumen de agua albergada, siendo este de 0,974 m³, y estimaremos su peso en 50 kg.

3.8.2 Estabilidad estática

En este apartado se busca ubicar los centros de carena y centros de flotación del submarino, tanto en superficie como en inmersión. El centro de carena es el centro geométrico del volumen no inundado. En superficie este volumen es todo el submarino. Con el SW Inventor®, podemos ubicar el centro de carena en superficie en crujía, a 0,75 m de la quilla y a 6,76 m de la popa, mientras que en inmersión el centro de carena será el centro geométrico del casco de presión, definido por 2 cilindros superpuestos parcialmente que terminan en un cono truncado en popa y una plancha en proa (posteriormente se le dará una forma abovedada). El centro de carena en inmersión obtenido en inventor se encuentra en crujía a 0,75 m de la quilla y a 6,53 m de la popa.

Una vez ubicados todos los compartimentos en la disposición general del submarino, podemos ubicar el centro de gravedad, teniendo en cuenta los pesos estimados de cada compartimento y la ubicación de su centro de gravedad en la disposición general prevista. Realizando el cálculo (21), tenemos que el centro de gravedad se encuentra a 5,62 metros de la popa. Destacar que en este cálculo no hemos tenido en cuenta el centro de gravedad del espacio multimisión que se ha estimado en un desplazamiento de 5,54 t, lo que representa un 21% del total del peso de superficie (26,1 t). De esta manera, los diseños de módulos acoplables al AUV tendrán que tener una distribución de peso de forma que desplacen el centro de gravedad 0,91 metros a proa. Es decir, que el centro de gravedad del módulo para que el centro de carena en inmersión y el centro de gravedad se encuentren a la misma altura, debe estar a 7,68 m de la popa, especialmente si tenemos en cuenta que el centro geométrico del espacio multimisión se encuentra a 7,45 m de la popa. En cuanto a la posición vertical del centro de gravedad (KG), la calculamos de la misma forma que la posición longitudinal con la ecuación (21), pero con distancias a la quilla en vez de a la popa. Finalmente, obtenemos que el centro de gravedad se encontrará a 0,45 metros de la quilla, es decir, 30 cm por debajo del centro de carena, por lo que el submarino será estable transversalmente. Se puede concluir que será fácil ubicar el centro de gravedad en la posición buscada. Por todo ello, se decide eliminar el 3% de lastre permanente previsto en la Tabla 3-2, asignando este peso a la carga útil, que pasa de representar del 29% al 32%.

$$Centro\ de\ gravedad_{long} = \frac{\sum(Peso\ de\ compartimento * distancia\ a\ la\ popa)}{\sum Peso\ de\ compartimento} \quad (21)$$

3.9 Casco de presión

En este apartado estudiaremos la estructura en la que se encuentran todos aquellos equipos que deben permanecer estancos al agua del exterior, además de su arquitectura, y nos aseguraremos de que cumpla los requisitos para navegar en las condiciones requeridas. Es decir, que soporte la presión hidrostática navegando a 200 metros de profundidad y el efecto del oleaje en superficie, además del posible lanzamiento desde un avión. Por ello, en este apartado definiremos sus elementos arquitectónicos, conceptos, la forma de la estructura y los materiales de construcción del casco.

Con el objetivo de mejorar la supervivencia del AUV, lo dividiremos en secciones estancas. Se suelen montar a lo sumo 2 mamparos preparados para soportar una cierta presión que ayudan a soportar los momentos flectores derivados de las cargas hidrostáticas laterales. Normalmente con forma de sector esférico (para que trabajen a tracción), delimitando zonas funcionales. En nuestro caso hemos establecido 2 mamparos estancos en el interior del AUV, uno que se encuentra en la popa y que permite separar los compartimentos de baterías y propulsión en 2 zonas, aumentando la supervivencia del submarino, y el otro que divide el espacio multifunción del submarino.

Es necesario definir el forro, que es el límite exterior del casco resistente. Como se dice en [6]: “Las fuerzas en el sentido longitudinal son soportables por el forro sin refuerzos adicionales”. Además, se le dotará de cuadernas transversales para soportar el esfuerzo de flexión en el sentido periférico que actuarán en conjunto con el forro. La estructura puede presentar 3 fallos estructurales:

- a) El forro es presionado más allá del límite de elasticidad. Para evitarlo, se colocan cuadernas dispuestas estrechamente, capaces de soportar este esfuerzo.
- b) Se produce una abolladura hacia adentro y otra hacia afuera. Para evitarlo, se construyen cuadernas distanciadas.
- c) Se dobla la estructura, tanto el forro como las cuadernas (no tiene solución).

Según [40], la carga crítica es la mínima carga aplicada lentamente (para que no intervengan efectos dinámicos) a partir de la que el equilibrio no se mantiene. Diremos por tanto, que la estructura es estable si al aplicarle nuevas cargas de valor muy pequeño, las deformaciones incrementales son también de valor muy pequeño, y cuando eliminamos estas cargas la estructura vuelve a su forma inicial.

3.9.1 Formas del casco de presión

Para resolver el problema de diseñar un casco exterior con el mínimo peso para una presión exterior determinada, lo más eficiente es que la estructura trabaje a tracción o a compresión pura, son las denominadas formas apléxicas. De esta forma, no está expuesta a momentos flectores. Para conseguir esto, se emplean formas de campo de fuerzas iguales dirigidas a un punto que coincide con el centro geométrico. Sin embargo, las curvas provenientes de estos cálculos están pensadas para una profundidad determinada, pudiendo hacer que surjan momentos flectores a profundidades menores y más frecuentes que la del cálculo.

En el caso de nuestro submarino, el casco de presión estará definido por 2 cilindros superpuestos, quedando la sección transversal que se recomienda en [6], y estará rematado por 2 conos truncados en la popa y por un mamparo plano reforzado en la proa, similar al casco de presión de la Figura 3-9 (a). Además, reforzaremos los conos y cilindros con cuadernas como se recomienda en [40] para submarinos que naveguen entre 100 y 1000 m.

3.9.2 Resistencia a la presión

Como se puede ver en este apartado, lo más importante a la hora de definir el casco de presión es la presión ejercida sobre él una vez en inmersión por la gran magnitud de estos esfuerzos en relación con el resto de esfuerzos a los que se va a enfrentar el submarino como se refleja en [6], pero para ello, la mayor cuestión es saber qué valor tiene esta presión. Con este objetivo, se emplea la profundidad de diseño, que es la profundidad operativa. En nuestro caso esta profundidad es de 200 metros, sin embargo, para realizar los cálculos de referencia emplearemos una profundidad de destrucción que es a la que se espera una pequeña y limitada tolerancia según [6]. Para obtener dicha profundidad, le aplicaremos un coeficiente de seguridad de 1,5, que es el recomendado en [6] y [25], y utilizado en los submarinos norteamericanos. Así, nuestra profundidad de destrucción serán 300 m. Por otro lado, la presión hidrostática será el producto de la profundidad, la densidad del agua y la aceleración de la gravedad, así esta presión será de 3023,93 kPa.

Como se puede ver en [4], el grosor de un casco de presión cilíndrico cumplirá la ecuación (22), puesto que la forma de nuestro casco de presión es un cilindro de diámetro 1,5 m que se ha alargado en su parte central.

$$t = \frac{P \cdot D}{2\sigma} \quad (22)$$

3.9.3 Selección del material de construcción del casco resistente

Es importante según [40] que esta estructura esté construida al completo con el mismo material para conseguir la mayor homogeneidad y evitar así la aparición de tensiones derivadas del diseño. Al mismo tiempo este material debe ser fácilmente soldable, ya que con la tecnología actual es la técnica que tiene mejores prestaciones según [40]. Además, el material seleccionado debe tener: una buena resistencia a bajas temperaturas, características antimagnéticas (para evitar la detección, ser resistente a la corrosión), una baja densidad, y baja velocidad del sonido (para reducir vibraciones y la detectabilidad) y por último, tener un precio asequible para llevar a cabo el proyecto.

Para ello, se tienen en cuenta los materiales con los que se suele llevar a cabo la construcción del casco resistente en los submarinos. Estos materiales según [4], [6], [7] y [40] suelen ser acero HY80, HY100, HY 130, aluminio HY60 y titanio HY120. Vamos a poner en común estos materiales y hallar a partir de sus propiedades mecánicas el grosor de forro necesario mediante la ecuación (22), y para conocer el peso total de material necesario multiplicaremos el grosor por el perímetro de la sección transversal y el largo de esta. Para terminar de estimar el material necesario en la construcción del casco de presión, multiplicaremos este valor por un coeficiente de 3,5 con el objetivo de tener en cuenta los conos de popa, los mamparos y cuadernas del interior del forro, pues su diseño concreto se realizará en una ingeniería de detalle posterior al igual que la selección del material de construcción. Es así, que en la Figura 3-18 se representan las características de los aceros anteriormente citados y los resultados obtenidos en las estimaciones. Como se puede ver, el casco de presión fabricado con acero HY80 se estima en un peso de 4,8 t. Finalmente, para calcular el peso de la estructura completa, le asignaremos al casco exterior de proa y popa, mucho más ligero, un peso del 20% del casco de presión, obteniendo así la estimación del peso total de la estructura en 5,76 toneladas, lo que está dentro del valor asignado en la Tabla 3-2, definido como el 33% del desplazamiento en superficie (8,61 t).

Material	Densidad (Kg/m3)	Esfuerzo admisible (MPa)	Grosor (mm)	Peso total (t)
Acero HY80	7870	552	4,11	4,80
Acero HY100	7870	689	3,29	3,85
Acero HY130	7885	830	2,73	3,20

Figura 3-18 Espesores y pesos del casco de presión (elaboración propia)

3.10 Estudio de factibilidad

En [7] se explica el concepto del Military and Economic Analysis (MEA). Este análisis tiene el objetivo, por una parte, de comparar la inversión realizada con el rendimiento militar obtenido y por otra, analizar la conveniencia de producir el diseño teniendo en cuenta que en un futuro tendrá mayor coste (inflación), aunque existe el riesgo de que con los avances tecnológicos el diseño quede obsoleto.

La eficiencia operativa del vehículo será la aportación del AUV a la operación, en otras palabras, será la correlación entre la acción llevada a cabo y los resultados obtenidos. Para medirla de forma objetiva, en [7] se proponen 3 factores medibles: la cantidad de daño esperado realizado a la fuerza enemiga, la probabilidad de infligir el daño, y por último, el número de submarinos y/o unidades de apoyo necesarios para llevar a cabo la misión. En el caso del submarino diseñado, es de destacar que la eficiencia operativa es alta, porque suponiendo una task force de 4 submarinos destinados a la operación y sin unidades de apoyo, estos podrían realizar tareas de vigilancia, alerta temprana, y lo que es más importante, su capacidad para desplegar 40 o más minas a lo largo del tiempo del despliegue. Esto le

supondría al enemigo realizar un gran y constante esfuerzo de caza de minas, con altas posibilidades de que alguna de sus unidades sea alcanzada por una de estas minas.

En [7], además se hace referencia a la “field task force” (el número permanente de submarinos que deben estar en la zona de operaciones) y a la “full force” (el número total de submarinos necesarios para llevar a cabo la operación). Con estos 2 conceptos obtenemos el ratio de utilización, que es la relación entre la “field task force” y la “full task force”. Con este último ratio y la eficiencia operativa, obtenemos el rendimiento militar que es el que compararemos con los costes para tomar una decisión.

3.10.1 Costes del proyecto

El coste está formado por 3 conceptos diferentes: el coste de desarrollo, el coste de producción y el coste operativo. Además, al tratarse de un proyecto de construcción naval, se tendrán en cuenta los denominados grupos de coste, cuya designación es la siguiente:

- Grupo 100: Estructura del casco
- Grupo 200: Planta propulsora
- Grupo 300: Planta eléctrica
- Grupo 400: Mando y exploración
- Grupo 500: Sistemas auxiliares
- Grupo 700: Armas
- Grupo 800: Ingeniería
- Grupo 900: Servicios de apoyo

Empezaremos a calcular los costes de desarrollo (Grupo 800) y de producción (resto de grupos). Asimismo, para obtener una valoración económica más precisa de cada partida, se procederá a dividir el coste como se recomienda en [7], en dos factores distintos: el coste de material y el coste de producción, obteniendo el presupuesto desglosado en la Figura 3-19.

En lo que respecta al coste de material, empezando por el Grupo 100, para el casco resistente se ha empleado el precio de la tonelada de acero HY80 y los costes de soldadura; para estimar el valor de los materiales de casco exterior y apéndices se ha utilizado el 30% y el 20% del valor del casco resistente respectivamente; en cuanto a los tanques, nos hemos basado en precios de mercado, mientras que para las pruebas de compartimentos hemos considerado el coste que tienen en otros proyectos de submarinos.

Para el Grupo 200, se han tomado como referencia los precios comerciales de los elementos empleados en la elaboración del concepto, es decir, el de los motores “HEAVY DUTY DC MOTORS 0 151 WITH COOLING FAN”, y el de hélices para embarcaciones de similares dimensiones, y por último, para los ejes los hemos estimado en el 30% del coste de los 2 elementos anteriores.

Para el Grupo 300, se ha tomado el precio de las baterías “LFP-Smart 25,6/200a” de la empresa Victron. Asimismo, se ha asignado un coste de 500.000€ a las turbinas de energía mareomotriz y de 20.000€ a los sistemas de conversión de energía. El coste del cableado ha sido valorado en un 10% del coste del grupo 300.

En lo referente a los Grupos 400 y 500, nos hemos basado en los costes que tienen estos productos en el sector civil y que están siendo empleados en embarcaciones, en vehículos autónomos submarinos y en ROVs, pues los equipos militares propuestos anteriormente podrían ser sustituidos por estos equipos de grandes prestaciones si se considera conveniente.

Para el Grupo 700, nos hemos basado en los precios que tienen trabajos de fundición de envergaduras similares y maquinaria industrial empleada para mover cargas. Con estos datos llegamos a la estimación de un coste total de 170.000€.

Para los Grupos 800 y 900, nos hemos basado en otros presupuestos de proyectos de submarinos, que hemos reducido de acuerdo a la diferencia de desplazamientos entre los submarinos de los presupuestos de referencia y el propuesto en este TFG. Destacar dentro del Grupo 800 las partidas de

adecuación de instalaciones que es el coste estimado de la maquinaria necesaria para la fabricación de los submarinos y la partida de generación de software, pues será necesario generar un software nuevo que le permita al AUV tomar decisiones tácticas y de navegación.

En cuanto a los costes de producción, a cada operario se le ha asignado un coste de 30€ por hora trabajada, mientras que a cada ingeniero un coste de 70€ por hora trabajada, todo ello teniendo en cuenta los costes de seguridad social e impuestos. Señalar que las horas realizadas en los Grupos 800 y 900 son las horas correspondientes al trabajo de ingenieros, mientras que las del resto de grupos son las correspondientes a operarios.

Finalmente, destacar que se ha añadido un margen del 10% sobre el coste total de fabricación por la innovación que supone este submarino, todo ello por las necesidades de software, por la capacidad de supervivencia necesaria, y especialmente por el desarrollo de la turbina que lo convertirá en el primer AUV completamente autónomo. Además, se ha añadido un beneficio industrial del 30%, típico en este tipo de proyectos, que junto al 25% de impuestos, suponen un coste de la primera unidad de 39,6 millones de euros.

Partida Presupuestaria	Valoración económica (€)					
	Material			Producción		Total
	Coste de material	Cantidad	Total	Horas	Coste	
Grupo 100						
Casco Resistente	10.000,00 €	5	72.597,76 €	2500	75.000,00 €	
Casco Exterior			21.779,33 €	1000	30.000,00 €	
Apéndices			8.711,73 €	120	3.600,00 €	
Tanque resistente	19.350,00 €	1	19.350,00 €	80	2.400,00 €	
Tanque no resistente	12.000,00 €	2	24.000,00 €	80	2.400,00 €	
Pruebas de compartimentos	2.000,00 €	1	2.000,00 €	100	3.000,00 €	
SUMA PARCIAL			148.438,82 €		116.400,00 €	264.838,82 €
Grupo 200						
Motores de propulsión eléctrica	5.000,00 €	2	10.000,00 €	60	1.800,00 €	
Hélices	8.000,00 €	2	16.000,00 €	20	600,00 €	
Ejes	3.900,00 €	2	7.800,00 €	80	2.400,00 €	
SUMA PARCIAL			33.800,00 €		4.800,00 €	38.600,00 €
Grupo 300						
Baterías	1.900,00 €	83	157.700,00 €	300	9.000,00 €	
Sistemas de conversión de energía eléctrica	20.000,00 €	1	20.000,00 €	120	3.600,00 €	
Turbinas de energía mareomotriz	500.000,00 €	1	500.000,00 €	400	12.000,00 €	
Cableado red	52.190,00 €	1	52.190,00 €	140	4.200,00 €	
SUMA PARCIAL			729.890,00 €		28.800,00 €	758.690,00 €
Grupo 400						
Ordenador Central	10.000,00 €	1	10.000,00 €	120	3.600,00 €	
Navegador Inercial	150.000,00 €	1	150.000,00 €	160	4.800,00 €	
Antena SATCOM	300.000,00 €	1	300.000,00 €	200	6.000,00 €	
Sensores optoelectrónicos	600,00 €	20	12.000,00 €	60	1.800,00 €	
Hidrófonos pasivos	200,00 €	450	90.000,00 €	600	18.000,00 €	
Detector de campo magnético	2.000,00 €	15	30.000,00 €	120	3.600,00 €	
Sónar de apertura sintética	120.000,00 €	2	240.000,00 €	60	1.800,00 €	
Sónar de obstáculos	100.000,00 €	1	100.000,00 €	80	2.400,00 €	
Equipos ESM	150.000,00 €	1	150.000,00 €	200	6.000,00 €	
SUMA PARCIAL			1.082.000,00 €		48.000,00 €	1.130.000,00 €
Grupo 500						
Sistemas de achique y lastrado	8.000,00 €	1	8.000,00 €	200	6.000,00 €	
Sistema de refrigeración	10.000,00 €	1	10.000,00 €	160	4.800,00 €	
Sistema de lubricación	15.000,00 €	1	15.000,00 €	80	2.400,00 €	
Sistema Hidráulico	20.000,00 €	1	20.000,00 €	300	9.000,00 €	
SUMA PARCIAL			53.000,00 €		22.200,00 €	75.200,00 €
Grupo 700						
Lanzador de minas	50.000,00 €	1	50.000,00 €	300	9.000,00 €	
Estiba de minas	3.000,00 €	20	60.000,00 €	200	6.000,00 €	
Tanques Compensadores	3.000,00 €	20	60.000,00 €	300	9.000,00 €	
SUMA PARCIAL			170.000,00 €		24.000,00 €	194.000,00 €
Grupo 800						
Especificaciones, planos, cálculos de ingeniería, proce	600.000,00 €			2500	175.000,00 €	
Modelos y maquetas	100.000,00 €					
control de calidad	200.000,00 €					
Documentación técnica	9.000.000,00 €					
Adecuación de instalaciones	8.000.000,00 €			800	56.000,00 €	
Simuladores	100.000,00 €			60	4.200,00 €	
Dirección del proyecto	50.000,00 €			300	21.000,00 €	
Generación de Software	1.000.000,00 €			2500	175.000,00 €	
SUMA PARCIAL			19.050.000,00 €		431.200,00 €	19.481.200,00 €
Grupo 900						
Pruebas de puerto y mar	20.000,00 €					
Entrega y garantía	200.000,00 €					
Manipulación de materiales	50.000,00 €					
SUMA PARCIAL			270.000,00 €			270.000,00 €
SUMAS TOTALES			21.537.128,82 €		622.600,00 €	22.159.728,82 €
Margen de seguridad de innovación	10%		2.215.972,88 €			24.375.701,70 €
Beneficio industrial	30%		7.312.710,51 €			31.688.412,21 €
Impuestos	25%		7.922.103,05 €			39.610.515,26 €

Figura 3-19 Presupuesto desglosado (elaboración propia)

3.10.2 Análisis de resultados del coste del proyecto

En base a los resultados del presupuesto, se pueden realizar gráficos sectoriales que reflejen la importancia de los costes considerados y de las diversas partidas que engloban el presupuesto. Como se puede observar en la Figura 3-20, la mayor parte del presupuesto para un submarino está destinado al Grupo 800, es decir, a la ingeniería. Esto es debido a que están incluidos los costes de obtención de la maquinaria para realizar la construcción del submarino, el coste de elaboración de la documentación técnica y de los cálculos necesarios teniendo en cuenta que es un prototipo completamente innovador, y el coste de desarrollo de los softwares de control del submarino.

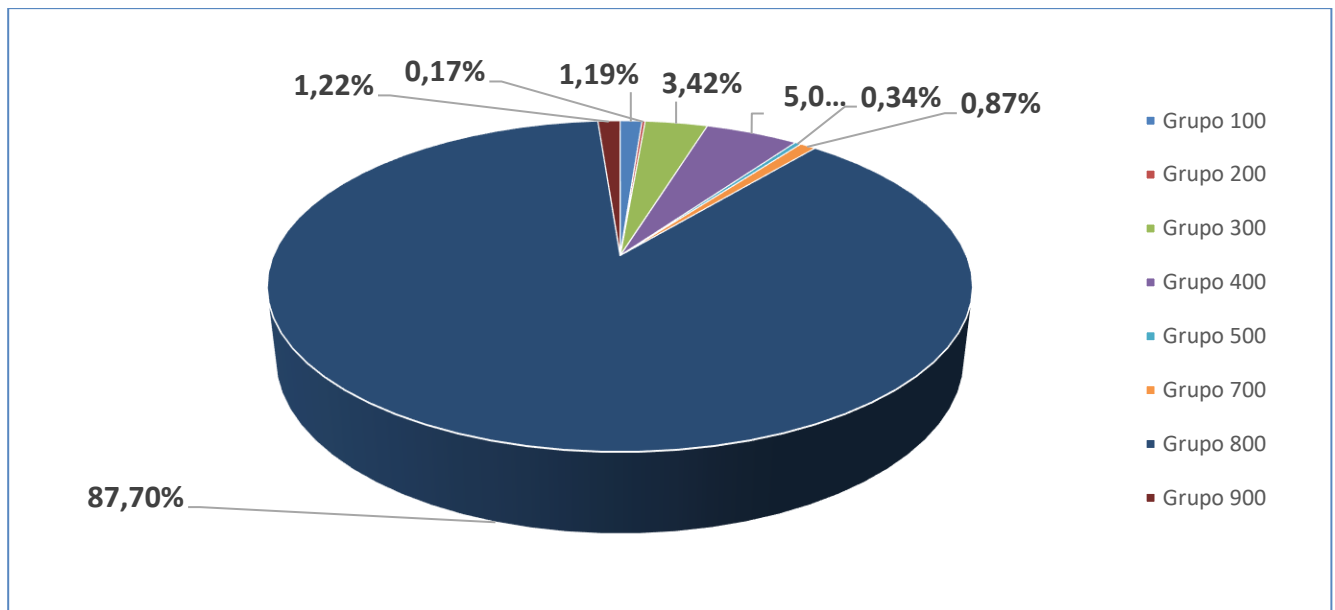


Figura 3-20 Distribución de los costes (elaboración propia)

Asimismo, es importante detallar la distribución del coste de los grupos sin tener en cuenta el coste de las ingenierías. De esta manera, en la Figura 3-21 se puede observar que el coste del Grupo 400 es el más elevado (41,37%). Esto es debido a la gran cantidad de sensores con los que cuenta el submarino. Igualmente, hay que destacar la importancia del Grupo 300, dedicado a la planta eléctrica, lo que refleja el concepto de propulsión plenamente eléctrica.

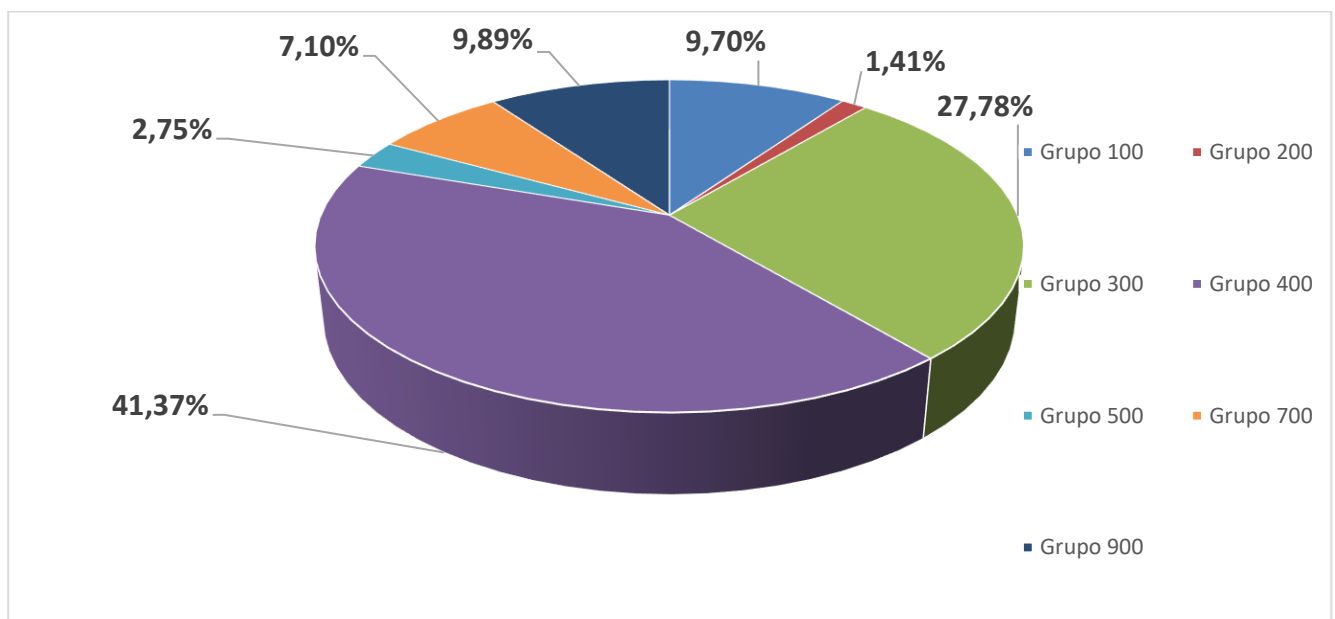


Figura 3-21 Distribución de costes sin ingenierías (elaboración propia)

Por otro lado, resaltar que el coste total obtenido en el punto anterior de 39,6 millones de euros corresponde a un solo submarino proyectado incluyendo el beneficio industrial y los impuestos. Este valor se reducirá en función del número de submarinos que se construyan, a consecuencia de dos motivos principales: los gastos no recurrentes y el denominado efecto aprendizaje.

Los costes no recurrentes, son básicamente los de ingeniería del Grupo 800, en los que se incurre una sola vez en el proyecto, independientemente del número de unidades que se fabriquen, por lo que teniendo en cuenta el alto coste de este grupo en el proyecto, cuantos más submarinos se fabriquen, más se reducirá el coste unitario.

El efecto aprendizaje se produce cuando se construye una serie de unidades. Consiste en la reducción del coste para la fabricación de unidades sucesivas, derivada de la disminución de errores y de las mejoras en los procesos constructivos. Lógicamente esta reducción de coste no puede ser infinita, sino que su valor irá disminuyendo hasta converger en cierto valor mínimo. Para evaluar este efecto, se utilizan las curvas de aprendizaje explicadas en la teoría de Crawford. El valor del aprendizaje en la industria naval suele estar en el 87%, aunque por el alto porcentaje de innovación e incorporación de nuevas tecnologías vamos a estimarlo en el 95%, es decir, que supondrá una reducción en el coste de producción de un 5% en cada unidad respecto a la anterior. Se espera construir 10 unidades en el proyecto, de esta forma tendríamos 2 “task force” operativas y 2 unidades realizando mantenimientos o de reserva. Por todo ello, el resultado del efecto aprendizaje a lo largo del proyecto quedaría como se muestra en la Tabla 3-13 aunque no se espera que el ahorro baje del 22,62% (sexto AUV fabricado).

N	Aprendizaje respecto a unidad 1	Ahorro respecto a unidad 1
1	100,00%	0,00%
2	95,00%	5,00%
3	90,25%	9,75%
4	85,74%	14,26%
5	81,45%	18,55%
6	77,38%	22,62%
7	73,51%	26,49%
8	69,83%	30,17%
9	66,34%	33,66%
10	63,02%	36,98%

Tabla 3-13 Ahorro debido al aprendizaje (elaboración propia)

Por último, teniendo en cuenta que los gastos de ingenierías del Grupo 800 son redundantes, los distribuiremos como un coste unitario entre los 10 submarinos de la serie. Además, a la producción le aplicaremos la reducción del coste debida al aprendizaje, de esta forma obtenemos los resultados de la Figura 3-22, en la que se representa el coste de cada unidad en función del coste de cada grupo, desglosando el coste de los materiales y el de producción que es el que se ve afectado por el aprendizaje. Al sumar todos ellos, obtenemos que el coste de fabricación unitario es ligeramente superior a los 4,85 millones de euros, que se traduce para la fabricación de las 10 unidades en un coste total de 48,5 millones de euros, al que le añadiremos el margen de beneficio industrial del 30%, obteniendo un total de 63,1 millones de euros, que tras impuestos (25%), da un resultado final cercano a los 78,9 millones de euros. Es decir, que el coste unitario de los AUVs después de impuestos es de media 7,89 millones de euros.

		Material	Producción	Total
Submarino 1	Grupo 100	148.438,82 €	116.400,00 €	264.838,82 €
	Grupo 200	33.800,00 €	4.800,00 €	38.600,00 €
	Grupo 300	729.890,00 €	28.800,00 €	758.690,00 €
	Grupo 400	1.082.000,00 €	48.000,00 €	1.130.000,00 €
	Grupo 500	53.000,00 €	22.200,00 €	75.200,00 €
	Grupo 700	170.000,00 €	24.000,00 €	194.000,00 €
	Grupo 800	2.126.597,29 €	43.120,00 €	2.169.717,29 €
	Grupo 900	270.000,00 €	- €	270.000,00 €
	TOTAL			4.901.046,10 €
Submarino 2	Grupo 100	148.438,82 €	110.580,00 €	259.018,82 €
	Grupo 200	33.800,00 €	4.560,00 €	38.360,00 €
	Grupo 300	729.890,00 €	27.360,00 €	757.250,00 €
	Grupo 400	1.082.000,00 €	45.600,00 €	1.127.600,00 €
	Grupo 500	53.000,00 €	21.090,00 €	74.090,00 €
	Grupo 700	170.000,00 €	22.800,00 €	192.800,00 €
	Grupo 800	2.126.597,29 €	40.964,00 €	2.167.561,29 €
	Grupo 900	270.000,00 €	- €	270.000,00 €
	TOTAL			4.886.680,10 €
Submarino 3	Grupo 100	148.438,82 €	105.051,00 €	253.489,82 €
	Grupo 200	33.800,00 €	4.332,00 €	38.132,00 €
	Grupo 300	729.890,00 €	25.992,00 €	755.882,00 €
	Grupo 400	1.082.000,00 €	43.320,00 €	1.125.320,00 €
	Grupo 500	53.000,00 €	20.035,50 €	73.035,50 €
	Grupo 700	170.000,00 €	21.660,00 €	191.660,00 €
	Grupo 800	2.126.597,29 €	38.915,80 €	2.165.513,09 €
	Grupo 900	270.000,00 €	- €	270.000,00 €
	TOTAL			4.873.032,40 €
Submarino 4	Grupo 100	148.438,82 €	99.798,45 €	248.237,27 €
	Grupo 200	33.800,00 €	4.115,40 €	37.915,40 €
	Grupo 300	729.890,00 €	24.692,40 €	754.582,40 €
	Grupo 400	1.082.000,00 €	41.154,00 €	1.123.154,00 €
	Grupo 500	53.000,00 €	19.033,73 €	72.033,73 €
	Grupo 700	170.000,00 €	20.577,00 €	190.577,00 €
	Grupo 800	2.126.597,29 €	36.970,01 €	2.163.567,30 €
	Grupo 900	270.000,00 €	- €	270.000,00 €
	TOTAL			4.860.067,09 €
Submarino 5	Grupo 100	148.438,82 €	94.808,53 €	243.247,34 €
	Grupo 200	33.800,00 €	3.909,63 €	37.709,63 €
	Grupo 300	729.890,00 €	23.457,78 €	753.347,78 €
	Grupo 400	1.082.000,00 €	39.096,30 €	1.121.096,30 €
	Grupo 500	53.000,00 €	18.082,04 €	71.082,04 €
	Grupo 700	170.000,00 €	19.548,15 €	189.548,15 €
	Grupo 800	2.126.597,29 €	35.121,51 €	2.161.718,80 €
	Grupo 900	270.000,00 €	- €	270.000,00 €
	TOTAL			4.847.750,04 €
Submarinos 6,7,8,9 Y 10	Grupo 100	148.438,82 €	90.068,10 €	238.506,92 €
	Grupo 200	33.800,00 €	3.714,15 €	37.514,15 €
	Grupo 300	729.890,00 €	22.284,89 €	752.174,89 €
	Grupo 400	1.082.000,00 €	37.141,49 €	1.119.141,49 €
	Grupo 500	53.000,00 €	17.177,94 €	70.177,94 €
	Grupo 700	170.000,00 €	18.570,74 €	188.570,74 €
	Grupo 800	2.126.597,29 €	33.365,43 €	2.159.962,72 €
	Grupo 900	270.000,00 €	- €	270.000,00 €
	TOTAL			4.836.048,84 €
TOTAL				48.548.819,96 €
Beneficio comercial				63.113.465,95 €
Después de impuestos (25%)				78.891.832,44 €

Figura 3-22 Coste unitario de fabricación de cada submarino (elaboración propia)

3.10.3 Coste operativo

Este es el coste al que tendrá que hacer frente la fuerza para operar el submarino. Para calcular el coste anual, nos ayudaremos de los factores mencionados en [7]: los gastos relativos a dotación, apoyo logístico y reparaciones. Estos gastos se han estimado en la Tabla 3-14 Coste anual operativos (elaboración propia), en la que se ha tenido en cuenta una dotación de 8 personas que compongan el segmento terrestre y operen los 10 submarinos, así como un coste de reparaciones de un 10% del coste de cada AUV, lo que supone un coste anual de mantenimiento de toda la flota en 5,6 millones de euros.

Partida presupuestaria	Valoración económica
Personal	
Gasto dotación (8)	200.000,00 €
Adiestramientos	40.000,00 €
Suma Parcial	240.000,00 €
Apoyo Logístico	
Minas	500.000,00 €
Empleo del satélite	50.000,00 €
Suma Parcial	550.000,00 €
Reparaciones	4.836.048,84 €
TOTAL	5.626.048,84 €

Tabla 3-14 Coste anual operativos (elaboración propia)

3.10.4 Análisis MEA

Con los datos obtenidos del presupuesto, realizaremos los cálculos de la eficiencia de combate de la task force de 10 submarinos. Empezaremos calculando el factor de utilización, que es el tiempo de su vida útil en operaciones. Puesto que esperamos tener en todo momento 8 submarinos operando y 2 en mantenimiento, este factor será del 80%. A continuación, definiremos el factor de utilización operativa, que es el tiempo destinado a llevar a cabo acciones de combate dentro del tiempo en operaciones, anteriormente calculado y reflejado en la Figura 3-17 (entorno al 40%). Estos son porcentajes de utilización mucho más altos que los de un submarino convencional que depende de combustible y de descansos de dotación. Asimismo, el coste del submarino de 7,89 millones de euros es muy inferior si lo comparamos con los daños que podría causar al destruir un buque enemigo con una mina, junto a la amenaza de la presencia de las 2 task force que supondrían la capacidad de minar varios puertos del enemigo, negando completamente su tráfico marítimo además de suponer un gran coste de caza de minas. Con estos efectos, los costes generados al enemigo podrían llegar fácilmente a los cientos de millones de euros, y no solo eso, sino que la información recogida por los AUVs, son de gran valor para el empleo posterior por otras unidades aliadas, dejando en gran desventaja a los sistemas enemigos que deberán soportar el coste de ser renovados.

4 RESULTADOS

4.1 Comprobación de cumplimiento de requisitos

Como se puede apreciar a lo largo del trabajo, se ha demostrado que el submarino puede construirse. En cuanto al peso, el desplazamiento volumétrico del casco de presión es de $24,88 \text{ m}^3$, lo que se traduce en 25,56 t de desplazamiento máximo para el submarino y una desviación de $1,45 \text{ m}^3$ respecto al cálculo inicial realizado en el apartado 3.3.3. Sin embargo, hay numerosos sensores y equipos desplegables fuera del casco de presión que conseguirán llegar a la flotabilidad para 26,10 t. Siguiendo la distribución inicial de la Tabla 3-2 y teniendo en cuenta que se ha eliminado el lastre permanente en el apartado 3.8.2, obtenemos como resultado que el payload pueda tener un peso total máximo de 8,18 t aunque realmente se utilicen 6,51 t. En cuanto a la propulsión, como máximo puede pesar 8,95 t aunque realmente se estima que pese 5,75 t. Finalmente, la estructura puede tener un peso máximo de 8,44 t aunque realmente tiene un peso total teniendo en cuenta la estructura del casco de presión, casco externo y tanques de lastre de 6,21 t. Como se puede apreciar se da bastante margen en cada uno de los pesos, lo que permitirá o bien una mayor flexibilidad en la ingeniería de detalle, un aumento de los equipos o armas embarcadas en el módulo multimisión, o bien una disminución del tamaño del AUV.

En lo referente a la energía para poder lograr los objetivos, se dimensiona la capacidad de baterías y se explica en el apartado 3.7 que el submarino puede tener la autonomía requerida en todos los entornos planteados. Además, esta autonomía podría ser aumentada al aprovechar parte de las 5,5 toneladas dispuestas para el espacio multimisión por baterías.

4.2 Características finales de la plataforma

Con los cálculos realizados en la fase de desarrollo hemos definido las características de nuestro AUV, mostrándose estas en la Tabla 4-1. Destacar que los valores del desplazamiento no son exactamente los calculados en el dimensionamiento inicial en el apartado 3.3, pues pese a que los volúmenes estimados eran unos concretos, hemos tenido que ceder en la precisión de estos para cumplir necesidades del diseño en cuanto al casco resistente, que se calculó inicialmente en $26,33 \text{ m}^3$ y en el diseño final es de $24,88 \text{ m}^3$. En cuanto al desplazamiento en superficie, lo hemos reducido en el mismo orden que el casco de presión, pues hemos mantenido la dimensión de los tanques de lastre, lo que ha supuesto un aumento del ROB del 10% al 11%. Asimismo, el desplazamiento de forma ha pasado de ser $32,59 \text{ m}^3$ a ser en el concepto final de $33,61 \text{ m}^3$, lo que supone un aumento de $1,02 \text{ m}^3$. Este resultado es favorable a la hora de pasar a la siguiente fase, pues da un mayor margen a la hora de integrar los equipos en el submarino.

Características del AUV	
L_{Proa} (m)	1
L_{Popa} (m)	2,8
$L_{Central}$ (m)	4,1
L (m)	11,6
B (m)	2,8
D (m)	1,5
T (m)	1,35
Δ_{sup} (m ³)	24,88
Δ_{inm} (m ³)	28,17
ROB (%)	11
A_m (m ²)	3,72
S (m ²)	76,7
LCG (m)	6,53
KG (m)	0,45
Autonomía (MN)	200
Autonomía en zona de operaciones (días)	40
Velocidad de crucero (kn)	5
Velocidad Máxima (kn)	7
C_p	0,78
C_b	0,69

Tabla 4-1 Características finales del AUV (elaboración propia)

Otras características que no aparecen en la tabla son las capacidades de los sensores que cubren: sensores optoelectrónicos, sensores acústicos, sensores de campo magnético y sensores de emisiones electromagnéticas. Por último, resaltar lo especial de su propulsión, ya que es plenamente eléctrica con recarga por energía mareomotriz, lo que le confiere una gran autonomía como se refleja en la Figura 3-17.

4.3 Comparación y compatibilidad con los submarinos de la Armada

El objetivo de este TFG era desarrollar un AUV que complementase las operaciones de los submarinos empleados actualmente por la Armada, los S80. Este AUV tiene el objetivo de entrar en zonas en las que para el S80 suponga un gran riesgo, bien sea por lo baja que es la sonda, las posibilidades de explotar una mina, por ser una zona en la que el enemigo está desarrollando una intensa operación ASW o por ser una operación que requiera estar un tiempo prolongado en inmersión en una zona determinada. Esta finalidad se consigue dotándole de las características de la Tabla 4-2, comparándolo con el S80, ya que el AUV está diseñado para realizar específicamente las tareas anteriormente descritas. Resaltando que no sería un sustituto para el S80, que tiene unas capacidades mucho más amplias, pero sí un complemento que aumentaría las capacidades del arma submarina de la Armada.

Características	S80	AUV
Dotación a bordo	32	0
Coste de la unidad	4.000 millones de €	7,89 millones de €
Autonomía	8000 Km	200 MN
Profundidad (m)	460	200
Velocidad máxima (kn)	19	7
Desplazamiento (t)	2965 t	25,56 t
Eslora (m)	80,81	11,6
Manga (m)	7,3	2,8
Apoyo logístico	Necesario	No es necesario
Maniobrabilidad	1 eje e hidroplanos	2 ejes y tanque de compensación

Tabla 4-2 Comparación S-80 y AUV (elaboración propia)

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El objetivo de este TFG era el de realizar un proyecto conceptual de AUV que permitiera ampliar las capacidades de la Armada en operaciones encubiertas en aguas de litoral enemigas. A lo largo del TFG se han estudiado, calculado y resuelto todas las cuestiones necesarias para validar el concepto, comenzar el proceso de adquisición del proyecto según [6] y posteriormente realizar la ingeniería de detalle. Estas cuestiones siguen un orden lógico y coherente a lo largo del TFG, de tal forma que cada cuestión resuelta ha permitido calcular y estimar la posterior.

Se comenzaron definiendo las condiciones a las que debería operar el submarino y qué objetivos se esperaba que cumpliera. A partir de estas condiciones se han dimensionado los desplazamientos y dimensiones generales del submarino en el apartado 3.3. Posteriormente, se estudió como son las formas de los submarinos, y en función de los objetivos que se han querido conseguir, se ha definido un AUV de casco simple. Sobre la base de los conceptos que se han querido adoptar para cumplir los objetivos operativos y de maniobrabilidad, se ha obtenido la forma final del concepto, mostrada en la Figura 3-12.

La siguiente cuestión ha sido estimar la resistencia de avance a la que se va a enfrentar el submarino para dimensionar así su propulsión y la capacidad energética que debe llevar. Este ha sido un punto de inflexión en el TFG, pues tras haber estudiado el consumo de los equipos que debe embarcar el AUV, y la energía requerida para su propulsión se ha demostrado que el concepto de AUV propuesto en este TFG se puede desarrollar con la tecnología existente, como se puede concluir de los resultados obtenidos y reflejados en la Figura 3-17. Esto quiere decir, que el AUV podrá ser totalmente independiente energéticamente y no necesitará el apoyo de ninguna unidad gracias a los requisitos de supervivencia con los que se ha diseñado. Este aspecto lo hace idóneo para operaciones estratégicas de inteligencia y alerta temprana. Y no sólo esto, pues también se ha demostrado que puede llevar a cabo operaciones precursoras como el estudio batimétrico para un posible desembarco o el minado estratégico.

A continuación, se ha propuesto una distribución modular del AUV, en la que los componentes principales para navegación, propulsión e inteligencia se mantienen de forma permanente, pero se dispone de un espacio multimisión que podría albergar hasta 10 minas de gran tamaño. Este espacio también podría ser utilizado para transportar cargamento estratégico atravesando una zona A2/AD o podría ser utilizado para transportar otro tipo de módulos que se diseñen en posteriores ingenierías de detalle, considerándose los siguientes módulos: módulo de lanzamiento de minas, módulo para operar AUVs, módulo para lanzamiento de misiles, módulo de lanzamiento de torpedos o módulo de transporte de carga para operaciones especiales.

Una vez definida la disposición general del AUV, se han calculado los centros de carena y de gravedad del AUV para poder asegurarnos de que se cumplan los requisitos de estabilidad. Asimismo,

ha sido posible definir el casco de presión de acuerdo a la disposición general, permitiéndonos definir el peso de este. Finalmente, todos los cálculos y características anteriores nos han permitido elaborar un presupuesto desglosado para la realización del proyecto, obteniendo un coste después de impuestos de 7,89 millones de euros por unidad.

5.2 Líneas futuras

Este proyecto no es sólo un sistema de armas que amplíe las capacidades del arma submarina de la Armada, sino que también supone ser un demostrador para el desarrollo de AUVs que han sido definidos por primera vez en este TFG que denominaremos como “AUVs durmientes”. Explicando más profundamente la afirmación anterior, este tipo de submarinos se caracterizan por operar de una forma completamente distinta a AUVs anteriormente diseñados, pues estos se caracterizan por ser completamente autónomos, tanto en navegación como en energía, por lo que se les puede asignar una zona de patrulla o que permanezcan en una zona hasta que se les asigne una misión.

Es con este concepto con el que se pueden desarrollar una multitud de versiones de AUVs para distintas misiones. Pondremos unos ejemplos: en la guerra ASW se pueden diseñar submarinos que patrullen una zona permanentemente (ASW) o que se mantengan próximos a infraestructuras submarinas críticas del enemigo para asestar un ataque cuando sea indicado; en la guerra de superficie, enjambres que esperen en una localización específica que sean capaces de atacar HVUs o convoyes tanto si están cerca como si tienen que interceptarlos porque estarán diseñados para alcanzar altas velocidades durante una autonomía limitada.

Además, el AUV propuesto en este TFG sirve a la proyección estratégica, pues puede permanecer cerca de la costa del enemigo y llevar a cabo operaciones preguerra como minar zonas sin activar las minas y realizar reconocimientos. Asimismo, puede suponer una plataforma para el lanzamiento y recuperación de AUVs, lanzamiento de misiles o torpedos e incluso se podría preparar para el desembarco encubierto de unidades o cargamento para operaciones de fuerzas especiales.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Romero Bartumeus, «España y las capacidades submarinas de los países del entorno mediterráneo,» *Paix et Sécurité Internationales*, nº 10, 2022.
- [2] F. S. BERGÉS, «<https://www.fsupervielle.com/>,» TN Supervielle, 8 Agosto 2020. [En línea]. Available: <https://www.fsupervielle.com/post/estudio-drones-submarinos-uuv#viewer-do3lc>.
- [3] C. Jarabo, «www.cesareojarabo.es,» 9 Agosto 2023. [En línea]. Available: <https://www.cesareojarabo.es/2023/08/la-gran-traicion-del-98.html>. [Último acceso: 21 Febrero 2025].
- [4] R. Burcher y L. Rydill, *Concepts in Submarine Design*, Cambridge: Cambridge University Press, 1998.
- [5] OTAN, «ANEP-77 Parte 1,» NATO STANDARDIZATION OFFICE (NSO), 2019.
- [6] U. Gabler, *Construcción de submarinos*, Madrid: San Martín, 1982.
- [7] Y. Kormilitsin y O. Khalizev, *Theory of submarine design*, San Petesburgo: St-Petesburg State Marine Technichal University, 2001.
- [8] R. W. Button, T. B. C. J. Kamp y J. Dryden, «A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles,» RAND Corporation, Santa Monica, USA, 2009.
- [9] C. Augusto Conte de los Ríos, «EMPLEO DE SUBMARINOS EN OPERACIONES DE INTELIGENCIA,» *REVISTA GENERAL DE MARINA*, nº 259(7), pp. 61-70.
- [10] R. Girrier y W. Hughes, *fleet tactics and naval operations*, Annapolis: Naval Institute Press, 2018.
- [11] F. S. Bergés, *Táctica Naval: Guerra en la mar en el siglo XXI*, 2023.
- [12] A. Conte de los Ríos, «El vehículo submarino autónomo,» *Instituto Español de Estudios Estratégicos*, 2018.
- [13] P. d. V. Álvaro Babé, «DRONES: EL PAPEL QUE ESTÁN TENIENDO EN LA GUERRA MODERNA,» *Revista general de marina*, nº 284, pp. 911-920, 2023.

- [14] L. Maroto, «Nuevo enfoque estratégico para la integración del poder naval de los Estados Unidos de América en el marco de las Operaciones Distribuidas,» *Escuela de Guerra Naval de Argentina*, 2023.
- [15] H. Sutton, «<http://www.hisutton.com/>,» 25 Abril 2024. [En línea]. Available: <http://www.hisutton.com/World-XLUUVs.html>. [Último acceso: 12 Febrero 2025].
- [16] NATO, «North Atlantic Treaty Organization,» Agosto 2022. [En línea]. Available: https://www.nato.int/nato_static_fl2014/assets/pdf/2022/9/pdf/2209-factsheet-mus.pdf. [Último acceso: 30 Enero 2025].
- [17] V. Bernard, «Interview with Peter W. Singer, Director of the 21.st Century Defense Initiative at the Brookings Institution,» *International Review of the Red Cross*, vol. 94, n° 886, 2012.
- [18] C. B. PARKER, ««Armed drones changing conflict faster than anticipated, Stanford scholar finds,» *Stanford News*, 2018.
- [19] J. Gutiérrez de la Cámara Señán, «Minas navales modernas,» *Revista general de Marina*, vol. 278, pp. 665-677, 2020.
- [20] J. Rivas Calvar, *Apuntes de Sistema de Armas y Tiro Naval II*.
- [21] C. J. M. M. Lax, «Las minas navales en los conflictos actuales,» *Revista General de Marina*, n° 286, pp. 585-594, 2024.
- [22] J. M. R. CF: RODRÍGUEZ, A. S. GARCÍA y J. J. D. HERNÁNDEZ, «Análisis de la Respuesta a Firmas en Minas Multi-Influencia,» *DERROTERO, Revista de la Ciencia y la Investigación*, vol. 9, n° 1, pp. 95-110, 2016.
- [23] S. P. Neil y M. Reza Hashemi, *Fundamentals of Ocean renewable Energy*, Londres: Elsevier Ltd., 2018.
- [24] S. A. Gucel MU, «Analyzing the Mediterranean Sea's Dynamic Current System and Modeling of Renewable Current Energy Potential.,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 12, n° 4, p. 671, 2024.
- [25] P. P.N.Joubert, «Some Aspects of Submarine Hydrodynamics,» Australian Department of defense, Victoria, 2004.
- [26] B. Veritas, «Rules for the Classification of Naval Submarines,» Bureau Veritas, Neuilly sur Seine, 2016.
- [27] Exail, «Marins Series,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.exail.com/media-file/7650/exail-datasheetmarins-series.pdf>. [Último acceso: 27 02 2025].
- [28] Indra, «TSUB-40Ku,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.indracompany.com/sites/default/files/indra_tsub-40ku_en_baja_1_0.pdf. [Último acceso: 27 02 2025].
- [29] Sonardyne, «Vigilant Forward Look Sonar (Vigilant FLS),» 01 2022. [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.sonardyne.com/wp-content/uploads/2022/01/Sonardyne_VigilantFLS_Espanol.pdf. [Último acceso: 27 02 2025].

- [30] SAES, «SDH: Hidrófono Digital Inteligente,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://electronica-submarina.com/wp-content/uploads/2019/07/SDH_Hidrofono_Digital_Inteligente_ES.pdf. [Último acceso: 27 02 2025].
- [31] SAES, «SET 200-P,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://electronica-submarina.es/wp-content/uploads/2018/08/SAES_SET200-P_UnderwaterElectricPotentialSensor_english.pdf. [Último acceso: 27 02 2025].
- [32] Indra, «Naval Suites for submarines,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.indracompany.com/sites/default/files/indra_naval_suite_for_submarines_eng_v01_baja_3.pdf. [Último acceso: 27 02 2025].
- [33] KONGSBERG, «HISAS 1030,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-discovery/naval/hisas/high-resolution-interferometric-synthetic-aperture-sonar---hisas-1030/. [Último acceso: 27 02 2025].
- [34] SAES, «MINEA-E,» [En línea]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://electronica-submarina.es/wp-content/uploads/2018/08/SAES_MINEA_ExerciseNavalMine_english.pdf. [Último acceso: 27 02 2025].
- [35] U. (. CAPT Harry A. Jackson, «Fundamentals of Submarine Concept Design,» *Society of Naval Architects and Marine Engineers*, vol. 100, pp. 419-448, 1992.
- [36] M. Renilson, *Submarine Hydrodynamics*, Launceston, Australia: SPRINGER, 2015.
- [37] Coelectrix, «Coelectrix.com,» [En línea]. Available: https://coelectrix.com/blog/bateria-agm. [Último acceso: 16 Enero 2025].
- [38] L. Zhang y H. Liu, «The thermal stability and safety of lithium iron phosphate (LiFePO₄) batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 284, pp. 430-447, 2015.
- [39] H. Xiang y J. Xie, «Recent advances in lithium iron phosphate (LiFePO₄) cathode materials for lithium-ion batteries,» *Journal of Power Sources*, vol. 332, pp. 263-279, 2017.
- [40] P. Sosa, «Seminario de Submarinos. Apuntes. Capítulos 1 al 7.,» *Escuela Técnica Superior de ingeniería Naval y Oceánica. Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia.*, 2007.

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

Las implicaciones sociales del TFG se centran en la reducción del riesgo para el personal militar al utilizar AUVs autónomos para misiones peligrosas como el minado y la inteligencia en aguas enemigas. Esto se alinea con una postura post-heroica de evitar bajas humanas. Además, la capacidad de mantener una vigilancia continua con un número limitado de AUVs podría fortalecer la seguridad nacional y la alerta temprana. Desde una perspectiva ética, el uso de drones y, por extensión, AUVs, se considera una herramienta más precisa que podría reducir las víctimas colaterales al permitir una mejor identificación de objetivos y periodos de observación más largos.

En cuanto a las implicaciones económicas, el TFG presenta un coste de fabricación estimado por unidad de 4,85 millones de euros y unos costes operativos anuales para una flota de diez AUVs de aproximadamente 5,63 millones de euros. A pesar de estos costes, podría generar un ahorro significativo en comparación con los daños que podría infligir al enemigo (como la neutralización de buques con minas) y el coste de las contramedidas necesarias. El proyecto también busca favorecer la industria nacional mediante el uso de equipos de fabricación española siempre que sea posible, y la exploración de productos comerciales podría generar ahorros adicionales.

Respecto a las implicaciones ambientales, el aspecto más destacado es la propuesta de utilizar la energía mareomotriz como fuente de energía primaria para el AUV, lo que le conferiría una autonomía ilimitada y reduciría la dependencia de combustibles fósiles. Esta apuesta por una energía renovable representa un beneficio ambiental significativo. Sin embargo, el TFG no profundiza en un análisis detallado de los posibles impactos ambientales negativos que la operación de estos AUVs o el despliegue de las turbinas mareomotrices podrían tener en el ecosistema marino. Sería necesario un estudio específico para evaluar y mitigar estos posibles efectos.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Las Convenciones de Ginebra de 1949 establecen la obligación de identificar correctamente los objetivos y de hacer una distinción clara entre combatientes y no combatientes, con el fin de salvaguardar la integridad de los civiles. En este contexto, los drones se alinean con los principios del Derecho Internacional Humanitario, presentándose como una herramienta más precisa que los métodos tradicionales de bombardeo aéreo o de artillería, ya que generan una menor dispersión de metralla. A medida que la tecnología se especializa, se consigue una guerra más controlada, que produce menos víctimas colaterales. En este contexto, los drones permiten prolongar los períodos de observación antes de ejecutar un ataque, lo que incrementa la precisión de las intervenciones.

El debate jurídico contemporáneo se centra en la utilización de drones en "ataques por patrón de comportamiento", en los cuales la identidad de los individuos o grupos seleccionados como objetivos es desconocida, pero se presume que sus actividades siguen un patrón sospechoso. Estos ataques, al ser ejecutados de manera remota, carecen de motivaciones personales como la venganza, y no implican la exposición de los operativos a estrés postraumático ni a dilemas éticos o morales, ya que los operadores no participan directamente en el acto de la agresión, sino que se limita a la identificación y neutralización de objetivos a través de la tecnología.

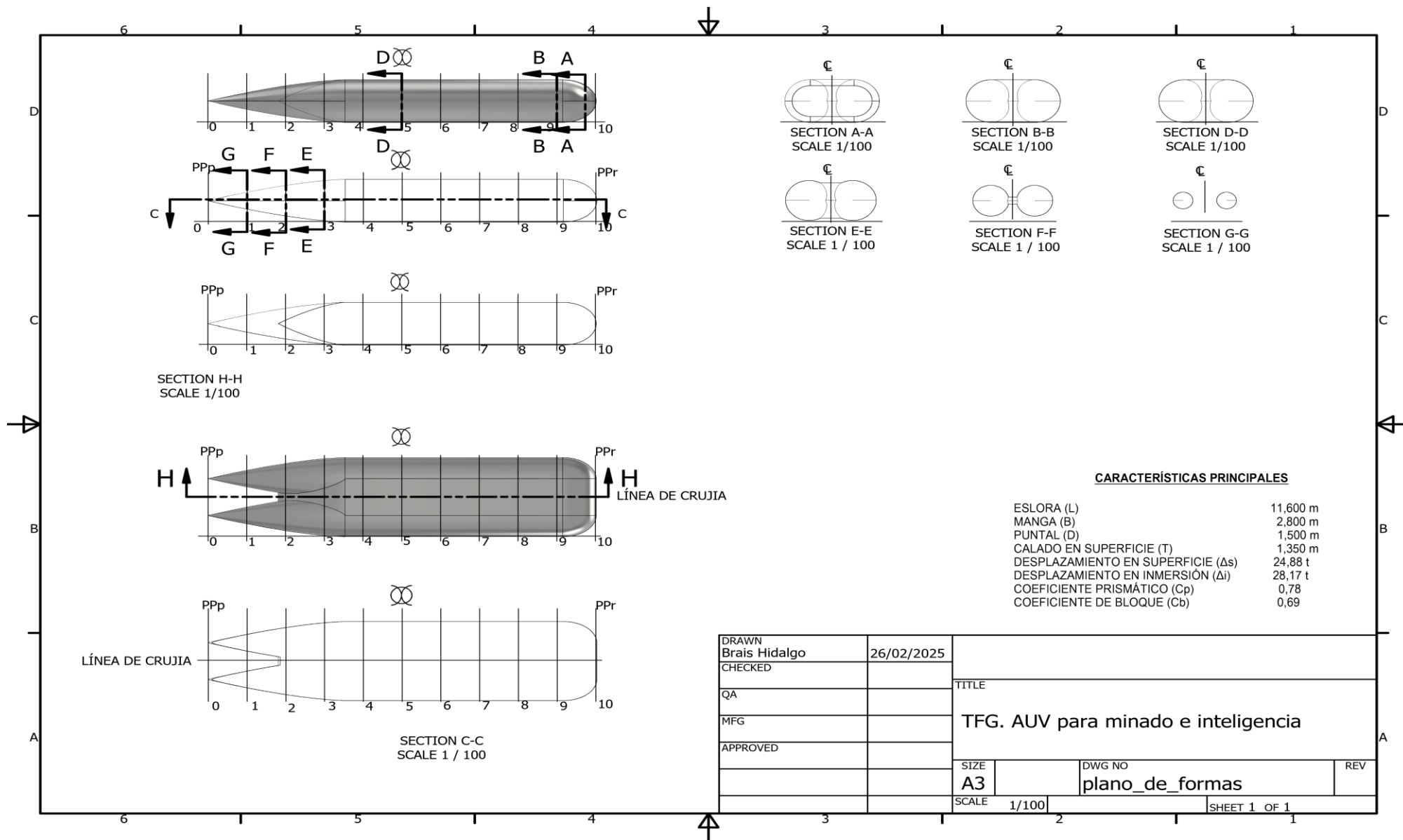
ANEXO III: AUVs CONOCIDOS

Se presenta la relación de AUV's que se encuentran en servicio en la actualidad.

NOMBRE	PAÍS	ESLORA	AUTONOMÍA	CARACTERÍSTICAS
ORCA (ECHO-VOYAGER)	EEUU	25 m	150 MN	Carga de baterías con motor diésel. Polivalente
SNAKEHEAD LDUUV	EEUU			Pequeño vehículo de transporte desplegado desde submarinos
HSU-001	China	desconocida	desconocida	Muy maniobrable, probablemente para operar en litoral
ASWUUV	Corea del Sur	6,5 m	430 días	Capacidad de actuar en enjambre
HARPSICHORD	Rusia	6 m	27 MN	Profundidad máxima 6.000 metros. Para atacar infraestructuras submarinas
GHOST SHARK XL-AUV	Australia	Dimensiones de un contenedor estándar		Realizado con impresión 3D
SPEARTOOTH LUUV	Australia		Misiones de larga duración	Modular. Cambia flotabilidad para moverse en vertical. Bajo coste.
SOLUS-XR	Canadá	12 m/ sección transversal 1,7m×1,7 m	2700 MN/45 días	Misiones de transporte con 2 compartimentos de carga
UCUV	Francia	[10-20] m		Con sónares de costado
HEAUV	India			Con arrays sónar
NAZIR-5	Irán		500 Km	AUV suicida
BLUE WHALE	Israel			Para ISR, ASW y MCM. Transmite información vía satélite
LONG ENDURANCE UUV	Japón	[10-15,6]m y diámetro 1,8 m		
HAEIL	Corea del Norte	16 m, diámetro 1,5 m	1000 Km	AUV suicida, navega haciendo snorkel la mayor parte del tiempo
HUGIN ENDURANCE	Noruega		1200 MN/15 días	
KLAVESIN-2P-PM	Rusia			Lanzado desde plataforma. ISR.

NOMBRE	PAÍS	ESLORA	AUTONOMÍA	CARACTERÍSTICAS
				Misiones a gran profundidad (6000 m)
MARICHKA	Ucrania		1000 Km	AUV suicida. ISR. Transporte. Coste de 433,000 USD
CETUS	Reino Unido	Dimensiones de contenedor		Espacio para otros AUVs o ROVs
MANTA	Reino Unido	9 m. Sec. Transversal 2 m.	1 semana. 48 h sumergido	Capacidades ISR y ASW
MORAY	Reino Unido	30 m	desconocida	Con sistema AIP

ANEXO IV: PLANO DE FORMAS



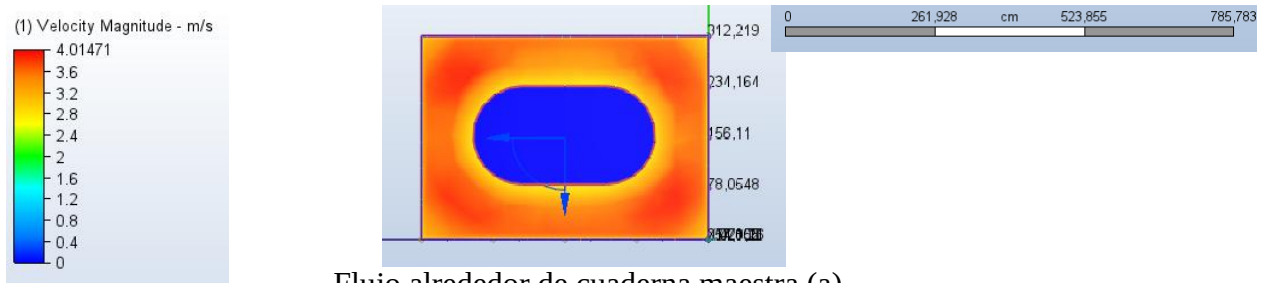
ANEXO V: DISPOSICIÓN GENERAL

ANEXO VI: ANÁLISIS CFD

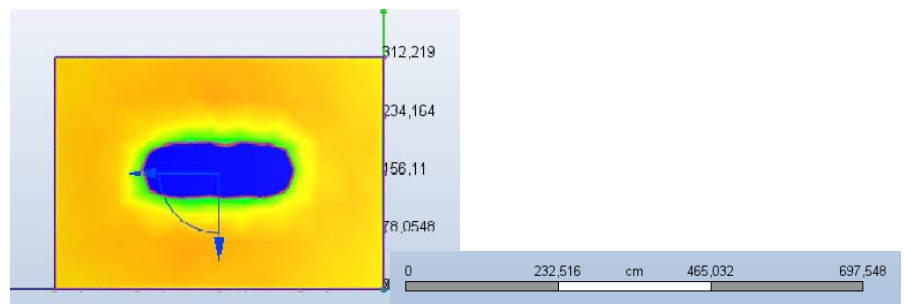
Para realizar el presente análisis CFD del submarino se utiliza el software Autodesk CFD®, suponiendo agua de mar y una velocidad del submarino de 5 nudos, obteniéndose resultados tanto de la velocidad del agua alrededor del submarino como de la presión. Mostrándose los resultados en este anexo.

Velocidad

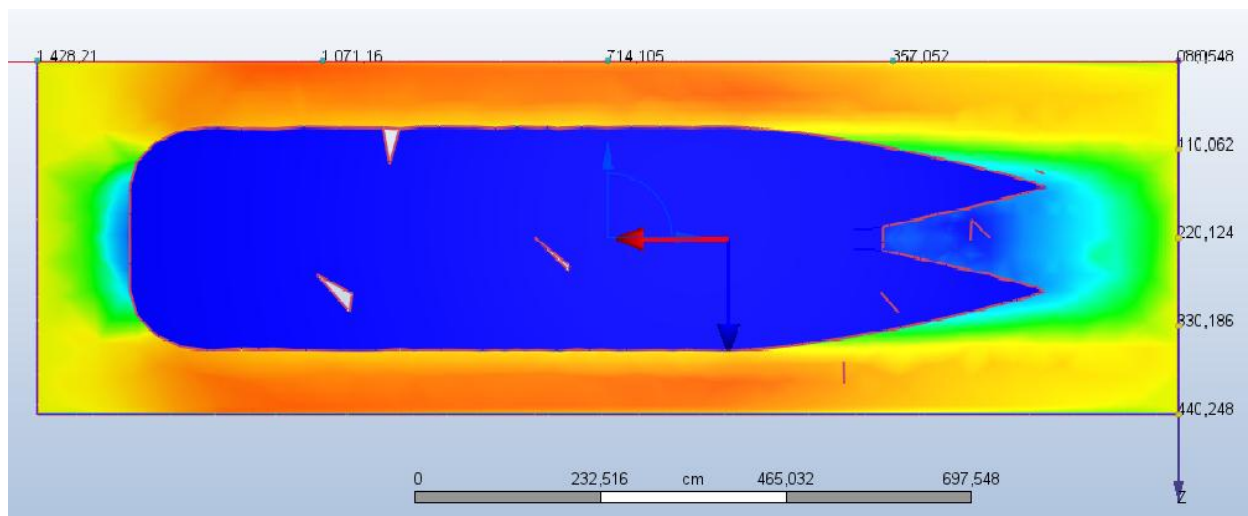
En las ilustraciones de la Figura 0-1, se puede ver la velocidad del flujo de agua alrededor del casco. Estos resultados son clave para analizar el flujo y la capa límite alrededor del submarino, como se puede ver en todas las ilustraciones de la Figura 0-1, el flujo es laminar, pues no se aprecia ningún cambio abrupto en la velocidad ni formación de remolinos. Asimismo, se puede observar en (e) que la velocidad del flujo disminuye lentamente hasta alcanzar la mínima en la popa, lugar en el que irá la hélice. Este resultado conseguirá que la hélice sea mucho más eficiente al poder generar un mayor cambio de velocidad en el fluido.



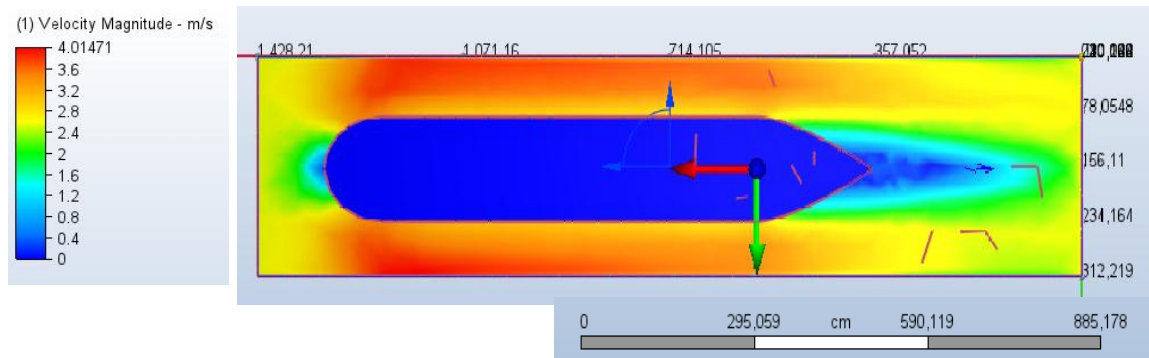
Flujo alrededor de cuaderna maestra (a)



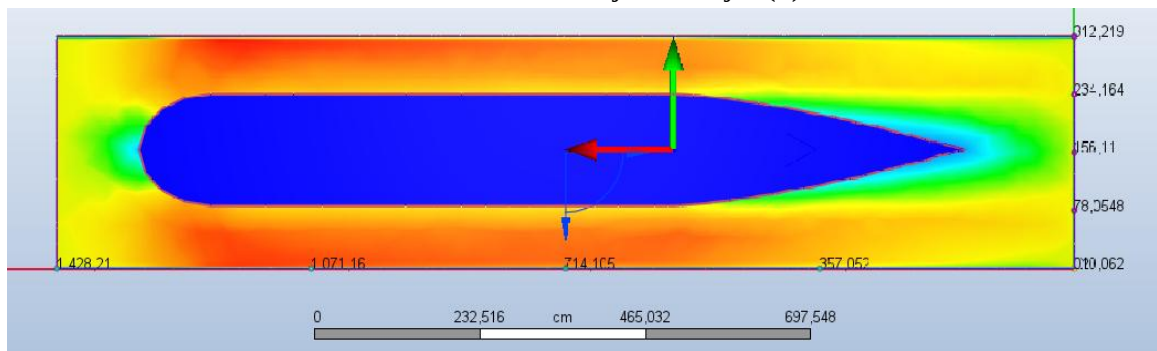
Flujo alrededor de sección de proa (b)



Flujo alrededor de plano de simetría (c)



Velocidad de flujo en crujía (d)

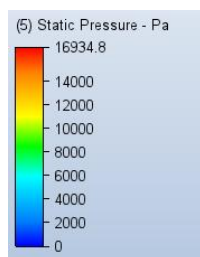


Velocidad alrededor de casco cilíndrico y cono de popa (e)

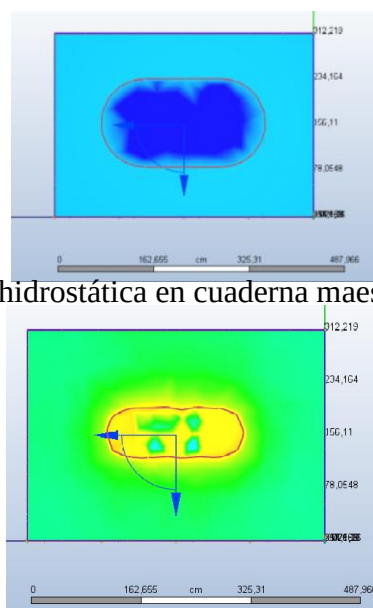
Figura 0-1. Velocidad de flujo alrededor del casco (elaboración propia)

Presión

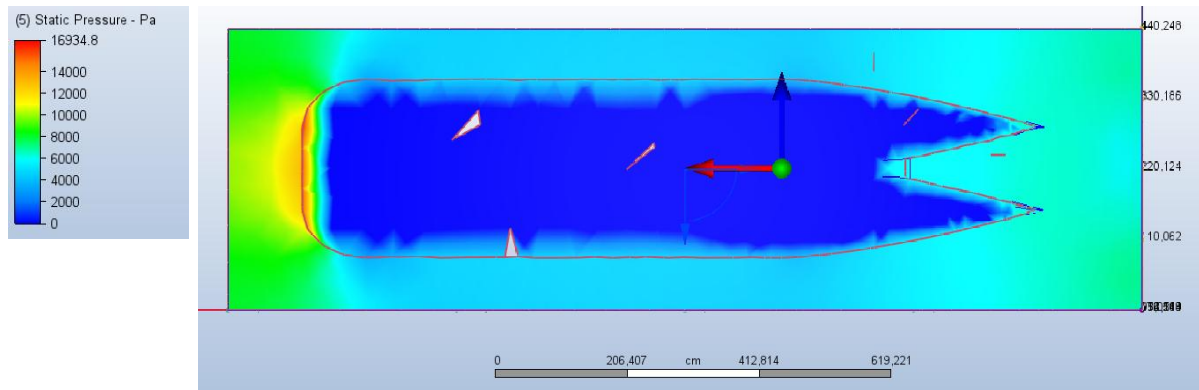
Como se puede observar en las ilustraciones de la Figura 0-2, especialmente en (d) y (e), la presión es más alta en la proa y descende al pasar la zona de arrays sonar de proa. Esto evita el paso a flujo turbulento en la proa. Asimismo, se puede observar que se consigue la distribución de presión ideal, mostrada anteriormente en la Figura 3-7.



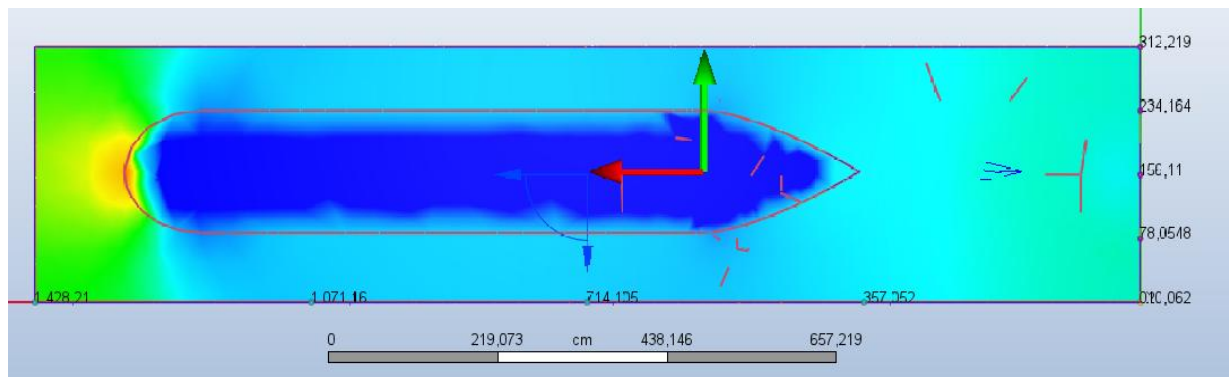
Presión hidrostática en cuaderna maestra (a)



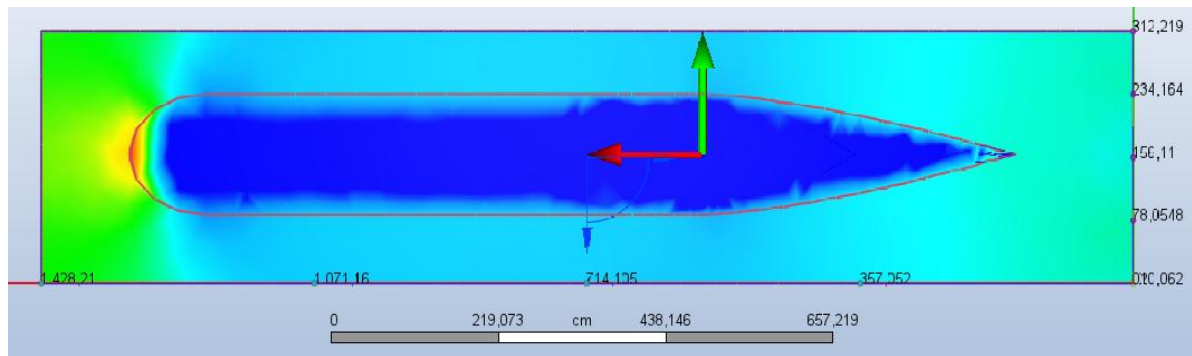
Presión hidrostática en proa (b)



Presión hidrostática en el plano de simetría (c)



Presión hidrostática en crujía (d)



Presión hidrostática en casco cilíndrico y cono de popa (e)

Figura 0-2. Presión hidrostática alrededor del submarino (elaboración propia)

ANEXO VII: RESULTADOS DE RESISTENCIA AL AVANCE POR EL MÉTODO DE FREUD

Resistencia por Fricción				
Velocidad	n° Reynolds	Coef. Fricción	Resistencia de fricción (N)	Potencia efectiva (W)
0	0,00E+00			
1	5,02E+06	3,03E-03	31,62	16,27
2	1,00E+07	2,68E-03	111,71	114,94
3	1,51E+07	2,50E-03	234,54	361,97
4	2,01E+07	2,38E-03	397,55	818,06
5	2,51E+07	2,30E-03	599,07	1540,94
6	3,01E+07	2,23E-03	837,90	2586,33
7	3,52E+07	2,18E-03	1113,11	4008,44
8	4,02E+07	2,13E-03	1423,93	5860,25
9	4,52E+07	2,10E-03	1769,70	8193,72
10	5,02E+07	2,06E-03	2149,89	11059,97
11	5,52E+07	2,03E-03	2564,00	14509,36

Resistencia de Forma				
Velocidad	n° Reynolds	Coef. Forma	Resistencia de fricción (N)	Potencia efectiva (W)
0	0,00E+00			
1	5,02E+06	3,39E-03	35,39	18,21
2	1,00E+07	3,00E-03	125,05	128,66
3	1,51E+07	2,80E-03	262,55	405,19
4	2,01E+07	2,67E-03	445,01	915,74
5	2,51E+07	2,57E-03	670,60	1724,93
6	3,01E+07	2,50E-03	937,95	2895,15
7	3,52E+07	2,44E-03	1246,02	4487,06
8	4,02E+07	2,39E-03	1593,95	6559,98
9	4,52E+07	2,35E-03	1981,01	9172,08
10	5,02E+07	2,31E-03	2406,59	12380,57
11	5,52E+07	2,27E-03	2870,15	16241,82

Resistencia de presión			
Velocidad	Coef. Presión	Resistencia presión (N)	Potencia efectiva (W)
0	0,00E+00		
1	1,21E-03	12,64	6,50
2	1,07E-03	44,64	45,93
3	9,99E-04	93,72	144,65
4	9,52E-04	158,86	326,90
5	9,18E-04	239,39	615,77
6	8,92E-04	334,84	1033,52
7	8,70E-04	444,81	1601,81
8	8,53E-04	569,02	2341,82
9	8,37E-04	707,19	3274,30
10	8,24E-04	859,12	4419,68
11	8,12E-04	1024,60	5798,09

