



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño conceptual de un XLUUV

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Álvaro Monedero Rodríguez y Muñoz

DIRECTORES: Pedro Carrasco Pena

Carlos Pérez Collazo

CURSO ACADÉMICO: 2025-2026

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño conceptual de un XLUUV

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_deVigo

RESUMEN

El diseño conceptual de un buque de guerra es el primer paso dentro del análisis industrial de una plataforma naval militar que sea capaz de cumplir con sus Objetivos Tácticos. Así, el estudio conceptual de un XLUUV modular con gran autonomía sirve de herramienta para las necesidades de la Armada española en materia del Arma Submarina nacional. Este proyecto conceptual se concibe como un diseño para ampliar las capacidades operativas de la Armada en misiones tácticas (ISR, ASW y minado) en entornos submarinos hostiles. En el contexto militar, el diseño conceptual de una plataforma autónoma se desarrolla con el análisis industrial de sus capacidades y necesidades; todo ello con la definición de geometrías, estudios de estabilidad y de energía, definición de sistemas eléctricos y de propulsión, junto con la definición preliminar de los equipos de a bordo. Esto va acompañado de la evaluación de desempeño con la que se analizan aspectos de cinemática, consumos, permanencia y generación energética, en adición a una partida presupuestaria y un análisis de rentabilidad y viabilidad que determina su potencial para operaciones navales autónomas. Con ello, se define la propuesta a nivel conceptual de una unidad autónoma operativa para la conducción de operaciones militares.

PALABRAS CLAVE

Dron, Submarino, Diseño conceptual, Energía mareomotriz, Plataforma multimisión.

ABSTRACT

The conceptual design of a warship is the first step in the industrial analysis of a naval combat platform capable of fulfilling its tactical objectives. Thus, the conceptual study of a modular XLUUV with high autonomy serves as a tool to meet the Spanish Navy's requirements regarding the national submarine force. This conceptual project is conceived as a design to expand the Navy's operational capabilities in tactical missions (ISR, ASW and mine operations) in hostile underwater environments. In the military context, the conceptual design of an autonomous platform is developed through an industrial analysis of its capabilities and requirements; this involves defining geometries, conducting stability and energy studies, defining electrical and propulsion systems, and establishing a preliminary specification of the on-board equipment. This is accompanied by a performance evaluation that analyses aspects of kinematics, consumption, endurance and power generation, in addition to the definition of a budget allocation and a cost-benefit and feasibility analysis that determines its potential for autonomous naval operations. This defines the conceptual proposal for an autonomous operational unit for the conduct of military operations.

KEYWORDS

Drone, Submarine, Concept design, Tidal power, Multi-mission platform.

RESUMO

O deseño conceptual dun buque de guerra é o primeiro paso na análise industrial dunha plataforma de combate capaz de cumprir cos seus obxectivos tácticos. Así, o estudo conceptual dun XLUUV modular de alta autonomía serve como ferramenta para satisfacer os requisitos da Armada Española en relación coa forza submarina nacional. Este proxecto conceptual concíbese como un deseño para ampliar as capacidades operativas da Armada en misións tácticas (ISR, ASW e colocación de minas) en ambientes submarinos hostís. No contexto militar, o deseño conceptual dunha plataforma autónoma desenvólvese mediante unha análise industrial das súas capacidades e requisitos; isto implica definir xeometrías, realizar estudos de estabilidade e enerxía, definir sistemas eléctricos e de propulsión, e establecer unha especificación preliminar do equipamento a bordo. A isto acompañañalle unha avaliación de rendemento que analiza aspectos da cinemática, o consumo, a autonomía e a xeración de enerxía, ademais dunha asignación orzamentaria e unha análise de custo-beneficio e viabilidade que determina o seu potencial para operacións navais autónomas. Isto define a proposta conceptual dunha unidade operativa autónoma para a realización de operacións militares.

PALABRAS CLAVE

Dron, Submarino, Deseño conceptual, Enerxía das mareas, Plataforma de misión múltiple.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi madre, porque gracias a ella estoy en este mundo y me ha criado con arrojo y valentía inculcándome valores para ser el hombre en el que me he convertido hoy. Gracias, mamá por tu tesón y por estar siempre ahí, por el apoyo estos últimos meses durante el desarrollo de este proyecto. Agradezco a mis abuelos maternos por haber ayudado a mi madre en mi crianza y preocuparse por mi bienestar. A mi abuelo Andrés, a quien le debo la pasión por la Armada, ya que desde pequeño me transmitió su amor y dedicación hacia esta profesión por su vocación de submarinista y su servicio a España con honor. Gracias Yayo por ese interés en este ámbito y por los valores tan importantes como lo son el honor, el valor, la disciplina y la lealtad.

Agradezco a los Pateres, Don Vicente, Don César y Don Luis por acompañarme en esta singladura de estos cinco años y por orientarme por el buen camino, ayudándome a ser mejor persona cada día y a disfrutar de los momentos en mi estancia en la escuela y en Elcano. También agradecer a todos los mandos que he tenido en mis embarques por haberme enseñado todo aquello que me ha permitido hacer este trabajo, y por ayudarme en mis primeros pasos en esta tan noble profesión. Así como a la promoción 426-156 por estos últimos meses y los cinco años en la Escuela Naval y las memorias que en ella hemos hecho. Agradezco al profesorado del centro por sus clases que he cursado en la escuela y gracias a los cuales he aprendido todos los conocimientos en las materias que me han permitido afrontar este proyecto.

Por último, agradecer al CC Pedro Carrasco Pena por su inmensa paciencia con todas las vicisitudes que me han surgido durante el desarrollo de este trabajo, por ayudarme a seguir con la compleción del prototipo ante mis dudas e ideas incomprensibles, y por iluminar el buen camino para el resultado que aquí se presenta. Y agradecer también a Don Carlos Pérez Collazo por orientarme en todas mis dudas, compartir su conocimiento sobre materias de dificultad y estar disponible desde la Universidad de Vigo.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de figuras	4
Índice de tablas	6
Lista de acrónimos.....	8
1 Introducción.....	13
1.1 Contexto	13
1.2 Motivación del trabajo.....	13
1.3 Caracterización del problema	14
1.4 Objetivos	15
1.5 Metodología.....	15
1.6 Alcance.....	17
1.7 Estructura.....	17
2 Estado del arte	19
2.1 Definición de XLUUV	19
2.2 Importancia del Arma Submarina	20
2.3 Operatividad en el teatro de operaciones.....	20
2.4 Sensores y sistemas de a bordo	21
2.5 Proyectos actuales de XLUUV	22
2.6 Sinergia para la concepción de diseño.....	24
2.7 Parametrización de diseño de un submarino	24
2.7.1 Fases de diseño	24
2.7.2 Estructura de la plataforma.....	25
2.8 Energía undimotriz y mareomotriz.....	25
2.9 Marco normativo y estandarización	26
3 Desarrollo del diseño	27
3.1 Perfil operativo	27
3.1.1 Análisis de la misión y capacidades operativas.....	27
3.1.2 Misiones	28
3.1.3 CONOPS	29
3.1.4 Teatro de operaciones.....	29
3.1.5 Reglas de enfrentamiento y empleo de la plataforma	30
3.2 Estudio del entorno de operaciones	30
3.2.1 Propiedades físicas del agua	31
3.2.2 Definición de flujo.....	32
3.2.3 Cavitación.....	33
3.3 Diseño y dimensionamiento	34
3.3.1 Configuración del casco	34
3.3.2 Diseño estimaciones iniciales.....	35
3.3.3 Casco ligero	36
3.3.4 Casco resistente	36
3.3.5 Disposición general	37
3.3.6 Selección de materiales	38
3.3.7 Dimensionado de la geometría	39
3.4 Parametrización hidrostática	40
3.4.1 Distribución de pesos	40

3.4.2 Estabilidad	41
3.4.3 Coeficientes de forma.....	44
3.4.4 Diseño de tanques de lastre y trimado	44
3.4.5 Polígono de equilibrio de lastres	46
3.5 Maniobrabilidad	47
3.5.1 Navegación inercial.....	47
3.5.2 Superficies de control	49
3.6 Planta eléctrica	49
3.6.1 Arquitectura de la planta eléctrica	50
3.6.2 Sistemas de control (PMS y BMS).....	51
3.6.3 Baterías	51
3.6.4 Sistema de generación de energía.....	53
3.6.5 Gestión de la energía	54
3.7 Planta propulsora	55
3.7.1 Arquitectura de la planta propulsora	55
3.7.2 Sistema de propulsión (Pump-Jet).....	56
3.7.3 Perfil de navegación	58
3.8 Sistemas y equipos	59
3.8.1 Sistema de Combate (SCOMBA).....	60
3.8.2 Sistema Autónomo de Combate Submarino (ASCS).....	60
3.8.3 Armamento (WCS).....	60
3.8.4 Sistema de Control de Plataforma (SCP)	60
3.8.5 Sistema de Contramedidas (SDEF)	61
3.8.6 Sistema de Gestión de la Información (SGI).....	61
3.8.7 Sistemas de Comunicaciones (SCOM)	61
3.8.8 Equipo polivalente.....	61
4 Evaluación de desempeño de la plataforma	63
4.1 Estudio cinemático del XLUUV	63
4.1.1 Definición de la parametrización.....	64
4.1.2 Definición de la actitud	65
4.1.3 Definición del movimiento lineal.....	65
4.1.4 Definición del momento lineal	65
4.1.5 Definición de fuerzas y momentos	66
4.2 Estudio de consumos y permanencia.....	68
4.3 Análisis de generación de energía mareomotriz y undimotriz	71
4.3.1 Estudio de los recursos de energía.....	73
4.4 Validación del diseño conceptual.....	74
5 Análisis económico y de viabilidad.....	75
5.1 Rentabilidad del proyecto.....	75
5.2 Presupuesto.....	75
5.2.1 Gastos de operación.....	77
5.3 Análisis de viabilidad	78
6 Conclusiones y líneas futuras	79
6.1 Conclusiones sobre la plataforma.....	79
6.1.1 Conclusión personal del proyecto	80
6.1.2 Análisis general del proyecto	80
6.2 Líneas futuras	81
7 Bibliografía.....	82

Anexo I Implicaciones sociales, económicas y ambientales	85
Anexo II Reflexiones éticas y sociales	88
Anexo III Estudio Básico de Seguridad y Salud	90
Anexo IV Estudio de Impacto Ambiental	92
Anexo V Ficha de especificaciones del XLUUV	94
Anexo VI Planos de formas.....	97
Anexo VII Disposición general	98
Anexo VIII Partida presupuestaria	99
Anexo IX Proceso de modelado de diseño	117
Anexo X Análisis del recurso energético marino	125
Anexo XI Estudio Montecarlo de permanencia	130
Anexo XII Análisis acústico operativo	135
Anexo XIII Arquitectura de software e IA.....	142
Anexo XIV Análisis de riesgos y matriz RAMS	146
Anexo XV Pruebas de mar y certificaciones.....	150
Anexo XVI Coordenadas de la geometría.....	175

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Pasos iniciales del TFG (Elaboración propia).	16
Figura 1-2 Espiral de Evans para definir el alcance del proyecto (Elaboración propia).	17
Figura 2-1 Presencia de las FAS de España en el exterior (EMAD – Ministerio de Defensa).	21
Figura 2-2 Unidades XLUUV actuales en el ámbito internacional (Elaboración propia).	22
Figura 2-3 Sistemas undimotrices y mareomotrices según ubicación y anclaje (OVACEN).	25
Figura 3-1 Batimetría de las AOI nacionales de España (GEBCO).	29
Figura 3-2 Gráfica Eslora-Desplazamiento de XLUUV internacionales (Elaboración propia).	35
Figura 3-3 Geometría del casco ligero (Elaboración propia / DELFTship).	36
Figura 3-4 Disposición del casco resistente (Elaboración propia / AutoCAD).	37
Figura 3-5 Disposición general (Elaboración propia / AutoCAD).	37
Figura 3-6 Estabilidad de un submarino en superficie e inmersión (Elaboración propia).	42
Figura 3-7 Polígono de estabilidad de trimado.	46
Figura 3-8 Polígono de estabilidad de lastre.	47
Figura 3-9 Esquema de funcionamiento del INS (Elaboración propia).	48
Figura 3-10 Arquitectura de la planta eléctrica (Elaboración propia).	50
Figura 3-11 Características de las baterías Li-ion NMC (Elaboración propia).	52
Figura 3-12 Funcionamiento de batería Li-ion en descarga (Elaboración propia).	53
Figura 3-13 Arquitectura de la planta propulsora (Elaboración propia).	56
Figura 3-14 Diseño de un sistema Pump-Jet para propulsión (Elaboración propia / AutoCAD).	57
Figura 3-15 Perfil de navegación del despliegue del XLUUV (Elaboración propia).	58
Figura 3-16 Diagrama de sistemas del XLUUV (Elaboración propia).	59
Figura 4-1 Esquema de movimiento de un submarino. (Elaboración propia).	63
Figura 4-2 Representación cinemática de los vectores de la velocidad. (Elaboración propia).	64
Figura 4-3 Representación de las fuerzas y momentos (Elaboración propia).	67
Figura 4-4 Sistemas de generación de energía (Elaboración propia).	71
Figura 4-5 Diseño validado del proyecto conceptual (Elaboración propia / DELFTship).	74
Figura 5-1 Presupuesto Total del XLUUV (Elaboración propia).	76
Figura 5-2 Ahorro e inversión de presupuestos de la serie UMS (Elaboración propia).	77
Figura A9-1 Primera propuesta de diseño conceptual (Prototipo 01).	118
Figura A9-2 Segunda propuesta de diseño conceptual (Prototipo 02).	119
Figura A9-3 Tercera propuesta de diseño conceptual (Prototipo 03).	119
Figura A9-4 Puntos de control de la geometría conceptual.	120
Figura A9-5 Geometría de la proa.	120
Figura A9-6 Geometría del cuerpo central.	121
Figura A9-7 Geometría de la popa con las aletas estabilizadoras.	121

Figura A9-8 Geometría de la tobera.	122
Figura A9-9 Geometría del timón de profundidad.	122
Figura A9-10 Geometría del diseño conceptual.	122
Figura A9-11 Geometría final del prototipo conceptual.	124
Figura A10-1 Energía undimotriz (Energies de MDPI de [A1]).	125
Figura A10-2 Energía mareomotriz (Florida Atlantic University de [A2]).	125
Figura A10-3 Recurso undimotriz en el Mar Mediterráneo (Energy 2016 de MDPI [A3]).	126
Figura A10-4 Recurso mareomotriz en el Mar Mediterráneo (OS-EGU de [A4]).	126
Figura A10-5 Recurso undimotriz en el Mar Báltico (Renewable energies de [A5]).	127
Figura A10-6 Recurso mareomotriz en el Mar Báltico (Renewable energies de [A6]).	127
Figura A10-7 Recurso mareomotriz en el Mar Rojo (Renewable energies de [A7]).	128
Figura A10-8 Recurso undimotriz en el Mar Rojo (Bower Labs de [A8]).	128
Figura A12-1 Representación de propagación acústica (Elaboración propia).	140
Figura A13-1 Diagrama de la arquitectura de software del XLUUV (Elaboración propia).	145

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Magnitudes principales de los XLUUV internacionales.	35
Tabla 3-2 Características del acero HLES80 y Böhler P501.	38
Tabla 3-3 Dimensiones principales de la plataforma (DELFTship).	39
Tabla 3-4 Contribución de pesos de sistemas a la plataforma.	40
Tabla 3-5 Relación de pesos de los sistemas de a bordo.	41
Tabla 3-6 Análisis de estabilidad para el cálculo de KG y KM.	43
Tabla 3-7 Estabilidad del XLUUV.	43
Tabla 3-8 Comparativa de especificaciones de baterías.	52
Tabla 3-9 Estudio de sistemas de energía mareomotriz y undimotriz.	54
Tabla 3-10 Acciones del XLUUV en función del SOC.	55
Tabla 4-1 Consumos básicos de operación.	69
Tabla 4-2 Consumos de propulsión.	69
Tabla 4-3 Consumos periódico.	69
Tabla 4-4 Regímenes de consumo del XLUUV.	70
Tabla 4-5 Permanencia del XLUUV.	70
Tabla 4-6 Capacidades de los sistemas de generación para recarga de energía.	72
Tabla 5-1 Presupuesto de la serie de UMS (XLUUV).	76
Tabla 5-2 Gastos de operación de la fuerza de XLUUV.	77
Tabla 5-3 Estudio de la efectividad global de las misiones del XLUUV.	78
Tabla A3-1 Riesgos laborales de la construcción.	90
Tabla A4-1 Evaluación de factores ambientales del EIA.	93
Tabla A8-1 Grupos de trabajo conforme al SWBS.	99
Tabla A9-1 Parámetros a considerar en el diseño de geometrías preliminares.	117
Tabla A9-2 Principales formas de diseño de geometrías.	118
Tabla A9-3 Capacidades y limitaciones de las geometrías propuestas.	119
Tabla A9-4 Objetivos de la optimización hidrodinámica del diseño.	123
Tabla A9-5 Métodos de prototipado de geometrías.	124
Tabla A11-1 Probabilidades de los regímenes operativos.	131
Tabla A12-1 Fuentes de ruido de propulsión.	136
Tabla A12-2 Fuentes de ruido de maquinaria.	136
Tabla A12-3 Estimaciones de parámetros acústicos.	138
Tabla A12-4 Estudio de alcances según la firma acústica.	139
Tabla A12-5 Capas de propagación para detección y ocultación submarina.	140
Tabla A13-1 Conceptos de la arquitectura de software.	142
Tabla A13-2 Arquitectura funcional del Sistema de software.	143

Tabla A13-3 Sensores de software integrados.	143
Tabla A13-4 Algoritmos de software del sistema.	144
Tabla A13-5 Métodos de aplicación de software.	144
Tabla A13-6 Actuadores integrados en el sistema.	144
Tabla A13-7 Sistemas computacionales de software.	145
Tabla A14-1 Análisis RAMS de los subsistemas de abordó.	148
Tabla A14-2 Medidas de mitigación de los riesgos de RAMS.	148
Tabla A15-1: Distribución típica de requisitos técnicos en XLUUV.	151
Tabla A15-2 Etapas del programa de pruebas para XLUUV.	152
Tabla A15-3: Distribución de pruebas HAT para XLUUV.	155
Tabla A15-4: Instrumentación principal durante pruebas SAT.	164
Tabla A15-5: Ejemplo de requisitos operacionales y tolerancias de aceptación.	165
Tabla A15-6: Ejemplo de medidas de mitigación de riesgos principales.	167
Tabla A15-7: Ejemplo de entradas en Matriz de Verificación de Requisitos.	171

LISTA DE ACRÓNIMOS

Acrónimo	Significado
AAW	Anti Air Warfare
AC	Altern Current
ACINT	Acoustic Intelligence
AEGIS	Sistema de Combate norteamericano (del nombre del escudo de Atenea, la égida)
AHRS	Attitude and Heading Reference System
AIP	Air-Independent Propulsion (Sistema híbrido de propulsión)
AIS	Acoustic Identification System
AOI	Area Of Interest
AOO	Area Of Operations
APEX	Advanced Propulsor Experimental (programa de desarrollo norteamericano)
ASCS	Autonomous Submarine Control System
ASUW	Anti Surface Warfare
ASW	Anti Submarine Warfare
AUKUS	Alianza militar estratégica de AUS (Australia), UK (Reino Unido) y US (E.E.U.U.)
BAM-IS	Buque de Acción Marítima de Intervención Subacuática
BEST	Bio-Ethanol Stealth Technology (tecnología de AIP para la clase S-80)
BMS	Battery Managment System
BRASS	Broadcast and Ship-Shore System (Sistema de comunicaciones de la Armada)
BRICS	Alianza política y económica de Brasil, Rusia, India, China y Sudáfrica
C2	Control and Command
C3	Control, Command and Communications
CAGR	Compound Annual Growth Rate (Tasa de Crecimiento Anual Compuesta)
CALOP	Calificación Operativa
CAS	Cilyndrical Array Sonar
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
CI	Counter Intelligence
COMMS	Comunicaciones (Nombre de uso en ámbito militar)
CONOPS	Concept of Operations

Acrónimo	Significado
CTD	Instrumento oceanográfico para medir Conductividad, Temperatura y Profundidad
DC	Direct Current
DG	Diésel Generador
DGA	Direction Générale de l'Armement de la marina de Francia
DIH	Derecho Internacional Humanitario
DoD	Depth of Discharge (Capacidad de descarga de un batería)
DOF	Degree Of Freedom
ELF	Extremely Low Frequency (banda del espectro electromagnético para comms)
ELINT	Electronic Intelligence
EM	ElectroMagnética
EMS	Energy Managment System
EMSA	European Maritime Security Agency
ESUS	Boya para comunicaciones submarinas desde superficie
EW	Electronic Warfare
F-110	Fragata española con capacidad Anti Submarina
FAS	Fuerzas Armadas de España
FS	Factor de Seguridad
GEBCO	General Bathymetric Chart of the Oceans
GNSS	Global Navigation Satellite System
HF	High Frequency (banda del espectro electromagnético para comms)
HY	High Yield (denominación para acero), siendo HLES (High Limit Elastic Steel)
I+D+i	Investigación + Desarrollo + Innovación
IA	Inteligencia Artificial
ICSC	Integrated Combat System Core
IHM	Instituto Hidrográfico de la Marina
IMINT	Imagery Intelligence
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
IW	Information Warfare
IWS	Information Warfare System

Acrónimo	Significado
JISR	Joint Intelligence, Surveillance and Reconnaissance
L-51	BAA Galicia (Buque de Asalto Anfíbio español con dique a bordo)
L-52	BAA Castilla (Buque de Asalto Anfíbio español con dique a bordo)
L-61	BAM Juan Carlos I (Buque de Acción Multipropósito español con dique)
LCC	Life Cycle Cost
LCDR	Leutenant Commander (cargo militar de la USN)
LFS	Looking Forward Sonar
LIB	Lithium Ion Battery
LOA	Lenght OverAll (eslora total de un buque)
MARPOL	Marine Pollution (Reglamento internacional contra la contaminación marina)
MASINT	Measurement and Signature Intelligence
MCM	Mine CounterMeasures
MEA	Mission Efficiency Analysis (método de análisis de rentabilidad económica)
MIW	Mine Warfare
MN	Milla Náutica (medida de distancia en el ámbito naval)
MN	Marine Nationale de la marina de Francia
NACA	Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica (denominación de perfiles)
NMC	Níquel-Manganeso-Cobalto (tipo de tecnología de baterías de Litio-Ion)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
NSC	Naval Ship Code (estándar internacional para seguridad)
OE / IR	OptoElectrónico e InfraRojo (denominación de sensores)
OMI	Organización Marítima Internacional
ONMS	Own Noise Managment System
ONST	Outline NATO Staff Target (objetivos y requisitos a nivel OTAN)
OSINT	Open Source Intelligence
OTAN	Organización del Tratado del Atlántico Norte (por sus siglas en francés)
Payload	Carga útil para integración de sistemas y cargas
PEM	Presupuesto de Ejecución Material
PFAS	Passive Flanked Array Sonar
PIP	Periodo de Inmovilización Planeado

Acrónimo	Significado
PJP	Pump-Jet Propulsion
PL	Presupuesto de Licitación
PLAN	People's Liberation Army Navy de China
PMS	Power Managment System
PT	Presupuesto Total
RAN	Royal Australian Navy
RF	Radio Frequency
RN	Royal Navy de Reino Unido
ROE	Rules of Engagement – Reglas de Enfrentamiento
ROV	Remote Operated Vehicule
RV	Rendez-Vous (punto de referencia para posicionamiento en la navegación)
S-80	Clase Isaac Peral de Submarinos españoles de última generación (botado en 2021)
SATCOM	Satellital Communications
SBW	Sea Bed Warfare
SCOM	Sistema de Comunicaciones (guiado para control y decisiones del mando)
SCOMBA	Sistema de Combate de Buques de la Armada (control total de la plataforma)
SCP	Sistema de Control de Plataforma (control de sistemas y control)
SDEF	Sistema de Defensa (encargado de contramedidas y defensa de la plataforma)
SGI	Sistema de Gestión de Información
SIGINT	Signal Intelligence
SLAM	Simultaneous Localization And Mapping
SLOC	Sea Lane Of Communication (Rutas de navegación establecidas para buques)
SNMCMG-1	Standing NATO Mine CounterMeasures Group (Agrupación OTAN de MCM)
SNMG-1	Standing NATO Maritime Group 1 (Agrupación OTAN en el Atlántico y Báltico)
SNMG-2	Standing NATO Maritime Group 2 (Agrupación OTAN en el Mediterráneo)
SOC	State Of Charge
SOLAS	Security Of Life At Sea (Convenio internacional para seguridad en la mar)
SSS	Side Scan Sonar (Barrido ateral)
SWBS	Ship Work Breakdown Structure
TFG	Trabajo de Fin de Grado

Acrónimo	Significado
TST	Tránsito (régimen de navegación)
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UCUV	Unmanned Combat Underwater Vehicle (designación de plataforma francesa)
UE	Unión Europea (Alianza de países europeos)
UHF	Ultra High Frequency (banda del espectro electromagnético para comms)
UNCLOS	Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar
UPS	Uninterruptible Power Supply (Sistema Auxiliar de Potencia)
USN	United States Navy
USV	Uncrewed Surface Vessel
UUV	Unmanned Underwater Vehicle
WCS	Weapon Control System
XLUUV	ExtraLarge Uncrewed Underwater Vessel
ZEE	Zona Económica Exclusiva
ZEEP	Zona Económica Exclusiva Pesquera

1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo expone la presentación de los elementos más importantes de todo trabajo de investigación. En él se explica el motivo por el cual se ha llegado a trabajar sobre la materia de estudio en cuestión, que será presentada en los 6 capítulos que conforman este Trabajo de Fin de Grado (TFG).

1.1 Contexto

El entorno marítimo actual y la situación geopolítica de nuestra actual sociedad exige que las armadas modernas mantengan una actividad de vigilancia marítima en las áreas de interés nacional para proporcionar así, una ventaja estratégica y garantizar de tal modo la seguridad de sus aguas y el usufructo de estas. La Armada española en el marco de sus objetivos (cómo se definirá en el Estado del Arte posteriormente) tiene la premisa de mantener la operatividad en escenarios cada vez más complejos para la ejecución de sus misiones y operaciones.

En este contexto, los submarinos no tripulados de gran autonomía emergen como plataformas con la capacidad de complementar a los medios militares convencionales, como son los submarinos S-80 y las fragatas F-110, permitiendo la ejecución de misiones que sean prolongadas para la vigilancia y control del dominio marítimo sin la dependencia del factor humano. Su desarrollo e integración en las capacidades navales ya existentes representa una oportunidad para ampliar el alcance operativo de la Armada Española y favorecer una adaptación a las nuevas doctrinas para el empleo de fuerzas navales.

1.2 Motivación del trabajo

Desde el desarrollo del primer submarino de carácter militar en 1888 por Isaac Peral y Caballero, hasta la botadura del primer submarino de la clase S-81 tras 135 años con el nombre de este ilustre marino y militar español; el Arma Submarina ha sido figura indiscutible dentro del poder naval español, y después de una época de escasez está viendo de nuevo en los tiempos venideros un auge en su presencia e importancia dentro del panorama militar nacional.

Desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, el diseño de un submarino no tripulado constituye un desafío técnico especialmente atractivo, al requerir la integración de múltiples disciplinas fundamentales que han sido impartidas durante el grado de Ingeniería Mecánica y siendo principal con la intensificación de tecnologías navales del propio grado como factor de la educación a nivel defensa.

Aspectos como el dimensionamiento estructural del casco resistente frente a elevadas presiones hidrostáticas, el análisis hidrodinámico de la plataforma, la selección de materiales adecuados para el ambiente marino y la optimización del consumo energético con estudios y análisis en la materia son elementos clave que permiten aplicar de forma práctica y coherente los conocimientos que han sido adquiridos a lo largo de la formación académica del grado.

Asimismo, el desarrollo conceptual de este tipo de plataformas resulta de especial interés en el ámbito nacional de la Armada, donde existe una creciente apuesta por la innovación tecnológica en defensa. La posibilidad de analizar, desde un enfoque académico, un submarino no tripulado orientado a las necesidades operativas de la Armada Española permite contextualizar el proyecto dentro de un marco realista y de utilidad, alineándose con las tendencias de actualidad y futuras del sector naval.

De esta manera, el presente TFG se ha concebido como una oportunidad para profundizar en metodologías de diseño propias de la ingeniería, abordando el proyecto de forma sistemática desde la definición de requisitos hasta la validación de un diseño preliminar. De tal modo, el trabajo no solo persigue el desarrollo de una solución viable, sino también la adquisición de una visión global del proceso de diseño de sistemas complejos, sentando una base sólida para futuros estudios o desarrollos profesionales en el ámbito de la ingeniería naval para defensa.

1.3 Caracterización del problema

El Arma Submarina constituye uno de los pilares del poder naval moderno, gracias a este se les permite a las armadas proporcionar una combinación única de discreción, persistencia y capacidad de disuasión. En el caso de la Armada española, los submarinos convencionales han desempeñado históricamente un papel clave en la defensa de los intereses marítimos nacionales. No obstante, la operación de plataformas tripuladas y su puesta en escena en el teatro de operaciones implica elevados costes económicos y logísticos, así como limitaciones operativas relativas a la disponibilidad y la permanencia en zona de las unidades.

De forma paralela, el entorno estratégico marítimo ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas gracias a la innovación tecnológica en el sector. El incremento de la actividad naval en áreas de interés, la protección de infraestructuras críticas, la proliferación de sensores submarinos y la aparición de escenarios de conflicto de baja intensidad y alta persistencia. Estos factores en su conjunto han generado nuevas exigencias operativas que no siempre pueden ser cubiertas de manera eficaz y eficiente por medios convencionales.

En este contexto, surge la necesidad de complementar el Arma Submarina con sistemas capaces de operar de forma prolongada y discreta, asumiendo misiones de vigilancia y control sin el compromiso del factor humano. En el ámbito internacional, diversas armadas han iniciado el desarrollo de submarinos no tripulados de gran autonomía (XLUUV) como respuesta a estos retos presentados en el siguiente capítulo. Estas plataformas se conciben como multiplicadores de fuerza, capaces de ampliar el alcance sensorial de las flotas, ejecutar misiones persistentes y reducir la dependencia de unidades tripuladas con mayores permanencias sin el factor humano en juego. El avance de estos programas refleja una tendencia clara hacia la incorporación progresiva de sistemas autónomos en la guerra naval y en el entorno submarino.

Ante este escenario, la Armada española se enfrenta al desafío de mantener su capacidad tecnológica y operativa en un entorno caracterizado por una rápida evolución de los sistemas navales militares. La ausencia de desarrollo o adaptación a estas nuevas tecnologías podría derivar en una pérdida progresiva de capacidades relativas y en un declive del poder del Arma Submarina. Desde una perspectiva más amplia, el mantenimiento del desarrollo tecnológico y armamentístico no responde únicamente a necesidades operativas inmediatas, sino también a la preservación del conocimiento industrial y técnico asociado al diseño y construcción de sistemas navales avanzados.

La exploración de conceptos como los XLUUV permite analizar nuevas soluciones de ingeniería, fomentar la innovación y sentar las bases para futuras capacidades militares, ya sea mediante el desarrollo propio o la integración de sistemas que permita la interoperabilidad con fuerzas aliadas en entornos operativos.

1.4 Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es el diseño a nivel conceptual de un XLUUV para la conducción de operaciones de larga duración en un teatro de operaciones, donde se permita hacer uso del arma submarina de forma eficaz y en apoyo a las capacidades actuales de la Armada. Con este fin, para el desarrollo de la plataforma de una forma viable y eficaz, además de su diseño funcional se disponen una serie de objetivos secundarios, en virtud de alcanzar el objetivo principal de este, que se definen de la siguiente manera:

1. Definición del perfil de la misión de la plataforma.
2. Estudio de la cinemática del submarino durante la navegación.
3. Desarrollo de un diseño funcional con su dimensionado.
4. Análisis de equipos y sistemas.
5. Definición de la generación de energía y de la planta propulsora.
6. Estudios de pesos, flotabilidad y estabilidad de la plataforma.
7. Disposición de sistemas y distribución interna.
8. Maniobrabilidad y resistencia dinámica.
9. Estudio de viabilidad funcional y análisis económico.

Alcanzando los objetivos se caracterizará el diseño a nivel conceptual de un XLUUV para uso militar por parte de la Armada para la ejecución de operaciones y misiones del Ministerio de Defensa.

1.5 Metodología

El desarrollo del presente TFG adopta un enfoque de ingeniería de sistemas para el desarrollo del submarino, tratando la plataforma como un sistema de sistemas integrados. La metodología sigue una estructura de carácter iterativo y progresivo, organizada en las siguientes fases:

- **Definición y Requisitos:** Se parte del perfil operativo y los requisitos funcionales para establecer una base técnica trazable.
- **Diseño y Dimensionamiento:** Se desarrolla el diseño conceptual y el dimensionamiento preliminar, integrando en paralelo los sistemas de navegación (IMU), la planta propulsora (energía mareomotriz y undimotriz) y la carga útil de sensores.
- **Definición y Selección:** con la caracterización de los equipos de a bordo con su distribución, y la selección de materiales, baterías, y demás componentes y equipos.
- **Modularidad y Sinergia:** El diseño prioriza la arquitectura modular, facilitando la interoperabilidad y el intercambio de sistemas en entornos militares.
- **Validación y Optimización:** Mediante ciclos de retroalimentación, los resultados de cada fase permiten ajustar el diseño global hasta obtener una solución equilibrada y técnica consistente.

Asimismo, la metodología seguida incorpora un carácter iterativo, en el que los resultados obtenidos en las fases de análisis retroalimentan el proceso de diseño, permitiendo ajustar los parámetros del sistema hasta alcanzar una solución equilibrada, viable y alineada con los objetivos del proyecto. De este modo, la aplicación de la ingeniería de sistemas proporciona un marco estructurado que asegura la integralidad de forma eficaz de los distintos subsistemas y conjuntos.

Esta metodología queda presentada en la Figura 1-1, donde se analiza el problema existente con sus causas y consecuencias. Con ello, se plantean las preguntas de requisitos de diseño y una matriz de consistencia. Gracias a esto, se procede con la justificación de la problemática, su marco teórico y finalmente la solución obtenida.

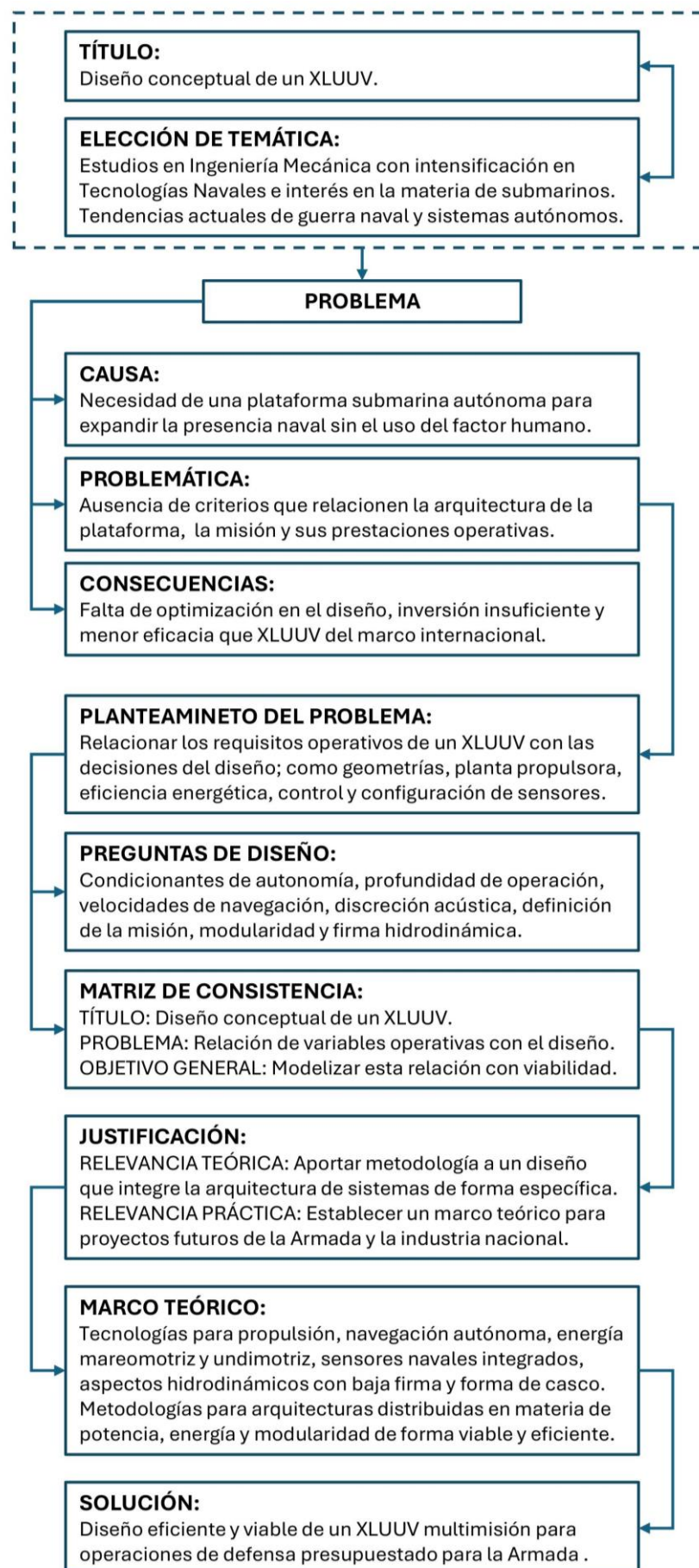


Figura 1-1 Pasos iniciales del TFG (Elaboración propia).

1.6 Alcance

El alcance del presente trabajo se basa en la definición de un modelo conceptual de un XLUUV mediante su diseño y parametrización, con la definición de todos los conceptos en materia de arquitectura, sistemas y equipos necesarios para la compleción del citado modelo. De este modo, y siguiendo las directrices de las fases preliminares de un diseño dentro del ámbito militar para buques, submarinos y demás plataformas [1]; el alcance del diseño se encuadra dentro de la primera fase con los estudios de viabilidad previa y el diseño conceptual donde se tiene como objetivo el obtener el análisis industrial de la plataforma que son necesarios para cumplir los Objetivos Tácticos Generales (ONST – *Outline NATO Staff Target*) bajo las directrices de la doctrina de la OTAN y materia de Defensa, además de obtener una estimación del coste del proyecto.

Los objetivos ONST son los que definen el alcance del proyecto y se representan en la Figura 1-2 con una espiral de Evans. De igual modo, estos objetivos delimitan la profundidad del marco de desarrollo hasta el punto de la obtención de una solución industrial directa y experimentada, o en su defecto ante una solución incompleta el obtener alternativas a la misma. El alcance se extiende hasta la selección de forma preliminar de los sistemas de abordaje y la estimación de un presupuesto para el proyecto presentado, siendo validado y revisado en última instancia por la Armada.

Figura 1-1 Pasos iniciales del TFG (Elaboración propia).

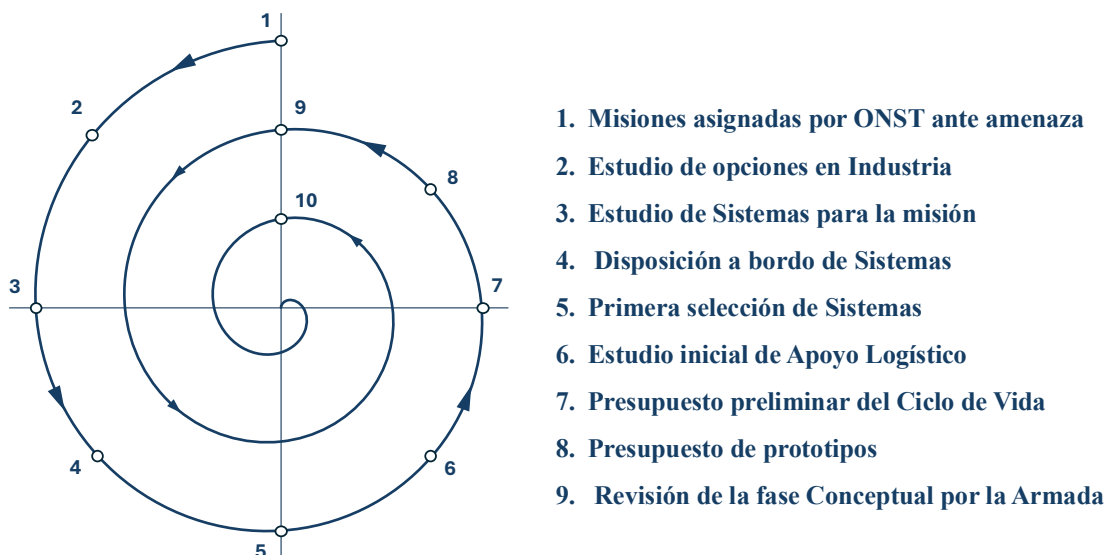


Figura 1-2 Espiral de Evans para definir el alcance del proyecto (Elaboración propia).

1.7 Estructura

El presente TFG se estructura en 6 capítulos para el desarrollo a nivel conceptual de un XLUUV. Los capítulos se definen bajo una metodología Problema-Solución, de modo que se exponen siguiendo:

- Capítulo 1 – Introducción, la presente parte donde se define el proyecto como conjunto.
- Capítulo 2 – Estado del Arte, donde se expone el marco teórico y de referencia con el que se revisan y analizan los conocimientos e investigaciones en los que se basa el desarrollo.
- Capítulo 3 – Marco de Desarrollo, donde se expone la investigación del proyecto y se aplica la metodología dentro del marco teórico de estudio.
- Capítulo 4 – Evaluación de desempeño, se presentan los resultados obtenidos del análisis de desempeño del submarino y se desarrollan los cálculos y estudios sobre el proyecto.
- Capítulo 5 – Análisis económico y de Viabilidad, se estudia y expone el presupuesto y la factibilidad de llevar a cabo el proyecto para proseguir con el diseño contractual.
- Capítulo 6 – Conclusiones, con la síntesis del conjunto del proyecto y un análisis general.
- Bibliografía y Anexos con información complementaria de interés para el proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se exponen las bases necesarias para el desarrollo del trabajo con la definición del concepto de XLUUV como objeto del presente estudio. En adición, se explicará la importancia de estas plataformas y su presencia en el Arma Submarina, se hará un pequeño estudio de los entornos que se presentan para la operatividad del submarino y las posibilidades de sensores y sistemas de a bordo.

Además, se hace un repaso de las capacidades actuales de este marco de estudio por parte de otras armadas a nivel internacional. Y de cara al diseño, en que se basa el concepto de sinestesia para su creación y las especificaciones necesarias para la parametrización de la plataforma. Finalmente, la energía mareomotriz que se hace uso para la generación de energía para el sostenimiento de la autonomía durante la conducción de las operaciones.

2.1 Definición de XLUUV

Un XLUUV (*Extra-Large Uncrewed Underwater Vehicule*) es un vehículo submarino no tripulado de gran tamaño y alta autonomía [2]. Este es una plataforma que se concibe como un submarino autónomo con un alcance operativo de cientos de millas náuticas desde su base y capacidad de llevar una carga útil (*payload*) compuesta por armas, sensores navales y equipos específicos. La operatividad de un XLUUV esta ideada de tal forma que sea operado desde su salida a la mar en un puerto o una plataforma naval, y llegar desde esta hasta la zona de operaciones para la ejecución de la misión y su vuelta a base de forma completamente autónoma.

La eslora de estas plataformas ronda el orden de decenas de metros y desplazamientos de toneladas, además de la existencia de amplias bodegas de carga con gran capacidad de almacenamiento para un uso multimisión de manera versátil siendo plataformas que permiten un uso de manera multimodal con capacidades de adaptación a gran variedad de misiones.

Estas unidades se plantean desde la visión del campo militar como multiplicadores de fuerza para la flota submarina de las naciones que los operan [3]; y que se disponen para la compleción de tareas de alto riesgo y/o alta persistencia: minado ofensivo a grandes distancias, vigilancia prolongada de rutas estratégicas y SLOC, seguimiento encubierto de fuerzas navales enemigas, supervisión de zonas denominadas como *choke points*, despliegue de redes de sensores en el fondo y apoyo a operaciones antisubmarinas (ASW) actuando como nodos avanzados para detección. También se consideran para misiones de guerra electrónica (EW) y *cyber* para escucha, y ataque sobre cables submarinos e infraestructuras críticas, así como para funciones logísticas de naturaleza discreta; todo ello con el objetivo de aumentar la presencia submarina sin la necesidad de recurrir al incremento del número de submarinos tripulados y con lo que se evita la exposición de dotaciones en entornos especialmente exigentes y convulsos con el riesgo derivado del factor humano.

Dentro de los XLUUV, la naturaleza intrínseca de estas plataformas se distingue a través de los programas actuales en función del rol que adoptan para sus misiones. De esta forma, encontramos plataformas dedicadas a operaciones de transporte (logística), variantes orientadas a guerra de minas (MIW), versiones de inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) con alta carga de sensores y comunicaciones, además de configuraciones de combate que integran torpedos, minas y capacidades de guerra electrónica (EW).

Así, la plataforma es capaz de realizar diferentes roles de manera combinada e intercambiable, ya que se adaptan a estos con el uso de la modulación gracias a que se utilizan secciones intercambiables de casco en las que se integran distintas cargas útiles y sistemas, permitiendo así que un mismo casco de una unidad pueda ser reconfigurado en función del rol que se le asigne para la misión encomendada.

2.2 Importancia del Arma Submarina

El Arma Submarina ha sido uno de los instrumentos más discretos pero decisivos de la política de defensa marítima del país [4]. Desde principios del siglo XX, los submarinos han permitido compensar las limitaciones que la Armada sufría en materia de grandes unidades de superficie, ofreciendo una capacidad de disuasión difícil de evaluar para un adversario y muy adecuada al extenso perfil costero y litoral con los intereses nacionales en el Atlántico, Mediterráneo y estrecho de Gibraltar (y demás zonas de interés nacional) que existían en materia de defensa. La tradición técnica y científica española ligada a la navegación submarina en España, con figuras pioneras y una industria que ha ido madurando, ha contribuido a que el submarino se perciba como un símbolo de modernización y de autonomía necesario.

A lo largo del tiempo [5], el empleo del Arma Submarina ha evolucionado desde un enfoque casi exclusivo en la guerra anti-superficie (ASUW) y antisubmarina (ASW) hacia un perfil mucho más amplio y versátil. Actualmente, el submarino se especializa en vigilancia encubierta, control de líneas de comunicación y apoyo a operaciones especiales. Además, su integración en alianzas internacionales potencia su conectividad y operatividad dentro de grupos navales complejos.

Paralelamente, el avance de la industria nacional ha permitido desarrollar tecnologías críticas como la propulsión silenciosa, sensores de alta sensibilidad y sistemas integrados de combate. El submarino convencional ha pasado así de ser una unidad aislada a convertirse en un nodo dentro de una red submarina distribuida. Prueba de esta importancia, es el papel que suponen estas unidades en marinas como la americana [6] y la inglesa [7].

En este contexto, la introducción de vehículos submarinos no tripulados y plataformas autónomas (UUV y AUV) es un paso coherente con las tendencias navales internacionales y con las necesidades específicas de España en este contexto [8]. Estos sistemas permiten asumir misiones de gran variedad de acciones tanto ofensivas como defensivas con un menor riesgo humano y una mayor persistencia. Su combinación con submarinos tripulados de nueva generación abre un escenario en el que el Arma Submarina incrementa su relevancia estratégica.

2.3 Operatividad en el teatro de operaciones

La operatividad de los submarinos no tripulados está caracterizada por su capacidad para la ejecución de misiones de larga duración con un alto grado de autonomía funcional, con estas tecnologías se busca apoyar a las operaciones de las FAS y de la Armada en el panorama internacional dentro de sus frentes abiertos con las misiones y operaciones actuales, como esta desarrollado en la visión de la Armada 2050 [9] y los objetivos de la Armada española [10].

El teatro de operaciones que se presenta para las operaciones es de carácter hostil y cambiante, con lo que se presentan retos para la plataforma en su despliegue. Ante esta situación, la unidad militar debe de conducir sus acciones bajo el control coordinado de los sistemas de a bordo con una planificación estudiada y establecida de manera previa.

La planificación de misiones se apoya en sistemas de navegación autónoma y en modelos predictivos del entorno marino, lo que permite optimizar las rutas y reducir consumos. Así, se permite una mayor y mejor presencia en el teatro de operaciones nacional en el exterior como en la Figura 2-1.

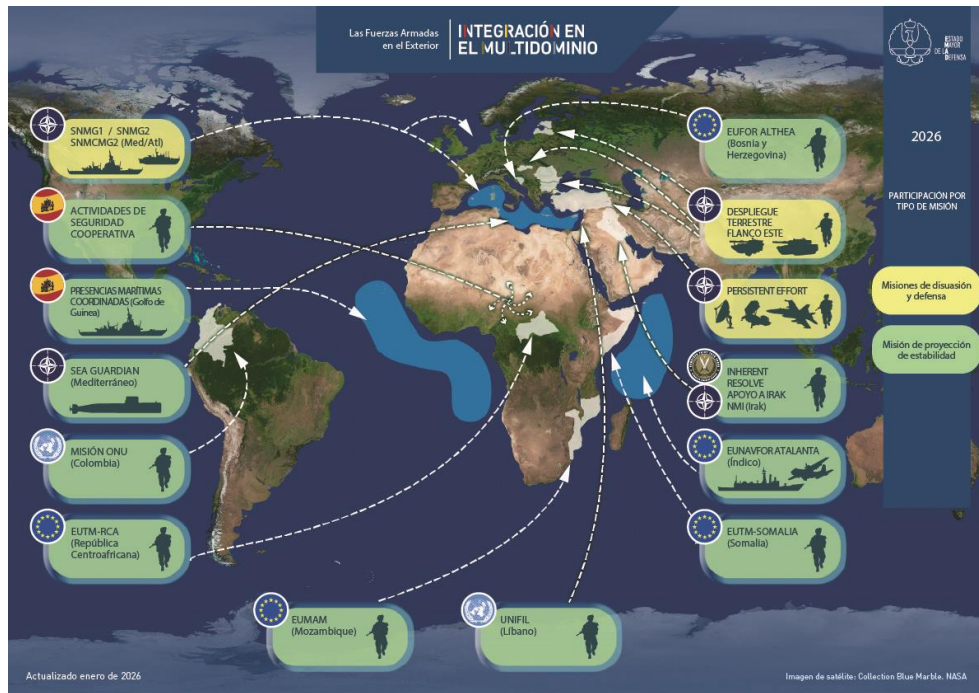


Figura 2-1 Presencia de las FAS de España en el exterior (EMAD – Ministerio de Defensa).

Desde el punto de vista logístico y operativo, los XLUUV presentan ventajas significativas en términos de despliegue y recuperación, al requerir infraestructuras más flexibles que las plataformas tripuladas. No obstante, su uso plantea desafíos asociados a las comunicaciones submarinas de baja latencia, la supervisión remota de sistemas críticos y la gestión de contingencias en tiempo real; es por esto por lo que con la implantación de estas unidades se requiere también una evolución del entorno operativo y la forma de plantear las misiones y operaciones futuras.

La investigación actual se orienta hacia el desarrollo de arquitecturas de control resilientes y protocolos de comunicación híbridos que incrementen la fiabilidad y la seguridad en un teatro de operaciones que es hostil y cambiante.

2.4 Sensores y sistemas de a bordo

Los sistemas de sensores embarcados constituyen el núcleo de su capacidad de percepción del entorno y de adquisición de datos operativos [11]. En plataformas no tripuladas requieren de unos sistemas similares a las plataformas convencionales, estos sistemas suelen incluir conjuntos de sonar activo y pasivo, sensores de presión y profundidad, giróscopos de alta precisión y sistemas de navegación asistidos por GPS en superficie. La arquitectura de adquisición de datos está diseñada para proporcionar información en tiempo real con redundancia funcional y mecanismos de validación. Asimismo, se incorporan sensores ambientales, como sondas de conductividad, temperatura y salinidad, con el objetivo de mejorar la caracterización del medio marino y optimizar el rendimiento hidrodinámico y acústico del vehículo durante su despliegue.

En el caso de submarinos autónomos, la instrumentación embarcada dispone de elementos accesorios y adquiere un papel aún más crítico que en plataformas convencionales con la sustitución directa de la toma de decisiones humanas. Las unidades autónomas integran sensores inerciales de alta estabilidad, unidades de medición inercial (IMU), sistemas de navegación acústica de largo alcance y cámaras submarinas para inspección visual y reconocimiento del entorno.

Toda la información recopilada por los sistemas es procesada mediante algoritmos de fusión, que combinan múltiples fuentes de datos para mejorar la precisión en la estimación de posición, orientación y estado dinámico. Además, los sistemas autónomos incorporan módulos de detección de obstáculos y evasión de colisiones basados en sonares multihaz y técnicas de procesamiento digital de señales, permitiendo una operación segura en entornos complejos, desconocidos y adversos.

Desde el punto de vista de los sistemas auxiliares, tanto las plataformas convencionales como las autónomas requieren subsistemas de soporte vital o energético, control térmico y gestión de potencia. Sin embargo, en vehículos no tripulados se prioriza la optimización energética y la automatización completa del control de actuadores, como lo son timones, hélices y tanques de lastre y trimado. Esto implica el uso de arquitecturas distribuidas de control, comunicación redundante y sistemas de autodiagnóstico capaces de detectar fallos y reconfigurar el comportamiento del vehículo. La tendencia actual en el desarrollo de submarinos autónomos apunta hacia la integración de sistemas inteligentes capaces de adaptar su estrategia operativa en función de las condiciones ambientales del entorno y del estado interno del sistema con la optimización en el uso de recursos.

2.5 Proyectos actuales de XLUUV

El concepto de XLUUV ha trascendido desde una curiosidad tecnológica de ciertas marinas hasta llegar a constituir un componente activo de la modernización de las fuerzas navales contemporáneas como se muestra en la Figura 2-2, evolucionando en proyectos que, en algunos casos, siguen siendo prototipos aún en desarrollo, pero que también han llevado a la introducción de estas unidades como parte de fuerzas navales como el caso de E.E.U.U., China, Reino Unido, Australia y Francia entre otras.

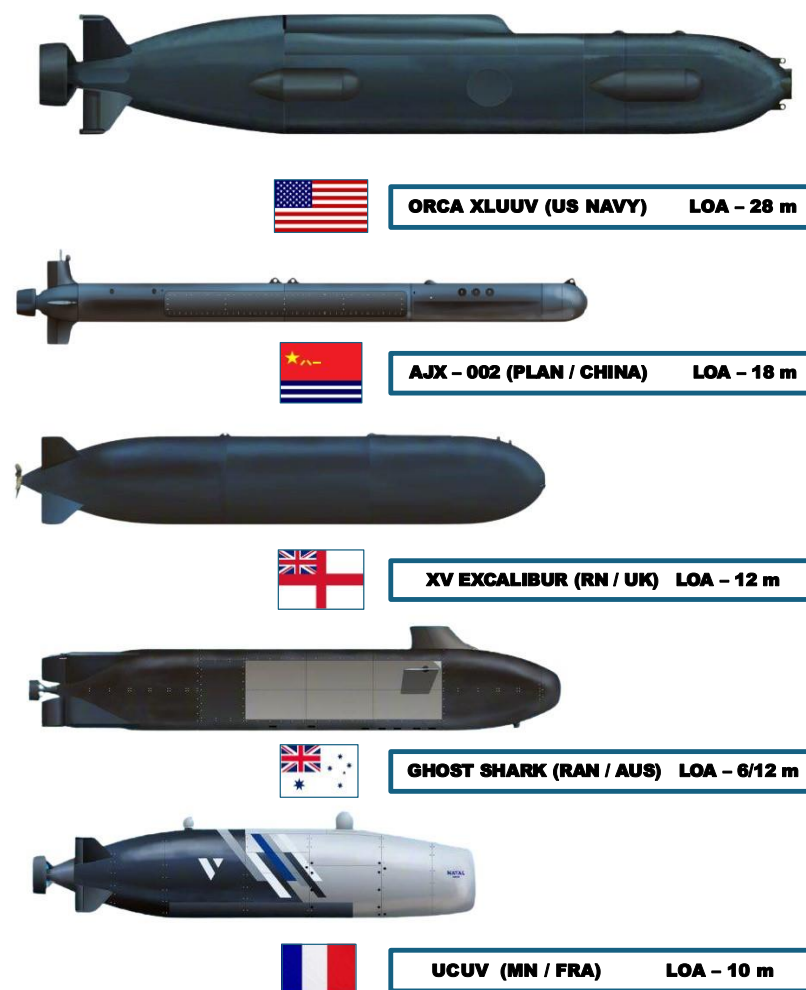


Figura 2-2 Unidades XLUUV actuales en el ámbito internacional (Elaboración propia).

El ejemplo más consolidado es el *Orca XLUUV* de la marina de Estados Unidos (USN), desarrollado por la empresa Boeing bajo contrato con la US Navy [12]. Este vehículo submarino autónomo de gran tamaño fue entregado en diciembre de 2023 a la USN y ha comenzado su programa de pruebas de mar y certificación, marcando la transición hasta la plataforma operativa que conforma actualmente dentro de la flota submarina estadounidense. El *Orca* está diseñado con una propulsión diésel-eléctrica y una sección modular de cargas útiles (*payload*) que facilita la integración de sensores navales y sistemas específicos, permitiendo misiones en el abanico que va desde contramedidas de minas (MCM) hasta guerra electrónica (EW) y apoyo a operaciones ASUW y ASW.

Paralelamente, la Royal Navy del Reino Unido (RN) ha avanzado en su programa propio de submarinos autónomos con su vehículo bautizado bajo el nombre de *XV Excalibur*, desarrollado por la firma MSubs Ltd. dentro del Proyecto *Cetus* de la RN [13]. Esta plataforma, con una eslora de unos 12 metros y que ronda las 19 toneladas de desplazamiento, ha sido oficialmente entregada a la RN para iniciar un ciclo amplio de pruebas de mar para su certificación y entrega; estas están orientadas a la evaluación de sus capacidades con el control remoto, la autonomía y el desempeño en escenarios operativos reales. El desarrollo del *Excalibur* refleja el interés de la armada de Reino Unido en incorporar sistemas no tripulados para vigilancia persistente, protección de infraestructuras críticas y apoyo a unidades tripuladas en el marco estratégico de sus alianzas como es el caso con AUKUS.

La marina de Australia, por su parte, ha emergido como uno de los actores más activos en el desarrollo de vehículos submarinos autónomos de gran tamaño [14] mediante el programa *Ghost Shark*, impulsado por la Royal Australian Navy (RAN) en colaboración con la industria nacional y centros de investigación de defensa. Esta plataforma ha sido concebida como un submarino modular, de alta autonomía y que se ha concebido para misiones de vigilancia, recopilación de inteligencia y apoyo a operaciones navales en entornos estratégicos del Indo-Pacífico (zona de interés para la RAN). El diseño del *Ghost Shark* prioriza la integración de sistemas de navegación autónoma con una arquitectura abierta para el posicionamiento de cargas útiles y la búsqueda de una elevada eficiencia energética. Este enfoque refleja la estrategia de la RAN de complementar submarinos tripulados con capacidades no tripuladas.

Dentro de un concepto paralelo, Francia se encuentra con el desarrollo del UCUV (*Unmanned Combat Underwater Vehicle*) [15], a través de la agencia de adquisición DGA y el Naval Group con las que se ha impulsado el desarrollo de una plataforma para la Marine Nationale (MN) destinada al ensayo de tecnologías de autonomía avanzada de desarrollo propio, toma de decisiones controladas y navegación segura. Este prototipo ha iniciado campañas de calificación en el Mediterráneo para su fabricación y entrega a Francia.

Además, China (dentro de BRICS) ha intensificado recientemente el desarrollo de vehículos submarinos no tripulados de gran tamaño dentro de su estrategia naval [16], evidenciando programas avanzados que podrían situarse entre los más ambiciosos del mundo. En este contexto, la Armada del Ejército Popular de Liberación (PLAN) ha probado y/o construido una serie de prototipos a nivel conceptual con esloras de longitudes estimadas de más de 40 metros, una escala que supera la de plataformas occidentales. Estos vehículos, observados en ensayos en el Mar de China Meridional desde bases flotantes, parecen orientarse a misiones prolongadas. Aunque los detalles técnicos oficiales siguen siendo escasos debido a la alta confidencialidad de Pekín, informes apuntan al desarrollo de modelos como *AJX-002*, el único desarrollado del que se tiene conocimiento de ser prototipo funcional.

En síntesis, el despliegue y el desarrollo de XLUUV en las armadas modernas se está viendo marcado por una transición desde prototipos experimentales hacia plataformas cada vez más maduras y versátiles. Aunque Estados Unidos encabeza el campo con sus primeros programas operativos, naciones europeas y asiáticas están acelerando sus propios diseños con fines tanto defensivos como de proyección y control, lo que refleja la importancia estratégica de estos sistemas en el orden mundial.

El campo de desarrollo e innovación de los submarinos autónomos presenta un marco de desarrollo que propone nuevas unidades militares con tecnologías innovadoras y que disponen las bases de la linealidad de los conflictos navales en un futuro cercano.

2.6 Sinergia para la concepción de diseño

En el ámbito del diseño, la sinergia se ha consolidado como una estrategia de gran importancia a nivel de creación [17] bajo la búsqueda de la integración de sistemas y equipos para la optimización de la plataforma con la forma del casco manteniendo la eficiencia hidrodinámica de la misma.

La aproximación al diseño del casco del submarino permite la interpretación de ciertos atributos operativos como lo son el sigilo, la robustez o la fluidez hidrodinámica, y que se traduce en la creación de un diseño que permite el silencio, la suavidad, la continuidad y la ausencia de rupturas bruscas. Con esto se permite la conversión en criterios de la configuración del casco con la aplicación de geometrías continuas, líneas esbeltas y superficies limpias que refuercen la idea de deslizamiento silencioso y baja detectabilidad.

De esta forma, la sinergia de la forma con la disponibilidad de espacios y pesos puede ser empleada como herramienta para cohesionar la operatividad y la forma, por lo que su aplicación para los cascos submarinos abre una vía para vincular la identidad operativa de la unidad, la optimización de procesos y las decisiones geométricas en fases tempranas del proceso de diseño.

2.7 Parametrización de diseño de un submarino

La parametrización traduce los requisitos operativos en variables cuantitativas de diseño [18]. Al definir parámetros como la geometría del casco, el desplazamiento y los coeficientes hidrodinámicos, se establece la base para las simulaciones numéricas. Estos modelos permiten optimizar el balance energético y asegurar que el diseño final cumple con los objetivos de estabilidad y rendimiento marcados para la misión.

2.7.1 Fases de diseño

El proceso de diseño de un submarino se estructura en una secuencia de fases de manera progresiva y con orden [1], mediante la aplicación de este proceso se permite la transformación de los requisitos operativos del diseño en una plataforma funcional y viable desde el punto de vista técnico para su puesta a punto y uso a nivel militar operativo.

En primer lugar, se aborda el diseño conceptual, en el cual se determinan los parámetros principales del vehículo, como dimensiones generales, arquitectura del sistema, configuración de propulsión y distribución de volúmenes internos.

Posteriormente, el diseño preliminar profundiza en el análisis hidrodinámico, estructural y energético, incorporando simulaciones numéricas, estudios de estabilidad y evaluaciones de viabilidad técnica que permiten validar las decisiones iniciales. Así, este proceso se hace siguiendo el concepto de la ingeniería de sistemas de modo que se permite la integración e interoperabilidad de los diferentes equipos sistemas de la unidad autónoma.

Finalmente, el diseño detallado se centra en la definición precisa de componentes, materiales, sistemas electrónicos y estructuras internas, incluyendo planos constructivos, tolerancias mecánicas y esquemas de integración de subsistemas. Esta fase se complementa con análisis avanzados de resistencia estructural, fatiga y comportamiento dinámico de la estructura, así como con la planificación de procesos de fabricación y ensamblaje de manera programada.

El desarrollo técnico dispone las etapas necesarias para la creación del prototipo, que se basa en la realización de pruebas en un entorno controlado y la validación en mar abierto, donde se verifica el cumplimiento de los requisitos de rendimiento, seguridad y fiabilidad de la plataforma. Este enfoque iterativo permite optimizar el diseño final y asegurar que el submarino alcance los estándares operativos establecidos de manera eficiente.

2.7.2 Estructura de la plataforma

Desde el punto de vista estructural, la plataforma submarina debe diseñarse para soportar elevadas solicitaciones mecánicas derivadas de la presión hidrostática, las cargas dinámicas inducidas por el movimiento y las condiciones ambientales marinas. La arquitectura estructural suele basarse en una configuración modular que integra el casco resistente, los compartimentos técnicos y las secciones de propulsión y control. Asimismo, se emplean materiales de alta resistencia, como aceros especiales o aleaciones ligeras, combinados con refuerzos internos y anillos estructurales que incrementan la rigidez y la capacidad portante del conjunto.

En cuanto al diseño del casco, este desempeña un papel clave en el comportamiento hidrodinámico y acústico del submarino. Las geometrías se optimizan mediante técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) con el objetivo de minimizar la resistencia al avance y reducir la generación de turbulencias. Paralelamente, se tienen en cuenta criterios de sigilo acústico, integrando recubrimientos especiales y soluciones de aislamiento vibratorio para limitar la transmisión de ruido.

2.8 Energía undimotriz y mareomotriz

Durante las últimas décadas, el aprovechamiento de la energía marina ha adquirido una gran relevancia en el sector energético internacional dentro de las denominadas como energías renovables. En el seno del auge de estas nuevas energías verdes encontramos aquellas conocidas como energía undimotriz [19] y mareomotriz [20] que destacan por su elevada densidad energética y la facilidad en la predicción para el aprovechamiento del entorno marítimo para su extracción.

El marco científico específico de estas energías recoge diversos dispositivos orientados a la conversión de la energía del oleaje y de las corrientes de marea como se ve en la Figura 2-3, tales como absorbedores puntuales, columnas de agua oscilante y turbinas de eje horizontal (o vertical); y que serán estudiados en el desarrollo del proyecto en base a su eficiencia para la plataforma. Sin embargo, la gran mayoría de aplicaciones de instalaciones para este tipo de energías están orientadas para su uso por plataformas de carácter superficial o fija en el lecho marino.

En este contexto, el desarrollo de plataformas submarinas emerge como una alternativa tecnológica con potencial para la operativa en capas de mayor estabilidad dentro del medio marino, así como en plataformas móviles con lo que se aprovechan así las cargas dinámicas inducidas por el oleaje de fondo; aunque esta tecnología no está exenta de problemas como lo son la exposición a condiciones ambientales extremas lo cual limita su operatividad y vida útil en el lugar de instalación.

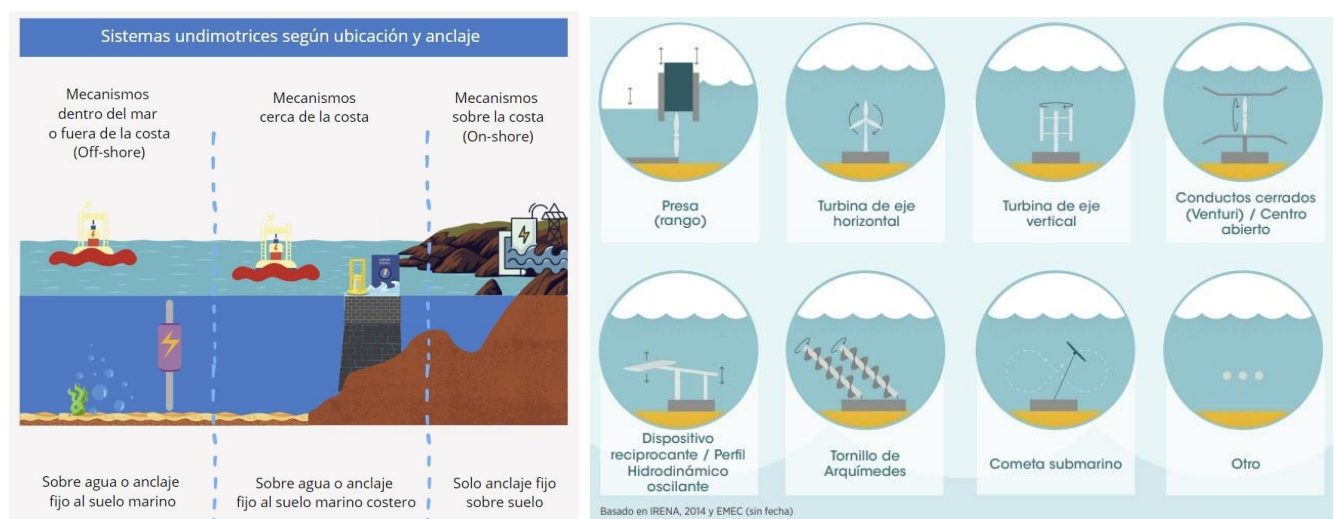


Figura 2-3 Sistemas undimotrices y mareomotrices según ubicación y anclaje (OVACEN).

Estudios recientes han tenido como objeto el análisis del diseño de vehículos y estructuras con la integración de sistemas de captación de energía de corrientes marinas y oscilaciones hidrodinámicas inducidas por el oleaje en profundidad. Estas propuestas emergentes contemplan el uso de turbinas marinas encapsuladas en plataformas y mecanismos de amarre dinámico, así como la aplicación de estrategias de conversión electromecánica y almacenamiento energético a bordo con distintas tecnologías.

No obstante, la aplicación de estas tecnologías en el medio marino sigue teniendo dificultades a las que sobreponerse como lo son la optimización hidrodinámica de la forma del casco, la resistencia estructural que permita hacer frente a la corrosión y la fatiga, y la eficiencia del sistema para la conversión energética. Es por esto de la necesidad de soluciones que sean integradas y que combinen los diferentes criterios de la ingeniería naval, mecánica y eléctrica, y que se orienten a maximizar el rendimiento energético y la fiabilidad operativa de los sistemas.

2.9 Marco normativo y estandarización

La construcción y utilización de submarinos militares y drones navales se apoya en el conjunto de varias normativas como son el derecho internacional del mar, derecho de los conflictos armados y normas técnicas y de seguridad (OTAN, códigos navales, sociedades de clasificación, etc.). De cara a los sistemas no tripulados como es el caso de este proyecto, el marco normativo se encuentra en desarrollo y sigue siendo cambiante debido a la innovación continua en este campo.

Al nivel de las Naciones Unidas tiene aplicación el UNCLOS (Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar) por la cual se realiza la regulación del estatus de los buques, el paso inocente, las zonas marítimas y la conducta de submarinos [21]; siendo aplicable a casuísticas como la obligación de navegar en superficie y la de enarbolar pabellón en paso inocente cuando se realice por mar territorial. Dentro de este marco normativo, para drones navales tanto de superficie como submarinos, el debate actual es si pueden ser considerados como buques o como buques de guerra a efectos de UNCLOS.

Dentro de los conflictos militares, es de aplicación el DIH (Derecho Internacional Humanitario) donde se tratan los principios de distinción, la proporcionalidad en el uso de medios, la necesidad militar de las acciones y la responsabilidad del Estado por los actos en el combate [22]. Para aplicación a los UUV y XLUUV se basa en el estatus jurídico de la plataforma que puede ser considerada como buque o como arma, la inmunidad soberana en las acciones y las ROE (Reglas de Enfrentamiento) para hacer uso de la fuerza durante las operaciones y en aguas soberanas o no de otros Estados.

A nivel normativo, no existe aún un convenio específico para drones submarinos; la doctrina jurídica propone encajarlos por analogía con buques o submarinos tripulados; es por esto, que existe un vacío en la legalidad y que se intenta llenar con regulaciones nacionales y prácticas operativas. Aunque a nivel de USV (drones de superficie) la OMI (Organización Marítima Internacional) ha realizado un ejercicio para determinar la validez de la normativa existente y por parte de la UE se sigue una línea de estandarización de carácter similar y aplicada a través de la EMSA.

De manera análoga a otros países europeos y aliados, la normativa nacional española se basa en la aplicación de convenios civiles (SOLAS y MARPOL) con una adaptación a buques de guerra, y se han llegado desarrollar códigos específicos; como el *Naval Ship Code* (NSC), que proporciona un marco de seguridad a nivel internacional [23]. Por su parte, las sociedades de clasificación han empezado a publicar guías para buques autónomos y vehículos no tripulados, que sirven como marco de referencia técnica en proyectos militares y a modo de complementar la normativa estatal existente.

3 DESARROLLO DEL DISEÑO

A lo largo del presente capítulo se desarrollan los diferentes estudios que han sido necesarios para definir el diseño del XLUUV y la creación conceptual de un elemento para el teatro de operaciones.

3.1 Perfil operativo

En el contexto del presente documento, el desarrollo de un XLUUV como concepto desarrollado anteriormente se debe definir una plataforma versátil y resistente con posibilidades que se presentan dentro de un gran abanico de condiciones determinantes; es por esto, que para su desarrollo se necesita realizar un estudio previo de las necesidades y definir la misión, así como limitaciones e implicaciones.

3.1.1 Análisis de la misión y capacidades operativas

El punto de partida de este estudio consiste en la definición de las misiones que van a ser encomendadas a la plataforma y el entorno de su ejecución. El desarrollo de esta unidad como plataforma militar se concibe con un perfil estratégico-operacional (no de nivel táctico inmediato) con la posibilidad de realizar misiones persistentes, discretas y de alto valor militar. De este modo, se dota a la Armada española de un nuevo sistema naval capaz de apoyar misiones de la Flota y objetivos militares, cumplimentando los objetivos de la Armada 2050 propuestos por el Almirante Jefe de Estado Mayor de la Armada, Antonio Piñeiro Sánchez [9].

Estas capacidades son necesarias para la compleción de acciones en la AOO (*Area of Operations*) y suponen requisitos a nivel técnico y operativo para el diseño del submarino autónomo, por lo que se definen capacidades como:

- Entorno y rendimiento operativo, con un diseño que responde a las demandas críticas del entorno submarino (presión, corrosión y opacidad electromagnética), estableciendo los siguientes parámetros de rendimiento:
 - Cota operativa: 200 metros, con inmersión máxima a cota de 250 metros.
 - Velocidad de tránsito: 5 nudos (inmersión) / 4 nudos (cota periscópica).
 - Velocidad máxima de 15 o 20 nudos para acciones ofensivas y situaciones de emergencia.
 - Alcance y autonomía: radio de acción de 1000 MN con autonomía extendida mediante generación de energía renovable mediante posado (energía undimotriz y mareomotriz).
 - Limitación crítica: la eficiencia operativa está supeditada al binomio resistencia hidrodinámica y capacidad de almacenamiento energético (baterías y consumos).
 - Integración completa de sistemas con la operación coordinada por un sistema central.

- Requisitos funcionales y operación autónoma con capacidades de operar sin supervisión:
 - Navegación táctica: control preciso de rumbo y profundidad, ejecución de patrones de búsqueda y evasión automática de obstáculos (colisión).
 - Gestión de misión: capacidad de reconfiguración dinámica ante cambios del entorno o pérdida de enlace con C2, incluyendo planificación de rutas y gestión inteligente de energía.
 - Modularidad: arquitectura flexible mediante compartimentos modulares para la integración de cargas útiles (*payload*) según la misión específica.
- Arquitectura de sistemas (Comunicaciones e Inteligencia): el sistema de Mando, Control y Comunicaciones (C3) emplea una estructura híbrida integrada en la cadena de mando:
 - Comunicaciones: enlaces acústicos de baja tasa (inmersión) y RF/SATCOM (cota periscópica), en adición a comunicaciones por boyas ESUS y sistemas de última generación.
 - Sensores: sistema compuesto por sonares de casco, flanco y barrido, sistemas OE/IR con integración en célula de inteligencia (IW) y sistemas inerciales (INS) para navegación.
 - Software y Ciberseguridad: algoritmos de reconocimiento de objetos, localización y mapeo simultáneos (SLAM) y protocolos de protección contra amenazas *cyber*.
- Apoyo logístico, con una infraestructura de apoyo dentro de Defensa que incluye:
 - Estaciones de mantenimiento: diques a escala y centros de control móvil para despliegue y recuperación, además de integración con unidades actuales y sus ciclos operativos.
 - Análisis de datos: centros de post-misión para el procesamiento de la información captada por los sensores y retroalimentación del ciclo de I+D+i.

Con estas capacidades se dota de un nivel táctico y operativo a la altura de las necesidades de su entorno.

3.1.2 Misiones

La misión principal de la plataforma se orienta de forma multifuncional y adaptable para las necesidades de la Armada en el marco operacional del entorno submarino. Con esta premisa, la plataforma se concibe para misiones de JISR (*Joint Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*) y la obtención de ACINT (*Acoustic Intelligence*) con la firma acústica, firma EM e IMINT (*Imagery Intel*).

Así mismo, de forma defensiva; la plataforma permite operaciones para:

- El minado defensivo de aguas territoriales en el marco de MIW (*Mine Warfare*).
- La vigilancia de áreas marítimas estratégicas, con lo que se engloba la defensa de la ZEE española, así como infraestructuras críticas (como cables submarinos o plantas petrolíferas).
- La defensa de forma estratégica de unidades tripuladas de la flota en sus misiones.

Además, la plataforma puede llevar a cabo operaciones ofensivas como:

- Incursión en aguas enemigas para la recopilación de Intel sobre unidades e infraestructuras.
- El minado ofensivo de áreas de interés para la negación de área y capacidades MIW.
- La vigilancia de puertos con la monitorización de su patrón de vida.
- La interceptación de unidades tanto en navegación o en base (destrucción de unidades).
- La vigilancia en agua territorial enemiga a nivel de litoral para la colección de Intel de naturaleza *cyber*, ASW, EW (con comunicaciones y emisiones de importancia), ASUW y AAW; y con capacidades SBW (*SeaBed Warfare*) para infraestructuras críticas submarinas.
- Acciones de negación de servicios y acciones precursoras para el control del mar.

En adición, el XLUUV permite misiones complementarias. La plataforma puede desempeñar roles de transporte limitado de carga, despliegue de sensores distribuidos o apoyo a redes de vigilancia.

Dentro de esta línea, la plataforma sirve de elemento perturbador de manera asimétrica como lo define el LCDR Matthew Ritchey en un informe de la USN [24]. Esta podría ser usada como multiplicador de la fuerza y como apoyo a unidades en sus operaciones, actuando como elemento de vanguardia para reconocimiento y análisis del AOO y negación del mar para operaciones precursoras.

3.1.3 CONOPS

El CONOPS define el marco operativo bajo el cual se emplea la unidad, describiendo la secuencia de despliegue, ejecución y recuperación de la plataforma; con fases de planificación, lanzamiento y puesta a flote, la operación autónoma en área y la transmisión de datos. Por ello, es un concepto vivo que puede sufrir modificaciones, consiguiendo una mejora continua de la eficiencia e integración.

- Planificación; el marco operativo [25] se inicia con la determinación de la misión y sus objetos lo que conlleva la parametrización de las acciones de la plataforma y el esquema de maniobra; con esto se definen las operaciones hasta el siguiente momento de comunicaciones y C3.
- Despliegue; la unidad tiene posibilidad de despliegue desde base y navegación a zona, desde el dique de unidades con capacidad anfibia (como L-51, L-52 y L-61) o en una estación nodriza diseñada para acción cercana.
- Ejecución; esta se lleva a cabo en base a las instrucciones preestablecidas y la propia plataforma es capaz de actuar en concordancia con la evolución del entorno de operaciones, de forma que la unidad aúna la información recibida de los sensores y sistemas de a bordo con las instrucciones recibidas conforme al software (véase Anexo XIII). El submarino podrá recibir actualización de las órdenes e información de forma periódica con ascensos a cota periscópica para establecer una conexión de C3, en marcos temporales y geográficos establecidos; y de forma paralela, la plataforma realizará el ascenso seguro fuera de la zona de interés en puntos RV (*Rendez-Vous*) en caso de inconvenientes.
- Recepción; se realizará o bien con los puntos RV establecidos, o con la navegación autónoma a base o a las áreas establecidas para su recogida por otras unidades navales.

3.1.4 Teatro de operaciones

La plataforma se concibe como un elemento de naturaleza multifuncional estado pensada para su disposición y uso en todas las Areas de Interés (AOI) de España [26]. Estas áreas son de especial importancia nacional siendo necesaria la presencia naval para defender la soberanía, independencia e integridad territorial en el entorno naval con garantías en las rutas de comercio y pesqueras.

Para estas AOI y con el perfil de la misión como objeto es necesario un conocimiento previo de estas áreas para el despliegue y realizar un estudio del entorno como se ve en la Figura 3-1 con la batimetría.

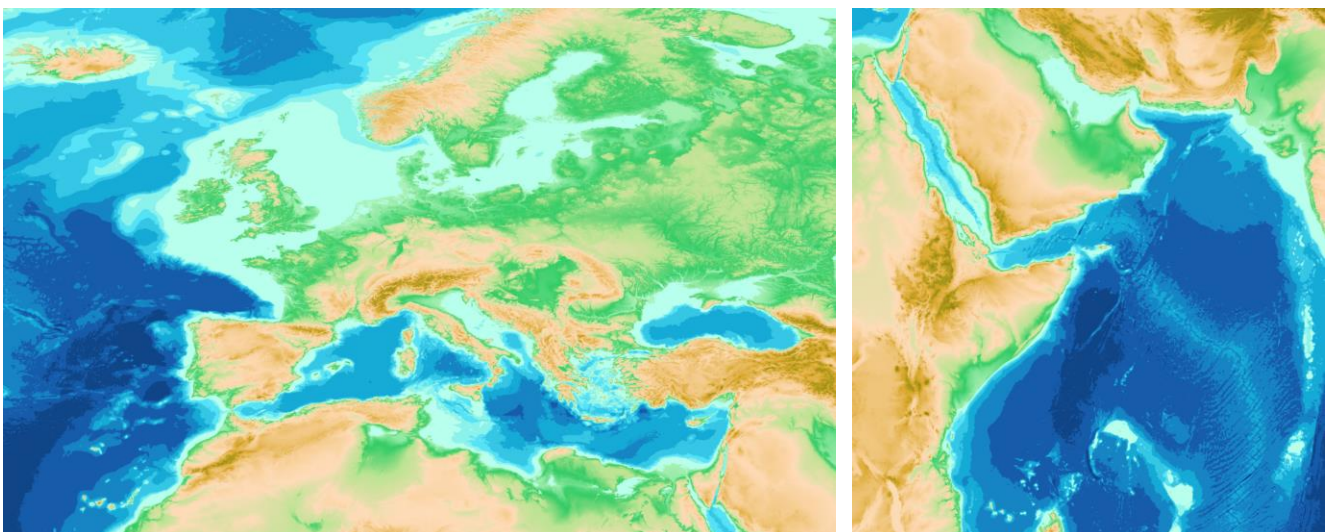


Figura 3-1 Batimetría de las AOI nacionales de España (GEBCO).

De este modo, la batimetría define la capacidad de operación ya que es factor determinante para los periodos de carga de la plataforma con su posado en el fondo y los patrones de navegación. Con este conocimiento en posesión, se permite sentar las bases del perfil de la misión y la cronología del enfrentamiento. Así, esta información puede ser del IHM (Instituto Hidrográfico de la Marina), ser OSINT (*Open Source Intelligence*) o ser proporcionada por servicios de inteligencia aliados; como el uso de GEBCO [27] como fuente abierta.

El teatro de operaciones para el submarino autónomo presenta un variado abanico de entornos posibles con escenarios de interés nacional [28] como los son:

- El Mar Mediterráneo, con la soberanía de las aguas nacionales y la presencia de la Armada en operaciones nacionales y de la alianza (OTAN y UE) como la SNMG-2 en sus aguas.
- El Océano Atlántico, en su parte occidental con la soberanía de las aguas en la parte oeste del país e Islas Canarias, la ZEE y ZEEP y los intereses nacionales en el AOI del Golfo de Guinea y las SLOC en sus proximidades; y en la zona septentrional por la presencia pesquera.
- El Estrecho de Gibraltar, debido al poder geopolítico de la zona con la gran densidad de tráfico marítimo y presentar la frontera marítima más cercana con Reino Unido y Marruecos.
- El Mar Rojo, de interés para el país con la presencia de tráfico marítimo y presencia pesquera nacional junto al Canal de Suez y la zona septentrional del Índico con la presencia militar del país con misiones como Atalanta de la UE.
- El Mar del Báltico y del Norte, por la presencia militar de la OTAN con operaciones conjuntas como el caso de la SNMG-1 y SNMCMG-1 y misiones de la UE.

De este modo, la naturaleza del teatro de operaciones en las AOI expuestas presenta un entorno favorable con la operación en orografía y batimetría favorecedora para el ocultamiento permanente.

3.1.5 Reglas de enfrentamiento y empleo de la plataforma

Las Reglas de Enfrentamiento o ROE's (*Rules of Engagement*) son las directrices que se le da a una unidad militar para llevar a cabo un enfrentamiento o una misión, pudiéndose clasificar como las libertades y las limitaciones que se aplican para la ejecución de una operación militar [29]. De este modo, en aplicación a un submarino las ROE's no son de carácter universal y se basan en el marco legal, el contexto político y militar, y la naturaleza de la propia misión. Este marco sirve como fundamento del objetivo militar de la misión y como herramienta para misiones con un fundamento legal legítimo.

Así, la autoridad y el control se basa a que el uso de la fuerza de una unidad militar es inherente a una cadena de mando, por lo que el uso de armamento requiere de validación (autorización de la ROE). Con esto, se garantiza que las acciones ofensivas estén alineadas con los objetivos políticos y estratégicos, evitando escaladas no deseadas; lo que se traduce en restricciones (confirmación externa).

El principio de autodefensa sirve para la defensa de la plataforma ante posibles amenazas identificadas e inminentes, por lo que se permite adoptar medidas proporcionales para proteger la integridad del buque y la misión asignada.; dentro de la autodefensa incluye maniobras evasivas, reducción de firma acústica y, en última instancia, el empleo de sistemas defensivos. En base a la proporcionalidad, las ROE establecen que las acciones tanto ofensivas y defensivas deben ser proporcionales a la amenaza existente y coherente con el objetivo militar que se trata de alcanzar; esto implica seleccionar respuestas que cumplan el efecto militar (en base al DIH) deseado sin generar impactos innecesarios sobre infraestructuras civiles, ecosistemas marinos o navegación comercial.

3.2 Estudio del entorno de operaciones

El submarino durante su despliegue en el teatro de operaciones deberá hacer frente a gran número de escenarios con numerosas variables que pueden suponer dificultades ante el desarrollo de la misión. Debido a la naturaleza de las misiones autónomas estudiadas, la plataforma deberá de ser capaz de afrontar las condiciones más precarias y contraproducentes del entorno. Esta información es de interés para la operación del CTD y la predicción de alcances de sistemas y su eficacia operativa [30].

3.2.1 Propiedades físicas del agua

La temperatura del agua supone un factor clave en las capacidades operativas. Tanto en mares como océanos, su valor puede variar de forma significativa en función de la zona y la estación del año. En base a los datos ofrecidos por el Sistema Mundial de Observación de los Océanos de la NOAA se puede dilucidar que la temperatura del medio marino varía entre los 2 °C y los 30 °C. Siendo:

- La Tª mínima de estudio es de 2 °C que está presente como temperatura constante de la capa isoterma profunda (aunque la Tª mínima en los polos es de -2 °C por lo que nos son objeto de estudio).
- La Tª máxima es de 30 °C, presente en zonas tropicales y áreas del mar Mediterráneo y Mar Rojo en épocas estivales.

Otro factor limitante a nivel físico es la presión de la zona de operaciones. Esta supondrá las limitaciones de inmersión y dependerá del dimensionado de la estructura resistente. La presión que debe soportar la plataforma vendrá dada por la profundidad de operación máxima.

Por especificaciones técnicas se ha decidido que la cota de operación se fije en torno a los 200 metros, por lo que se hará un estudio con un margen de seguridad, asumiendo que la profundidad máxima será de 250 metros en régimen de inmersión profunda. Siguiendo los estudios de Parthiat y Leroy se aplica (3-1), así, la presión del medio submarino se puede concluir con una precisión de unos 8000 Pa.

$$P_i(Z, \phi) = h(Z, \phi) - \delta h_i(\phi) \quad (3-1)$$

donde P es la presión relativa en MPa, la Z viene dada por la profundidad, y la ϕ se define por la latitud máxima (60° N) en la que vamos a operar; por ello se define h aplicando las fórmulas en (3-2).

$$h(Z, \phi) = h(Z, 60) \times k(Z, \phi)$$

$$h(Z, 60) = 1,00818 \times 10^{-2}Z + 2,465 \times 10^{-8}Z^2 - 1,25 \times 10^{-13}Z^3 + 2,8 \times 10^{-19}Z^4$$

$$k(Z; \phi) = \frac{g(\phi) - 2 \times 10^{-5}Z}{9,80612 - 2 \times 10^{-5}Z} \quad (3-2)$$

$$g(\phi) = 9,77803(1 + 5,3 \times 10^{-3}\sin^2\phi)$$

además, se aplica un factor de corrección para las latitudes de entre 40°S y 60°N con δ para Z.

$$\delta h_i(Z) = \frac{1,0 \times 10^{-2}Z}{Z + 100} + 6,2 \times 10^{-6}Z$$

Así, tomando como profundidad una cota de 250 metros y un posicionamiento geográfico con un máximo de latitud en 60°N, y desarrollando las ecuaciones planteadas anteriormente se obtiene Pi.

$$P_i(250,60) = 2,518 \text{ MPa} = 2571,619 \text{ kPa}$$

Con la presión relativa calculada y siendo 101,28 kPa la presión atmosférica, obtenemos la presión

$$P_{Absoluta}(250,60) = 2618,899 \text{ kPa} = 2,62 \text{ MPa}$$

Se obtiene una presión absoluta de 2,62 MPa que tendrá que ser soportada por la estructura del casco, este resultado coincide con el concepto general de que, por cada 10 metros de inmersión en el medio, la presión aumenta 1 atmósfera.

También es limitación física la salinidad del medio, esto tiene repercusiones en la resistencia de materiales y su mantenimiento operativo ante corrosión y desgaste.

La salinidad de los océanos no tiene una distribución uniforme, produciéndose zonas de altas concentración en función de la evaporación del agua superficial o la regeneración por los deltas de los ríos. La salinidad media del océano puede aproximarse a un valor medio del marco de 35 gramos de sal por litro de agua (equivalente a un 3.5% de sal disuelta en el agua o 35 ppt). Esta concentración varía regionalmente: alcanzando valores más altos en mares de interés como son el Rojo (40-42‰) y el Mediterráneo (36-39‰) por la alta evaporación, y más baja en los polos y el ecuador (30‰).

Finalmente, la densidad del agua limita los factores de resistencia del casco para la navegación en el medio y la distribución de pesos con influencia en la estabilidad de esta.

La densidad viene dada por la ecuación de estado del agua, la cual está compuesta de tres ecuaciones polinómicas y un total de 41 constantes, en beneficio de la simplicidad del estudio no se tomará como objeto el cálculo de este valor. Para los cálculos se tomará un valor medio de:

$$\rho \approx 1,026 \text{ kg/m}^3$$

3.2.2 Definición de flujo

Otro aspecto que define la operatividad de la plataforma será el flujo del medio; por ello, para caracterizar el flujo y su compresibilidad se hace uso del Número de Reynolds (Re) y el de Mach (M).

Para determinar el tipo de flujo y si se caracteriza de forma laminar o turbulenta, se aplica el cálculo del número de Reynolds; este es un parámetro adimensional que cuantifica la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas dentro del flujo del fluido. Se determina mediante (3-3),

$$Re = \frac{\rho V_0 l}{\mu} = \frac{V_0 l}{\nu} \quad (3-3)$$

Basándose en la viscosidad cinemática, se aproxima el valor de la constante dependiente de la densidad (ρ) y viscosidad (μ) a $1,05 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; por ende, si aplicamos la ecuación de Reynolds a la velocidad media de operación (que son 5 nudos) sobre una longitud unitaria obtenemos que

$$Re = \frac{2,572}{1,05 \times 10^{-6}} = 2,449 \times 10^6$$

Ya que $Re > 2300$, se puede determinar que el flujo es turbulento con fuerzas inerciales predominantes.

Para la determinación de M es necesario la velocidad de propagación (3-4) de las ondas acústicas, la magnitud de esta velocidad se define por la ecuación de Mackenzie; para el estudio se da la casuística con el estado más crítico de operación, este se da cuando la velocidad del sonido presente el menor valor. Así, la menor velocidad acústica se obtiene con la temperatura mínima.

$$\begin{aligned} c = & 1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 \\ & + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 \\ & - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \end{aligned} \quad (3-4)$$

Teniendo en cuenta la temperatura como T [°C] de 2 grados como mínima según el análisis de temperatura, la salinidad como S [ppt] con 35 ppt, y estableciendo la profundidad como D [m] en la cota máxima de navegación (250 m). Desarrollando (3-4) obtenemos que la velocidad resultante es

$$c = 1458.75 \text{ m/s}$$

Ahora, conociendo la velocidad del sonido más crítica y asumiendo que la velocidad media de avance de la plataforma en inmersión va a ser de 20 nudos como máximo; pasamos a aplicar la fórmula de Mach (3-5) donde obtenemos el valor de M.

$$M = \frac{V_0}{c} = \frac{10,29}{1458,75} = 0,00705 \quad (3-5)$$

De la ecuación anterior se evidencia que el valor de M es inferior a la unidad ($M < 1$), por lo que se puede determinar que el flujo es incompresible.

En resumen, tras el análisis de la caracterización del flujo alrededor de la plataforma se concluye que tendremos un flujo turbulento y no compresible a esas velocidades por las proximidades de la superficie de la plataforma en inmersión.

3.2.3 Cavitación

La cavitación es un fenómeno indeseado y crítico en ingeniería naval que ocurre cuando la presión local en un fluido cae por debajo de su presión de vapor, formando burbujas que posteriormente colapsan causando daño en estructuras sumergidas; por ejemplo, en las palas y sus proximidades.

Para el estudio del submarino se pasa a evaluar el riesgo de cavitación en agua marina con salinidad de 35 ppt, analizando el rango de temperaturas de 2°C a 30°C para identificar las posibles condiciones más críticas en el entorno durante la navegación.

Para la determinación de la velocidad límite de cavitación se debe de obtener el valor σ de cavitación con el que se limita la velocidad máxima de gobierno, para ello es imperativo el cálculo de la presión del vapor de agua salada mediante (3-6).

$$\frac{P_v - P_v^0}{P_v^0} = 9.206 \times 10^{-4}(Cl) + 2.36 \times 10^{-6}(\%Cl)^2 \quad (3-6)$$

donde P_v^0 es la presión de vapor del agua pura, y de donde tras despejar la incógnita de la presión de vapor obtenemos que

$$P_v = P_v^0 [1 - 9.206 \times 10^{-4}(Cl) - 2.36 \times 10^{-6}(\%Cl)^2]$$

De esta forma, y habiendo obtenido el valor de la presión del vapor de (3-6); para definir el límite físico de la cavitación en función de la velocidad de la plataforma con (3-7) se puede obtener el número de cavitación por su definición, de modo que

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_{cav}^2} \quad (3-7)$$

Asimismo, para evitar el fenómeno de cavitación su magnitud no debe rebasar la unidad, por ende, la velocidad crítica de cavitación vendrá dada cuando el número de cavitación iguale la unidad, es decir cuando $\sigma \approx 1$. Es así que despejando de (3-7) se llega a (3-8) con la que se caracteriza la limitación de velocidad que viene dada por lo siguiente

$$V_{cav} = \sqrt{\frac{2(P_\infty - P_v)}{\rho}} \quad (3-8)$$

Para el estudio de la cavitación se ha decidido hacerlo con la T^a media de operación (unos 15°C) y el caso más crítico (con T^a de 30°C), quedando los estudios de la siguiente manera

$$V_{cav}(15^{\circ}\text{C}) = \sqrt{\frac{2(101325 - 1705)}{1026}} = 13,93 \text{ m/s}$$

$$V_{cav}(30^{\circ}\text{C}) = \sqrt{\frac{2(101325 - 4246)}{1026}} = 13,75 \text{ m/s}$$

Ante los resultados, y debido a la poca diferencia con las dos temperaturas estudiadas, la propulsión de la plataforma se limita a una velocidad de entorno a los 13,4 m/s lo equivale a una limitación de 26 nudos en la velocidad máxima del submarino. Por ello, se establece un régimen de velocidades en la plataforma que abarca hasta los 12 nudos de media, con la capacidad de operar a 20 nudos para situaciones que así lo requieran y casos de emergencia.

3.3 Diseño y dimensionamiento

El diseño y dimensionado de la plataforma es un condicionante en el proyecto para conceptos como lo son la profundidad, la seguridad de la estructura y la eficiencia de la embarcación. Este diseño se llevará a cabo con el uso del software especializado de diseño y modelado 3D, DELFTship ®; con ella se realizarán los diseños de geometrías de la estructura y servirán de marco para los estudios posteriores. Así, a lo largo de los siguientes apartados se presenta la caracterización de las geometrías del diseño conceptual del proyecto con un análisis de las estimaciones iniciales que darán paso al diseño conceptual de los cascos ligero y de presión, y con ello la disposición general de la plataforma; así como un estudio de los materiales de construcción.

3.3.1 Configuración del casco

El diseño del casco de una plataforma submarina autónoma debe de seguir los principios comunes de un submarino convencional tripulado [31], por lo que su diseño parte de la base de un elemento flotante y con capacidad de inmersión con una estructura delgada que está sometido a presiones externas uniformes en su superficie. Por ello, la geometría del casco busca una forma cilíndrica constante con cierres elipsoidales que permite conseguir la distribución de los esfuerzos de compresión y, por ende, las mínimas concentraciones de tensión en la estructura.

Con esta distribución el criterio determinante es el pandeo de la estructura el cual se caracteriza con la selección de un espesor, un diámetro y un material con modulo elástico que sea adecuado. La arquitectura y estructura, que se definirá en el punto 3.3.3 y 3.3.4, se basa en la implementación de anillos de refuerzo y mantener una continuidad de las superficies evitando cambios abruptos en curvas y secciones, buscando así una geometría que suponga la menor resistencia y con ello la reducción de consumos y solicitudes.

La optimización de la configuración del casco tiene como objetivo maximizar el volumen interno presurizado por unidad de peso estructural. Estos factores se consiguen con:

- El estudio de la relación de magnitudes (en el punto 3.3.2).
- Una selección de materiales adecuada (punto 3.3.6).
- El cuidado de los volúmenes y pesos de abordaje con la selección de sistemas y equipos que respalden estos principios.

Por su parte, en el diseño de la geometría se diferencian el casco resistente y ligero que se definen buscando la mejor resistencia e hidrodinámica respectivamente. En base a esto, la configuración del casco se debe caracterizar con una estructura resistente que permita la navegación con la menor resistencia para mejorar la eficiencia de los sistemas y reducir los consumos a bordo.

3.3.2 Diseño estimaciones iniciales

Con carácter previo y de modo preliminar, para la determinación de las dimensiones de la plataforma se ha hecho un estudio de las magnitudes principales de las plataformas autónomas ya existentes en el panorama internacional (descritas en el apartado 2.5), y siendo objeto de este la eslora (L), manga (B), francobordo (H) y desplazamiento (Δ) de cada una de ellas como se presenta en la Tabla 3-1.

Plataforma	País	Eslora	Calado	Francobordo	Desplazamiento
Orca (<i>Boeing</i>)	E.E.U.U.	26 m	2,6 m	2,6 m	85 t
Sea Voyager (<i>Boeing</i>)	E.E.U.U.	16 m	2,6 m	2,6 m	45 t
Manta Ray (<i>Northrop</i>)	E.E.U.U.	9 m	2 m	2 m	9 t
UCUV (<i>Naval Group</i>)	Francia	10 m	1,2 m	1,2 m	12 t
Excalibur (<i>BAE Cetus</i>)	Reino Unido	12 m	2,2 m	2,2 m	20 t
Ghost Shark (<i>BAE</i>)	Australia	12 m	2 m	2 m	20 t
AJX-002	China	18 m	1,8 m	1,8 m	40 t
UUV-300 (<i>HSIC</i>)	China	11,5 m	1,6 m	1,6 m	15 t

Tabla 3-1 Magnitudes principales de los XLUUV internacionales.

En base a lo expuesto, se puede obtener que la relación eslora/manga (L/B) es de 7,64 entorno a la media general de las plataformas (el valor coincide con el valor de L/B entre 7 y 10), siendo un valor óptimo para la forma hidrodinámica del casco que supone baja resistencia y una firma acústica reducida.

De igual manera, con el uso de los datos expuestos anteriormente se puede determinar una regresión para aproximar la magnitud del desplazamiento de la plataforma en función del paralelepípedo de las dimensiones principales (LxBxH) prevista en el diseño conceptual del submarino como se presenta en la Figura 3-2 mediante la regresión lineal de las plataformas existentes relacionadas anteriormente.

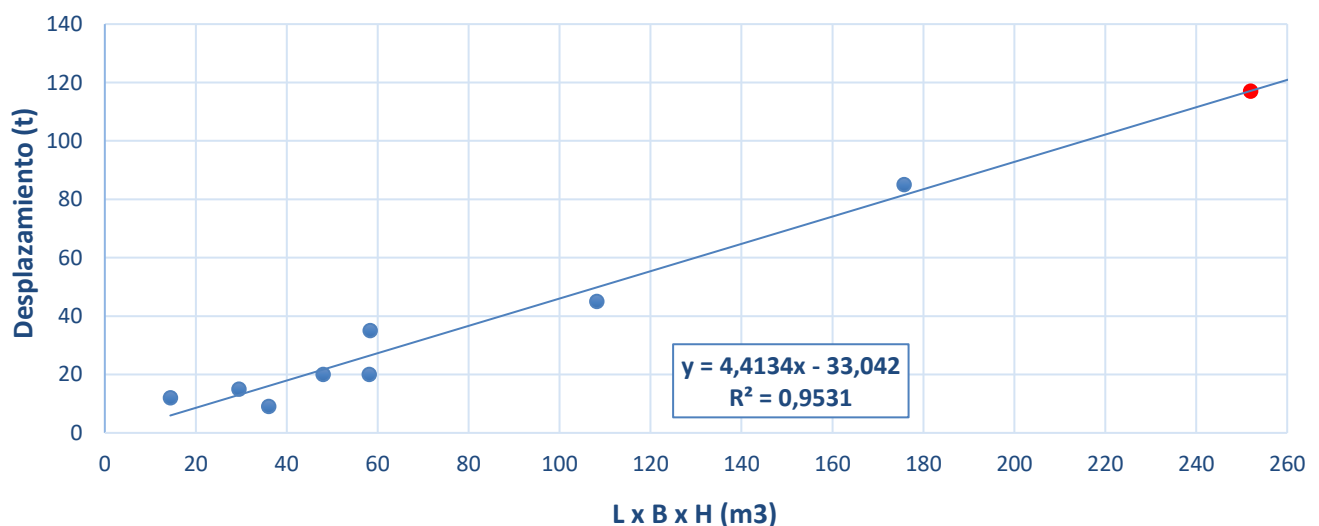


Figura 3-2 Gráfica Eslora-Desplazamiento de XLUUV internacionales (Elaboración propia).

De la gráfica anterior podemos extraer como conclusión que para una plataforma autónoma con un valor de $L \times B \times H$ de 252 m^3 ($V=18 \times 3,5 \times 4$) tiene que ser diseñada con una geometría que cuente con un desplazamiento del orden de las 120 toneladas (117,53 t exactamente como se representa en rojo).

3.3.3 Casco ligero

El casco ligero del submarino es el encargado del rendimiento hidrodinámico de la plataforma, permitiendo geometrías especiales que mejoran el rendimiento propulsor en la navegación. Por ello, el diseño de esta estructura se debe realizar cuidando los detalles con una geometría suave y sin cambios bruscos de rasante. Con esto se busca un flujo continuo a lo largo de la eslora que no provoque turbulencias ni remolinos [32]. Su geometría se define con el uso de medias mangas, alturas y líneas de agua mediante su representación en un plano de formas (véase Anexo VI) con las vistas principales.

El diseño del casco se ha conformado con respecto a la geometría cilíndrica del casco resistente con elongaciones de sus extremos para alojar los tanques de lastre en la parte inferior, y los equipos “húmedos” en la superior. Además, el diseño se ha dividido en proa y popa conforme a:

- La geometría de la proa busca la incisión en el medio de forma que no se produzca resistencia al avance y que el flujo se distribuya a las zonas laterales (bandas) de forma uniforme, esto se complementa con una hendidura en torno a los timones de profundidad para dirigir el flujo y mejorar la eficiencia de la superficie de control.
- La geometría de la popa se han diseñado los timones de corte recto siguiendo un perfil NACA y disposición simétrica con un patrón en forma de cruz (+) en torno al sistema de propulsión en tobera.

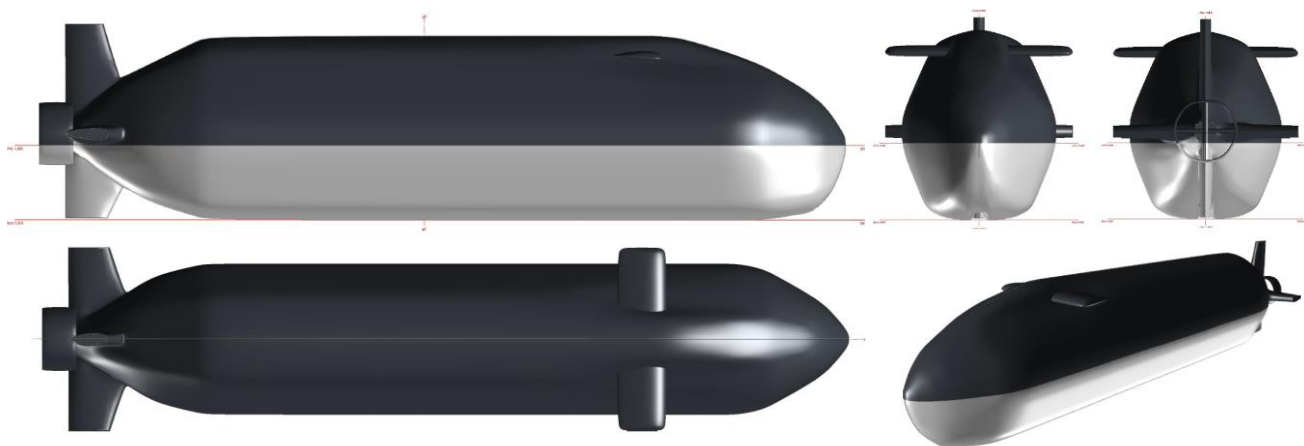


Figura 3-3 Geometría del casco ligero (Elaboración propia / DELFTship).

En la Figura 3-3 se representan las vistas principales del submarino (general, superior, estribor, proa y popa). El proceso de desarrollo del diseño de la geometría se presenta en el Anexo IX y su representación queda definida con las coordenadas de la geometría en el Anexo XVI.

3.3.4 Casco resistente

El casco resistente es la estructura del submarino encargada de soportar las altas presiones hidrostáticas durante la inmersión para proteger a los sistemas instalados. La estructura se caracteriza por su estanqueidad y una gran robustez gracias a cuadernas resistentes a lo largo del casco que afirman la estructura y su integridad. La geometría se basa en formas cilíndricas y esféricas, con esta forma se consigue la distribución de las cargas uniforme y minimizar de puntos de colapso o pandeo.

Para el diseño de la geometría se ha optado por una estructura de un cilindro de 10 metros de eslora y 3,1 metros de diámetro con terminación en dos hemisferios semiesféricos con la ampliación rectangular de la parte delantera superior. En adición, para alojar la planta propulsora se ha diseñado un segundo casco complementario de forma anexa en una esfera de 2 metros de diámetro a popa de la plataforma, esto favorece el aislamiento de vibraciones al resto de sistema y facilita la instalación de polines para la estructura. Ambos cascos cuentan con refuerzos estructurales interconectados, así como la disposición de los dos cascos que se plantea para la conexión de sistemas y cableado necesario con una zona intermedia estanca que forma parte integral del casco resistente y alberga sistemas auxiliares.

A continuación, se muestra en la Figura 3-4 la disposición del casco ligero en posición y forma.

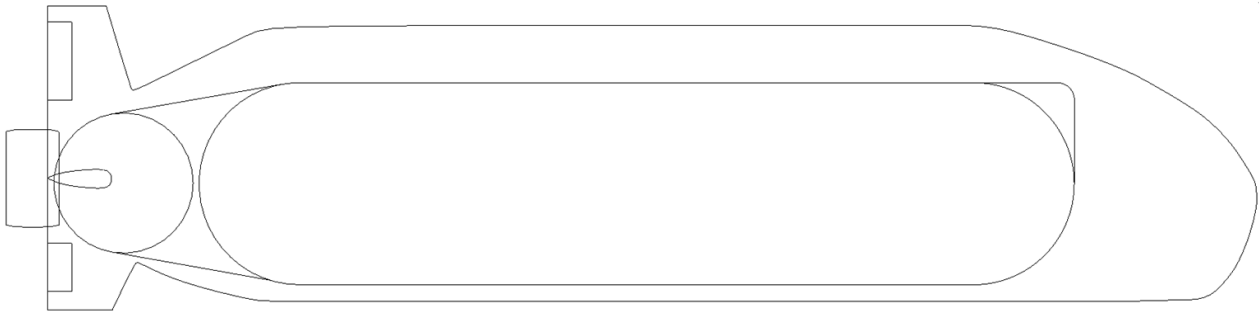


Figura 3-4 Disposición del casco resistente (Elaboración propia / AutoCAD).

En la Figura 3-4 se presenta la geometría del casco resistente en color verde y su disposición en relación con el casco ligero, permitiendo el espacio para los tanques de lastre y los sistemas “húmedos”.

3.3.5 Disposición general

El diseño del submarino se basa en el desarrollo de ingeniería de sistemas, por lo que el desarrollo de la estructura se organiza con la creación de módulos que sirven de espacio para alojar a los distintos sistemas de a bordo. Con la definición de la disposición general a nivel estructural se caracterizan los espacios en posición y forma dentro del casco ligero de forma “húmeda” y dentro del casco resistente de forma estanca. Los módulos, aunque independientes, están interconectados permitiendo el control de la plataforma de forma completa para la gestión de recursos y la optimización de sistemas.

La distribución de la disposición se ha realizado con vista en la estabilidad de la plataforma, posicionando los equipos de mayor peso en la parte inferior. Por otra parte, los sistemas de armas y sensores se han posicionado en el exterior de la plataforma en proa y popa, los sistemas especializados en la zona del través, y la propulsión en popa para reducir la longitud del eje. También se ha posicionado el periscopio (pieza extensible) adyacente a los módulos del sistema de combate y en continuidad con la curva de geometría de la proa del submarino. Además, todos los espacios no usados en torno a los módulos han sido aprovechados para tanques de lastre y trimado, y sistemas “húmedos” auxiliares.

Esta disposición se presenta en la Figura 3-5 donde se disponen; a popa la propulsión y sistemas auxiliares, en la zona inferior del casco resistente las baterías, inferior a ello los lastres y trimados, a proa los sensores (sonares y elementos calables), a proa del casco los sistemas de combate, y a proa central los sistemas de armas (torpedos y minas), en popa los sistemas de gestión y generación de energía, junto a los sistemas de comunicaciones e inteligencia, y marcado en aspa el periscopio a proa y a popa el espacio de *payload* (situado en el centro por la posibilidad de carga variable).

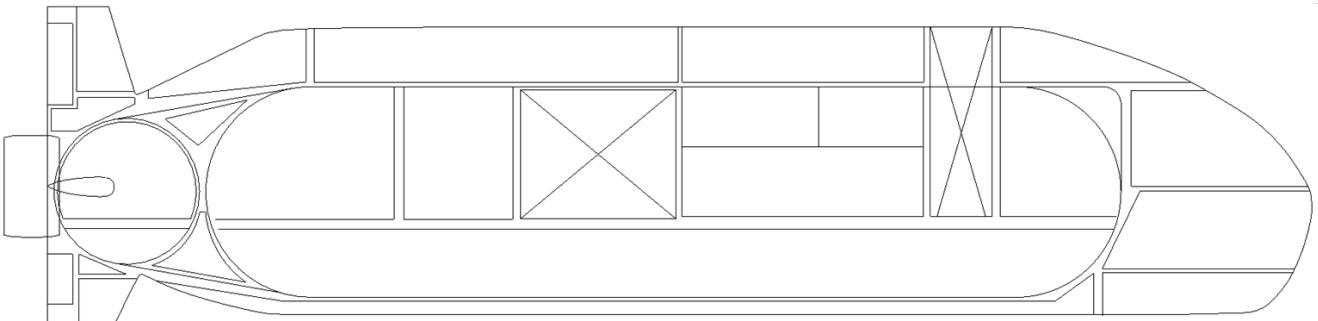


Figura 3-5 Disposición general (Elaboración propia / AutoCAD).

En este apartado sólo se detalla la distribución de los módulos, la definición completa y funcionamiento de estos se detalla en 3.8 de forma extensa y con un análisis de los sistemas a embarcar. La disposición general se presenta con mayor detalle en el Anexo VII.

3.3.6 Selección de materiales

Para la selección de materiales de construcción de las geometrías se presentan una gran variedad de materiales y distribuidores para el diseño de la plataforma. El mercado actual de materiales para el casco resistente tiene una oferta principal que se basa en aceros de alta resistencia y buena tenacidad para uso naval. Dentro de la oferta, existe el acero HY (*High Yield*) usado por la USN y de desarrollo estadounidense con buenas prestaciones; por otra parte, dentro de la oferta europea se encuentran aceros similares de astilleros como ThyssenKrupp, BAE Systems, y Navantia.

En el marco de desarrollo nacional con Navantia se han desarrollado materiales con un control microestructural avanzado para mayores presiones y menores pesos con el acero naval HLES y HLES.

Por la parte de la oferta para materiales del casco ligero, en el mercado existen los denominados aceros austeníticos y de composición desmagnetizada que permiten reducir la firma de la estructura, su desarrollo viene de la mano de empresas como Saab Kockums, Naval Group y Böhler a nivel nacional. Dentro del desarrollo nacional con Böhler, su oferta de mercado presenta una gran variedad de aceros y aleaciones con las últimas prestaciones además de presentar experiencia en el sector con opciones especializadas para aplicación naval y submarina.

Tras un estudio de las posibilidades existentes en el mercado se ha decidido seguir la línea de construcción actual de Navantia en el desarrollo de los submarinos S-80. Por ello, se ha optado por seleccionar acero naval HLES 80 para el casco resistente y acero Böhler P501 para el casco ligero; con esta decisión se ha provecho la industria existente en España y el I+D asociado con lo que se fomenta el comercio nacional y se mejoran aspectos logísticos.

A continuación, en la Tabla 3-2, se presentan las especificaciones de los dos aceros seleccionados.

Características	Acero HLES 80	Acero Böhler P501
Densidad (ρ)	7850 kg/m ³	7900 kg/m ³
Límite Elástico (σ_r)	550 MPa	400 – 500 MPa
Resistencia Tracción (σ_u)	800 – 900 MPa	700 – 850 MPa
Soldabilidad	Con precalentamiento	Con precalentamiento
Tratamiento Térmico	Templado / Revenido	Templado
Tenacidad	Excelente	Buena
Modulo Young (E)	210 GPa	205 GPa
Composición	C – Ni – Cr – Mo – V – Nb	Ni – Cr – Mo – N
Resistencia a la corrosión	Necesidad de tratamiento	Resistente

Tabla 3-2 Características del acero HLES80 y Böhler P501.

El acero naval de alta resistencia HLES 80 se caracteriza por presentar una combinación de características favorables; un límite elástico elevado con buena soldabilidad, ductilidad y un buen comportamiento frente a la fatiga, lo que facilita su fabricación y lo hace adecuado para cascos resistentes sometidos a la presión externa presente en los regímenes de inmersión.

Por su parte, el acero Böhler P501 es un metal inoxidable austenítico y reforzado con nitrógeno, destacando por su alta resistencia a la corrosión en agua de mar, composición intergranular y baja tensión residual tras la soldadura; además, presenta una estructura no magnetizable con lo que se reduce la firma magnética de la plataforma y permite una mejor ocultación.

3.3.7 Dimensionado de la geometría

Una vez con la geometría y los materiales definidos y seleccionados, es turno de definir el dimensionado de la plataforma. De este modo, la eslora del submarino y según la geometría es finalmente de un total de 18 metros (LOA), con este dato y con una relación L/B de 5,3 se obtiene un francobordo de 4,1 metros y una manga de 3,4 metros según la geometría elegida y que a su vez define el radio del casco resistente. Así, las dimensiones principales se relacionan en la Tabla 3-3.

Dimensiones	
Eslora (LOA)	18 m
Francobordo (H)	4,2 m
Calado (T)	3,5 m
Manga (B)	3,4 m
Casco resistente	L 11 m x Ø 3,1 m
Diseño de Bao	12,35 m
Tobera	Ø 1,5 m
Aletas estabilizadoras	L 2 x B 1,25 x H 0,25 m
Aleta de profundidad	L 2 x B 1,15 x H 0,25 m

Tabla 3-3 Dimensiones principales de la plataforma (DELFTship).

Por otra parte, con respecto al diseño de la estructura del casco resistente del submarino es necesario definir el espesor de este. Para la caracterización de este espesor (t) es necesario tener en cuenta las especificaciones del material y las solicitaciones. Estas se obtienen mediante (3-9) con el cálculo de la presión interna (t1) y externa (t2) de compresión de un cuerpo cilíndrico (la forma más crítica bajo presión). Con ello se obtienen los valores de las presiones que va a sufrir el material durante inmersión.

$$t_1 = \frac{P_{int} D}{\sigma}$$

$$t_2 = D \sqrt[3]{\frac{P_{ext}/F}{2E} \sqrt[2]{3(1-\nu^2)}} \quad (3-9)$$

La fórmula se aplica con una presión (Pcr) de 2,62 MPa a una profundidad de 250 m, un coeficiente de Poisson (ν) del acero HLES 80 de 0,3, y conociendo el diámetro (D) de 3,1 m y un factor de arriostramiento (F) de 35 que disminuye el efecto de la presión gracias a la presencia de las cuadernas.

Así, el espesor (tcr) necesario vendrá dado por el factor más crítico de presión, es decir, dependerá del mayor de los espesores calculados con lo que

$$t_{c.r.} = \max(t_1; t_2) = (14,6 \text{ mm}; 20,5 \text{ mm}) = 20,572 \text{ mm} \approx 21 \text{ mm}$$

De este modo, el espesor del casco resistente queda con un valor de 21 mm, el cual es un valor dentro del orden de espesores en submarinos de las mismas características. Además, existe la posibilidad de integrar un sistema de presión que aumente la presión interna de la estructura con lo que se reduce la diferencia de presiones y se permite ya sea un menor espesor o una mayor profundidad de inmersión.

Con respecto al casco ligero con el uso de acero Böhrer, el espesor de la estructura se debe de dimensionar con el objetivo de soportar las solicitaciones hidrodinámicas de la navegación y posibles colisiones en el entorno. Para determinar el orden de esta magnitud es necesario el estudio frente a la presión cinética (p) la cual es crítica en el régimen de velocidad máxima de 20 nudos y donde el espesor se define con (3-10).

$$t_{min} = \sqrt[2]{\frac{p_{cin} L^2}{k \sigma}} \quad \text{donde} \quad p = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3-10)$$

La fórmula (3-10) depende de la presión cinética de 54 kPa a una velocidad de 20 nudos, con una longitud entre refuerzos (L) de 1 m, un factor k de 2 (se asume el empotramiento de la estructura con vigas de refuerzo) y un límite elástico de 450 MPa del acero. Con la aplicación de (3-10) se obtiene un espesor (t_{min}) que se sobredimensiona con un factor de seguridad (FS) de 1,25 para esfuerzos puntuales y colisiones, por lo que se obtiene un espesor necesario tal que

$$t_{c.l.} = FS t_{min} = 1,25 * 7,75 \text{ mm} = 9.6875 \text{ mm} \approx 10 \text{ mm}$$

Por ello, para resistir estas solicitaciones se diseña el casco ligero con un espesor (t_{cl}) de 10 mm, este valor coincide con las recomendaciones del propio fabricante para la manipulación y uso de su material de cara a aprovechar de forma óptima las especificaciones del acero.

3.4 Parametrización hidrostática

La parametrización hidrostática consiste en el cálculo y representación de las propiedades geométricas de la carena (parte sumergida u obra viva) con las condiciones de carga. Con ello, es necesario el análisis de la estabilidad y la caracterización del comportamiento del submarino mediante los coeficientes de forma. Con este estudio se explorarán los principios fundamentales de la flotación, el centro de gravedad y el centro de carena, así como la influencia de la distribución de pesos y del diseño geométrico del casco sobre la estabilidad longitudinal y transversal.

3.4.1 Distribución de pesos

Parte del diseño de la plataforma para su estabilidad radica en el posicionamiento de los pesos de a bordo, ya que es debido a estas el comportamiento dinámico y la flotabilidad en el medio. Con esto en consideración, la distribución de los pesos se dispone de forma simétrica con respecto a la crujía para mantener la estabilidad transversal, y en la zona inferior del casco se posicionan los sistemas de mayor peso. De este modo, para conocer que equipos disponer, donde y de qué manera es necesario conocer su contribución. Esta, se presenta en la Tabla 3-4 con su distribución siguiendo la configuración propia de la industria naval siguiendo el modelo de SWBS (*Ship Work Breakdown Structure*) [33].

Grupos	Sistemas	Contribución de peso
Grupo 100	Estructura del casco	12 %
Grupo 200	Propulsión	5 %
Grupo 300	Instalación eléctrica	38 %
Grupo 400	Sistemas Electrónicos	30 %
Grupo 500	Sistemas Auxiliares	3 %
Grupo 700	Armas	12 %

Tabla 3-4 Contribución de pesos de sistemas a la plataforma.

Como se observa, la propulsión supone la mayor parte del peso de la plataforma (38%), por ello la distribución de los grupos de sistemas se realiza tal que:

- La planta propulsora se posiciona a popa, y las baterías se disponen con la mayor proximidad a la quilla tomando la posición más baja en el casco resistente.
- Los sistemas como la instalación eléctrica con los sensores, sistemas de comunicaciones, control e inteligencia se distribuyen de forma uniforme en el plano neutro del casco.
- Los sistemas de C2 y auxiliares se posicionan por encima del plano neutro.
- El armamento se posiciona en la parte de proa para contrarrestar el peso de la planta propulsora en popa y contribuir así a la estabilidad longitudinal del conjunto (reduciendo esfuerzos).

Con respecto a los pesos de los distintos sistemas, salvo en el caso de la planta propulsora, el casco, las baterías y todos los sistemas propiamente civiles; la mayoría de los sistemas de abordaje son de carácter militar por lo que el detalle de las especificaciones como peso, medidas y necesidades de posicionamiento son información sensible y de carácter clasificado. Por ello, para determinar sus pesos se considerará un estudio de las medidas, la densidad media de sistemas y el factor de ocupación.

Con esto, es necesario determinar el volumen para obtener el peso de los módulos como se presenta en la Tabla 3-5. Las medidas se referencian en metros (con largo, ancho y alto), el volumen en m³, la densidad se da en kg/m³, el peso en kg y el factor de ocupación (%).

Módulo	Medidas			Volumen	Densidad	F. Ocupación	Peso (W)
	L	A	H				
S. Combate	3,50	3,1	1,9	20,615	500 – 800	0,65	8.040
C2/C3	2,55	3,1	1,9	15,020	300 – 700	0,80	6.000
ASW	3,50	3,1	1,9	20,615	300 – 900	0,80	9.900
EW	2,00	3,1	1,9	11,780	300 – 700	0,85	5.000
AAW/ASUW	1,50	3,1	1,9	8,835	500 – 600	0,80	3.900
Intel	1,55	3,1	1,0	4,805	500 – 800	0,85	2.650
COMMS	1,55	3,1	0,9	4,325	400 – 700	0,85	2.050
CM	1,50	1,0	1,0	1,500	400 – 800	0,80	750
Degaussing	1,00	1,0	1,0	1,000	900 – 1800	0,70	945
Multimisión	2,25	3,1	1,9	13,253	400 – 1400	0,65	7.750

Tabla 3-5 Relación de pesos de los sistemas de a bordo.

Los módulos con un menor factor de ocupación son debido a que albergan sistemas que necesitan mayor refrigeración y, por ende, más espacio vacío. De igual manera, los pesos de los sistemas civiles cuyas magnitudes son conocidas se tienen en cuenta para el estudio de estabilidad del siguiente apartado; la definición de los equipos, sus instalaciones y especificaciones son materia del punto 3.8.

3.4.2 Estabilidad

La estabilidad caracteriza el comportamiento de un cuerpo flotante mediante la descripción de la capacidad de este para recuperar una posición de equilibrio tras la perturbación de una acción externa como oleaje, propulsión o fuerzas puntuales. En el ámbito naval, la estabilidad [34] se basa en los principios hidrostáticos básicos y la interacción de solicitaciones que sufre la plataforma, siguiendo como base física el principio de Arquímedes.

Con vista en este comportamiento en flotación, la estabilidad se manifiesta de forma transversal y longitudinal, con respecto a los ejes de babor-estribor y proa-popa respectivamente. Así y de forma genérica, la estabilidad será más sensible en el plano transversal por depender de una sección menor.

Para el estudio de la estabilidad es necesario definir inicialmente las magnitudes de las que depende. La estabilidad depende de la posición de los diferentes centros de la plataforma; así, encontramos el centro de gravedad (G) respecto al peso, el centro de carena (B) respecto a la flotabilidad y el centro metacéntrico (M) respecto a la intersección de la línea de acción del empuje en reposo y escora. La estabilidad depende de la denominada altura metacéntrica (GM) que es la distancia existente entre las posiciones de G y M, y viene dada por (3-11) como se aprecia en la Figura 3-6 (con la diferenciación de las partes A, B, C y D). Para el estudio de esta distancia es necesario la posición de G y M, cuya magnitud se define con respecto a la quilla (K).

$$GM = KM - KG \quad (3-11)$$

De este modo, con un GM positivo se presenta estabilidad, si es nula es indiferente, y en caso negativo se da un equilibrio inestable. En caso de la presencia de escora y existencia de un equilibrio estable, surge el concepto del brazo adrizante (GZ) (en D) con el que el submarino recupera su posición inicial por la actuación del momento adrizante (M_r), presente por la diferencia de empujes según (3-12).

$$GZ = GM \sen \theta \quad (3-12)$$

$$M_R = \Delta GZ$$

Para la estabilidad de un submarino la estabilidad clásica establece nuevos conceptos, la navegación de una plataforma submarina le permite operar en condiciones de inmersión y superficie. En el caso de la navegación en superficie (en C) la plataforma se comporta igual que un buque de superficie con valores de GM más reducidos. Con regímenes de inmersión el comportamiento de estabilidad cambia (en B), la posición de B y M se altera y el centro de carena se posiciona por encima del de gravedad; la distancia de KM se iguala a KB por lo que en inmersión la posición de KB debe ser distinta y superior a KG para mantener la estabilidad de la plataforma ($GM > 0$). El comportamiento descrito se presenta de manera gráfica en la Figura 3-6, con la evolución del posicionamiento de G, B y M de modo transversal y longitudinal en la parte izquierda (en A).

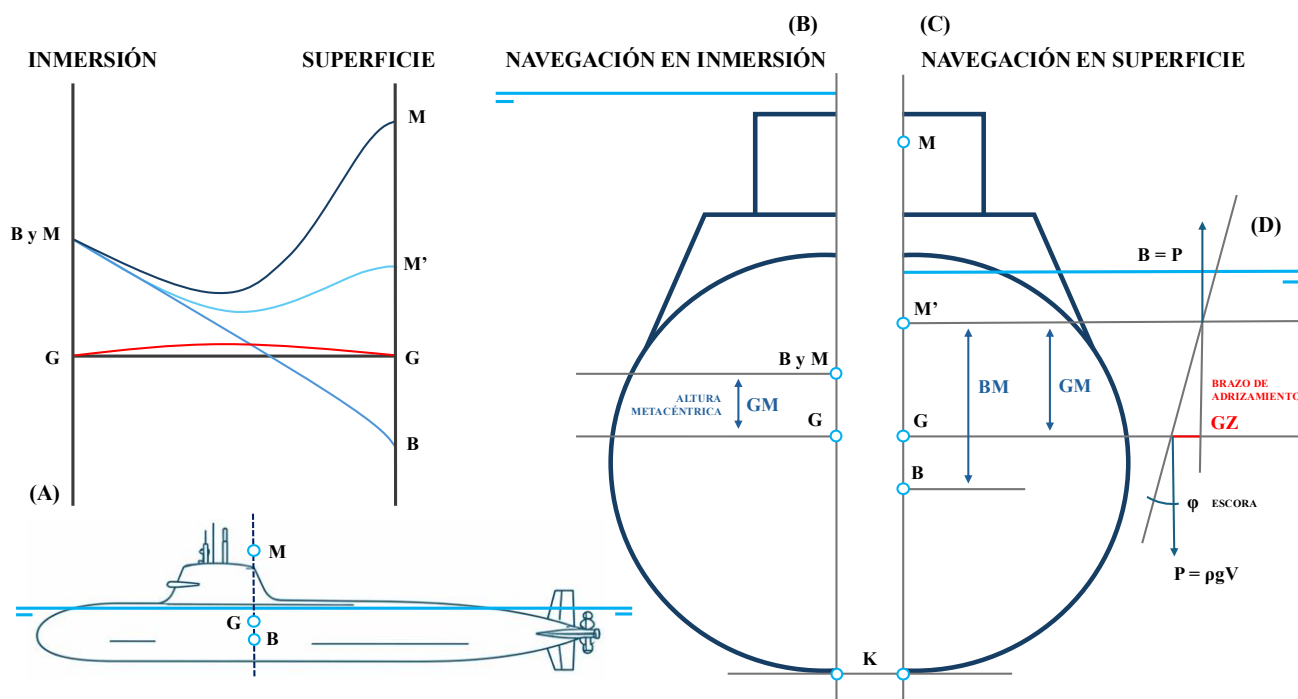


Figura 3-6 Estabilidad de un submarino en superficie e inmersión (Elaboración propia).

A continuación, prosiguiendo con el estudio de la estabilidad y siendo conocida la posición de GM en su condición de rosca (plataforma vacía), pero el centro de gravedad se ve afectado por los sistemas de abordó y su peso que influenciará el GM según la posición de instalación. Para hallar la magnitud real del GM de la plataforma es necesario el estudio de los sistemas y definir su peso (W) y posición (Z). Así, el cálculo del KG se aplicará según (3-13) teniendo en cuenta la relación de la plataforma en rosca con todos los pesos descritos y su posición.

$$KG = \frac{\Delta_0 GM_0 + \sum W_i Z_i}{\Delta_0 + \sum W_i} \quad (3-13)$$

De esta forma y quedando representado en la Tabla 3-6, se hace un análisis de los módulos de a bordo con las magnitudes de W y Z (a la izquierda) con los resultados del punto 3.4.1 y los sistemas de peso conocido; y se presenta junto a la información existente de la plataforma (a la derecha) con los valores para la condición de navegación e inmersión que viene dada por el software de DELFTship.

Módulos	W_i	Z_i	Plataforma en Rosca	
			Superficie	Inmersión
Casco (R y L)	16.500	1,79 m		
E. Mareomotriz	5.500	3,70 m	KG	1,790
Sonar	4.500	3,55 m	KB	0,799
Torpedos	1.700	1,25 m	BM	1,064
Minas	6.000	2,50 m	KM	1,863
Periscopio	2.500	2,55 m	GM	0,073
S. Combate	27.550	2,30 m	Δ	150,88 t
Multimisión	7.750	2,30 m		
S. Control	11.650	2,30 m		
Baterías	49.400	0,70 m		
P. Propulsora	9.500	2,00 m		
Lastre	3.800	0,10 m		
Total	146.350	-		

Tabla 3-6 Análisis de estabilidad para el cálculo de KG y KM.

Tras el análisis de los datos presentados y el estudio de la plataforma como conjunto se obtienen los datos finales y aproximados de la estabilidad del submarino autónomo como se ve en la Tabla 3-7.

Δ	KG	$GM_{superficie}$	$GM_{inmersión}$	$GM_{descargado}$	GM_L
146,35 t	1,69 m	0,173	0,251	0,089	15,232

Tabla 3-7 Estabilidad del XLUUV.

De la estabilidad se concluye, en base a los datos expuestos, que la plataforma es estable tanto en navegación de superficie como en inmersión con una altura metacéntrica positiva ($GM > 0$) del orden de las pocas decenas de centímetros (0,1 – 0,2), lo cual es estándar en el diseño de submarinos.

3.4.3 Coeficientes de forma

Los coeficientes de forma de un buque son una representación numérica adimensional que se utilizan en la construcción naval para la descripción de la geometría del casco mediante su comparación con formas simples como bloques y prismas. En el ámbito de la arquitectura permiten un estudio preliminar y aproximado de las condiciones del buque para su comportamiento en los campos de resistencia al avance, estabilidad, capacidad de carga, potencia de propulsión y demás parámetros.

El coeficiente de bloque (C_b) define la capacidad volumétrica global de la plataforma con respecto al bloque que lo contiene y permite una estimación del desplazamiento, la potencia y cómo clasificación.

$$C_b = \frac{\nabla}{L B T} = 0,535$$

con el resultado de un C_b bajo se caracteriza una embarcación con baja resistencia al avance lo que permite mayores velocidades, pero menor capacidad de carga. Se presenta un buque como “fino”.

El coeficiente prismático (C_p) caracteriza la distribución del volumen del buque en el plano longitudinal en dirección de proa a popa y que es dependiente del área de sección en la cuaderna maestra; este permite la optimización hidrodinámica, la selección de la velocidad media de diseño y establecer una predicción de formación del oleaje en navegación.

$$C_p = \frac{\nabla}{A_m L} = 0,682$$

con la aproximación del C_p en valores bajos permite la navegación en regímenes de mayor velocidad con una resistencia menor ante las olas longitudinales producidas por el propio buque.

El coeficiente de maestra (C_m) define la forma de la sección transversal principal del buque y permite el estudio del diseño estructural para cuadernas y refuerzos, y la estimación de la estabilidad dinámica de la plataforma.

$$C_m = \frac{A_m}{B T} = \frac{C_b}{C_p} = 0,785$$

con el valor de C_m se define la redondez de la sección transversal del buque, por lo que en cuanto más cercano a 0 sea su valor, más próxima a la circunferencia será su sección.

El coeficiente de flotación (C_{wp}) determina la relación existente entre el área de flotación y las medidas del plano de flotación ($L \times B$) y permite estimar la estabilidad inicial y la respuesta ante oleaje.

$$C_{wp} = \frac{A_{wp}}{L B} = 0,849$$

así, con un C_{wp} bajo se caracteriza una plataforma con baja resistencia al avance y que es afilada con lo que se mejora el comportamiento del oleaje transversal.

3.4.4 Diseño de tanques de lastre y trimado

Para los regímenes de operación del submarino y permitir la navegación de superficie y en inmersión es necesario el uso de tanques de lastre que se basan en compartimentos estructurales dispuestos en el casco ligero para la gestión de la flotabilidad con la entrada o salida de agua. Para sumergirse, se inundan de agua (aumentando la densidad); y para emerger, el aire comprimido expulsa el agua con el sistema de soplado, reduciendo el peso y permitiendo el ascenso. De forma paralela, los tanques de trimado se encargan de corregir la actitud permitiendo el ajuste “fino” de la posición del submarino autónomo.

Para el dimensionado de los tanques de lastre es necesario definir sus requisitos operativos. Así, la plataforma debe de contar con una reserva de flotabilidad (RF) del 10% para la estabilidad en superficie, además de disponer los tanques cercanos a la quilla (bajo el casco resistente) para la mejora de esta.

El cálculo de los tanques de lastre se hace en función de la RF requerida siguiendo (3-14) tal que,

$$RF = \frac{V_{estanco}}{V_{disponible}} \mu_{uso} \quad (3-14)$$

$$V_{lastre} = V_{disponible} + \frac{M_{húmedo vacío}}{\rho_{agua salada}}$$

De este modo, se aplica que el RF es del 1,1 y se obtiene el valor del volumen estanco necesario para afrontar los requisitos técnicos; con un margen operativo de 2 m³ con lo que se dimensiona,

$$V_{lastre} = (V_{estanco} - V_{disponible}) + Margen = 14,869 \text{ m}^3 \approx 15 \text{ m}^3$$

Así, los tanques ya dimensionados se disponen a lo largo de la eslora de la plataforma bajo el casco resistente a lo largo de 10 m de longitud, con lo que se permite la inmersión y operar en situaciones de emergencia pudiendo afrontar problemas como el cambio de la densidad del medio y pérdidas de presión del sistema que radiquen de un mal funcionamiento.

Para el dimensionamiento de los tanques de trimado es necesario conocer el momento restaurador a aplicar, el cual viene dado por (3-15) y debe ser suficiente para corregir escoras menores ($\theta < 5^\circ$).

$$M = \Delta GM_L \theta \quad (3-15)$$

De (3-15) se obtiene que el M necesario es de 162,71 Nm, por ello este momento deberá de venir dado por la acción del volumen de los tanques de trimado y conforme a (3-16); así, se obtiene el volumen de los tanques de trimado sabiendo que el momento M depende de la masa, la gravedad y la distancia.

$$V_{trimado} = m_{trimado} / \rho_{agua salada} \quad (3-16)$$

$$M = m_{trimado} g d_{entre tanques}$$

De este modo, se obtiene que los tanques de trimado deben de ser de 3 m³. La disposición de los tanques de trimado se hace a lo largo de la eslora con una altura de 2 metros sobre la quilla en la zona exterior del casco resistente.

Además, con la implementación de los que se produce el aumento del peso total del sistema por lo que el KG se verá modificado, por ello con la instalación de los tanques el centro de gravedad pasa a

$$KG_{final} = \frac{m_{agua} (KG_{tanque} - KG_{total})}{M_{total}} = 0,0023 \text{ m}$$

por lo que el centro de gravedad se acerca a la quilla en 2,3 cm, y con ello se mejora la estabilidad.

Asimismo, el sistema de lastre necesita de un sistema de tanques de soplado de aire comprimido para el vaciado de los tanques y un sistema de bombas para el llenado de estos. Los tanques de lastre incorporan un sistema de llenado de agua por gravedad por lo que no es necesario la instalación de sistemas auxiliares. Para su soplado es necesario estimar la cantidad de aire comprimido, por ello se dimensionan con el volumen a ocupar y la presión presente en la cota mayor.

$$V_{aire} = V_{lastre} p_{exterior} = 18 \text{ m}^3 \times 21 \text{ bar} = 378 \text{ m}^3 \text{ de aire a 1 bar}$$

Esto supondría la operación de una maniobra de emersión completa por lo que para el sistema total se tienen en cuenta un total de 5 maniobras con botellas de 300 bares por lo que

$$V_{botellas} = \frac{378 \text{ m}^3}{300 \text{ bares}} = 1,26 \text{ m}^3$$

Por su parte, los tanques de trimado componen un sistema que debe de ser capaz de actuar de manera rápida y eficiente con el uso de aire comprimido almacenado en un volumen de 18 m³ siguiendo el procedimiento aplicado con el lastre. Además, el sistema de trimado requiere del uso de bombas para la rapidez de su eficacia, por ello el sistema debe de ser capaz de efectuar el soplado completo de su volumen en un tiempo (t) de 2 minutos (120 segundos) por necesidades de maniobrabilidad de la plataforma. Por ello, las bombas con un rendimiento (η) aproximado del 70% tendrán que trabajar con un flujo establecido (Q) y con la presión existente a la mayor cota de operación (p_{ext}) tal que se requiere de una potencia (P) según la aplicación de (3-17), tal que

$$P = \eta Q p_{ext} = \eta \frac{V_{trimado}}{t_{llenado}} p_{ext} \quad (3-17)$$

Así, se requiere un sistema de bombas de 45,5 kW que trabajen con un flujo de 25 L/s.

3.4.5 Polígono de equilibrio de lastres

Por su parte, el llenado y vaciado de los tanques de lastre y de trimado suponen una modificación de la estabilidad con la aparición de superficies libres lo que supone un decremento de la estabilidad de manera puntual. Para el control y estudio de esta situación existe el polígono de equilibrio.

El polígono de estabilidad delimita una región del plano que representa el conjunto de condiciones de equilibrio del submarino en inmersión. Cada punto de dicha región queda determinado por las coordenadas correspondientes al peso del lastre variable, representado en el eje vertical, y al momento longitudinal resultante (positivo a proa, negativo a popa o neutro), representado en el eje horizontal. Cada uno de los lados del polígono simboliza la variación producida al llenar progresivamente los tanques. En primer lugar, se consideran los tanques situados más a proa, avanzando sucesivamente hacia los ubicados a popa. Una vez completada la secuencia, el proceso se analiza en sentido inverso. De este modo, el contorno generado recoge todas las combinaciones operativas habituales de distribución de lastre en un polígono y sus efectos sobre el equilibrio longitudinal.

El estudio del polígono ha permitido determinar las posiciones de los tanques. De este modo se presenta un polígono de estabilidad para el trimado y para el lastre de la plataforma como se aprecia representado en la Figura 3-7 con respecto al trimado y en la Figura 3-8 con respecto al lastre. En el polígono se representan los estados del llenado inicial de los tanques 1 y 2 tanto de proa y popa de forma independiente, y el llenado compensatorio de los tanques opuestos para las posiciones de opuesto y lleno por parte de la parte contrapuesta.

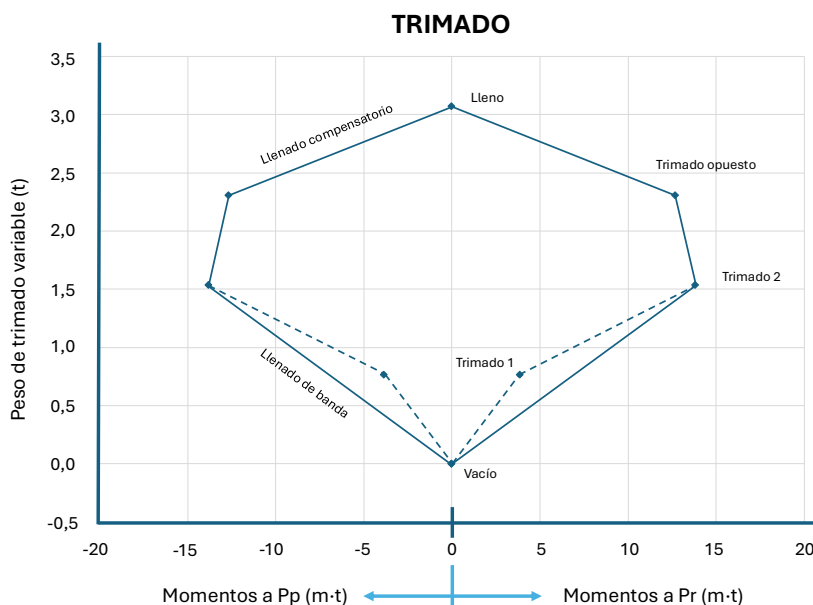


Figura 3-7 Polígono de estabilidad de trimado.

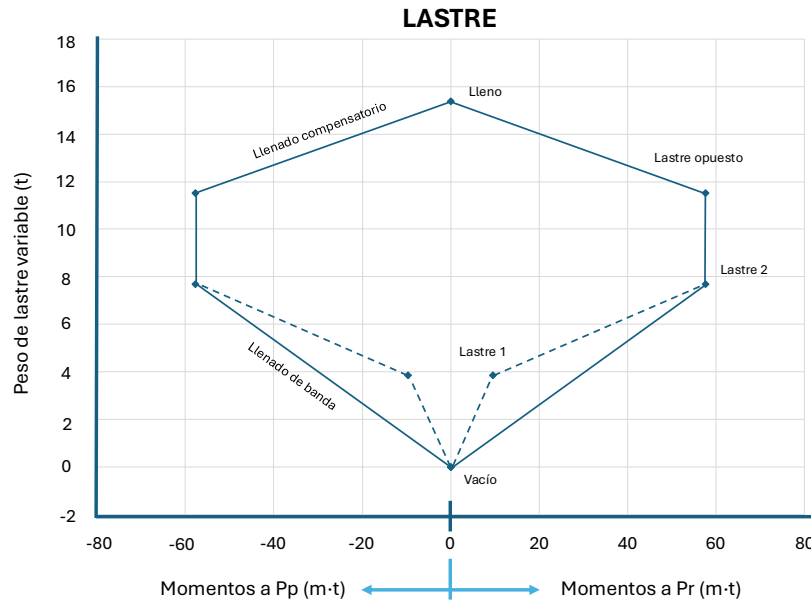


Figura 3-8 Polígono de estabilidad de lastre.

3.5 Maniobrabilidad

La maniobrabilidad es la habilidad de la plataforma para llevar el control con precisión del estado dinámico de esta en su posición, orientación y velocidad de forma autónoma, imperturbable y eficiente y dentro de un entorno complejo de tres dimensiones. Siguiendo este principio, la maniobrabilidad del submarino no tripulado debe de estar sujeta a regímenes de operación autónomos prolongados con navegaciones eficientes y maniobras precisas en el orden de bajas velocidades, desarrollando un control dinámico que permita la predicción de su comportamiento.

Dentro de este concepto, destaca como factor crítico de diseño la alta capacidad de maniobrabilidad en velocidades bajas y estados cuasi-estacionarios con procesos de maniobra predictivos para navegaciones litorales, posados en fondo (para recargas), mantenimiento de posición y entornos hostiles. Así, la plataforma está dotada con numerosas superficies de control para la navegación de precisión (desarrollados en el punto 3.5.2) con lo que se consigue un control activo inmediato del comportamiento hidrodinámico de la plataforma.

Por otra parte, fruto de la naturaleza multifunción del submarino, la plataforma debe de ser capaz de tener un control de maniobra que se pueda modificar en función de la carga de a bordo, la cual puede variar en función de la misión. Estos sistemas de control deben de desarrollarse de forma adaptativa con modelos actualizables y dependiente de incógnitas que puedan ser modificadas además de márgenes de estabilidad y reconfiguraciones de las leyes de control.

3.5.1 Navegación inercial

La navegación inercial se basa en el principio de que un objeto (la plataforma) va a presentar una resistencia en su estado actual, a no ser que una fuerza cause la aceleración de esta. Con la medida de estas aceleraciones de forma lineal y angular se permite la cuantificar el movimiento de forma precisa.

Con la integración de esta información con respecto al tiempo se obtiene la velocidad, y con una segunda integración se obtiene la posición como se define en (3-18), además de la información de la actitud para la dirección de la plataforma durante la navegación. Así, se obtiene información referente a latitud (ϕ), longitud (λ), profundidad (h), balance (ϕ), cabezada (θ) y guiñada (ψ).

$$v(t) = v_0 + \int_t^{t+\Delta t} a(t) dt \quad x(t) = x_0 + \int_t^{t+\Delta t} v(t) dt \quad (3-18)$$

Las mediciones se llevan a cabo con la implementación de tres acelerómetros, tres giróscopos y un magnetómetro los cuales se integran en la Unidad de Medidas Inerciales (IMU) y con lo que se definen los 6 DOF (*Degree of Freedom*) como se muestra en la Figura 3-9. Así, se integran:

- Los acelerómetros que permiten medir la aceleración en los tres ejes ortogonales principales (3 DOF) tanto de fuerzas externas como de la aceleración gravitatoria, por lo que con la información de actitud se puede extraer la aceleración real sin la acción gravitatoria.
- Los giróscopos que miden las velocidades angulares (3 DOF) y con la cual se extrae la rotación en los tres ejes, y con ello la evolución de la actitud.
- El magnetómetro que mide el campo magnético y permite correcciones a datos resultantes.

Para la medición de estas magnitudes se hace uso de los sensores inerciales mencionados, estos se pueden caracterizar con dos sistemas, el giroscópico y el fijo.

- El montaje giroscópico el sistema va montado en una estructura basada en un giróscopo, esto mantiene el sistema de referencia alineado con el movimiento de la plataforma.
- Con el sistema fijo, la estructura está fijada a la plataforma, así se reduce el espacio necesario, dando mayor robustez a vibraciones y movimientos, permitiendo autonomía prolongada con fiabilidad y cambios en la configuración de pesos, además de presentar bajos requisitos energéticos y peso junto con la integración de otros sistemas como cartografía, GPS y Doppler.

El procesamiento de esta información de la IMU [35] en la navegación es recopilado por parte de una AHRS (*Attitude and Heading Reference System*) con lo que se define y se recopila la información de la actitud y rumbo de la plataforma. Esta información es procesada con el uso de un software específico para definir la cinemática por la INS (*Inertial Navigation System*) con un funcionamiento que se presenta en la Figura 3-9, y a posteriori su comunicación a los sistemas de control y gobierno. En adición, para la información GPS se hace uso de conexión al GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Además, a nivel de software se introduce un filtro de Kalman con un algoritmo que estima el estado culto de un sistema dinámico lineal a partir de una serie de mediciones con ruido presente.

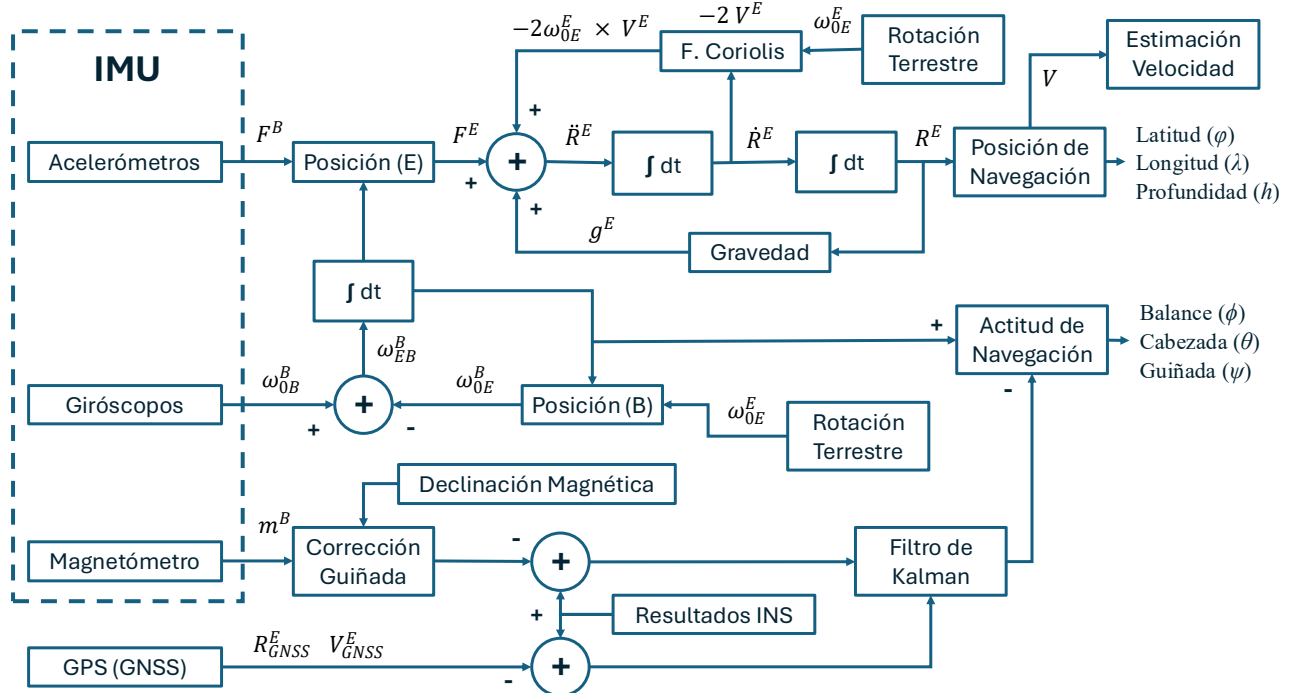


Figura 3-9 Esquema de funcionamiento del INS (Elaboración propia).

Nótese que se aplican tres sistemas de referencia 0 (inercial), E (basado en la Tierra) y B (basado en la plataforma); y aplicando F , ω , V , R y m definidos como fuerzas, velocidad angular, velocidad, posición y componente magnética respectivamente; se obtiene las 6 componentes de los DOF.

Esta posición inicial está basada en las aceleraciones angulares que provienen de las mediciones de los giróscopos y la rotación terrestre con su posterior integración, y que junto con la información de los acelerómetros determinan la primera aproximación de la posición. Esta aproximación se integra con los datos de la gravedad y la fuerza de Coriolis (cuyos datos se actualizan con el estado de la velocidad y posición respectivamente) y con lo que se obtiene la posición junto a una estimación de la velocidad.

Además, la actitud se obtiene directamente de la integración de los giróscopos y la rotación terrestre. De manera paralela, las mediciones del magnetómetro y la declinación magnética definen la corrección de la guiñada que junto a la información de GPS (con posición y velocidad) se actualiza con los resultados de la INS para definir el filtro de Kalman y corregir el cálculo de la actitud.

3.5.2 Superficies de control

En un submarino las superficies de control [36] son aquellas que permiten realizar el control hidrodinámico de la plataforma con el gobierno de su movimiento y actitud, este se realiza en los tres ejes principales de rotación con balance, cabeceo y guiñada. Con el uso de estas superficies se aprovecha el flujo del avance y así provocar fuerzas y momentos controlados para un mejor control del gobierno.

Dentro de estas superficies encontramos los timones. La plataforma se dota de timones verticales y horizontales para el control de rumbo y profundidad. El submarino está equipado con:

- Timones de rumbo, que se sitúan en popa con la función de ejercer el control de la guiñada con la modificación de la posición el plano horizontal con la inducción de fuerzas laterales que generan el giro en este plano.
- Timones de profundidad tanto en proa como en popa, y cuya función es la de controlar el cabeceo y con ello la inmersión y emersión.

Así, el timón de profundidad de proa tiene un movimiento independiente en babor y estribor, y su posición adelantada permite un mejor control del ángulo del casco y su respuesta en el plano longitudinal; por su parte el de popa contribuye a la estabilidad y control.

El diseño de las superficies tiene la mayor eficiencia hidrodinámica posible con el objetivo de producir los mayores esfuerzos con la menor resistencia posible. Su diseño se basa en los perfiles NACA, ya que estos presentan una excelente relación de resistencia y sustentación con un rendimiento eficiente gracias a su comportamiento suave y progresivo ante la modificación del ángulo de ataque, retrasando la separación de flujo y evitando posibles pérdidas de la efectividad en el gobierno. Además, estos perfiles conceden una alta previsibilidad hidrodinámica, lo que se traduce una mejor integración en los sistemas de control con geometrías simples y simétricas.

3.6 Planta eléctrica

La planta eléctrica es el elemento crítico en el diseño. Este sistema es responsable de suministrar la energía a todos los sistemas y subsistemas de la plataforma y está diseñada de acuerdo con los requisitos operativos de la plataforma. Dentro de estos requisitos se definen necesidades como lo son la autonomía, el alcance de navegación (en superficie e inmersión) y la permanencia. Además, de la planta eléctrica depende la firma acústica y térmica de la plataforma por lo que su diseño se realizará con las mínimas emisiones (ruido y calor) gracias a sistemas de control.

La disponibilidad y fiabilidad de la planta son cuestiones clave en el diseño, estos requisitos se mejoran con la implantación de redundancia de sistemas sin la pérdida de funcionalidad y con el espacio disponible como restricción. De acuerdo con la disposición general de submarinos existentes, la planta eléctrica ocupa entre el 35 y 50% del volumen; por lo que se requiere una planta reducida y ligera.

Además, debido a la ausencia de personal durante la navegación autónoma, la planta debe de estar capacitada con autonomía para controlar, localizar, diagnosticar y resolver los posibles problemas que ocurran durante su despliegue.

Por ello, es oportuno que su diseño y definición se complete de forma integral y completa en una única unidad para así obtener una buena sinergia de todos los sistemas de abord y de manera integrada con los subsistemas de la plataforma para cumplir con los requisitos expuestos. Es por ello, que para la definición de la planta eléctrica son materia de estudio: el balance eléctrico, los flujos de carga, la coordinación de protecciones, el cálculo de armónicos y los requisitos de cortocircuito (cálculos) y de caída de tensión de los grandes consumidores en el sistema.

3.6.1 Arquitectura de la planta eléctrica

La arquitectura de la planta eléctrica fundamenta las bases de la estructura funcional [37], la cual se define los sistemas de almacenamiento, las interconexiones entre los sistemas y subsistemas, los equipos de conversión y rectificación, y la propia red de distribución eléctrica de la plataforma. Con el uso de esta arquitectura (véase Figura 3-10) de forma funcional se debe garantizar un suministro eléctrico continuo, eficiente y con capacidad de operación segura.

La topología de la distribución de los sistemas dentro de la planta sigue las generalidades de un submarino convencional con DG. En el caso del submarino autónomo todos los sistemas dependen de generación eléctrica por parte del sistema undimotriz y mareomotriz, y su uso a través de los bancos de baterías. De este modo, la arquitectura queda definida como se puede observar en la Figura 3-10.

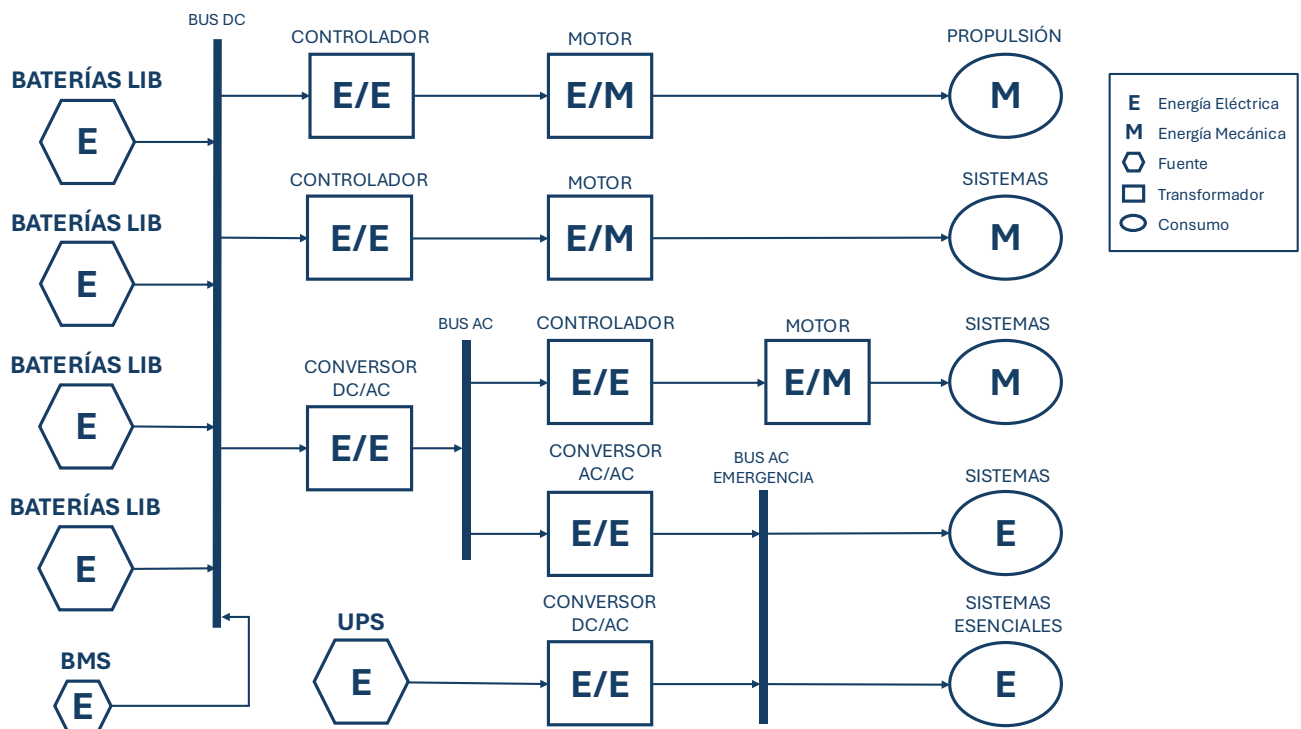


Figura 3-10 Arquitectura de la planta eléctrica (Elaboración propia).

Como se muestra en la figura, los sistemas dependen de fuentes, transformadores y consumidores como se aprecia en la leyenda (parte superior de la figura), y que los sistemas se distribuyen partiendo de las LIB hacia un Bus DC central que distribuye la carga a los equipos con un Bus AC para los equipos de esta naturaleza y una red de emergencia dependiente de una UPS con su propia red y bus de AC.

Es así, que la arquitectura se dispone de forma integrada con el resto de los sistemas de abord. Con esto se permite el funcionamiento coordinado de sistemas durante la actividad y el despliegue de la plataforma. A modo de redundancia y como subsistema de emergencia, se establece una UPS con almacenamiento propio y capacidad de generación con un DG capaz de operar en cota periscópica. La instalación del DG de emergencia permite la continuidad de las operaciones a pesar de impedimentos para la recarga.

De este modo la planta eléctrica queda caracterizada por distintos elementos que en su conjunto actúan para permitir la generación, almacenamiento, distribución y consumo de la corriente dentro del sistema y sus conexiones. Estos elementos se pueden agrupar bajo los siguientes conceptos:

- Fuentes de energía; con el sistema undimotriz, el sistema mareomotriz, y el subsistema de emergencia con el DG.
- Sistema de almacenamiento; con los bancos de baterías, el sistema de refrigeración, la contención térmica y la protección estructural.
- Sistema de conversión eléctrica; con el uso de rectificadores, inversores, convertidores y filtros armónicos.
- Bus eléctrico; con los buses de DC y AC y la arquitectura híbrida DC/AC.
- Sistema de distribución; con paneles de distribución, seccionadores, redundancia en conexiones y protecciones eléctricas y térmicas.
- Sistema de gestión; con sistemas de monitorización (BMS y PMS) y de control, subsistemas de emergencia y redundancia, y control de cargas.
- Consumidores; con la distribución a los sistemas de propulsión, navegación, sonar, de control, operativos, tácticos y auxiliares.

3.6.2 *Sistemas de control (PMS y BMS)*

El Sistema de Gestión de Potencia (PMS – *Power Management System*) se encarga del control, distribución y optimización de la energía producida y almacenada a bordo, asegurando el suministro estable a los sistemas críticos. Mediante la supervisión en tiempo real de cargas, fuentes y consumidores, permite el balance automático de la carga y la desconexión de sistemas no esenciales ante picos de demanda. Debe presentar una alta confiabilidad, redundancia, compatibilidad y rápida reacción ante fallas, utilizando protecciones adecuadas, refuerzos de cableado y un software específico que garantice la eficiencia y la continuidad en todas las condiciones de carga y consumo.

Por su parte, el Sistema de Gestión de Baterías (BMS – *Battery Management System*) supervisa y protege los bancos de baterías, optimizando su eficiencia y prolongando su vida útil. Controla parámetros críticos como tensión, corriente, demanda, temperatura, refrigeración y estado de carga (DoD). Además, integra funciones de detección y comunicación de sobrecargas, cortocircuitos u otras anomalías. En el submarino se instala de forma integrada en el sistema de potencia principal, en un compartimento sellado, estanco y aislado eléctricamente, con cableado protegido frente a vibraciones, sobrecalentamiento y humedad, y un software que ajusta los ciclos de carga y descarga según el perfil operativo para maximizar la autonomía. El estudio de fallos se amplía en el Anexo XIV.

3.6.3 *Baterías*

Las baterías a bordo de una plataforma submarina constituyen el núcleo de la planta y del sistema energético de esta. El uso de baterías es un elemento operativo crítico ya que con él se permite el almacenamiento de la energía eléctrica necesaria para la operación de la plataforma durante los regímenes de navegación e inmersión y no se posee la capacidad de generación eléctrica.

La función de estas es la de suministrar energía de forma estable y continua a los distintos sistemas de propulsión, navegación, combate, sensores y comunicaciones. El tipo y capacidad de las baterías como lo son la densidad energética, la capacidad de descarga, la eficiencia energética y la estabilidad térmica son condicionantes de las capacidades operativas durante el despliegue con influencia en factores como el alcance operativo, la autonomía, la firma acústica, la seguridad y la maniobrabilidad. Por ello, la selección de las baterías es influyente en las especificaciones del submarino y es condicionante del diseño de una plataforma eficiente al nivel de los competidores existentes.

Actualmente, en el campo militar de diseño de submarinos existe cierta variedad en cuanto a las opciones de baterías para una plataforma submarina las cuales destacan por su especialización y ventajas en determinados campos. De este modo, dentro de las opciones presentes se encuentran diferentes tecnologías como lo son las de plomo-ácido (*Lead-Acid*), las de Litio-Ion (NMC), las de Litio-Fosfato (LFP), las de Litio-Titanato (LTO), las de Plata-Zinc (Ag-Zn) y los sistemas híbridos de células de energía con la integración de un sistema AIP (*Air Independent Propulsion*). Tras un estudio de las especificaciones de las baterías se obtienen las siguientes conclusiones en la Tabla 3-8.

Especificaciones	Lead-Acid	NMC	LFP	LTO	Ag-Zn
Densidad Energética	Muy Baja	Alta	Media	Media	Media
Descarga (<i>DoD</i>)	30-50 %	80-100 %	80-100 %	80-100 %	80-100 %
Ciclo de Vida (<i>Usos</i>)	300-1500	2000-5000	6000-9000	+10000	100-300
Eficiencia	80-90%	95-99 %	95-99 %	90-95 %	75-80 %
Estabilidad Térmica	Alta	Media	Muy Alta	Muy Alta	Media
Seguridad	Alta	Media	Muy Alta	Muy Alta	Media

Tabla 3-8 Comparativa de especificaciones de baterías.

Ante los datos expuestos en la Tabla 3-8 anteriormente, y con un análisis basado en las necesidades de la plataforma para gran autonomía y alcance el mejor candidato para la plataforma son las baterías de Litio-Ion (NMC). La elección se realiza por presentar una alta densidad frente a los demás candidatos e igualando en materia de *DoD* (*Depth of Discharge*), ciclo de vida y eficiencia (representado en la Figura 3-11). Además de no destacar por la estabilidad térmica y seguridad que son conceptos gestionables con sistemas de control y gestión como BMS que se explicaran posteriormente.

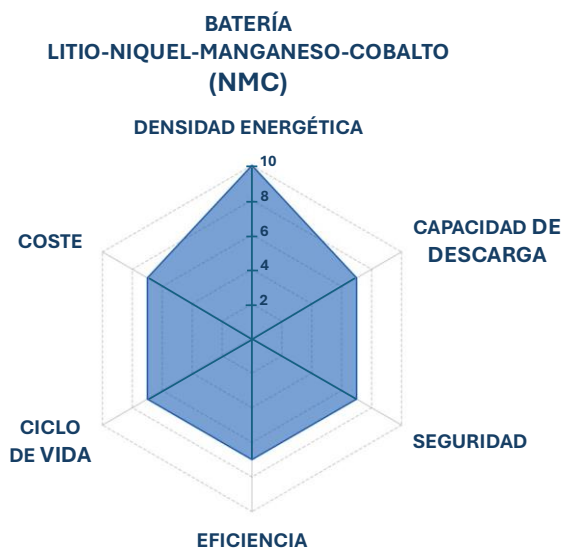


Figura 3-11 Características de las baterías Li-ion NMC (Elaboración propia).

Las baterías de Litio-Ion NMC o también denominadas LIB se caracterizan por una gran densidad energética y energía específica, con rangos de densidad que oscilan entre los 265 Wh/kg hasta los 675 Wh/kg además de sus capacidades en *DoD* pudiendo llegar a descargas casi completas de entre el 80 y 99%. Las LIB funcionan con el flujo de carga entre un ánodo y un cátodo como se muestra en la Figura 3-12. Esta capacidad se ve influenciada por la temperatura del sistema (principal causa de accidentes de LIB), con una estabilidad térmica que puede ser mejorada con sistemas de control y refrigeración integrados en el BMS.

Las LIB NMC dentro del ámbito militar con su aplicación en plataformas submarinas, son unidades de energía no escalables con un funcionamiento sencillo como se muestra en la Figura 3-12. Por lo que las baterías se agrupan en módulos acoplados en serie o paralelo, y que a su vez se integran dentro de un banco. Así, un submarino convencional monta un número del orden de 700 módulos a bordo con capacidades de entorno los 500 Ah, es por esto por lo que para equiparar el poder de una batería de *Lead-Acid* (de 14000 Ah y 2V de media) son necesarias en torno a 28 LIB de 500 Ah y 4V.

Así, las baterías se seleccionan las COMPASS CORE de la compañía alemana TESVOLT [38] de alta densidad con 197 Wh/kg (256 Wh/L) y alta integración y resistencia a vibraciones junto a máxima eficiencia en el sector con la certificación IP76 para uso naval y aislamiento. Estas se sitúan instaladas en módulos de 86 kg favoreciendo la eficiencia térmica y reduciendo un 30% su espacio de instalación.

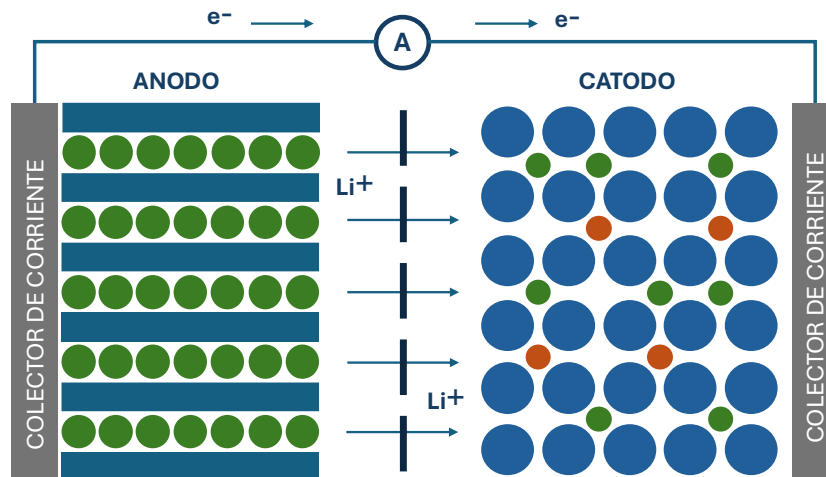


Figura 3-12 Funcionamiento de batería Li-ion en descarga (Elaboración propia).

Esta estructura modular por su parte presenta una ventaja en cuanto al aprovechamiento de espacio, ya que los módulos de LIB se pueden ajustar en mayor medida la forma circular del casco a presión; además la disipación del calor supone una menor fatiga térmica. Por otra parte, es necesario un sistema de balance que permita la carga y descarga de los módulos de manera equiparable para la optimización de toda la capacidad. Los módulos LIB no requieren de mantenimiento continuo lo que es favorable para el perfil de misión del submarino; y en adición solo es necesario el BMS para gestión y control y no lo son subsistemas auxiliares como bombas o recirculadores, reduciendo necesidades de peso y espacio. A su vez, se debe de tener en cuenta que la vida de las LIB empieza con su producción, por lo que se debe controlar el rendimiento y ciclo de vida.

3.6.4 Sistema de generación de energía

Una vez realizada la caracterización de la planta eléctrica es necesario definir el método de generación de la energía a bordo. Como ya se presentó a modo teórico en el estado del arte, la generación de energía estará a cargo de un sistema basado en energía mareomotriz y undimotriz, con un sistema de emergencia (*backup*) con un DG para navegación en snorkel (navegación en cota periscópica para ventilaciones de los DG y permitir su funcionamiento). El estudio y análisis detallado para su dimensionado y las necesidades de generación serán objeto en el estudio de desempeño del capítulo 4.

Asimismo, la energía mareomotriz se basa en la energía obtenida de las corrientes marinas y donde el factor crítico de su estudio es la velocidad de dicha corriente. Por su parte, la energía undimotriz se basa en el aprovechamiento del oleaje presente y siendo dependiente de la altura de la ola y su periodo. Con la información obtenida de fuentes como OVACEN [19] [20] de los diferentes sistemas de energía existentes actualmente (no se tienen en cuenta prototipos en desarrollo) se ha realizado un estudio de las capacidades que pueden ser instaladas en el submarino.

De este modo, en la Tabla 3-9 se relacionan los diferentes sistemas con sus ventajas y desventajas desarrollado en dos puntos por sistema y la aplicabilidad a la plataforma.

Sistemas de Energía	Ventajas	Desventajas	Aplicabilidad
Turbina horizontal (HAWT)	Alta eficiencia Tecnología madura	Necesita alineación Firma acústica	Viabile pero limitado
Turbina vertical (VAWT)	Flujo bidireccional Menor complejidad	Menor eficiencia Menor potencia	Integrable en UUV
Cometa submarina	Multiplicador velocidad Alta densidad energía	Control complejo Mayor espacio de uso	Integrable y mejor opción
Arquímedes <i>Waveswing</i> (AWS)	Mejor eficiencia Buena integración	Necesidad acople Necesita adaptación	Uso eficiente del recurso marino
Boya Point Absorber	Uso modular Mecanismo simple	Alta variabilidad Uso en superficie	Uso complementario
Columna oscilante (OWC)	Generación estable Buena densidad energía	Gran estructura Usa aire comprimido	No recomendado
Atenuadores lóxico (Pelamis)	Gran generación Alta densidad energía	Gran tamaño Anclaje a fondo	No permite el uso táctico del XLUUV
Convertidor undimotriz (WEC)	Depende presión Ajustable a condiciones	Baja madurez Baja generación	Uso complementario

Tabla 3-9 Estudio de sistemas de energía mareomotriz y undimotriz.

Ante los resultados obtenidos, para la implementación de los sistemas se decide el uso de:

- Turbina vertical (VAWT) por sus capacidades y posibilidades con una menor firma acústica.
- Cometa submarina por la alta eficiencia y densidad energética.
- AWS a modo de generación principal por sus capacidades con un uso modular y adaptable.

3.6.5 Gestión de la energía

El uso de la energía generada y almacenada por la planta debe de permitir el funcionamiento del submarino para su permanencia y la conducción de las operaciones, por eso es necesario definir la gestión de esta energía para permitir la optimización de su consumo. Por ello para el funcionamiento de la unidad es necesario el uso de un EMS (*Energy Managment System*) que en conjunto con el PMS y BMS permitan la navegación bajo los requisitos establecidos.

Para la gestión de la energía es necesaria la operación en base al SOC (*State of Charge*) existente en cada momento. Para ello se establece una optimización del SOC con un sistema predictivo en la EMS que permita la optimización de la carga según (3-19) mediante la estimación del perfil de consumo y el recurso energético con la información de los posados de recarga.

$$\min \int (SOC_{min} - SOC(t))^2 dt \quad (3-19)$$

De esta manera las operaciones se ejecutan en función del estado del SOC, así la EMS y los sistemas de la plataforma deberán de priorizar una serie de acciones para permitir la permanencia en zona, con acciones planeadas con anterioridad según lo reflejado en la Tabla 3-10.

SOC	Acciones
100 – 85 %	Evitar la carga completa prolongada
85 – 60 %	Régimen óptimo para operaciones
60 – 40 %	Planificación de posado
40 – 25%	Prioridad de recarga (Bajo consumo)
< 25 %	Modo conservación (Sistemas Esenciales)
< 10 %	Modo emergencia (Cota periscópica DG)

Tabla 3-10 Acciones del XLUUV en función del SOC.

Además, en base a las especificaciones de las LIB NMC seleccionadas el SOC de estas debe oscilar entre valores del 85% y el 25% para valores máximos de su DoD y con lo que se logra optimizar los ciclos de vida y la vida útil de las baterías. Estas acciones de la EMS son a nivel superficial, de modo interno el software y los sistemas de control llevarán a cabo acciones específicas y organizadas por subsistemas de manera automática y con relación y comunicación entre estos. El dimensionado de la capacidad de las baterías se desarrolla en el punto 4.2 con el estudio de los consumos y necesidades.

Para la gestión de la energía en plataformas autónomas al igual que en submarinos convencionales existen una serie de medidas que permiten una mejor distribución energética y, por ende, mejores consumos de la planta. Para ello la EMS puede realizar técnicas como el *dynamic load shedding* con el que se permite el uso a voluntad de los sensores en función de la necesidad de su uso; la gestión híbrida de la energía con el uso del AWS o el *glider* en regímenes de navegación lenta (entre 2 y 4 kts) y el uso del DG para navegaciones de tránsito a cota periscópica para los sistemas subrogados.

Además de forma activa, se pueden reducir las velocidades de navegación y la potencia de sistemas reduciendo así sus consumos (con reducciones de 30% por nudo de velocidad reducido); esto se puede aplicar junto con el planeamiento geográfico de zonas de recarga que sean favorables con estudios previos de las AOI y el teatro de operaciones en la fase preliminar de planeamiento de las misiones asignadas.

3.7 Planta propulsora

La planta propulsora es el elemento determinante en el desplazamiento de la plataforma y supone un factor condicionante en la autonomía y la maniobrabilidad [39]. Con un submarino autónomo, la propulsión es fundamental en cuestiones como la gestión energética mencionada, el control fino del empuje y el soporte de gobierno en navegaciones prolongadas. El diseño de la planta condiciona los modos de navegación y la estabilidad en las misiones con los mínimos consumos y perturbaciones hidrodinámicas en la operación permitiendo la permanencia en la AOO y la eficiencia operativa.

3.7.1 Arquitectura de la planta propulsora

La arquitectura de la planta propulsora determina la organización y conexión de todos los subsistemas y elementos como son el control de propulsión, la fuente de energía y sistemas de transmisión y control. Ya que la planta eléctrica no depende de los elementos de un submarino convencional, la planta propulsora será de naturaleza eléctrica en su totalidad y con un empuje entregado que se adapta de forma dinámica a las necesidades operativas según los diferentes perfiles de navegación (desarrollados en el punto 3.7.3).

De este modo, la planta propulsora se estructura con respecto a la Figura 3-13 y esta misma se define respecto a los siguientes elementos:

- Motores, con dos motores eléctricos que suponen la fuente de energía mecánica dispuestos paralelamente a ambas bandas (estribor y babor).
- Sistema de Transmisión, con la caja de transmisión para el control de revoluciones, la línea de ejes apoyada en la chumacera (para sustentación).
- Propulsor, con el sistema de Pump-Jet (definido en el punto 3.7.2).
- Sistemas de energía, con el gestor de alimentación y baterías como fuente.
- Sistemas Auxiliares, con los acoples del eje y sistemas de control.
- Elementos estructurales, como los son la bocina y el codaste que permiten la conexión de los elementos con el medio.

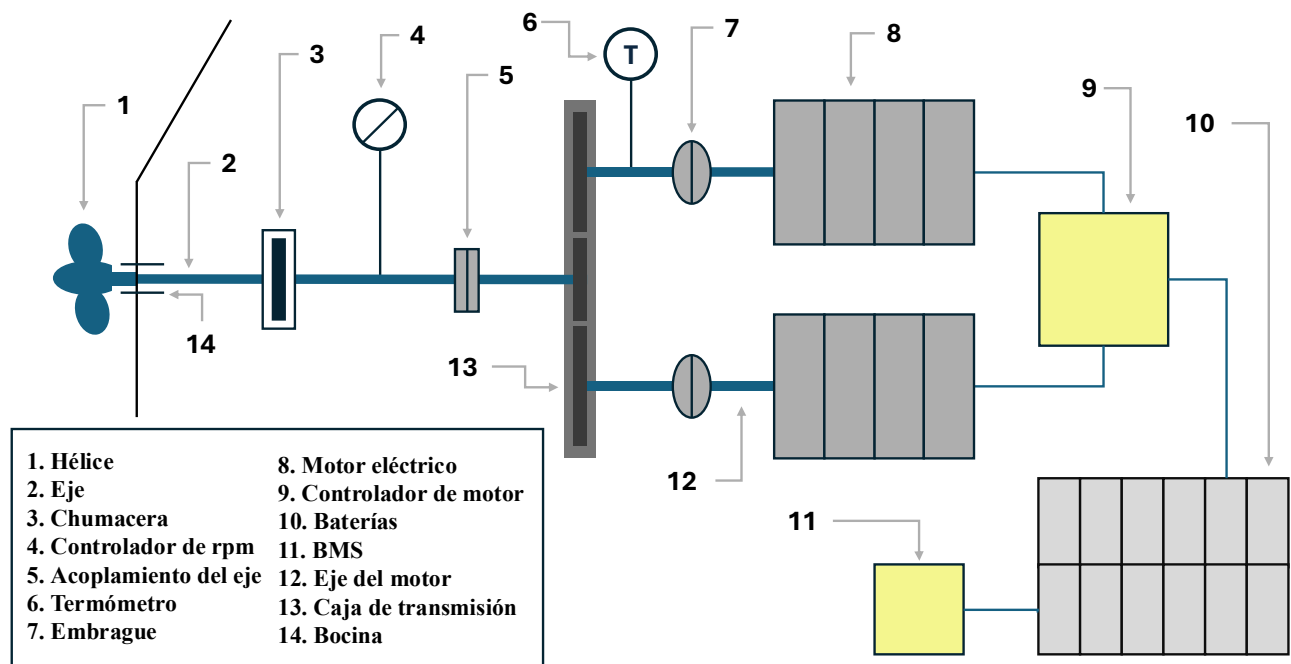


Figura 3-13 Arquitectura de la planta propulsora (Elaboración propia).

Así, el funcionamiento de la planta propulsora está basado en la conversión controlada de la energía de la planta eléctrica para conseguir empuje hidrodinámico que permita el gobierno con la regulación de la velocidad y el par de los motores a las necesidades de la navegación. Esta regulación debe de ser continua para minimizar pérdidas y reducir las sollicitaciones mecánicas asegurando una respuesta precisa para el desplazamiento. Además, debe de existir una integración con el INS y los sistemas de control para conseguir optimizar el rendimiento de la plataforma durante su despliegue.

3.7.2 Sistema de propulsión (Pump-Jet)

El sistema de propulsión se define con el uso de *Pump-Jet Propulsion* (PJP) [40]. La propulsión mediante Pump-Jet se basa en un sistema de propulsión que integra un rotor carenado en una tobera adaptada. Este sistema se compone de un estator de entrada para dar dirección al flujo entrante, un rotor para la aceleración del flujo y el empuje, y un estator de salida que aprovecha el flujo de la propia propulsión para recuperar energía rotacional y generar empuje axial.

El sistema de PJP conlleva una serie de implicaciones en el diseño de la plataforma para aprovechar de la mejor forma esta estructura. Se requiere un meticuloso alineamiento de las partes (rotor, estator y tobera) con las menores tolerancias de geometría y con calidades superiores. Se requiere también una estructura adaptada para resistir los esfuerzos del sistema montado.

Así, un diseño preliminar del PJP se ha realizado con el uso de AutoCAD como se presenta en la Figura 3-14, este diseño se ha llevado a cabo siguiendo las geometrías de referencia en este tipo de sistemas de propulsión y con base en proyectos similares como submarinos de la clase Astute (RN), clase SeaWolf (USN) y clase Barracuda (MN). Estas tecnologías están presentes en plataformas aliadas de la OTAN y la UE, por lo que es un desarrollo que se puede encaminar en modelos ya probados y mejorados a nivel de la alianza.

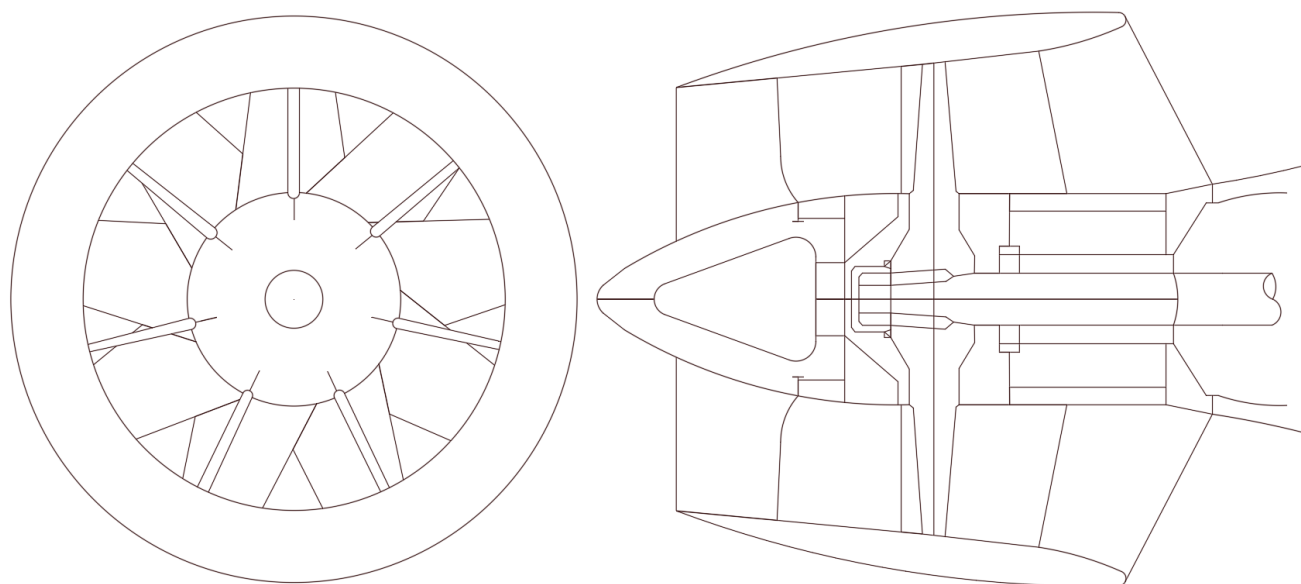


Figura 3-14 Diseño de un sistema Pump-Jet para propulsión (Elaboración propia / AutoCAD).

Originalmente, el sistema PJP de diseño estadounidense se concibió como una turbina que servía para mejorar el empuje de la propulsión de la entonces nueva clase SeaWolf siendo previsto para un régimen elevado de revoluciones. Los últimos estudios por parte de la Royal Navy y la PLAN de China han conseguido con la integración de la pala en la tobera y geometrías de Coanda (para direccionamiento del flujo), con lo que se han conseguido diseños eficientes en regímenes bajos y medios con el aumento sustancial del empuje y un 90% de firma acústica. Prueba de ello es la instalación del sistema PJP en los submarinos Astute de la RN y estando proyectado como el sistema para la futura clase Dreadnought de submarinos nucleares británicos con entrada en servicio en el próximo lustro (2030).

La implementación de este sistema en la propulsión permite trabajar con flujos uniformes maximizando la eficiencia con un control del flujo que permite reducir las pérdidas en la punta de pala y estabilizar la estela de la navegación. Desde el punto de vista hidrodinámico de la plataforma, este sistema mejora la eficiencia propulsiva en los regímenes de velocidad gracias al estator que reduce el remolino residual de la pala, además de que la integración de la tobera reduce el problema de la cavitación al aumentar las presiones locales de la hélice y suavizar los gradientes de circulación del agua; además el empuje producido no presenta los problemas de empuje de hélices levóginas y dextróginas, y se puede tomar como un empuje 'doble' en términos de cinemática. Dentro de materia de acústica, el encapsulamiento y control del rotor permite reducir la firma acústica del submarino con la disminución tonal considerable durante su funcionamiento.

La integración del PJP propone notables ventajas frente a la propulsión tradicional parte de la razón de que las plataformas modernas del arma submarina cuentan con este sistema en sus filas. Aunque estas ventajas están condicionadas por limitaciones como los son el mayor peso del sistema junto con una mayor complejidad de diseño que requiere esfuerzos de I+D+i para su uso de forma efectiva y óptima. Además, la apuesta esta tecnología de propulsión para submarinos posicionaría a España en la línea de investigación con países como EE. UU. con APEX (*Advanced Propulsor Experimental*) y con lo que se sentarían las bases para la posible propulsión de submarinos como la futura clase S-90.

3.7.3 Perfil de navegación

La propulsión de la plataforma y las exigencias de los sistemas de a bordo se definen por medio del perfil de navegación como se define en la Figura 3-15. Así, el submarino durante su despliegue efectuará la ejecución de distintas líneas de operación dentro de un perfil ya establecido.

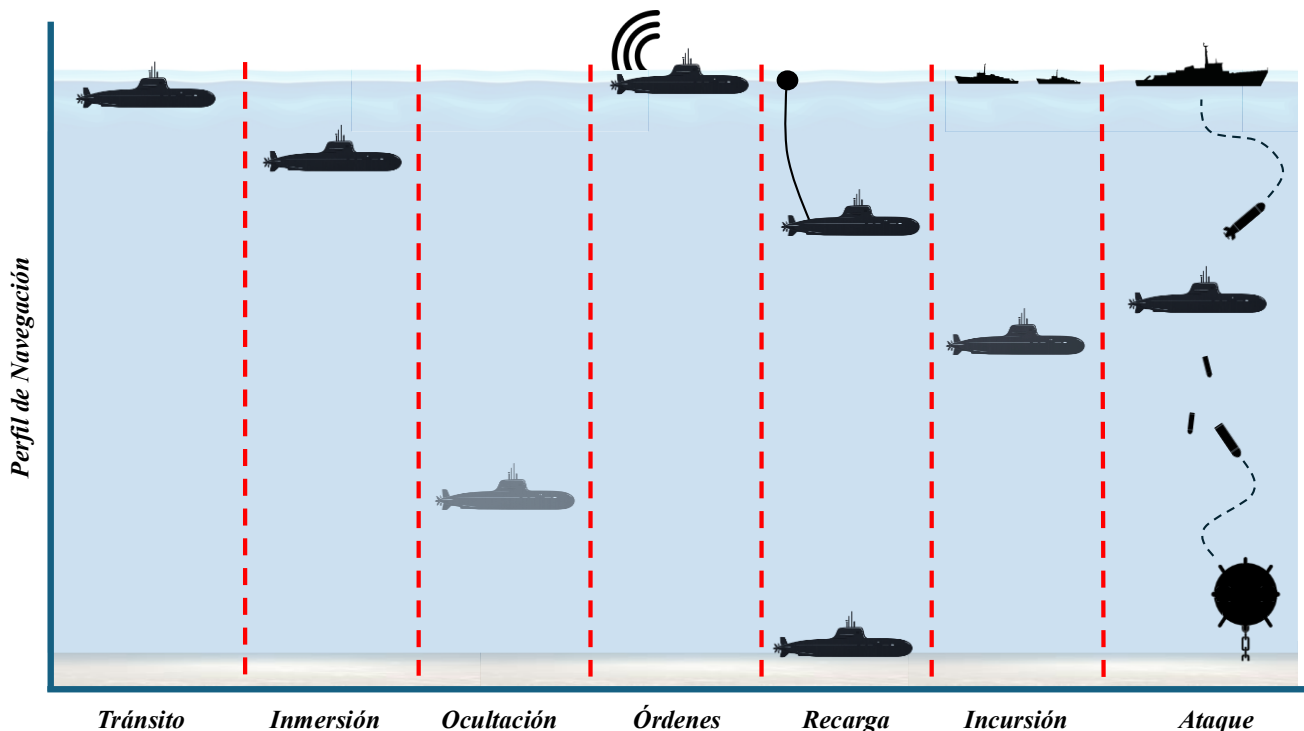


Figura 3-15 Perfil de navegación del despliegue del XLUV (Elaboración propia).

De este modo, el perfil de navegación se caracteriza por las distintas acciones de la plataforma en el despliegue de forma que el submarino podrá llevar a cabo acciones tales que:

- Tránsito, para la navegación hacia zonas de interés o el teatro de operaciones; la propulsión no es un factor limitante con requisitos moderados y situación general y no exigente.
- Inmersión, para la navegación sin exposición visual; la propulsión depende de forma total de la propulsión eléctrica y las baterías con requisitos estructurales y mayor resistencia.
- Ocultación, navegación en inmersión con silencio de equipos; la propulsión se reduce a menores velocidades y exigencias de potencia, pero mayor restricción de ruidos.
- Recepción de Órdenes, navegación en superficie; la propulsión se reduce para afrontar los requisitos de potencia de los sistemas C2, comunicaciones *LINK* y de control.
- Situación de Recarga, posado de la plataforma o navegación undimotriz en cota periscópica; sin requisitos de propulsión y consumos nimios para maximizar la recarga de baterías.
- Incursión en la zona de operaciones, para introducir la plataforma en la AOO; la propulsión debe afrontar posibles picos de potencia junto a capacidades de ocultación.
- Ataque, con la conducción de operaciones ofensivas como ataques deliberados con el armamento disponible y acciones de minado y ataque aéreo; la propulsión debe de afrontar picos de potencia y variabilidad del régimen de propulsión con velocidades máximas.

De esta manera, la plataforma autónoma debe enfrentar periodos de navegación estable y controlada en situaciones como el tránsito, y a su vez ser capaz de afrontar situaciones de exigencia con la máxima situación de silencio y con la reducción al máximo de sus emisiones acústicas y magnéticas; esto será objeto de estudio para la generación de energía y los consumos del submarino en el capítulo 4. La variabilidad de la situación operativa en navegación debe de ser el objetivo del desarrollo y la producción de los sistemas de navegación para asegurar la correcta operatividad del submarino.

3.8 Sistemas y equipos

Finalmente, en el proceso de desarrollo del XLUUV es necesario definir los sistemas que irán instalados a bordo. Por ello, a lo largo del presente apartado se caracterizan los sistemas y equipos del proyecto con detalle en sus especificaciones generales, así como su modelo y compañía desarrolladora.

La plataforma cuenta con un sistema integrado de control como se muestra en la Figura 3-16 con el diagrama de sistemas, bautizado bajo el nombre de SCOMBA, el Sistema de Combate de Buques de la Armada, y del cual dependen los 5 sistemas principales con el Sistema de Control de Plataforma (SCP), el subsistema de combate con el ASCS (*Autonomous Submarine Control System*), el sistema C3, y el Sistema de Defensa (SDEF), y el Sistema de Gestión de la Información (SGI).

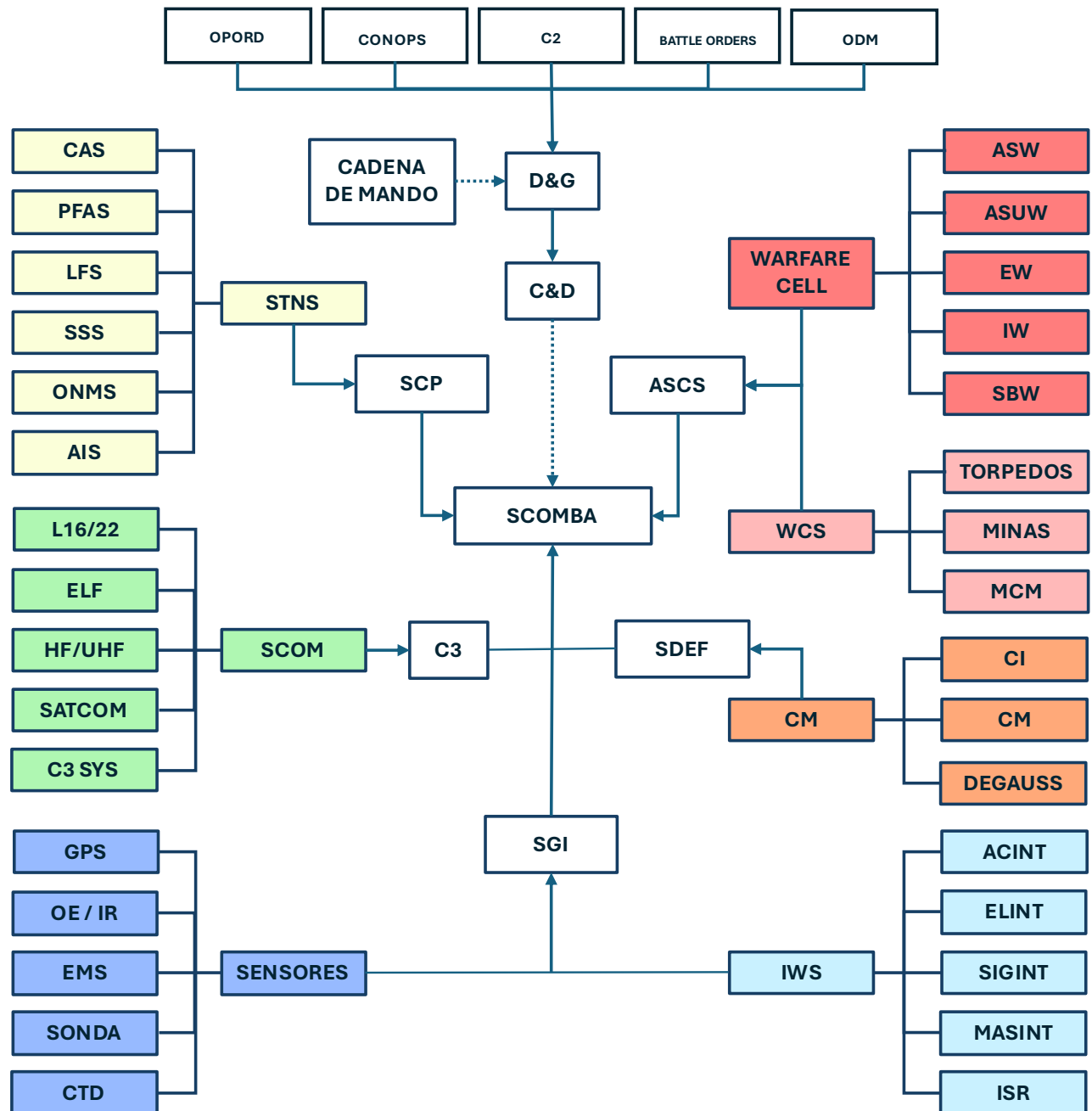


Figura 3-16 Diagrama de sistemas del XLUUV (Elaboración propia).

Nótese que todos los sistemas referenciados en la Figura 3-16 serán definidos y concretados a lo largo de los siguientes apartados. La definición de los sistemas desarrollados es una propuesta para la construcción del proyecto en una fase preliminar, pudiendo sufrir modificaciones y ampliaciones.

3.8.1 Sistema de Combate (SCOMBA)

El Sistema de Combate de Buques de la Armada (SCOMBA) es el sistema encargado de llevar las funciones operativas del submarino para su operación de forma unificada actuando como cerebro central con un desarrollo basado en el ICSC (*Integrated Combat System Controller*) y el AEGIS norteamericano. De este dependen todos los sistemas integrados a bordo y apoya al C&D (*Control and Decision*) a nivel *offshore* por parte de la célula de mando que ejecuta el D&G (*Direction and Guidance*) con la definición de la misión por parte del C2 encargado. Así mismo, este D&G depende de la documentación pertinente y necesaria para la operación como OPORD (Órdenes de Operación), el CONOPS, las Battle Orders que definen la evolución de la misión y sus restricciones, el C2 y el ODM con los objetivos seleccionados.

3.8.2 Sistema Autónomo de Combate Submarino (ASCS)

El ASCS está encargado de la *Warfare Cell* y el armamento del WCS. Así, los sistemas de la célula de guerra con los subsistemas de ASW, ASUW, AAW, SBW y EW son competencia de Indra como en el desarrollo del S-80 [41]. Del ASCS también depende el periscopio de ataque y los sistemas EO con su desarrollo por L3 Harris Technologies (US) y el software de control y gestión (véase Anexo XIII) de fabricación por parte de FABA Sist. y con empresas de referencia como Anschütz (DE). La información referente al ASCS es de clasificación confidencial y queda fuera del objeto de este documento.

3.8.3 Armamento (WCS)

El *Weapon Control System* (WCS) gestiona y usa el armamento de abordó compuesto por torpedos, minas y drones de HE (Alto explosivo). Así, el armamento de a bordo se compone de:

- El cargo AAW está compuesto por Switchblade 600 de la americana AeroVironment siendo este un dron ligero (UAV) de HE para ataque antibuque con alcance de 40km a 110 km/h con su lanzamiento desde *canister* y guiado *homming* OE/IR y GPS.
- Los torpedos presentan varias propuestas como los MK54 de Raytheon (US), los SWLT de Saab Ind. y el MU90/Impact de Eurotrop (UE), aunque se decide el Copperhead de los ingleses Andruil Ind. por su alcance de 300 MN a 30kts y portar 45 kg de carga explosiva de HE.
- Las minas de desarrollo nacional de parte de la empresa SAES con la familia de MINEA y sistemas multi-influencia (magnética, eléctrica, acústica) diseñados para acciones de combate y operaciones de MIW con el uso de alta tecnología; además de prototipos de ejercicio.

3.8.4 Sistema de Control de Plataforma (SCP)

El Sistema de Control de Plataforma se encarga de la navegación de la plataforma con los sistemas de control de FABA Sist. y Navantia y la instalación de la INS para la navegación inercial con opciones de empresas como GEM Tech (IT) y Northrop Grumman (US), aunque se opta por la empresa líder del mercado con la filial francesa de Exail con el INS M11 de alta resolución y mínimo error.

El SCP integra de igual manera el Sistema Táctico de Navegación de Sensores (STNS) con todos los sensores de abordó que vienen proporcionados por Lockheed Martin de Estados Unidos con sensores como el CAS (*Circular Array Sonar*) para la detección temprana en lejanía con barrido activo y pasivo, el LFS (*Looking Forward Sonar*) de baja frecuencia (LF) para la navegación frontal de forma habitual, el PFAS (*Passive Fanned Array Sonar*) para la información lateral y de flancos de la navegación, además del SSS (*Side Scan Sonar*) para el levantamiento del fondo marino y permitir el posado y operaciones de inteligencia. Además, se instalan el ONMS (*Own Noise Measure System*) de SAES para la detección del ruido propio y mejora de la ocultación, y el AIS (*Acoustic Identification System*) para la identificación de contactos por medio de ACINT (siendo todos ellos equipos “húmedos”).

Asimismo, la propulsión viene instalada con el motor eléctrico de GAMESA de producción nacional con experiencia en el S-80, aunque entre las opciones también destacan distribuidores como Thyssenkrupp TKMS de Alemania, Naval Group en Francia y General Dynamics (US) con opciones competentes en el mercado militar y con relaciones con la Armada española en proyectos anteriores.

3.8.5 Sistema de Contramedidas (SDEF)

El Sistema de Defensa (SDEF) se encarga del funcionamiento de las contramedidas (CM) y acciones mitigadoras de las causas de detección de la propia unidad (contradetección) con gestión de la firma acústica. De este modo, los sistemas de CM y CI (*Counter Intelligence*) son de desarrollo nacional de Indra y el sistema de *Degaussing* es labor de las empresas IFEN y Polyamory AB a través de filiales de Navantia en Cartagena; además de su integración con SAES y FABA.

3.8.6 Sistema de Gestión de la Información (SGI)

El Sistema de Gestión de la Información (SGI) engloba al IWS (*Intel Warfare System*) y los sensores de a bordo. En cuanto a los sensores encontramos instalados tenemos el GPS (apoyo al INS), el sensor OE/IR para la recopilación de IMINT e IRINT, el EMS por parte de FABA e Indra, y el sistema desarrollado por Navantia Cartagena de CTD que consiste en un instrumento oceanográfico de precisión utilizado para medir la Conductividad, Temperatura y Depth (profundidad) en el agua de mar para el estudio de la salinidad, densidad y estructura física del medio marino.

Conforme a los sistemas de Intel son marco de la empresa Indra con el desarrollo de los sistemas del S-80 y experiencia en el marco de I+D. Dentro de este encontramos las capacidades del IWS con ACINT (*Acoustic Intel*), ELINT (*Electronic Intel*), y SIGINT (*Signal Intel*), además de sistemas de MASINT (*Measurement and Signature Intel*) e ISR (*Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*).

3.8.7 Sistemas de Comunicaciones (SCOM)

El Sistema de Comunicaciones (SCOM) está encargado del C3 con el envío y gestión de las comunicaciones del submarino. Con su integración en el mástil del periscopio y protuberancias en el casco ligero y una boya auxiliar para mantener la ocultación. De esta manera el SCOM integra el propio sistema C3 conectado al SCOMBA para la C&D, y las comunicaciones de RF por medio de ELF (LF), HF y UHF con la implementación de SATCOM que permiten la conexión con las antenas a nivel nacional y la de Guardamar del Segura para submarinos, y la integración de la plataforma con el sistema militar BRASS (*Broadcasting and Radio Access System*) de la Armada española. En adición, el equipo de Link 11, 16 y 22 se realiza con el LINPRO de Tecnobit de fabricación nacional y relacionada con los desarrollos de Navantia.

3.8.8 Equipo polivalente

Concebido como un volumen modular, el espacio multimisión de la plataforma puede ser utilizado con interfaces estandarizadas de energía, datos, control térmico y fijación estructural, este compartimento puede configurarse para albergar cargas útiles muy diversas como módulos ISR para vigilancia persistente, sensores acústicos avanzados o sonar remolcado para guerra ASW, sistemas de guerra de minas para MIW (detección, clasificación y neutralización), nodos de comunicaciones submarinas para actuar como repetidor o *gateway* entre fuerzas sumergidas y superficie, cargas de guerra electrónica para apoyo en operaciones discretas, o incluso vehículos secundarios desplegados como ROV o UUV que amplíen el alcance de exploración sin comprometer la plataforma principal.

En términos operativos, el espacio multimisión transforma al XLUUV en una plataforma adaptable, capaz de asumir funciones de inteligencia, disuasión, apoyo táctico o control del entorno marítimo sin necesidad de desarrollar vehículos específicos para cada misión. El desarrollo de estos módulos instalables e interoperables serán objeto de la empresa óptima con experiencia en el campo de desarrollo y su integración se hará mediante Navantia en Cartagena que está encargada de la construcción de la plataforma y como promotora de la entrega a la Armada española la unidad militar finalizada. El uso de este compartimento debe de ser estudiado en las pruebas de mar basándose en las posibles configuraciones que se adopten a su finalización y entrega.

4 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LA PLATAFORMA

En el presente capítulo se expone el estudio y análisis del desempeño de la plataforma en su despliegue. De este modo, se realiza un estudio de la cinemática de la plataforma con la caracterización de sus parámetros a nivel preliminar; además se evalúa su desempeño en cuanto a su eficiencia hidrodinámica y resistencia estructural a presión y esfuerzos; además, se analiza la generación de energía y los consumos a bordo con un análisis del recurso existente.

4.1 Estudio cinemático del XLUUV

Para el estudio del movimiento de la plataforma es necesario la caracterización del control, la estabilidad y la maniobrabilidad de esta durante la navegación [42]. Con el estudio de esta cinemática se permite desarrollar la navegación que será determinada por el sistema de control y que irá relacionada con los datos proporcionados por la INS, la cual se encarga de llevar el registro de los movimientos en los 6 DOF representados en la Figura 4-1. Estos 6 grados de libertad se basan en tres traslaciones con el avance (*surge*), la deriva (*sway*), y la pesantez (*heave*); y tres rotaciones sobre los ejes de las anteriores con el balance (*roll*), la cabezada (*pitch*) y la guiñada (*yaw*).

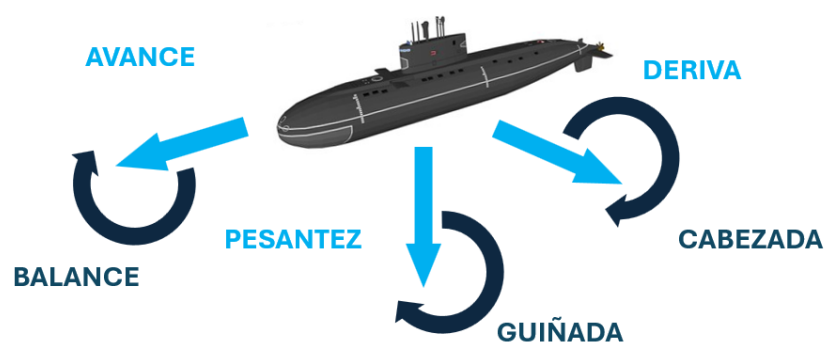


Figura 4-1 Esquema de movimiento de un submarino. (Elaboración propia).

De este modo, se desarrolla un modelo cinemático con la relación de las velocidades lineales y las velocidades angulares con la posición y la actitud de la plataforma en el sistema inercial resultante. Así mismo, la información de la navegación en los DOF es recogida por la IMU que se encarga de recopilar estas magnitudes con el uso de los tres acelerómetros y tres giróscopos; y que posteriormente es procesada por una AHRS y ser usada para la cinemática de la INS, según el funcionamiento desarrollado en el apartado 3.5 del desarrollo del presente documento.

4.1.1 Definición de la parametrización

Para la definición del movimiento del submarino y su parametrización se requiere en primera instancia la disposición de las ecuaciones que definen las principales magnitudes (ver Figura 4-2).

De este modo, en lo consiguiente se definirá con el superíndice de E a todo lo referenciado a un sistema de referencia basado en la tierra (Earth), y con el superíndice de B a lo referente a la propia plataforma (Body), todo ello referenciado con los tres ejes ortogonales (i, j, k).

La definición de la posición vendrá dada por,

$$\bar{P}^E = P_{North}i^E + P_{East}j^E + P_{Depth}k^E$$

La velocidad lineal queda definida por,

$$\bar{V}^B = Ui^B + Vj^B + Wk^B$$

La velocidad angular se define mediante,

$$\bar{\omega} = Pi^B + Qj^B + Rk^B$$

La magnitud de la fuerza queda igualmente definida por,

$$\bar{F}^B = Xi^B + Yj^B + Zk^B$$

Y finalmente, el momento se define mediante,

$$\bar{M}^B = Ki^B + Mj^B + Nk^B$$

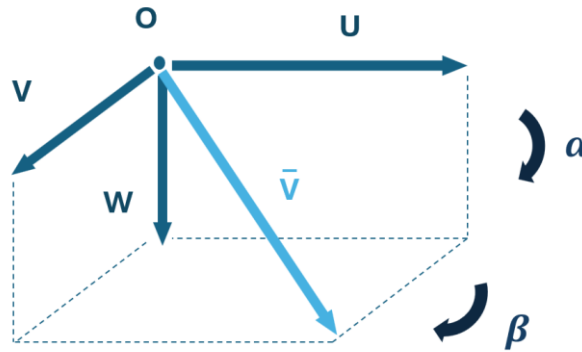


Figura 4-2 Representación cinemática de los vectores de la velocidad. (Elaboración propia).

De igual manera, la velocidad para la caracterización en un marco de navegación se puede definir mediante (4-1) con el uso de ecuaciones polares lo que resultaría en la caracterización de V, alfa y beta.

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \\ \alpha &= \arctan W/U \approx \frac{W}{U} \\ \beta &= \arcsen V/\bar{V} \approx \frac{V}{\bar{V}} \end{aligned} \quad (4-1)$$

De esta forma y con una parametrización que pueda ser usada por la IMU anteriormente mencionada, la caracterización de esta velocidad en forma matricial quedaría según (4-2) tal que,

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & U & 0 \\ 0 & 0 & U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ \beta \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

4.1.2 Definición de la actitud

Un sistema dinámico como es la plataforma de este estudio se comporta con un movimiento que viene dado por lo que se denomina actitud del submarino, definido como el comportamiento físico en el agua de este y que viene registrado por el AHRS con los movimientos de cabeceo, balance y guiñada. Esta actitud se define por el movimiento de las rotaciones relativas en los ejes ortogonales y que matricialmente se puede definir como en la matriz de (4-3) con respecto a i, j y k.

$$\begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i^A i^B & i^A j^B & i^A k^B \\ j^A i^B & j^A j^B & j^A k^B \\ k^A i^B & k^A j^B & k^A k^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

4.1.3 Definición del movimiento lineal

El movimiento lineal de la plataforma se define sobre las incógnitas definidas como X, Y y Z. Con dicha definición dada sobre un punto definido por x_g , y_g y z_g . La superposición de los tres movimientos lineales en cada eje ortogonal dará como resultado el movimiento final y real de la navegación.

La definición de este movimiento vendrá dada por la combinación la masa con la aceleración lineal que se experimenta, el efecto de Coriolis, la aceleración angular, el acoplamiento de rotación-posición y el efecto de la fuerza centrífuga. Con el sumatorio de esto, queda definido en (4-4) el movimiento lineal mediante las componentes X, Y y Z.

$$\begin{aligned} X &= m [\dot{U} + QW - RV + Qz_g - Ry_g + P(Qy_g + Rz_g) - x_g(Q^2 + R^2)] \\ Y &= m [\dot{V} + RU - PW + Rx_g - Pz_g + Q(Rz_g + Px_g) - y_g(R^2 + P^2)] \\ Z &= m [\dot{W} + PV - QU + Py_g - Qx_g + R(Px_g + Qy_g) - z_g(P^2 + Q^2)] \end{aligned} \quad (4-4)$$

De este modo y tomando el centro de la plataforma como sistema de referencia del movimiento se obtiene una simplificación reflejada con (4-5), obteniendo que las componentes X, Y y Z solo dependientes de las combinaciones las masas existentes con las aceleraciones lineales que se sufren por la estructura a modo de solicitudes.

$$\begin{aligned} X &= m [\dot{U} + QW - RV] \\ Y &= m [\dot{V} + RU - PW] \\ Z &= m [\dot{W} + PV - QU] \end{aligned} \quad (4-5)$$

4.1.4 Definición del momento lineal

De igual manera que en el apartado anterior con el movimiento, el momento es un elemento condicionante para la navegación de la plataforma y viene definido por la combinación de la aceleración angular, el acoplamiento giroscópico, la inercia y el efecto del centro de masa (asumido como despreciable).

De este modo, estos momentos principales (en x, y, z) vienen definidos por los momentos de inercia de cada eje y que se define en (4-6), siendo dependiente de los momentos de los que se compone según lo reflejado en (4-7).

$$I_B = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (4-6)$$

$$\begin{aligned}
 I_x &= \int_V (y^2 + z^2) \rho \, dV & I_{xy} &= \int_V xy \rho \, dV \\
 I_y &= \int_V (x^2 + z^2) \rho \, dV & I_{yz} &= \int_V yz \rho \, dV \\
 I_z &= \int_V (x^2 + y^2) \rho \, dV & I_{xz} &= \int_V xz \rho \, dV
 \end{aligned} \tag{4-7}$$

Con la definición de los momentos de inercia ya realizado y la caracterización del momento de la plataforma con I_b , los momentos principales en cada uno de los ejes ortogonales del submarino se desarrolla las ecuaciones de (4-8) según los componentes dados por K, M y N,

$$\begin{aligned}
 K &= \dot{P} I_x + (I_z - I_y)QR - (\dot{R} + PQ)I_{xz} + (R^2 - Q^2)I_{yz} + (PR - \dot{Q})I_{xy} \\
 M &= \dot{Q} I_y + (I_x - I_z)RP - (\dot{P} + QR)I_{xy} + (P^2 - R^2)I_{xz} + (QP - \dot{R})I_{yz} \\
 N &= \dot{R} I_z + (I_y - I_x)PQ - (\dot{Q} + RP)I_{yz} + (Q^2 - P^2)I_{xy} + (RQ - \dot{P})I_{xz}
 \end{aligned} \tag{4-8}$$

y donde asumiendo que los momentos de xy , yz y xz son nulos ($I_{xy} \approx I_{yz} \approx I_{xz} \approx 0$), las ecuaciones se simplifican según (4-9) obtenido que los momentos son dependientes de las combinaciones de las aceleraciones angulares existentes,

$$\begin{aligned}
 K &= \dot{P} I_x + (I_z - I_y)QR \\
 M &= \dot{Q} I_y + (I_x - I_z)RP \\
 N &= \dot{R} I_z + (I_y - I_x)PQ
 \end{aligned} \tag{4-9}$$

4.1.5 Definición de fuerzas y momentos

La plataforma durante su navegación deberá de resistir fuerzas fruto del entorno en el que navega y los distintos fenómenos físicos presentes durante la duración de las travesías de una misión.

De esta forma y para el estudio de las solicitaciones de la plataforma según se define en (4-10) sólo se tendrán en cuenta las fuerzas debidas al empuje de la propulsión (T - *thruster*), la hidrodinámica (H - *hydrodynamic*), la flotabilidad de esta (B - *buoyancy*) y la fuerza debida a la gravedad sufrida en la estructura (G - *gravity*).

$$\begin{aligned}
 X &= X_T + X_H + X_B + X_G \\
 Y &= Y_T + Y_H + Y_B + Y_G \\
 Z &= Z_T + Z_H + Z_B + Z_G
 \end{aligned} \tag{4-10}$$

De igual forma, en el caso relativo a los momentos que actúan sobre la estructura de la plataforma depende como se presenta por (4-11) de los cuatro factores anteriormente mencionados y en base a los componentes de K, M y N.

$$\begin{aligned}
 K &= K_T + K_H + K_B + K_G \\
 M &= M_T + M_H + M_B + M_G \\
 N &= N_T + N_H + N_B + N_G
 \end{aligned} \tag{4-11}$$

A continuación, se procederá a definir cada una de las componentes de las fuerzas y momentos, desarrollando los conceptos de los que dependen las solicitaciones (X, Y, Z, K, M y N) y estas quedan representadas en la Figura 4-3 con las componentes T, H, B y G en ella.

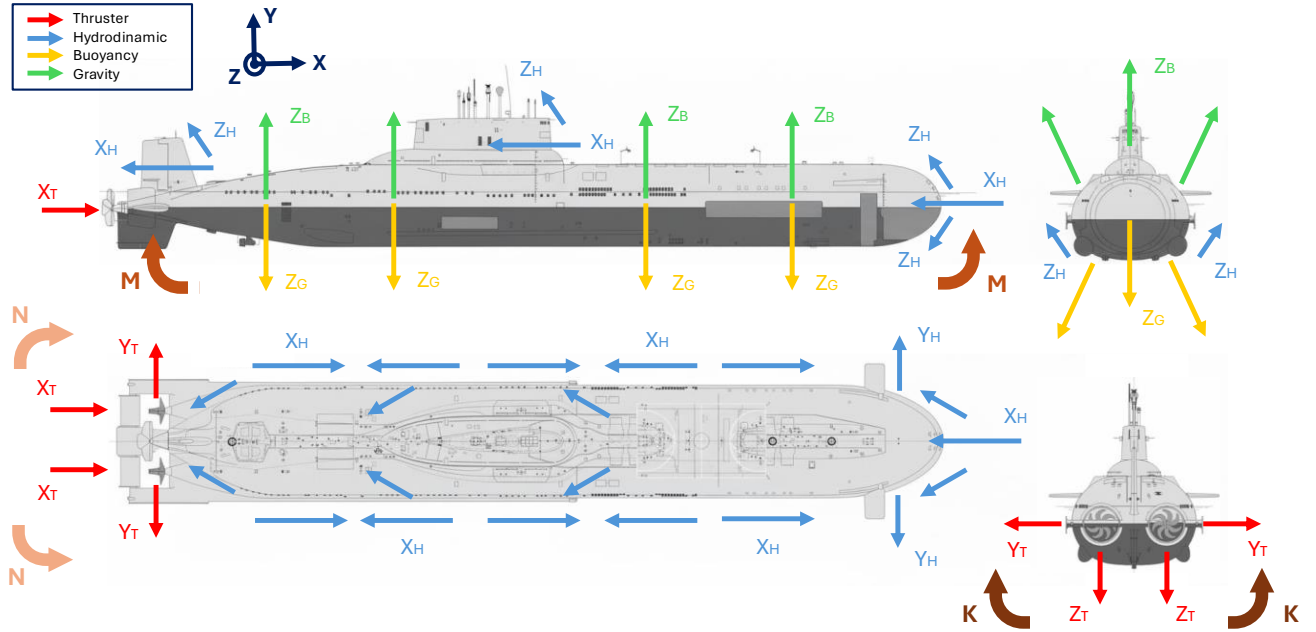


Figura 4-3 Representación de las fuerzas y momentos (Elaboración propia).

Debido a que la propulsión está dispuesta por dos hélices superpuestas a popa por el sistema PJP, el submarino cuenta con una propulsión de doble componente de empuje (desarrollada en el punto 3.7), con una componente de babor y estribor (R - right y L - left) debido a su naturaleza levógira y dextrógira, y cuya caracterización viene dada por (4-12) en términos de fuerza y momento basado en el cuerpo.

$$F_T^B = \begin{bmatrix} (T_R + T_L) \cos \alpha_T \\ 0 \\ -(T_R + T_L) \sin \alpha_T \end{bmatrix} \quad (4-12)$$

$$M_T^B = r_{T_R} \times F_{T_R}^B + r_{T_L} \times F_{T_L}^B = \begin{bmatrix} -(y_{T_R} T_R + y_{T_L} T_L) \sin \alpha_T \\ -(z_{T_R} T_R + z_{T_L} T_L) \cos \alpha_T - (x_{T_R} T_R + x_{T_L} T_L) \sin \alpha_T \\ -(y_{T_R} T_R + y_{T_L} T_L) \cos \alpha_T \end{bmatrix}$$

Por otra parte, la acción hidrodinámica viene definida en función del eje de aplicación con la definición del avance (X), la deriva (Y), la pesantez (Z), y en materia de momentos existentes mediante el balance (K), el cabeceo (M) y la guiñada (N). Quedando la acción hidrodinámica definida por (4-13).

$$\begin{aligned} X_H &= X^S \cos \alpha - Z^S \sin \alpha & K_H &= K^S \cos \alpha - N^S \sin \alpha \\ Y_H &= Y^S & M_H &= M^S \\ Z_H &= Z^S \cos \alpha + X^S \sin \alpha & N_H &= N^S \cos \alpha + K^S \sin \alpha \end{aligned} \quad (4-13)$$

Que de forma matricial queda expresado según (4-14) según los términos anteriores.

$$\begin{bmatrix} X_H \\ Y_H \\ Z_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^S \\ Y^S \\ Z^S \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} K_H \\ M_H \\ N_H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K^S \\ M^S \\ N^S \end{bmatrix} \quad (4-14)$$

Siendo dependientes de los valores de las magnitudes a nivel superficial y dependientes los ángulos de α y β que se definen como los ángulos de incidencia que definen esta fuerza; por lo que estas componentes superficiales, como se define en (4-15) dependen de unos coeficientes para la parametrización las perturbaciones sufridas a nivel superficial.

$$\begin{aligned} X^S &= -D = -\bar{q} l^2 C_D & K^S &= -\bar{q} l^3 C_K \\ Y^S &= \bar{q} l^2 C_Y & M^S &= -\bar{q} l^3 C_M \\ Z^S &= -L = -\bar{q} l^2 C_L & N^S &= -\bar{q} l^3 C_N \end{aligned} \quad (4-15)$$

donde q se define como la presión cinética (con l siendo la longitud) y viene dada por

$$\bar{q} = \frac{1}{2} \rho V_0^2$$

Así, la acción debida a la flotabilidad se define por su dependencia con el volumen sumergido por la plataforma pudiendo ser definida en referencia al marco terrestre o a la propia estructura, y bajo la aplicación y el desarrollo de la fórmula del empuje mediante

$$B = \rho g \Delta$$

dónde desarrollando se obtiene (4-16) en base a los distintos sistemas de referencia.

$$\begin{aligned} F_B^E &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -B \end{bmatrix} & F_B^B &= \begin{bmatrix} B \sin \theta \\ -B \cos \theta \sin \phi \\ -B \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \\ M_B^E &= r_B \times F_B^E & M_B^B &= \begin{bmatrix} -yB \cos \theta \cos \phi + zB \cos \theta \sin \phi \\ zB \sin \theta + xB \cos \theta \cos \phi \\ -xB \cos \theta \sin \phi - yB \sin \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4-16)$$

Por último, para el estudio de la acción de la fuerza gravitatoria nos basamos en la definición de que el peso de la estructura depende de la masa y de la aceleración de la gravedad con la fórmula de W .

$$W = m g$$

por lo que aplicando W para los dos sistemas de referencia se obtiene F y M según (4-17).

$$\begin{aligned} F_G^E &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ W \end{bmatrix} & F_G^B &= \begin{bmatrix} B \sin \theta \\ -B \cos \theta \sin \phi \\ -B \cos \theta \cos \phi \end{bmatrix} \\ M_G^E &= r_G \times F_G^E & M_G^B &\approx 0 \end{aligned} \quad (4-17)$$

4.2 Estudio de consumos y permanencia

La permanencia de un submarino es un factor estratégico clave, determinando el tiempo de operación sin necesidad de salir a superficie o reabastecerse. De esta forma, el régimen de operación de la plataforma lleva consigo el consumo eléctrico con requisitos energéticos que no son valores exactos ni constantes, por lo que los datos de los estudios son de carácter aproximado para obtener una idea preliminar de las capacidades de la plataforma.

Primeramente, se toma como objeto de estudio los consumos del submarino. De este modo, se hace un estudio de los diferentes consumos que se producen con una diferenciación entre los consumos básicos para el funcionamiento normal, los de propulsión y los periódicos de uso poco recurrente.

Conforme al consumo básicos, se ha analizado los consumos mínimos necesarios para el funcionamiento del XLUUV con su desarrollo en la Tabla 4-1.

Concepto	Consumos Básicos
Computación	4 kWh
Sensores Pasivos	5 kWh
Comunicaciones	4 kWh
INS y Navegación	2 kWh
Sistema de Control	3 kWh
Auxiliares	4 kWh
Refrigeración	3 kWh
Margen Eléctrico	7 kWh
<i>Total de consumos básicos</i>	32 kWh

Tabla 4-1 Consumos básicos de operación.

Con respecto a los consumos de la propulsión se definen tres regímenes principales de navegación con las situaciones de patrulla, tránsito y acciones de combate y que difieren en las velocidades necesarias. Por ello, la potencia necesaria por la planta propulsora dependerá de la velocidad tal que

$$P_{propulsión} \propto V^3$$

y con ello, el análisis de la propulsión basado en los modos de operación principal arroja los valores mostrados en la Tabla 4-2.

Régimen de Propulsión	Velocidad	Consumo
Patrulla	3 – 4 kts	40 kWh
Tránsito (TST)	5 – 6 kts	80 kWh
Acción de Combate	7 – 8 kts	125 kWh

Tabla 4-2 Consumos de propulsión.

Asimismo, se definen consumos que son periódicos y que solo están presentes en momentos puntuales por necesidades de los sistemas y que se analizan con el desarrollo de la Tabla 4-3.

Concepto	Consumos Puntuales
Sensores activos	40 kWh
SATCOM	10 kWh
SGI	30 kWh
Sistema de Combate	40 kWh

Tabla 4-3 Consumos periódico.

De este modo, se puede obtener los consumos totales en los diferentes regímenes de navegación de la plataforma con la adición de una condición de Recarga para el parado estático de la plataforma con el uso de sistemas esenciales en situación de posado. Este análisis se relaciona en la Tabla 4-4.

Régimen	Consumo
Acción de Combate	210 kWh
Tránsito	130 kWh
Patrulla	70 kWh
Condición Básica	30 kWh
Recarga	10 kWh

Tabla 4-4 Regímenes de consumo del XLUUV.

Teniendo esto en cuenta, para el cálculo de la permanencia del submarino en operaciones se analiza la duración de esta en función de los consumos estudiados y con la capacidad de las baterías con su descarga hasta un SOC mínimo del 10% (se tiene en cuenta el 85% de la capacidad total de almacenamiento por el DoD recomendado del fabricante), con ello se obtiene que la permanencia de la plataforma es la representada en la Tabla 4-5.

Régimen de Operación	Permanencia	
Acción de Combate	31h 40 min	1,3 días
Tránsito (TST)	51 h	2,2 días
Patrulla	94 h 45 min	4 días
Condición Básica	221 h	9,2 días
Recarga	La generación de energía sopesa los consumos	
TST con uso de DG	Dependiente de las existencias de combustible	

Tabla 4-5 Permanencia del XLUUV.

Conforme a los resultados, se muestra que la permanencia de operaciones hasta recarga disminuye claramente en regímenes de alto consumo (1 o 2 días en combate) y aumenta en bajo consumo hasta más de 9 días en Condición Básica, mientras que la recarga y el tránsito con generador diésel no tienen un límite fijo, al depender respectivamente del balance generación-consumo y del combustible.

Además, el TST se puede realizar en regímenes de velocidad menores lo que permite un menor consumo y mayor autonomía hasta la recarga. De igual forma, los consumos exactos y la duración final de permanencia pueden sufrir modificaciones en función del uso de sistemas por el SCOMBA con el uso de sistemas de control que permitan una optimización de los consumos gracias al EMS.

De forma complementaria, en el Anexo XI se realiza un estudio más detallado de los consumos con lo que se han obtenido los consumos reflejados en el presente apartado y se analiza la permanencia con un análisis con el método Montecarlo (método no determinista o estadístico numérico), con el que se aproxima expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud respecto a la evolución de los consumos y la generación de energía.

4.3 Análisis de generación de energía mareomotriz y undimotriz

La plataforma está dotada con la instalación de sistemas de generación mareomotriz y undimotriz para la recarga de las baterías [19] [20]. Con el desarrollo del apartado 3.6.3 se definieron los sistemas de generación de energía con la instalación una turbina VAWT (*Vertical Axis Wave Turbine*), un *glider* submarinos y un Arquímedes *waveswing* (AWS) y en la Figura 4-4.

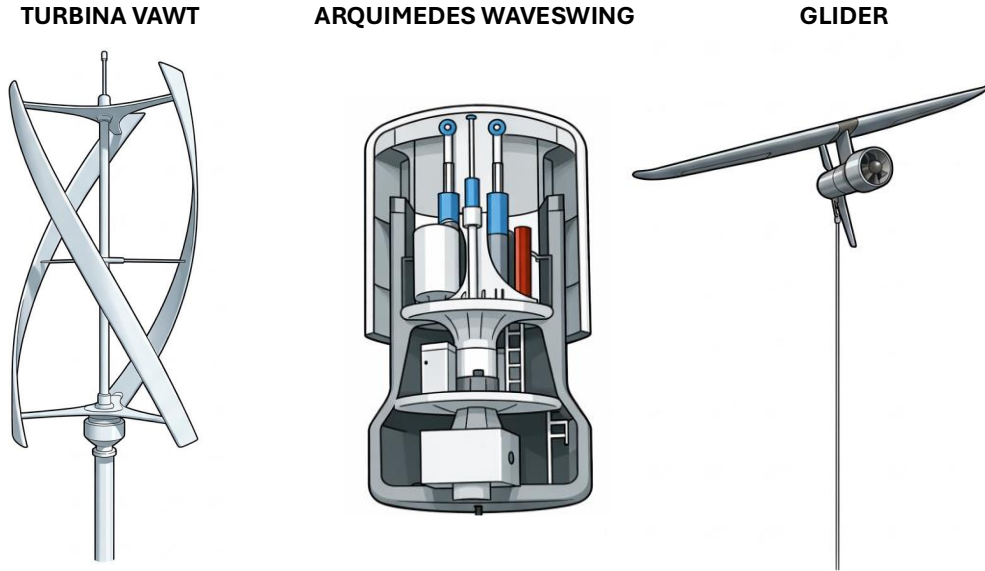


Figura 4-4 Sistemas de generación de energía (Elaboración propia).

La generación por parte de la turbina VAWT se basa en la generación de energía mareomotriz y la definición de la potencia generada viene dada por (4-18) donde se dimensiona una turbina plegable de 3 m de diámetro con una altura de 2 m siendo extraíble del casco ligero.

$$P_{mareomotriz} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p \eta \quad (4-18)$$

Donde se asume una densidad de 1025 kg/m³, un área de acción de 6 m² con una corriente (*v*) de 0,65 m/s (valor medio del Mediterráneo), así como un *C_p* de 0,7 y rendimiento (*η*) de 0,95; con lo que

$$P_{VAWT} = \frac{1}{2} 1025 \times 6 \times (0,65)^3 \times 0,7 \times 0,95 = 561,57 \text{ W} \approx 0,56 \text{ kW}$$

Con respecto al *glider* submarino, al ser igualmente energía mareomotriz se aplica la misma fórmula de (4-18) con un área de 8 m² (estructura plegable), un *C_p* de 0,5, un rendimiento (*η*) de 0,90, y una velocidad de corriente efectiva de 3,5 m/s (la estructura cuadruplica la velocidad de acción); y se obtiene

$$P_{glider} = \frac{1}{2} 1025 \times 8 \times (3,5)^3 \times 0,5 \times 0,90 = 79.104,38 \text{ W} \approx 79,1 \text{ kW}$$

Por su parte, el AWS responde a la generación de energía undimotriz que depende de la ola significativa de la ola y su periodo, con lo que responde a la fórmula de (4-19).

$$P_{undimotriz} = \frac{\rho g^2}{64 \pi} H_s^2 T_e \eta \quad (4-19)$$

Dependiendo de una altura significativa de la ola (*H_s*) de 1,25 m en el Mediterráneo y un periodo de ola medio (*T_e*) de 7 segundos (6s en verano y 8s en invierno), además de un rendimiento de 0,95.

$$P_{undimotriz} = \frac{1025 \times 9,81^2}{64 \pi} (1,25)^2 \times 7 \times 0,95 = 5.097,72 \text{ W} \approx 5,1 \text{ kW}$$

Ahora esta potencia de 5 kW obtenida de forma undimotriz tiene que adecuarse a los conceptos de generación de un AWS con su geometría definida. El AWS se concibe con un volumen de 14,5 m³ en un compartimento de 1 metro de altura, 2,8 metros de manga y 5,2 metros de eslora. Así, aplicando los estudios de A. Babarit [43] se puede aplicar (4-20) conforme al CW (*Capture Width*) siendo la capacidad de uso del recurso, P la potencia de la ola (en kW) y J el recurso de la ola (en kW/m).

$$CW = \frac{P}{J} \quad (4-20)$$

Según los estudios de [43], se hace un análisis de las capacidades de un AWS de 9,5 m de diámetro con un J de 21 kW/m y un η_1 del 205%. De este modo, para escalar el AWS a nuestras necesidades, se conocen las relaciones del rendimiento con las dimensiones del sistema que se definen con (4-21).

$$B = CW / \eta_1 \quad (4-21)$$

$$B = \sqrt{4 A_w / \pi}$$

Así, en aplicación de (4-21), con el conocimiento del A_w siendo el área de acción horizontal (y el diámetro para sistemas circulares), el η_1 como la fracción de la ola siendo usada por el sistema (en %) y el CW obtenido anteriormente de (4-20), se obtiene que

$$B = \sqrt{\frac{4 \times (5,2 \times 2,8)}{\pi}} = 4,3056$$

$$CW = B \eta_1 = 4,3056 \times 2,05 = 8,8265$$

con esto se puede obtener la potencia (P) del sistema tal que

$$P = CW J = 8,8265 \times 21 = 185,36 \text{ kW}$$

Por lo que el AWS permite la generación de 185 kW, suponiendo la mayoría de la generación.

Así, para el análisis de las capacidades de recarga es necesario determinar el almacenamiento por parte de estas y los modos de uso de los sistemas de generación. Con ello, la plataforma cuenta con la instalación de un total de 690 baterías TESVOLT COMPASS de 12 kWh con un régimen de operación del 90% del DoD y un rendimiento del 95%, por lo que

$$E_T = \eta_{bat} \times n^o \text{ Baterías} \times P_{bat} \times DoD = 0,95 \times 690 \times 12 \times 0,90 = 6,67 \text{ MWh}$$

por lo que la plataforma cuenta con 6,67 MWh de almacenamiento energético para las operaciones, este almacenamiento determinará el tiempo final de carga y descarga junto a las capacidades de generación. Además, el XLUUV cuenta con un DG de emergencia con capacidad de 150 kW.

Con los datos de las capacidades de la batería y los medios de carga existentes, se puede hacer un análisis de las capacidades de recarga con los tiempos del proceso como se representa en la Tabla 4-6.

Sistema	Capacidad	Tiempo de Recarga
AWS	185,36 kW (1 ud.)	35,98 h
Glider submarino	79,10 kW (1 ud.)	84,32 h
VAWT	0,56 kW (1 ud.)	11.9190,75 h
Todos los sistemas	265,02 kW	25,17 h

Tabla 4-6 Capacidades de los sistemas de generación para recarga de energía.

Con los resultados obtenidos, se define el AWS como método principal de recarga con el 70% de la recarga, y le cual se apoya en la turbina como elemento de robustez y fiabilidad con su principal uso con corrientes elevadas, y *glider* para recarga tanto en posado como para navegaciones en regímenes lentos (patrulla y TST reducido), aunque aumenta considerablemente la resistencia al avance.

Asimismo, los sistemas de control en conjunto con el EMS harán uso de los sistemas de recarga en función del valor del SOC existente y su evolución, y el estudio predictivo ya mencionado. Por lo que, la generación se gestionará conforme al estado del SOC según (4-22).

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_{total}} \quad (4-22)$$

$$\frac{dE(t)}{dt} = P_{generada}(t) - P_{consumida}(t)$$

Por su parte, el DG tiene un funcionamiento de 150 kWh con lo que la recarga de las baterías se llevaría a cabo en un tiempo de 44 h de forma total. Con este sistema, es necesario el uso de combustible por lo que aproximando un consumo medio de 0,24 kg/kWh se obtiene que el consumo del DG es

$$Consumo_{combustible} = Consumo_{hora} E_{bat} = 1.591,2 \text{ kg}$$

así, es necesario el dimensionamiento de taques que permitan la recarga completa un total de 5 veces completas para la realización del TST de llegada y regreso a la zona de operaciones y situaciones de emergencia durante el despliegue. Con ello, se dimensiona un tanque de 8000 kg con un volumen total del tanque de combustible de 9,2 m³ (tomando una ρ de 875 kg/m³). Esto en términos de estabilidad no supone modificaciones mayores ya que el peso añadido supone menos del 5% del total.

Nótese que el uso del *glider* podría provocar su colisión al ser un elemento móvil; por ello, el sistema se dispone con cable ajustable para la cometa con su posicionamiento a popa del compartimento de generación mareomotriz. La longitud de este cable es ajustable mediante un *winch* para las condiciones que se presenten en el entorno y la cota de posado, evitar la colisión con objetos durante su funcionamiento y la pérdida de capacidades de ocultamiento.

4.3.1 Estudio de los recursos de energía

El potencial de aprovechamiento de energía mareomotriz y undimotriz depende principalmente de la amplitud de las mareas, la intensidad de las corrientes y el régimen de oleaje. Así, el estudio de estos factores se realiza en las AOI del Mediterráneo, el Báltico y el Mar Rojo; y es ampliado en el Anexo X.

Mar Mediterráneo:

- El recurso mareomotriz es generalmente reducido, ya que la amplitud de marea suele rondar el valor de un metro en la mayor parte de la cuenca litoral. Sin embargo, existen zonas con cierto potencial en corrientes de estrechos, como el Estrecho de Messina o el Estrecho de Gibraltar.
- El recurso undimotriz, el recurso es moderado, siendo más significativo en la zona occidental del Mediterráneo, especialmente en el litoral de España, Francia e Italia, y la costa africana, con un oleaje más energético por la influencia de vientos dominantes y borrascas atlánticas.

Mar Báltico:

- La energía mareomotriz presenta condiciones más limitadas, ya que prácticamente no existen mareas significativas debido a su carácter casi cerrado y a su conexión restringida con el océano. Por ello, el aprovechamiento mareomotriz es prácticamente inexistente.
- Respecto al recurso undimotriz, el potencial también es moderado, ya que el tamaño de la cuenca limita el desarrollo de oleaje largo, aunque la presencia de borrascas y frentes presenta situaciones favorables. Así, ciertas zonas centrales son de interés para prototipos a escala.

Mar Rojo:

- La energía mareomotriz presenta entorno con un comportamiento mareal algo más marcado que el Mediterráneo o el Báltico, con amplitudes que pueden alcanzar valores cercanos a uno o dos metros en determinadas zonas, especialmente en el sur. Esto podría permitir aplicaciones puntuales de las tecnologías mareomotrices en estrechos y zonas de corriente intensa.
- El recurso undimotriz presenta un potencial que es medio-bajo, ya que el oleaje suele estar dominado por vientos regionales y la cuenca permite el desarrollo sistemas de olas de orden reducido. No obstante, determinadas áreas del centro y norte del mar pueden presentar condiciones moderadas para aprovechar mediante tecnologías adaptadas.

En conclusión, estos tres mares presentan potenciales energéticos inferiores a los de regiones oceánicas, pero pueden ofrecer oportunidades específicas para tecnologías marinas adaptadas a condiciones de menor energía para su uso en zona litoral. Sin embargo, ciertas localizaciones con corrientes intensas o condiciones de oleaje relativamente constantes podrían permitir la implementación de tecnologías específicas de generación marina.

4.4 Validación del diseño conceptual

A continuación, se presenta el diseño conceptual final validado de la plataforma, resultado del proceso iterativo de desarrollo llevado a cabo a partir de los requisitos operativos, energéticos y funcionales establecidos. La validación se ha realizado mediante la realización y definición de los planos de formas y los planos de disposición general, verificando que la geometría del casco (representada en la Figura 4-5), la distribución interna y los sistemas embarcados configuran un conjunto viable desde el punto de vista técnico.

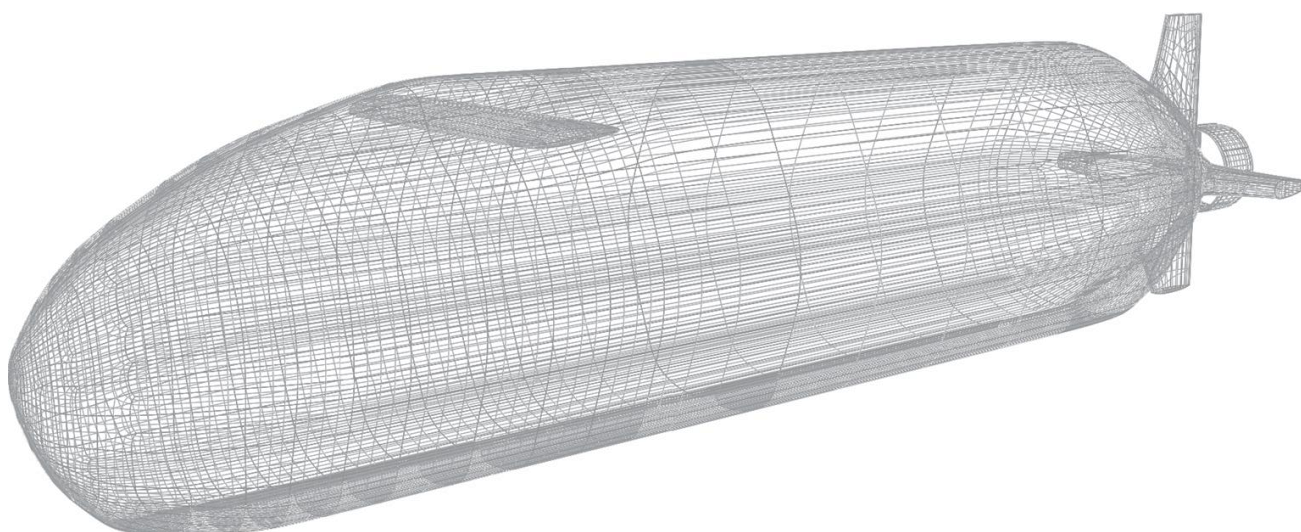


Figura 4-5 Diseño validado del proyecto conceptual (Elaboración propia / DELFTship).

Asimismo, el diseño final cumple con los criterios fundamentales de esta fase conceptual, como la coherencia hidrodinámica derivada de los planos de formas, la viabilidad constructiva, y la compatibilidad entre generación, consumo y almacenamiento energético. Todo ello permite afirmar que la plataforma es funcionalmente integrable y técnicamente consistente, constituyendo una base sólida para su evolución hacia fases posteriores de diseño básico y de detalle, donde se abordarán análisis más avanzados y validaciones específicas.

Además, la geometría final del proyecto queda definida con los planos de forma expuestos en el Anexo VI (en adición al plano de cuadernas) y la disposición general en el Anexo VII, con la posición y distribución de los sistemas y equipos a bordo de la plataforma.

5 ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE VIABILIDAD

En este capítulo se realiza y expone el análisis económico del proyecto con la aproximación de un presupuesto inicial y el estudio de la rentabilidad de este, además de un análisis de viabilidad.

5.1 Rentabilidad del proyecto

En términos económicos, el mercado de XLUUV está experimentando un crecimiento rápido en el mercado militar con un mercado estimado de ~998 millones de dólares en el ejercicio de 2025 y una proyección en 7 años estimada en ~2,59 billones ($\approx 14,6\%$ de CAGR - *Compound Annual Growth Rate*).

A nivel nacional, el I+D en el marco de XLUUV es inexistente, con el desarrollo únicamente de plataformas UUV como el Mare Lupe de 1,5 millones de € en desarrollo (vehículo de 2,3 m y 125 kg). Dentro del marco internacional y como se mostró en el estado del arte, el *Orca* de la USN tiene un presupuesto de 43 millones para cuatro unidades y en la RN el *Cetus* ha supuesto un desembolso total de 19,5 millones de dólares por 10 unidades. En adición, el proyecto americano de la USN supuso incrementos sustanciales del presupuesto con un 64% de coste adicional y 3 años de retrasos.

Vistos los costes iniciales de la producción del proyecto anterior, los beneficios económicos de las plataformas suponen un ahorro operativo cuantificable con la posibilidad de unidades autónomas que permiten la sustitución de submarinos tripulados en misiones, así como reducir el factor humano de la operabilidad y presencia de una dotación con sus costes asociados. Además, el desarrollo de la plataforma supone un retorno industrial a nivel nacional con la posibilidad de realizar exportaciones a nivel internacional y la participación de España en un mercado en crecimiento lo que permite el posicionamiento del país en tecnologías emergentes y en un sector con altas posibilidades. Asimismo, el desarrollo tecnológico con la inversión en I+D+i dentro de este marco industrial permitirá una rentabilidad a largo plazo para la proyección de nuevas plataformas en este campo.

Asimismo, al ser un proyecto de naturaleza militar su rentabilidad no se mide directamente a nivel de retorno monetario, ya que entra en juego el factor del valor estratégico y de proyección que se consigue con la plataforma permitiendo una nueva línea de acción en las operaciones y sirviendo de factor disuasivo y operativo en el teatro de operaciones con la reducción de la exposición humana.

5.2 Presupuesto

La estimación del presupuesto se ha realizado con el desarrollo de costes parciales siguiendo la configuración de costes conforme al SWBS, con ello se presenta el presupuesto en base a los costes de material y su cantidad, y la mano de obra con las horas trabajadas. El presupuesto se ha realizado conforme a estipulaciones propias de la construcción naval y en base a publicaciones de referencia [44] teniendo en cuenta que se trata de un proyecto militar y de desarrollo limitado a Navantia Cartagena.

Conforme al análisis económico y su desarrollo por grupos de sistemas, se obtiene el presupuesto total representado en la Figura 5-1. Este se ha obtenido con la aplicación de gastos de gestión (15%), beneficios industriales (35%) e impuestos (IVA del 25%). Además, se toma como referencia un 10% de margen de seguridad para errores y un 10% para I+D+i para el análisis económico.

Presupuesto	Análisis Económico de la Unidad UMS - 00	
Presupuesto de Ejecución (PEM)		19.033.175,00 €
Seguridad, Desarrollo, Gastos y Beneficio		
Presupuesto de Licitación (PL)		32.356.397,50 €
Impuestos (IVA)		
Presupuesto Total (PT)		40.445.496,88 €
Asciende el presupuesto total de un XLUUV a la expresada cantidad de 40.445.496,88 € (Cuarenta millones cuatrocientos cuarenta y cinco mil cuatrocientos noventa y seis euros con ochenta y ocho céntimos)		

Figura 5-1 Presupuesto Total del XLUUV (Elaboración propia).

El presupuesto del proyecto finalmente asciende a los 40 millones de euros para la primera unidad de la serie. El Presupuesto de Ejecución (PEM) asciende a 19 millones de euros, lo que representa el coste directo de desarrollo y construcción de la unidad. Por su parte, el Presupuesto de Licitación (PL) alcanza los 32,4 millones de euros, incorporando gastos generales, beneficio industrial y otros costes asociados al proceso contractual. El Presupuesto Total (PT) se sitúa en 40,5 millones de euros, lo que evidencia el impacto de partidas adicionales como gestión, integración de sistemas, certificaciones y posibles contingencias. El desarrollo completo de la partida presupuestaria se presenta en el Anexo VIII.

Con ello, el coste unitario de las unidades es un valor variable que dependerá de las innovaciones y desarrollos de proyectos anteriores con el ahorro y abaratamiento de costes de cara al desarrollo de los posteriores; por ello es necesario definir el presupuesto completo de la ejecución de la serie como se presenta en la Tabla 5-1 con los presupuestos de las 6 unidades de la serie.

Unidad XLUUV	Presupuesto Final
UMS - 01 Jorge Juan	40.445.496,88 €
UMS - 02 Churruca	39.029.904,48 €
UMS - 03 Ulloa	38.423.222,03 €
UMS - 04 Mazarredo	36.603.174,67 €
UMS - 05 Císcar	35.490.923,51 €
UMS - 06 Landazábal	34.783.127,31 €
<i>Total de la Serie UMS</i>	<i>224.775.848,88 €</i>

Tabla 5-1 Presupuesto de la serie de UMS (XLUUV).

La compleción de la construcción se proyecta con un total de 6 unidades para la conducción de operaciones y con lo que se permite el flujo de operaciones propio de la Armada española con la cumplimentación del Periodo de Inmovilización Programada (PIP), la Calificación Operativa (CALOP) y despliegue para operaciones. Con ello y gracias a las 6 unidades se permite tener una fuerza operativa con el reparto de unidades en cada proceso de preparación y mantener una permanencia ininterrumpida de 3 a 4 unidades operativas de manera continua para la conducción de operaciones.

De este modo, para el desarrollo de la ejecución de los proyectos se tienen en cuenta unos márgenes de ahorro e innovación con respecto a la primera serie gracias a las lecciones aprendidas y los desarrollos ya realizados que sientan las bases del siguiente proyecto. Así, estos márgenes evolucionan con un aumento como se presenta en la Figura 5-2 por la evolución de la construcción dentro de la serie.

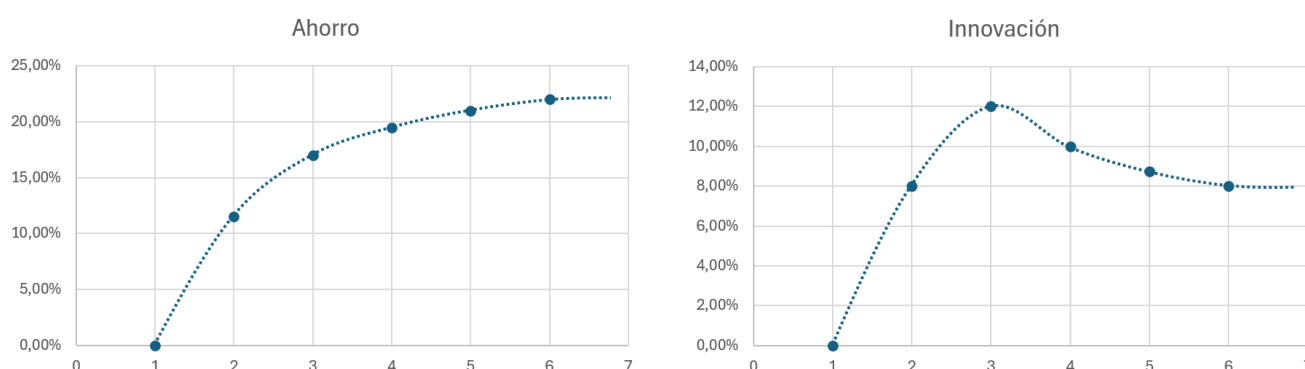


Figura 5-2 Ahorro e inversión de presupuestos de la serie UMS (Elaboración propia).

El ahorro evoluciona con un aumento logarítmico debido a la amortización de los márgenes de ahorro y los desarrollos entre unidades disminuyen sustancialmente. Por su parte, se aprecia que la innovación experimenta un auge en la tercera unidad debido a que con ella se produce la optimización profunda y mejoras estructurales de los fallos encontrados en la segunda unidad.

5.2.1 Gastos de operación

El despliegue de la plataforma y su funcionamiento dependiente de elementos de control y seguimiento hacen que con la operatividad del XLUUV existan de forma intrínseca gastos de operación. Estos gastos son necesarios para hacer frente al funcionamiento de la estructura de mando con dotación dedicada (con sueldos en 14 pagas), la secuencia de reparaciones y el apoyo logístico entre más factores. Este gasto se plantea de forma general y aproximada con los costes mensuales y anuales presentados en la Tabla 5-2 conforme a los conceptos de estudio.

Concepto de operación	Gasto mensual	Gasto anual
Personal de dotación (14 pagas)	38.400 €	537.600 €
Instrucción y Adiestramiento	30.000 €	360.000 €
Célula de Control (C2)	15.000 €	180.000 €
Reposición de WCS	37.500 €	450.000 €
Apoyo logístico	12.500 €	150.000 €
Reparaciones	15.750 €	189.000 €
Pertrechos	25.500 €	306.000 €
Empleo de sistemas auxiliares	4.500 €	54.000 €
<i>Total de operación</i>	<i>179.150 €</i>	<i>2.226.600 €</i>

Tabla 5-2 Gastos de operación de la fuerza de XLUUV.

La operación de la serie supone un gasto en Defensa de 2,23 millones de euros de forma anual. Nótese que no se tienen en cuenta los gastos propios de la ejecución de reparaciones de PIP y periodos de gran carena para modernizaciones y reparaciones mayores lo que supondría cuantías mayores.

5.3 Análisis de viabilidad

Para el análisis de viabilidad de un proyecto militar es necesario la aplicación de un análisis de metodología MEA (*Mission Effectiveness Analysis*) [45]. Con esto se permite evaluar si la plataforma cumple su misión dentro de un coste razonable mediante su comparación con otras plataformas (submarinos tripulados, UUV pequeños, drones UAV, etc.). El objetivo de este análisis no es solo la medición del rendimiento técnico, sino su efectividad operativa por cada euro invertido.

La ejecución de un análisis MEA se plantea para la resolución de las posibles misiones que puede efectuar con la probabilidad de éxito de estas y el coste militar que conlleva su ejecución. La métrica de este análisis se estudia mediante (5-1) con la relación de los parámetros mencionados.

$$MEA = \frac{\text{Efectividad operativa}}{\text{Coste del proyecto}} \quad (5-1)$$

$$MEA = \sum (\text{Peso}_{\text{misión}} \times \text{Probabilidad}_{\text{éxito}})$$

De este modo, los pesos de la misión se disponen con un peso que se evalúa conforme a una fracción de la unidad. Con su estudio presentado en la Tabla 5-3 conforme a las líneas de acción en operaciones.

Misión	Peso de misión	Probabilidad de éxito	Contribución MEA
ISR	0,25	0,75	0,187
ASW	0,20	0,60	0,120
AAW y ASUW	0,10	0,85	0,085
MIW y MCM	0,20	0,80	0,160
Ataque Ofensivo	0,15	0,65	0,097
EW	0,10	0,70	0,070

Tabla 5-3 Estudio de la efectividad global de las misiones del XLUUV.

Con los resultados obtenidos se puede obtener un valor del MEA de 0,719 que corresponde al conjunto de las 6 unidades. Ahora bien, como se mencionó anteriormente, el periodo de PIP del ciclo operativo supone la inoperatividad de ciertas unidades de forma constante; por ello, la fuerza de XLUUV solo cuenta con un 75% de la fuerza de forma constante en condición operativa (CALOP y operaciones). Con esto en consideración el MEA resultante para las 6 unidades queda tal que

$$MEA_{\text{fuerza}} = MEA \times \% \text{ unidades}_{\text{Condición Operativa}} = 0,719 \times 0,75 = 0,54$$

El análisis muestra una relación coste-efectividad competitiva dentro del mercado de vehículos submarinos no tripulados de gran tamaño. Comparado con sistemas como el *Orca XLUUV* de la USN, el coste estimado se mantiene dentro del rango habitual del mercado. Además, disponer de seis unidades permite una presencia distribuida en distintas áreas marítimas, aumentando la cobertura operativa. El enfoque reduce riesgos del factor humano y costes operativos frente a plataformas tripuladas.

El MEA sugiere que el proyecto es viable tanto desde el punto de vista económico como operativo, siempre que se mantenga un equilibrio adecuado entre capacidades de misión y complejidad tecnológica. El sistema analizado podría cubrir eficazmente el espacio operativo, proporcionando persistencia, flexibilidad y reducción de costes operativos, factores que lo convierten en una propuesta competitiva dentro del mercado de plataformas navales autónomas. El programa de 224 millones de euros para seis unidades sugiere que el proyecto conceptual es técnicamente viable, económicamente razonable y coherente con la evolución hacia sistemas navales autónomos militar para la Armada española.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Finalmente, el proyecto se cierra con la presentación de las conclusiones del diseño conceptual de la plataforma con las conclusiones técnicas del diseño final y las conclusiones a nivel personal de esta; esto está acompañado de un análisis del desarrollo conceptual además de presentar unas líneas futuras para el proyecto.

6.1 Conclusiones sobre la plataforma

En el desarrollo del XLUUV, se ha presentado cierta dificultad derivada, principalmente, del carácter estratégico y reservado que acompaña a este tipo de plataformas no tripuladas. La información técnica detallada sobre vehículos submarinos de gran autonomía no suele estar disponible para dominio público debido a la clasificación confidencial de los documentos al respecto. Esto ha condicionado el acceso a datos veraces y reales, y ha requerido trabajar con hipótesis técnicas fundamentadas para mantener la rigurosidad técnica del proyecto.

No obstante, se ha cumplido el objetivo principal del proyecto, con el diseño a nivel conceptual de un XLUUV con la compleción de la espiral de Evans del diseño del submarino (punto 1.6), definiendo sus parámetros principales, arquitectura general, la cinemática de la navegación y una estimación económica preliminar. Además, durante el proceso se han alcanzado de forma complementaria los objetivos secundarios, como la estructuración de la generación de energía y los consumos (básicos, de propulsión y periódicos) y su influencia directa en la permanencia operativa según el perfil de misión definido, sentando así las bases para futuras fases de diseño y desarrollo con un mayor nivel de detalle.

Para el diseño se han empleado herramientas de modelado y cálculo ya conocidas como DELFTship y AutoCAD, combinadas con hojas de cálculo y bases de datos para la estimación de consumos y costes, lo que ha permitido estructurar el proyecto de manera rigurosa en la presente fase conceptual.

En cuanto a la plataforma, se ha desarrollado un concepto modular y flexible, con la definición de una disposición interna orientada a maximizar la autonomía y permitir la integración de distintas cargas útiles según la misión con el estudio satisfactorio de la estabilidad y flotabilidad gracias a la distribución de pesos realizada. La configuración adoptada facilita la adaptación a la ingeniería de sistemas con la definición de todos los equipos y un análisis de estos. Además, el diseño conceptual ha permitido una maniobrabilidad y resistencia hidrodinámica coherente y satisfactorias con lo que se posibilita la evolución del diseño en etapas posteriores sin comprometer la arquitectura básica definida.

Respecto al análisis económico, el presupuesto estimado de entorno 40 millones de euros, lo cual es coherente con las dimensiones, complejidad tecnológica y sistemas embarcados considerados. La coyuntura industrial actual permitiría que astilleros nacionales (Navantia) con capacidades en construcción naval militar para su desarrollo, especialmente con apoyo de una red de empresas especializadas en integración de sistemas.

6.1.1 Conclusión personal del proyecto

A nivel personal, este trabajo ha permitido consolidar y aplicar de forma integrada conocimientos relacionados con la ingeniería naval, el análisis energético y la planificación económica de plataformas complejas. Asimismo, ha servido para reforzar el manejo de herramientas de diseño y análisis técnico, así como la estructuración de información en bases de datos y modelos de cálculo.

El carácter multidisciplinar del proyecto ha facilitado aplicar de manera transversal competencias adquiridas, orientándolas hacia el ámbito específico de los vehículos submarinos autónomos. Con ello y gracias a la cumplimentación de los objetivos expuestos, el desarrollo del proyecto ha sido una buena herramienta de aprendizaje para la finalización de los estudios del grado de Ingeniería Mecánica con gran importancia de la intensificación de tecnologías navales.

6.1.2 Análisis general del proyecto

El desarrollo de un XLUUV supondría una aportación estratégica relevante para la Armada española, ya que ampliaría sus capacidades en vigilancia marítima, reconocimiento, guerra antisubmarina y protección de infraestructuras críticas. Este tipo de plataforma permitiría incrementar la permanencia en zona de operaciones con menor riesgo para el personal y un coste operativo inferior al de unidades tripuladas, además de complementar eficazmente a submarinos y buques de superficie dentro de un concepto de fuerza más distribuida y tecnológicamente avanzada.

Sin embargo, en el contexto actual, el proyecto no se configura como una prioridad inmediata de estudio o inversión. La Armada se encuentra inmersa en programas de gran envergadura y elevado impacto presupuestario, lo que concentra los recursos económicos, industriales y técnicos disponibles. La coexistencia de múltiples proyectos estratégicos limita la capacidad de abordar simultáneamente nuevas líneas de desarrollo que, aunque interesantes y de interés para los objetivos militares nacionales, no resultan urgentes actualmente frente a otras necesidades operativas presentes en el panorama de Defensa con las líneas de desarrollo que se están abordando.

Entre los proyectos actuales de la Armada española destacan:

- La construcción de las nuevas fragatas de la clase F-110, diseñadas para guerra ASW y reforzar capacidades AAW y ASUW (con la primera unidad, la F-111 Bonifaz, botada recientemente) y cuya serie completa está prevista hasta principios de la década de 2030.
- La modernización de las fragatas F-100 para la prolongación de su vida operativa.
- La ampliación de capacidades en submarinos S-80 con tecnología AIP (BEST) que permite largas inmersiones (en las futuras unidades botadas y las actuales durante carena).
- Programas para la ampliación de infraestructuras clave como la Base Naval de Rota y la ampliación de la Estación Naval de La Algameca en Cartagena.
- La adquisición de buques especializados como el Buque de Acción Marítima de Intervención Subacuática (BAM-IS).
- Diversos planes de modernización en el marco de la estrategia Armada 2050.

A ello se suma la restricción presupuestaria estructural existente en el Ministerio de Defensa que afecta a los programas de defensa, donde la asignación de fondos debe equilibrar mantenimiento de capacidades existentes, modernización y nuevas adquisiciones.

En este escenario, un proyecto como el XLUUV podría considerarse una iniciativa con alto potencial a medio o largo plazo, pero cuya materialización requeriría una planificación financiera específica o un marco de cooperación industrial que hiciera viable su desarrollo sin comprometer los programas actualmente en ejecución.

Por esto, aunque se trate de un proyecto viable y de interés para la Armada, no es de necesidad prioritaria para Defensa debido a las restricciones económicas y los múltiples proyectos en ejecución.

6.2 Líneas futuras

A pesar de tratarse de un diseño conceptual de un XLUUV se puede considerar que se han establecido las bases para el desarrollo de futuras fases del proyecto. Se han definido los parámetros principales de la plataforma, lo que proporciona los elementos necesarios para desarrollar el diseño hacia etapas posteriores con mayor nivel de detalle.

Sin embargo, se puede considerar como el primer escalón conseguido dentro de la espiral de diseño a nivel preliminar para el diseño conceptual según las bases del ONST, y que sienta las bases de un posible futuro proyecto.

Este trabajo aborda exclusivamente la fase inicial de diseño conceptual del sistema. Por tanto, constituye el punto de partida para estudios posteriores que profundicen en las siguientes fases del desarrollo del submarino concebido en este TFG. Algunas de estas líneas futuras propuestas son:

- Desarrollo del diseño básico y posteriormente del diseño de detalle, incluyendo definición estructural y selección definitiva de materiales.
- Cálculo avanzado hidrodinámico y optimización de formas mediante simulación CFD.
- Análisis estructural por elementos finitos para validar resistencia a presión y cargas operativas.
- Definición detallada del sistema energético, incluyendo estudio comparativo de tecnologías de almacenamiento e integración de sistemas como AIP.
- Desarrollo de la arquitectura de control y autonomía, con integración de algoritmos de navegación inteligente.
- Estudio de reducción de firma acústica y optimización del sistema propulsivo.
- Plan de industrialización, análisis logístico y estudio de ciclo de vida (LCC).
- Evaluación operativa dentro de escenarios reales de empleo en la Armada española.
- Arquitectura modular ampliada con un modelo “*plug-and-play*” estandarizado para la integración de *payload* (sonares, sensores oceanográficos, sistemas ISR o módulos EW).

Estas líneas permitirían transformar el concepto inicial en un proyecto técnicamente maduro y viable desde el punto de vista industrial y operativo. Con ello se permite el desarrollo de una plataforma completamente operativa que pueda ser entregada a la Armada para la conducción de sus operaciones.

7 BIBLIOGRAFÍA

En este último capítulo se exponen las referencias bibliográficas que han servido de soporte para el desarrollo del proyecto. A continuación de este, se anexan los 16 anexos del proyecto.

- [1] E. Casanova Rivas, "El Buque de Guerra" como aplicación más avanzada de la tecnología naval, Editorial de Ingeniería Naval del Colegio Oficial de Ingenieros Navales y Oceánicos, 2009.
- [2] A. Conte de los Ríos, «Goblal Strategy,» 17 de Mayo de 2020. [En línea]. Available: <https://global-strategy.org/los-grandes-vehiculos-submarinos-autonomos-el-sueno-de-julio-verne/>. [Último acceso: 13 de Diciembre de 2025].
- [3] F. Wolf, «¿Por qué la tecnología del gran dron submarino XLUUV es estratégica para las armadas militares?,» 01 de Febrero de 2024. [En línea]. Available: <https://meta-defense.fr/es/2024/02/01/Problemas-de-ddo-del-grupo-naval-xluuv/>. [Último acceso: 15 de Diciembre de 2025].
- [4] J. J. Crespo Páramo, «El Arma Submarina, un servicio algo menos silencioso,» *Biblioteca Virtual de Defensa*.
- [5] Instituto de Historia y Cultura Naval, «Historia del Arma Submarina Española,» de *Publicaciones Oficiales del BOE*, Madrid, Septiembre de 2015.
- [6] U.S. Department of War, «Living in the Deep,» [En línea]. Available: <https://www.war.gov/Multimedia/Experience/Living-in-the-Deep/>. [Último acceso: 27 de Enero de 2026].
- [7] Royal Navy, «Submarine Service,» [En línea]. Available: <https://www.royalnavy.mod.uk/organisation/submarine-service>. [Último acceso: 28 de Enero de 2026].
- [8] Funditec, «La Armada presenta el proyecto de Buque Autónomo para afrontar el futuro de la defensa naval,» 24 de Septiembre de 2024. [En línea]. Available: <https://funditec.es/es/la-armada-presenta-el-proyecto-de-buque-autonomo-para-afrontar-el-futuro-de-la-defensa-naval/>. [Último acceso: 16 de Diciembre de 2025].
- [9] A. Piñeiro Sanchez, «Armada 2050,» de *Armada, Ministerio de Defensa*, Madrid, 4 de Diciembre de 2024.
- [10] A. Piñeiro Sanchez, *Líneas Generales de la Armada 2025*, Madrid: Ministerio de Defensa, 05 de Febrero de 2025.
- [11] General Dynamics, «Submarine Systems,» [En línea]. Available: <https://gdmissionsystems.com/submarine-systems>. [Último acceso: 14 de Enero de 2026].

- [12] Boeing, «XLUUV, Long-duration, first-of-its kind autonomous undersea vehicle,» [En línea]. Available: <https://www.boeing.com/defense/autonomous-and-unmanned-systems/xluuv>. [Último acceso: 20 de Diciembre de 2025].
- [13] X. Vavasseur, «UK's CETUS XLUUV launched by MSubs in Plymouth,» 05 de Marzo de 2025. [En línea]. Available: <https://www.navalnews.com/naval-news/2025/03/uks-cetus-xluuv-launched-by-msubs-in-plymouth/>. [Último acceso: 20 de Diciembre de 2025].
- [14] A. Conte de lo Ríos, «La rompedora apuesta de Australia por los submarinos XLUUV,» 25 de Agosto de 2024. [En línea]. Available: <https://www.revistaejercitos.com/articulos/la-rompedora-apuesta-de-australia-por-los-submarinos-xluuv/>. [Último acceso: 21 de Diciembre de 2025].
- [15] N. News, «France Orders XLUUV Submarine Drone Demonstrator from Naval Group,» 30 de Enero de 2025. [En línea]. Available: <https://www.navalnews.com/naval-news/2024/01/france-orders-xluuv-submarine-drone-demonstrator-from-naval-group/>.
- [16] H. I. Sutton, «China's New Giant Underwater Drone Increases Naval Mine Threat Around Taiwan,» 18 de Septiembre de 2025. [En línea]. Available: <https://www.navalnews.com/naval-news/2025/09/chinas-new-giant-underwater-drone-increases-naval-mine-threat-around-taiwan/>. [Último acceso: 21 de Diciembre de 2025].
- [17] T. Hindreus y V. Reedik, «Synergy-Based Approach to Engineering,» de *Institute of Machinery, Tallinn University of Technology*, Reykjavik, Iceland, 16 de Agosto de 2016.
- [18] S. Chakraborty, «Understanding Structure Design of a Submarine,» 07 de Mayo de 2021. [En línea]. Available: <https://www.marineinsight.com/naval-architecture/submarine-design-structure-of-a-submarine/>. [Último acceso: 16 de Diciembre de 2025].
- [19] P. Segui, «Energía undimotriz o olamotriz,» OVACEN, [En línea]. Available: <https://ovacen.com/energias-renovables/undimotriz-olamotriz/>. [Último acceso: 15 de Enero de 2026].
- [20] P. Segui, «Energía mareomotriz: Qué es, tipos y cómo funciona,» OVACEN, [En línea]. Available: <https://ovacen.com/energias-renovables/mareomotriz/>. [Último acceso: 15 de Enero de 2026].
- [21] Naciones Unidas, United Nations Convention on the Law of the Sea, Nueva York, 30 de Abril de 1982.
- [22] Convenio de Ginebra, Derecho Internacional Humanitario, Ginebra, 1949.
- [23] OTAN y International Naval Safety Association, ANEP-77, 2014.
- [24] LCDR Matthew Ritchey, «Unmanned Undersea Vehicles: An Asymmetric Tool for Sea Denial,» de *Royal Navy Report*, Office of the Provost Naval War College, Newport, 21 de Agosto de 2008.
- [25] F. W. Lacroix, R. W. Button, S. E. Johnson y J. R. Wise, «A Concept of Operations for a New Deep-Diving Submarine,» de *National Defense Research Institute for U.S. Navy*, Santa Monica, CA, USA, 2001.
- [26] Ministerio de Defensa, «Misiones Permanetes y en el Exterior».
- [27] GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans), «GEBCO multi-resolution grid product,» British Oceanographic Data Centre (BODC), [En línea]. Available: <https://www.gebco.net/data-products/gridded-bathymetry-data/multi-res>.
- [28] A. Conte de los Ríos, «La visión estratégica de la Armada: «Armada 2050»,» Portal de CESEDEN, 09 de Enero de 2025. [En línea]. Available: https://www.defensa.gob.es/ceseden/-/la_vision_estrategica_de_la_armada_2050. [Último acceso: 22 de Enero de 2026].
- [29] U.S. Marine Corps Basic Officer Course, Law of War / Introduction to Rules of Engagement, Camp Barret, Virginia 22134-5019, USA: U.S. Marine Corps Training Command.

- [30] J. J. Alonso del Rosario, . J. M. Vidal Pérez, G. M. Piñero Linde y F. T. Quesada Silva , Conceptos de Oceanografía Física para Ingenieros Navales y Oceánicos, Cádiz: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz, 17 de Octubre de 2022.
- [31] R. Burcher y L. J. Rydill, Concepts in Submarine Design, Cambridge: Cambridge University Press, 1994.
- [32] V. Bertram, Practical Ship Hydrodynamics, Butterworth-Heinemann, 06 de septiembre de 2011.
- [33] Malay Pal, Ship work breakdown structures through different ship lifecycle stages, Bremen, Alemania: International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, 2015.
- [34] P. Sosa, «Estática, Estabilidad de Submarinos,» Kimerius Aircraft, 2007. [En línea]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiD8sLqhomTAXWIRP4FHa1YDng4ChAWegQIFRAB&url=https%3A%2F%2Fwww.kimerius.com%2Fapp%2Fdownload%2F5780663562%2FEst%25C3%25A1tica%252C%2BEstabilidad.pdf&usg=AOvVaw09agb45ehjy5UvxqXobgWt&o>. [Último acceso: 12 de Febrero de 2026].
- [35] Á. Stuardo Gutiérrez, «Navegación inercial de un submarino y una nave espacial,» de *Revista de Marina N° 986*, Febrero de 2022.
- [36] A. Pérez, «Componenetes de Equipo de control submarino,» de *Universidad Nacional Rafael María Baralt*, El Carmelo, Venezuela.
- [37] A. Ramírez Bravo, ««Estado del arte» para una propulsión totalmente eléctrica,» de *Revista General de Marina Noviembre 2020*, Madrid, 2020.
- [38] T. Ocean, «Compass Core Batteries,» [En línea]. Available: <https://www.tesvolt-ocean.com/en/products/kaptein-series/compass.html>. [Último acceso: 17 de Febrero de 2026].
- [39] C. Barrionuevo Ojeda, Introducción a las Plantas de Propulsión Naval, Callao: Escuela Superior de Guerra Naval, Octubre de 2013.
- [40] P. Jayakumar, H. Das y V. Saji, «CFD Examination of Interaction of Flow on High-Speed Submerged Body with Pumpjet Propulsor,» de *5th International Conference on High Performance Marine Vehicles*, Australia, 10 de Noviembre de 2010.
- [41] InfoDefensa, «El submarino S-80 al detalle, el mayor proyecto de ingeniería naval española,» 28 de Noviembre de 2025. [En línea]. Available: <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/5683170/submarino-s-80-detalle>. [Último acceso: 24 de Febrero de 2026].
- [42] S. Wadoo y P. Kachroo, Autonomous Underwater Vehicules, Modeling, Control Design and Simulation, Taylor and Francis Group, LLC, 2011.
- [43] A. Babarit, «A database of capture width ratio of wave energy converters,» de *LHEEA Lab, Ecole Centrale de Nantes*, Nantes, Francia, 22 de Febrero de 2015.
- [44] Universidad de Coruña, Introducción al proyecto de buques, Asociación y Colegio de Ingenieros Técnicos Navales, 1996.
- [45] Y. Mi, S. Xu y H. Song, «Research on Mission-based Evaluation Model for Effectiveness of Flight Test Aircraft,» de *Proceedings of the World Congress on Engineering 2021*, Londres, Reino Unido, 09 de Julio de 2009.

ANEXO I IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Los XLUUV constituyen una nueva generación de sistemas navales autónomos diseñados para realizar misiones prolongadas con operación durante largos periodos de forma autónoma, con gran capacidad de carga útil y sensores avanzados.

En el caso español, la hipotética construcción de un XLUUV dotado de armamento y sistemas energéticos basados parcialmente en energías renovables (por ejemplo, baterías avanzadas, recarga mediante energía solar en superficie o sistemas híbridos) tendría diversas implicaciones en los ámbitos social, económico y ambiental, las cuales deben analizarse dentro del marco legal vigente en España.

1. Marco normativo aplicable en España

El desarrollo y empleo de sistemas de defensa como un XLUUV se enmarca en diversas normas del ordenamiento jurídico español.

1.1 Legislación de defensa y organización militar

El principal marco legal es la Ley Orgánica 5/2005, del 17 de noviembre, de la Defensa Nacional, que establece las bases del sistema de defensa y define la organización de las Fuerzas Armadas, así como el papel del Gobierno y del Parlamento en la planificación y ejecución de la política de defensa. Esta ley determina que el Gobierno dirige la política de defensa y fija sus objetivos estratégicos mediante la Directiva de Defensa Nacional, que establece las líneas de actuación para modernización militar, capacidades tecnológicas y cooperación internacional. Esto a su vez, se compagina con el marco activo y cambiante de los objetivos militares y los nuevos proyectos de Defensa que compaginan y promueven las bases y objetivos de esta ley.

Asimismo, la Dirección General de Armamento y Material (DGAM) es el organismo responsable de la normalización y regulación técnica de los sistemas de armas, incluyendo el desarrollo de estándares militares y la compatibilidad con normativas de la OTAN.

1.2 Normativa ambiental aplicable

Los proyectos industriales y tecnológicos asociados a la defensa deben cumplir con la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental, que regula la evaluación de impacto ambiental de proyectos que puedan afectar al medio natural.

Además, la política ambiental del Ministerio de Defensa promueve la prevención de la contaminación marina, el ahorro energético y la reducción del impacto ambiental de las operaciones militares. Este marco normativo obliga a considerar el impacto ambiental de la construcción, operación y mantenimiento del submarino.

2. Implicaciones sociales

El desarrollo de un programa en defensa para la construcción de una plataforma de guerra conlleva una serie de implicaciones sociales en cuanto a seguridad y empleo con un debate público existente.

2.1 Seguridad y protección del personal

Uno de los principales beneficios sociales de los sistemas XLUUV es la reducción del riesgo para el personal militar, ya que se eliminan tripulaciones en misiones potencialmente peligrosas como la guerra de minas o la vigilancia en zonas de conflicto.

La automatización y autonomía de estos sistemas permite realizar operaciones de alto riesgo sin exponer directamente a soldados o marinos.

2.2 Debate público y percepción social

La introducción de sistemas militares autónomos puede generar debates sociales relacionados con:

- Ética del uso de sistemas armados autónomos.
- Transparencia en el gasto militar.
- Equilibrio entre seguridad nacional y prioridades sociales.

En sociedades democráticas, como la española, el control parlamentario sobre la política de defensa y el gasto militar forma parte del marco institucional establecido por la legislación vigente.

2.3 Impacto en el empleo y la formación

El desarrollo de plataformas navales autónomas implicaría:

- Creación de empleos cualificados en ingeniería naval, inteligencia artificial y robótica.
- Necesidad de formación técnica avanzada para operar y mantener sistemas autónomos.
- Colaboración entre universidades, centros tecnológicos y la industria de defensa.

3. Implicaciones económicas

El desarrollo de un programa militar permite el desarrollo económico nacional con implicaciones en el marco industrial, y de desarrollo afectando al ecosistema industrial existente.

3.1 Desarrollo industrial y tecnológico

La construcción de un XLUUV implicaría la participación de empresas del sector naval, electrónico y tecnológico. En España, el sector de defensa constituye un motor de innovación tecnológica y genera un importante impacto económico.

La inversión pública en programas de defensa también se utiliza como instrumento para impulsar la industria nacional, el empleo y la innovación tecnológica. Un programa de estas características podría favorecer:

- Desarrollo de tecnologías duales (militares y civiles).
- Transferencia tecnológica hacia sectores civiles como la robótica marina o la energía.
- Fortalecimiento de la autonomía estratégica en defensa.

3.2 Costes de desarrollo y mantenimiento

Los programas de submarinos o vehículos submarinos autónomos suelen implicar altos costes de investigación y desarrollo, especialmente en las fases iniciales. Sin embargo, una vez desarrollada la tecnología, el coste por unidad puede reducirse y facilitar exportaciones o programas de cooperación internacional.

3.3 Efectos en el ecosistema industrial

La construcción de un XLUUV podría generar:

- Contratos para astilleros y empresas tecnológicas.
- Integración de pequeñas y medianas empresas en la cadena de suministro.
- Desarrollo de capacidades nacionales en inteligencia artificial, sensores submarinos y sistemas energéticos avanzados.

4. Implicaciones ambientales

El programa militar conlleva implicaciones ambientales que serán tratadas en mayor detalle con un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en el Anexo IV. De manera preliminar, las implicaciones son a nivel del proceso constructivo, del periodo de operación, y el uso de energías renovable en el diseño.

4.1 Impacto durante la construcción

La construcción de plataformas navales implica impactos ambientales relacionados con:

- Consumo de materiales y energía.
- Emisiones industriales.
- Gestión de residuos tecnológicos.

Estos impactos deben evaluarse mediante procedimientos de evaluación de impacto ambiental establecidos por la legislación española.

4.2 Impacto durante la operación

Las operaciones submarinas pueden afectar al medio marino en aspectos como:

- Contaminación acústica submarina.
- Interacción con ecosistemas marinos.
- Posible contaminación por combustibles o materiales.

Las políticas ambientales de la Armada buscan minimizar estos impactos mediante medidas de prevención y control.

4.3 Integración de energías renovables

El uso de energías renovables o sistemas híbridos en vehículos submarinos podría reducir:

- Emisiones contaminantes.
- Dependencia de combustibles fósiles.
- Huella ambiental de las operaciones militares.

Las tecnologías posibles incluyen baterías avanzadas, recarga mediante energías renovables o sistemas híbridos eléctricos.

5. Conclusiones

La construcción de un submarino XLUUV con armamento y sistemas energéticos basados en energías renovables para la Armada Española tendría implicaciones significativas en diversos ámbitos.

Desde el punto de vista social, estos sistemas pueden mejorar la seguridad del personal militar y generar empleo cualificado, aunque también plantean debates éticos sobre el uso de tecnologías autónomas en defensa. En el ámbito económico, el desarrollo de este tipo de plataformas podría impulsar la industria tecnológica y naval española, favoreciendo la innovación y la autonomía estratégica. Finalmente, en el ámbito ambiental, el cumplimiento de la legislación de evaluación ambiental y la integración de tecnologías energéticas sostenibles permitirían reducir el impacto ecológico de estos sistemas, alineando el desarrollo tecnológico militar con los objetivos de sostenibilidad.

ANEXO II REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El desarrollo de vehículos submarinos no tripulados de gran tamaño armados representa uno de los ejemplos más recientes de la creciente automatización de los sistemas militares. Estas plataformas combinan capacidades de autonomía operativa, sensores avanzados, inteligencia artificial y potencial de despliegue prolongado en el entorno marítimo. Aunque estas tecnologías ofrecen ventajas estratégicas desde el punto de vista militar, también plantean importantes interrogantes éticos, sociales y jurídicos que han sido ampliamente discutidos en la literatura académica sobre ética militar, derecho internacional humanitario y tecnologías autónomas.

Una de las principales preocupaciones éticas se relaciona con el grado de autonomía y la responsabilidad en el uso de la fuerza. Autores como Peter Asaro (2012) y Robert Sparrow (2007) han argumentado que la delegación de decisiones potencialmente letales a sistemas autónomos plantea un problema de responsabilidad moral. En particular, Sparrow sostiene que, si un sistema autónomo causa daños indebidos durante un conflicto armado, puede producirse lo que denomina un “*vacío de responsabilidad*” (*responsibility gap*), en el cual resulta difícil atribuir responsabilidad moral o legal a una persona concreta, ya sea el programador, el mando militar o el operador del sistema. Este problema adquiere especial relevancia con operaciones de periodos largos sin contacto con operadores humanos.

Desde la perspectiva del derecho internacional humanitario (DIH), el uso de cualquier sistema de armas debe cumplir con principios fundamentales como la distinción, proporcionalidad y precaución. Según Michael N. Schmitt (2016), uno de los principales retos de los sistemas autónomos es garantizar que puedan cumplir adecuadamente con estos principios en entornos complejos e inciertos. El entorno marítimo presenta además dificultades particulares, como la identificación de objetivos en áreas de tráfico marítimo civil o la interacción con infraestructuras submarinas y ecosistemas marinos. Por esta razón, algunos expertos sostienen que la introducción de sistemas autónomos armados exige mecanismos estrictos de supervisión humana y procedimientos rigurosos de evaluación jurídica.

Otro aspecto crítico se refiere al impacto social y político de la automatización de la guerra. Autores como P.W. Singer (2009), autor del libro “*Wired War*”, han señalado que el uso de sistemas no tripulados puede reducir el riesgo para las fuerzas propias, pero al mismo tiempo podría alterar la percepción social del coste de la guerra. Si las operaciones militares se realizan mediante plataformas remotas o autónomas, la sociedad puede percibir el conflicto como menos costoso desde el punto de vista humano, lo que potencialmente podría facilitar decisiones políticas de intervención militar. Esta idea se relaciona con el concepto de “*distanciamiento moral*” en el uso de la fuerza, que algunos filósofos consideran una consecuencia problemática de la creciente mediación tecnológica en el ámbito militar.

Asimismo, el desarrollo de plataformas como los XLUV plantea cuestiones relacionadas con la estabilidad estratégica internacional. Según Paul Scharre (2018) con “*Army of None: Autonomous Weapons and the Future of War*”, remarca que la proliferación de sistemas autónomos militares podría generar nuevas dinámicas de competencia tecnológica entre estados, especialmente si estas plataformas permiten operaciones persistentes, encubiertas o de difícil atribución. En el ámbito marítimo, donde la detección y atribución de acciones ya resulta compleja, el uso de vehículos autónomos podría aumentar el riesgo de incidentes o malentendidos entre países, lo que subraya la importancia de marcos normativos internacionales y medidas de confianza mutua.

No obstante, el desarrollo de estas tecnologías también puede generar beneficios sociales indirectos. Muchos de los avances tecnológicos asociados a los submarinos autónomos, como la robótica submarina, los sistemas de navegación autónoma o los sensores oceanográficos tienen aplicaciones civiles relevantes. Investigadores como Ronald Arkin (2009), con su obra “*Governing Lethal Behavior in Autonomous Robots*”, han defendido que, si se diseñan adecuadamente, los sistemas autónomos podrían incluso contribuir a reducir ciertos riesgos en conflictos armados, al operar con mayor precisión o sin la influencia de emociones humanas como el miedo o la fatiga. Sin embargo, esta postura sigue siendo objeto de intenso debate dentro de la comunidad académica.

Desde una perspectiva ambiental y ética más amplia, la incorporación de sistemas energéticos más sostenibles (baterías avanzadas o tecnologías híbridas con apoyo de energías renovables) puede interpretarse como un intento de reducir el impacto ambiental de las operaciones militares. No obstante, algunos autores en el ámbito de la ética tecnológica advierten que la introducción de tecnologías “más limpias” en sistemas militares no elimina los dilemas morales asociados al uso de la fuerza, sino que simplemente traslada el debate hacia nuevas dimensiones relacionadas con la sostenibilidad y la responsabilidad tecnológica.

En conclusión, el desarrollo de plataformas XLUUV armadas debe analizarse no solo desde una perspectiva técnica o estratégica, sino también desde una reflexión crítica que integre consideraciones éticas, sociales y jurídicas. La supervisión humana significativa en el uso de la fuerza, la evaluación jurídica conforme al derecho internacional humanitario, la transparencia democrática en las políticas de defensa y el debate público informado constituyen elementos fundamentales para garantizar que estas tecnologías se desarrollen y utilicen de manera responsable. La creciente autonomía de los sistemas militares hace necesario reforzar estos mecanismos de control y reflexión ética, con el fin de evitar que el progreso tecnológico supere la capacidad de las sociedades para regularlo y evaluarlo críticamente.

ANEXO III ESTUDIO BÁSICO DE SEGURIDAD Y SALUD

Proyecto – Construcción de un submarino autónomo XLUUV para la Armada

Promotor – Navantia (de forma preliminar e hipotética)

Nivel de proyecto – Diseño conceptual

Ambiente – España (Nivel militar)

El presente Estudio Básico de Seguridad y Salud tiene por objeto identificar los riesgos laborales asociados al desarrollo y construcción de un vehículo submarino no tripulado de gran tamaño (XLUUV) en fase de diseño conceptual, así como establecer criterios preventivos a integrar en el proyecto durante su desarrollo. Este documento se desarrolla a nivel preliminar y servirá de base para la elaboración posterior del Estudio de Seguridad y Salud definitivo en fases de ingeniería de detalle. La construcción del XLUUV se proyecta para el astillero nacional de Navantia en Cartagena, por lo que el proceso constructivo se adapta a los procesos propios del astillero (con experiencia en submarinos como el S80).

El estudio (EBSS) se desarrolla bajo el marco legislativo actual aplicable en España a nivel de regulación para la construcción de plataformas navales.

- Ley 31/1995 de Prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 1627/1997 sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en obras.
- Real Decreto 1215/1997 sobre utilización de equipos de trabajo.
- Real Decreto 773/1997 relativo a equipos de protección individual.
- Normativa sectorial industrial y naval aplicable.

La construcción del submarino se proyecta en base a la realización de las actividades habituales del entorno industrial en la construcción de proyectos similares. De este modo, la estructura del trabajo a realizar se estructura tal que se desarrolla la fabricación de la estructura metálica de los cascos resistente y ligero junto a los refuerzos estructurales y las cámaras y compartimentos, la soldadura y mecanizado, la manipulación de cargas pesadas junto a la aplicación de recubrimientos y tratamientos específicos, la integración de sistemas con su electrónica, la aplicación de ingeniería de sistemas, y las propias pruebas de mar y de muelle propias del astillero.

Con la definición de los procesos de trabajo en la construcción se procede con el análisis de los posibles riesgos laborales expuestos en la Tabla A3-1 y que se pueden presentar en el proyecto como,

- Riesgos mecánicos; con posibles atrapamientos, golpes de maquinaria, proyección de partículas, abrasión mecánica, y riesgos inherentes a manipulación de cargas pesadas.
- Riesgos eléctricos; por contactos con redes eléctricas de alto voltaje y en la manipulación de los sistemas de energía y plantas.
- Riesgos térmicos; por soldadura y corte térmico de materiales.
- Riesgos químicos; por inhalación de vapores, contacto con solventes y pinturas industriales.
- Riesgos ergonómicos; con manipulación de cargas y posturas forzadas.
- Riesgos acústicos; con la exposición a ruidos elevados.
- Riesgos portuarios; con la posibilidad de caídas al agua, resbalones por superficies húmedas y operaciones en el muelle y astillero.

Mecánicos	Eléctricos	Térmicos	Químicos	Ergonómicos	Acústicos	Portuarios
Alto	Moderado	Moderado	Bajo	Moderado	Bajo	Moderado

Tabla A3-1 Riesgos laborales de la construcción.

Ante los riesgos presentados y de forma preliminar, se procede a integrar una serie de medidas preventivas para el proceso de construcción. A nivel de protección colectiva se pueden instaurar medidas con la señalización de zonas de riesgo, ventilación de zonas de trabajo, creación de barreras físicas y el uso de plataformas seguras. De forma preventiva, se puede hacer uso de una formación específica en el entorno laboral, protocolos de trabajo seguros y estudiados, supervisión técnica del proceso, y coordinación de las actividades. A nivel individual, se permite el uso de Equipos de Protección Individual (EPI) con el uso de cascos de seguridad, gafas de protección ocular, protección respiratoria con máscaras y filtros, protección auditiva en zonas de contaminación acústica elevada, el uso obligatorio de calzado de seguridad y guantes aislantes y de protección.

De manera preventiva, para la realización y ejecución del proyecto es recomendable incorporar una buena accesibilidad en las zonas de trabajo, la automatización de manipulación de cargas pesadas, el uso de una construcción modular, la certificación de los procesos constructivos en materia de seguridad, la instalación de espacios ergonómicos de trabajo y la minimización de exposición acústica y química de los trabajadores en su jornada laboral.

A modo de conclusión del EBSS quedan identificados los riesgos principales en una obra del ámbito de la construcción industrial naval, y la presentación de medidas preventivas y mitigadoras de estas. Con el análisis de Seguridad y Salud no se han encontrado riesgos extraordinarios que sean incompatibles con el desarrollo de la construcción, por lo que el proyecto es viable desde el punto de vista de la seguridad y la salud. Así, queda condicionada la ejecución de esta a estudios posteriores en mayor detalle que se realicen en fases posteriores.

La presentación de este EBSS es a modo preliminar y en fases posteriores del proyecto deberá de ejecutarse la realización de un Estudio de Seguridad y Salud con un Plan de Seguridad extenso y específico que esté dispuesto por área de trabajo con la evaluación de los riesgos por puesto; además de establecer procedimientos de emergencia y simulacros.

ANEXO IV ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

Proyecto – Construcción de un submarino autónomo XLUUV para la Armada

Promotor – Navantia (de forma preliminar e hipotética)

Nivel de proyecto – Diseño conceptual

El presente documento tiene por objeto incorporar a la Memoria Descriptiva del Proyecto las consideraciones ambientales preliminares asociadas al desarrollo y construcción de un vehículo submarino no tripulado de gran tamaño (XLUUV), en fase de diseño conceptual. Este anexo tiene carácter técnico-informativo y constituye una primera aproximación ambiental que permitirá la identificación de los principales factores ambientales, permitir la anticipación de impactos potenciales asociados a la fase de fabricación y pruebas del proyecto, la posibilidad de integrar criterios de sostenibilidad en el diseño conceptual y permitir el facilitar futuras tramitaciones ambientales si resultarán exigibles. El proyecto se somete al procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental conforme a la Ley 21/2013, de Evaluación Ambiental en el marco jurídico nacional con el que se integra la evaluación ambiental de proyectos y se garantiza la prevención y corrección de impactos ambientales.

Con el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) se analiza de forma preliminar y exclusiva la fase de fabricación industrial del astillero (ya existente de Navantia Cartagena), la fase de integración de las pruebas de mar de la plataforma y las operaciones asociadas a la construcción de la primera serie; todo ello desde el nivel de desarrollo conceptual sin la medición ni modelización específica del proyecto. Con el presente EIA se contempla la realización del diseño estructural del casco resistente y ligero, la fabricación de las secciones metálicas (o materiales compuestos), la posibilidad de la integración de sistemas eléctricos y de almacenamiento energético, el proceso de aplicación de recubrimientos protectores, y la ejecución de las pruebas funcionales en instalaciones portuarias y pruebas de mar controladas. Así, la fabricación del proyecto se prevé ser realizada en instalaciones industriales ya operativas, por lo que el proyecto no implica ampliaciones significativas de superficie construida.

Según la metodología EIA, se analizan efectos sobre población humana, fauna y flora, suelo y agua, aire, paisaje, ecosistemas, patrimonio cultural. Esta proyección el estudio a realizar responde al enfoque estándar de evaluación ambiental que analiza impactos directos e indirectos en múltiples componentes del entorno. Con el estudio del proceso constructivo del XLUUV se analiza un proyecto de naturaleza basada en el diseño, fabricación e integración de un XLUUV militar mediante la construcción en instalaciones industriales existentes (astillero). Todo ello a lo largo de las fases propias de un proyecto de estas características y magnitud con la ingeniería y diseño, la fabricación estructural, la integración de sistemas de electrónica y energética, la realización de pruebas de mar, y finalmente la entrega.

De este modo, con el desarrollo del EIA y el análisis de los posibles aspectos ambientales que pueden ser perjudicados por la ejecución de la construcción del XLUUV se obtiene riesgos en cuanto a,

- Consumo de recursos; con el uso de materias primas metálicas y compuestos técnicos, el consumo de energía eléctrica a nivel industrial, el uso de agua en procesos industriales y la aplicación de productos químicos (aceites, pinturas, disolventes y demás).
- Generación de residuos; con residuos metálicos, electrónicos, envases industriales y residuos peligrosos como aceites, pinturas, disolventes, lodos y demás.
- Vertidos y efluentes; con aguas residuales de limpieza y escorrentías controladas.
- Emisiones contaminantes; producidas por soldadura y corte, generación de emisiones indirectas de fabricación y emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV).
- Medio marino; por la perturbación del medio marino y la interacción con la fauna local.
- Contaminación acústica y vibraciones; producidas por el movimiento de maquinaria pesada y por operaciones de corte, mecanizado y soldadura.

Con ello, se evalúan los riesgos de forma cualitativa con respecto a la Tabla A4-1 tal que,

Factor ambiental	Magnitud	Evaluación	Duración	Carácter
Aire	Moderada	Local	Temporal	Reversible
Agua	Baja	Local	Temporal	Reversible
Residual	Moderada	Local	Continua	Gestionable
Acústica	Moderada	Local	Temporal	Reversible
Medio Marino	Baja	Puntual	Temporal	Reversible

Tabla A4-1 Evaluación de factores ambientales del EIA.

En base a los resultados obtenidos de la Tabla A4-1 no se extrae ningún criterio crítico como riesgo medioambiental para la ejecución del proyecto, por lo que a nivel conceptual y de forma preliminar el proyecto es viable en términos medioambientales de acuerdo con la ley existente en España.

En la fase de diseño conceptual del XLUUV se han incorporado criterios de diseño ambiental de carácter preventivo, con el objetivo de minimizar los impactos potenciales desde el origen del proyecto. Este planteamiento se basa en el ecodiseño industrial, la eficiencia energética, la gestión de residuos y la prevención de la contaminación marina, en coherencia con la normativa ambiental vigente y con las buenas prácticas del sector naval.

Desde la óptica del ecodiseño, el proyecto contempla la optimización estructural del buque para reducir el consumo de materiales sin comprometer la seguridad ni la integridad del sistema. Se prioriza la utilización de materiales reciclables cuando ello resulta técnica y normativamente viable, y se procura limitar el uso de sustancias peligrosas, sustituyéndolas por alternativas de menor toxicidad y persistencia ambiental siempre que sea posible. En paralelo, la eficiencia energética se fomenta mediante la selección de sistemas eléctricos y equipos auxiliares de alto rendimiento, así como mediante un diseño orientado a disminuir el consumo energético durante la fabricación, la integración y las pruebas, favoreciendo cuando proceda el uso de energía de origen renovable en las instalaciones industriales.

La gestión de residuos se aborda mediante un enfoque modular que facilita las operaciones de mantenimiento, sustitución de equipos y eventual desmantelamiento del XLUUV, permitiendo la segregación selectiva de materiales y mejorando sus posibilidades de reciclaje o valorización. En fases posteriores se prevé la elaboración de un plan específico de gestión de residuos que defina flujos, responsabilidades y destinos finales autorizados. En cuanto a la prevención de la contaminación marina, se contemplan medidas de contención y protocolos de emergencia para minimizar el riesgo de vertidos durante las pruebas en mar, así como la selección de recubrimientos y sistemas de protección anticorrosiva con bajo impacto ecológico y toxicológico.

El proyecto se desarrolla en un entorno industrial ya consolidado, por lo que no implica una ocupación adicional significativa de suelo ni genera afecciones directas sobre espacios naturales protegidos, ni requiere modificaciones sustanciales del planeamiento urbanístico. En estas condiciones, y siempre que en fases posteriores se implementen un programa de seguimiento ambiental adecuado y los planes de gestión previstos, el proyecto puede considerarse ambientalmente viable a nivel conceptual, quedando su valoración definitiva a las evaluaciones y autorizaciones que puedan exigirse en etapas de diseño de detalle, construcción y operación.

ANEXO V FICHA DE ESPECIFICACIONES DEL XLUUV

Diseño

Parámetro	Valor
Eslora total	18 m
Diámetro máximo	2.4 m
Altura total	2.8 m
Relación eslora/diámetro (L/B)	7.5
Desplazamiento	146,35 t
Volumen desplazado	150,88 m ³
Peso en superficie	132,55 t
Tipo de casco	Monocasco resistente
Configuración hidrodinámica	Diseño modular
GM superficie	0,173 m
GM inmersión	0,251 m
GM longitudinal	15,232 m

Capacidades operativas

Parámetro	Valor
Profundidad operativa	200 m
Profundidad máxima	250 m
Cota periscópica	5 m
Velocidad máxima	20 nudos
Velocidad de crucero	5 nudos
Autonomía máxima	60 días
Alcance operativo	1.000 MN
Persistencia en zona	62 días
Tiempo máximo de misión	80 días
Tiempo de recarga mínimo	37 horas
Tiempo de recarga medio	45 horas
Medio de recarga	Energía renovable
Misiones	JISR, INTEL, FLOSUB
Acciones defensivas	ASW, Flota, SLOC y ZEE
Acciones ofensivas	ASW, ASUW, AAW, MIW, SBW
Apoyo logístico	Estructura integrada

Características estructurales

Parámetro	Valor
Material casco resistente	Acero naval HLES-80
Espesor casco resistente	21 mm
Factor de seguridad estructural	2.5
Tipo de refuerzo	Cuadernas circulares
Separación entre cuadernas	100 mm
Material casco ligero	Acero Böhler P501
Espesor casco ligero	10 mm

Dimensiones

Parámetro	Valor
Eslora (LOA)	18 m
Francobordo (H)	4,2 m
Calado (T)	3,5 m
Manga (B)	3,4 m
Tobera	Ø 1,5 m
Casco resistente	L 11 m x Ø 3,1 m

Propulsión y Energía

Parámetro	Valor
Tipo de propulsión	Pump-Jet (PJP)
Motor principal	Eléctrico síncrono GAMESA
Potencia máxima	650 kW
Potencia de cruce	150 kW
Rendimiento propulsivo	75 %
Tipo de baterías	Litio-Ion NMC
Capacidad total	6,65 MWh
Tensión nominal	800 V
Número de módulos	690
Densidad energética	197 Wh/kg
BMS	Monitorización de baterías
PMS	Gestión de potencia
EMS	Gestión autónoma de energía

Sistemas y equipos

Parámetro	Valor
INS	Sistema de navegación inercial
AHRS	Control de medición de actitud
IMU	Medición movimiento
GPS	Posicionamiento en superficie
Sonda	Medición de distancia al fondo
Sistema integrado	Fusión de sensores
Sonar de proa (CAS)	Sonar activo/pasivo
Sonar lateral (SSS)	Side Scan Sonar
Sonar de obstáculos (PFAS)	Forward Looking Sonar
CTD	Alcance de sensores
Sensor de presión	Medición presión hidrostática
Sensor de salinidad	Medición salinidad del agua
Comunicaciones ELF	Alcance global
Antena satelital	Comunicación SATCOM y BRASS
Enlace RF	Comunicaciones corto alcance

Control de Plataforma

Parámetro	Valor
Timones horizontales	Control de profundidad
Timones verticales	Control de rumbo
Timones estabilizadores	Control de actitud
Tanques de lastre	4 (Volumen 15 m3)
Tanques de trimado	8 (Volumen 3 m3)
Sistema de soplado	Bombas de 45,5 kW
Sistema de llenado	Válvulas hidráulicas

ANEXO VI PLANOS DE FORMAS

En la presente fase de diseño conceptual, los planos de formas del submarino se han desarrollado con el objetivo de definir de manera preliminar la geometría del casco y su comportamiento hidrodinámico en inmersión. Estos planos permiten establecer las:

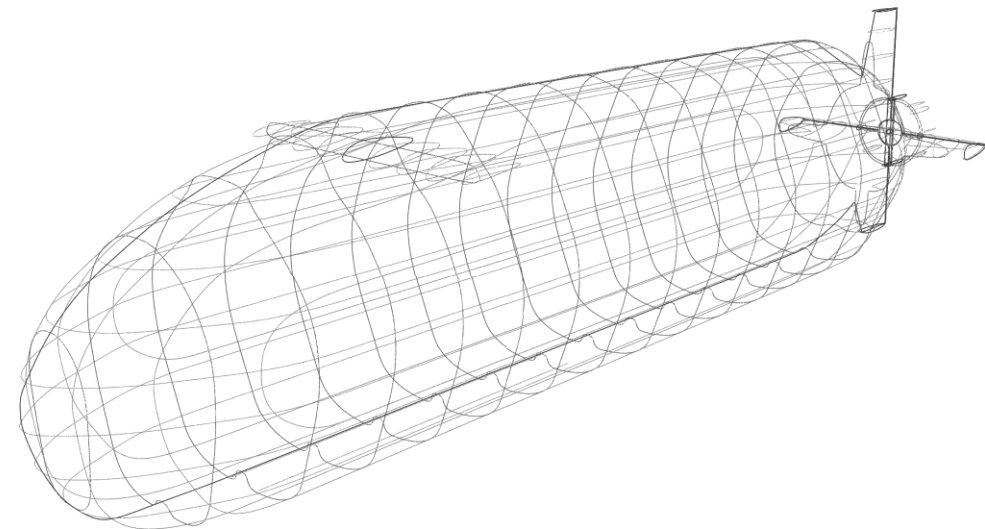
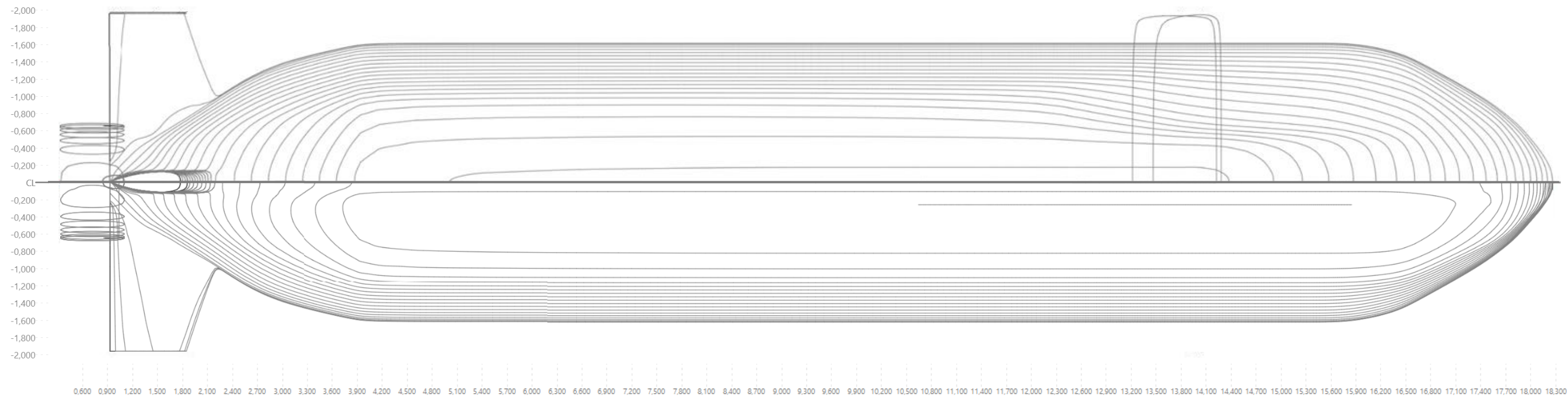
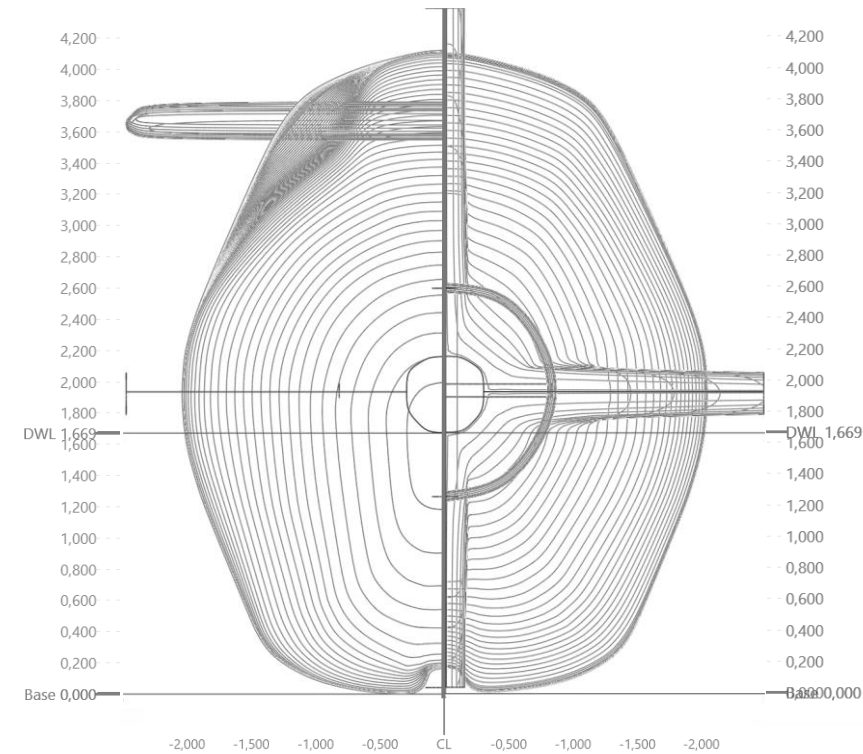
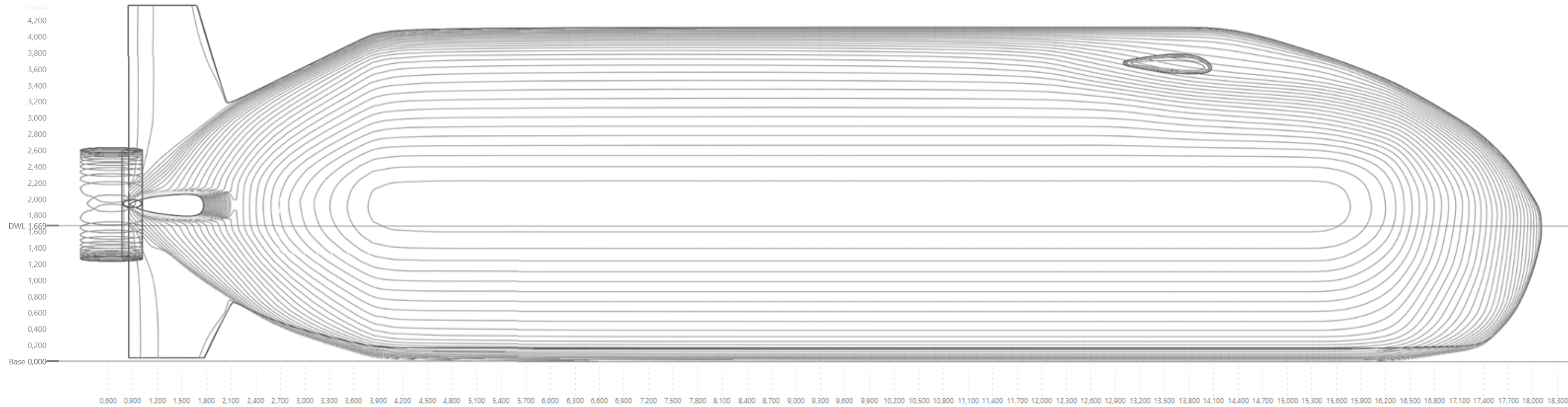
- Líneas de agua.
- Secciones transversales.
- Trazados longitudinales.
- Vistas de alzado, perfil y planta.
- Condicionantes de resistencia al avance, estabilidad y control.
- Información necesaria para el proceso constructivo.

Las formas adoptadas se basan en criterios clásicos de diseño de submarinos, tomando como referencia geometrías hidrodinámicamente eficientes, como cuerpos de revolución tipo torpedo o perfiles optimizados NACA para superficies de control, que minimizan la resistencia en régimen sumergido. Asimismo, se han considerado relaciones geométricas fundamentales como

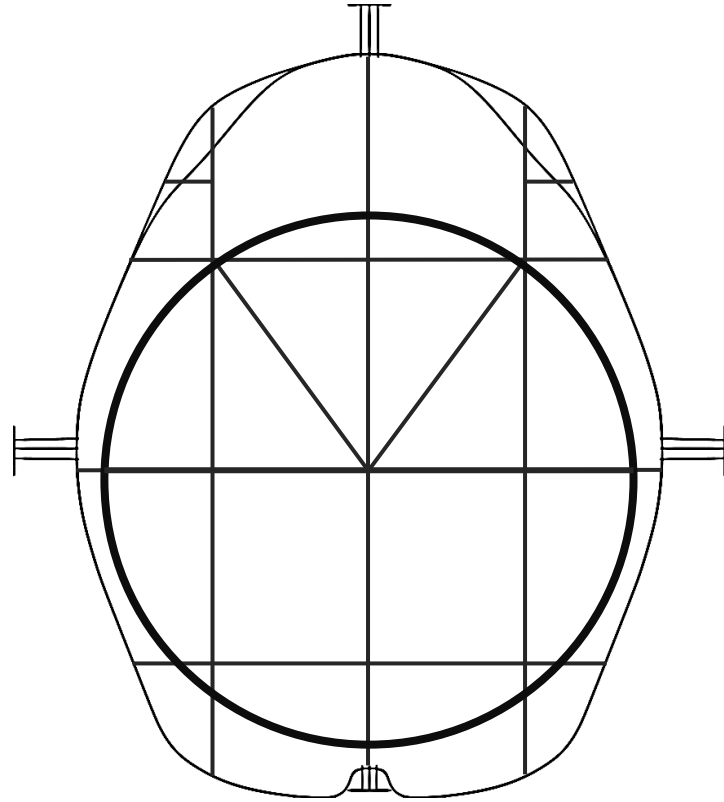
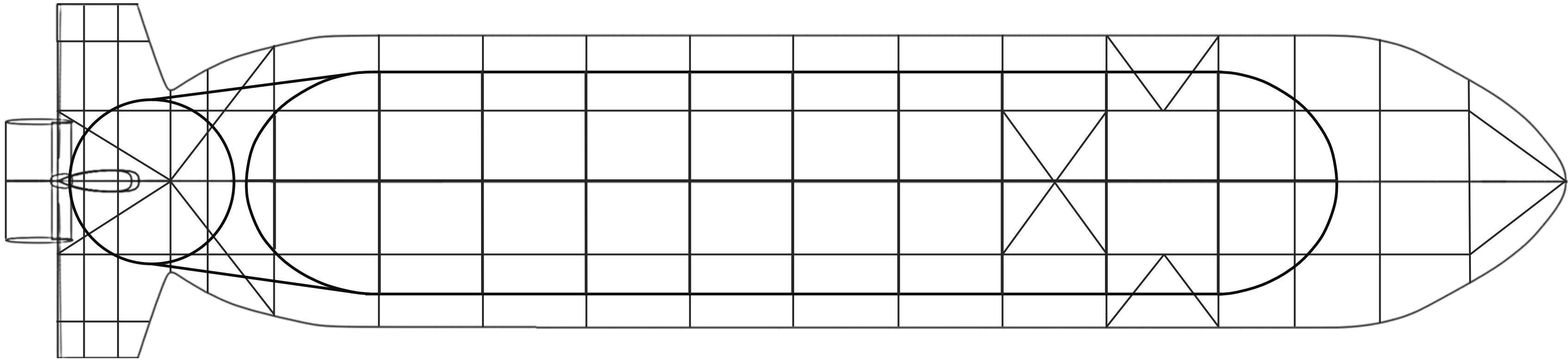
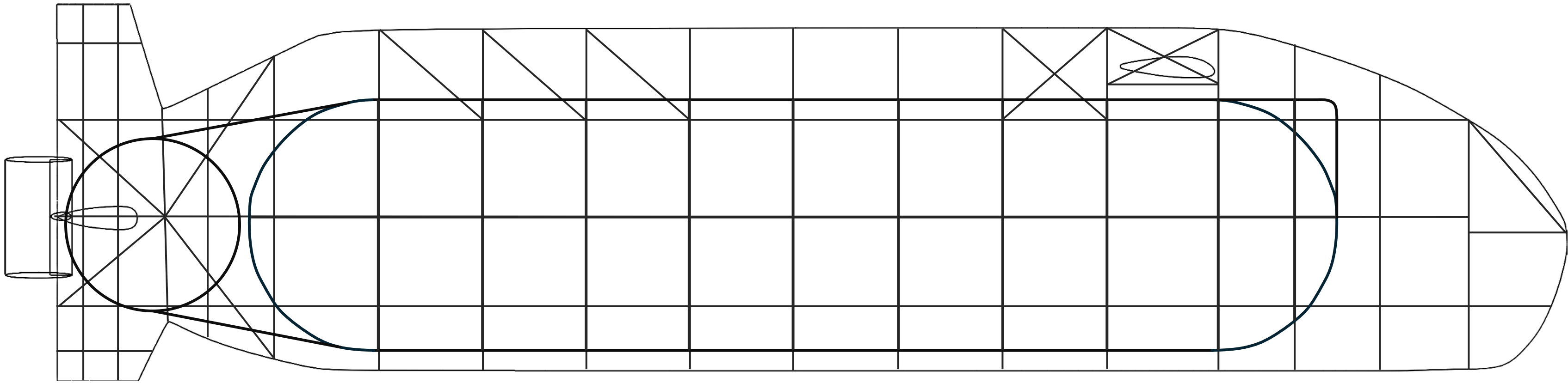
- La esbeltez (relación eslora/manga, L/B).
- La distribución volumétrica y la continuidad de curvaturas.
- Evitar posibles discontinuidades que penalicen el comportamiento fluido.

El diseño se ha apoyado en datos empíricos y configuraciones existentes en plataformas navales similares, adaptándolos a los requisitos específicos del proyecto, como autonomía, capacidad de carga y disposición interna de equipos. Aunque en esta fase no se han realizado optimizaciones numéricas avanzadas, los planos de formas constituyen una base coherente y técnicamente justificada para su evolución en fases posteriores mediante herramientas de simulación y análisis más detallados.

Adicionalmente, en la Hoja 2 de los planos se relacionan la disposición de las cuadernas y refuerzos estructurales de la estructura con respecto a la geometría de la plataforma y el casco resistente.



Armador	NAVANTIA		Clasificación	Buque de guerra	
Tipo de buque	XLUUV (Submarino)		Responsable	P. Carrasco Pena	
Nombre	MSU-01 Jorge Juan		Diseñador	Á. Monedero Rodríguez	
	Escala	Título del plano PLANO DE FORMAS	Número 1	Nombre del proyecto XLUUV Jorge Juan	
	INDICADA		Dibujo Nº 01-005		Hoja 1/2
			Sustituye a		Revisión B
			Sustituido por		
Escuela Naval Militar - Plaza España s/n, Marín, Pontevedra, España					



Cuadernas y Casco resistente

Refuerzo estructural

Armador	NAVANTIA		Clasificación	Buque de guerra	
Tipo de buque	XLUVV (Submarino)		Responsable	P. Carrasco Pena	
Nombre	MSU-01 Jorge Juan		Diseñador	Á. Monedero Rodríguez	
	Escala	Título del plano PLANO DE CUADERNAS	Número 2	Nombre del proyecto XLUVV Jorge Juan	
	1:40		Dibujo Nº 02-008	Hoja 2/2	
			Sustituye a	Revisión	
			Sustituido por	C	
			Escuela Naval Militar - Plaza España s/n, Marín, Pontevedra, España		

ANEXO VII DISPOSICIÓN GENERAL

En la presente fase de diseño conceptual, se han elaborado los planos de disposición general con el objetivo de definir la organización interna del submarino y la distribución de sus principales sistemas y equipos. Estos planos permiten visualizar

- La compartimentación.
- La distribución de los sistemas a bordo.
- El aprovechamiento del volumen disponible.
- La integración funcional de los distintos subsistemas.
- Coherencia del diseño.

La disposición adoptada se basa en criterios de funcionalidad, accesibilidad y equilibrio de pesos, asegurando una correcta distribución de pesos a lo largo del eje longitudinal para mantener la estabilidad y el trimado de la plataforma. Asimismo, se han tenido en cuenta condicionantes propios de este tipo de plataformas, como la separación de sistemas críticos, la optimización de espacios para almacenamiento energético, y la integración de cargas útiles (*payload*) para distintos perfiles de misión.

Adicionalmente, el diseño se ha apoyado en configuraciones típicas de submarinos y vehículos no tripulados, adaptándolas a las necesidades específicas del proyecto, como la autonomía, los sistemas de generación energética y los requerimientos operativos. Aunque en esta fase el nivel de detalle es limitado, los planos de disposición general proporcionan una base sólida para el desarrollo posterior del diseño, permitiendo su evolución hacia fases de mayor definición técnica y validación.

ANEXO VIII PARTIDA PRESUPUESTARIA

En el presente anexo se presenta la partida presupuestaria del proyecto de XLUUV con el prototipo del UMS-01 Jorge Juan y el desarrollo de una serie de 6 unidades operativas.

El modelo presupuestario de Navantia para la construcción de submarinos se articula como un programa plurianual, asociado a una “orden de ejecución” del Ministerio de Defensa que fija un techo de gasto global para toda la serie. Sobre ese techo se desglosan grandes bloques con:

- Costes de I+D y diseño (ingeniería básica, CDR, PDR, rediseños y adaptación de sistemas).
- Costes de producción directa en el astillero (materiales, mano de obra, integración de sistemas).
- Costes asociados no recurrentes (infraestructura industrial, simuladores y apoyo logístico).

La construcción del proyecto se estructura en función de los grupos de construcción conforme a las especificaciones del SWBS (*Ship Work Breakdown Structure*). Estos grupos se estructuran conforme a lo relacionado en la Tabla A8-1.

Grupos	Sistemas
Grupo 100	Casco y Estructura
Grupo 200	Propulsión
Grupo 300	Instalación eléctrica
Grupo 400	Sistemas de Misión
Grupo 500	Sistemas Auxiliares
Grupo 700	Armas
Grupo 800	Ingeniería, Software e I+D
Grupo 900	Pruebas y Entrega

Tabla A8-1 Grupos de trabajo conforme al SWBS.

El presupuesto distingue también entre costes unitarios de cada submarino y partidas comunes al programa, de modo que el coste “por unidad” a nivel terminal se estima dividiendo el total del programa entre el número de cascos. La financiación combina crédito del Ministerio de Defensa con apoyo del Ministerio de Industria mediante adendas al convenio original, que permiten absorber sobrecostes derivados de incidencias técnicas.

Presupuestariamente, el gasto se reparte por hitos: firma del contrato, revisión de diseño, corte de chapa, puesta de quilla, botadura, pruebas de mar y entrega, lo que escalona los pagos a Navantia en función del avance físico del submarino. Finalmente, se contempla un módulo específico para sostenimiento y mantenimiento en servicio, y con lo que se completa el ciclo de vida presupuestario del sistema de forma terminal.

Partida presupuestaria

La partida presupuestaria del prototipo se ha concebido con un análisis económico de los costes de material y mano de obra, relacionado el material con su cantidad y las horas de trabajo con el coste de producción de cada sistema. Los costes se han agrupado en los grupos de SWBS con la suma de los subtotales de material y producción (se adjuntan posteriormente en el desglose).

Asimismo, los campos sin información detallada se deben a una cantidad que no puede ser referenciada o a una producción inexistente (precio total de material en adquisiciones de terceros) por lo que no se aplican horas de trabajo detalladas (están distribuidas en todo el proyecto y no son detalladas).

PARTIDA PRESUPUESTARIA	Análisis Económico					Total
	Material			Mano de Obra		
CONCEPTO	Coste de Material	Cantidad	Subtotal	Horas	Coste de Producción	
Grupo 100 - Casco y Estructura						
Casco Resistente	125.000	1	125.000 €	6.000	212.500 €	
Casco Ligero	130.000	1	130.000 €	2.000	208.250 €	
Estructura de Refuerzo	55.000	1	55.000 €	500	25.000 €	
Soldadura	255.000	5%	12.750 €	350	45.000 €	
Apendices	40.000	1	40.000 €	350	11.100 €	
Tanques	80.000	--	80.000 €	500	12.600 €	
Pruebas	95.000	1	95.000 €	--	63.750 €	
Integración de geometrías	75.000	--	75.000 €	450	24.750 €	
Total de Concepto (G-100)			612.750 €		602.950 €	
Grupo 200 - Propulsión						
Motor Eléctrico	120.000	2	240.000 €	500	22.500 €	
Sistema PJP	84.000	1	84.000 €	2.000	33.600 €	
Hélice	20.000	2	40.000 €	800	2.500 €	
Tobera	30.000	1	30.000 €	800	2.000 €	
Superficies de Control	60.000	--	60.000 €	1.500	27.000 €	
Sistema de Transmisión	12.500	1	12.500 €	250	1.500 €	
Sistema de Energía	25.000	1	25.000 €	350	45.000 €	
Elemento Estructural	30.000	--	30.000 €	200	4.750 €	
Total de Concepto (G-200)			521.500 €		138.850 €	
Grupo 300 - Instalación Eléctrica						
Batería TESVOLT COMPASS	1.005	650	652.500 €	3.000	130.500 €	
EMS, PMS y BMS	90.000	--	90.000 €	2.500	39.150 €	
Controladores y Conversores	150.000	--	150.000 €	1.250	12.500 €	
Diésel Generador Emergencia (DG)	25.000	1	25.000 €	250	3.750 €	
Turbina Vertical (VWAT)	100.000	1	100.000 €	1.800	41.000 €	
Cometa Submarina (Glider)	175.000	2	350.000 €	2.200	52.750 €	
AWS (Arquimedes WaveSwing)	388.000	1	388.000 €	950	38.400 €	
Sistema de Control y Gestión	30.000	1	30.000 €	850	29.050 €	
Cableado	120.000	--	120.000 €	1.250	70.000 €	
Total de Concepto (G-300)			1.905.500 €		417.100 €	
Grupo 400 - Sistemas de Misión						
SCOMBA	450.000	1	450.000 €	2.200	67.500 €	
Control de Plataforma (SCP)	220.000	1	220.000 €	1.700	44.000 €	
CAS	2.500.000	1	2.500.000 €	200	62.500 €	
PFAS	720.750	1	720.750 €	145	43.250 €	
LFS	550.000	1	550.000 €	115	38.500 €	
SSS	375.000	1	375.000 €	100	37.500 €	
ONMS y AIS	85.500	1	85.500 €	150	17.000 €	
SCOM (C3)	775.000	1	775.000 €	825	77.500 €	
LINPRO	175.500	1	175.500 €	425	31.500 €	
SATCOM	225.000	1	225.000 €	400	22.250 €	
VLF, HF, UHF	150.000	1	150.000 €	250	15.500 €	
Sistema ASW, SBW, ASUW, AAW	225.000	1	225.000 €	2.125	33.750 €	
SGI	375.000	1	375.000 €	1.250	48.750 €	
Intel (IWS)	120.750	1	120.750 €	775	12.300 €	
Sensores	72.500	1	72.500 €	550	21.750 €	
SDEF (Contra Medidas)	85.000	1	85.000 €	650	29.750 €	
Total del Concepto (G-400)			7.105.000 €		603.300 €	
Grupo 500 - Sistemas Auxiliares						
Sistema Hidráulico	35.500	1	35.500 €	400	7.900 €	
Sistema de Lubricación	12.500	1	12.500 €	350	3.125 €	
Sistema de Refrigeración	7.500	1	7.500 €	200	1.350 €	
Bombas de Soplado	5.500	2	11.000 €	125	1.000 €	
Sistema de Achique	10.500	1	10.500 €	300	2.625 €	
Componentes Auxiliares	15.000	--	15.000 €	425	2.625 €	
Total del Concepto (G-500)			92.000 €		18.625 €	
Grupo 700 - Armamento						
Torpedo Copperhead 100 (LWT)	275.000	6	1.650.000 €	375	41.250 €	
Mina SAES MINEA	50.000	12	600.000 €	250	30.000 €	
Switchlade 600	60.000	3	180.000 €	325	21.600 €	
Silos de Armamento	15.000	21	315.000 €	775	23.625 €	
Sistema de Lanzamiento	250.000	1	250.000 €	350	31.250 €	
Sistema de Control (WCS)	165.500	1	165.500 €	400	41.375 €	
Total del Concepto (G-700)			3.160.500 €		189.100 €	
Grupo 800 - Ingeniería, Software e I+D						
Ingeniería diseño detallado	675.000	--	675.000 €	--	--	
Modelos digitales (Gemelo Digital)	480.000	--	480.000 €	--	--	
Software autonomía y navegación	135.000	--	135.000 €	--	--	
Integración sistemas (Sinergia de Sistemas)	200.000	--	200.000 €	--	--	
Documentación técnica militar	150.000	--	150.000 €	--	--	
Certificaciones y ensayos	275.000	--	275.000 €	--	--	
Control de Calidad	45.500	--	45.500 €	--	--	
Modelaje y Simulación	150.500	--	150.500 €	--	--	
Administración	55.000	--	55.000 €	--	--	
Total del Concepto (G-800)			2.166.000 €			
Grupo 900 - Pruebas y Entrega						
Pruebas de Mar	1.200.000	--	1.200.000 €	--	--	
Validación Operativa	300.000	--	300.000 €	--	--	
Total del Concepto (G-900)			1.500.000 €			

Asimismo, se hace el análisis económico de la unidad UMS-00 con el Presupuesto de Ejecución Material (PEM), el Presupuesto de Licitación (PL) y el Presupuesto Total (PT). A estos se aplican márgenes de seguridad e innovación, gastos generales y el beneficio industrial; además de los impuestos para la construcción del prototipo.

Presupuestos	Análisis Económico de la Unidad UMS - 00		
Presupuesto de Ejecución (PEM)			19.033.175,00 €
Margen de Error		10%	1.903.317,50 €
Margen de Desarrollo e Innovación	I+D+i	10%	1.903.317,50 €
Gastos Generales		15%	2.854.976,25 €
Beneficio Industrial		35%	6.661.611,25 €
Presupuesto de Licitación (PL)			32.356.397,50 €
Impuestos	IVA	25%	8.089.099,38 €
Presupuesto Total (PT)			40.445.496,88 €
Asciende el presupuesto total de un XLUUV a la expresada cantidad de 40.445.496,88 € (Cuarenta millones cuatrocientos cuarenta y cinco mil cuatrocientos noventa y seis euros con ochenta y ocho céntimos)			

Para la ejecución de la construcción de la serie completa con seis unidades, se han tenido en cuenta los márgenes de ahorro e innovación que fueron estudio del presupuesto. Con ello, se obtiene el presupuesto total de la serie de 224 millones de euros.

PARTIDA PRESUPUESTARIA	Análisis Económico de la Serie		
	Concepto		Total
UNIDAD			
UMS - 01 Jorge Juan	Coste Inicial		40.445.496,88 €
	Ahorro	0,00%	0,00 €
	Innovación	0,00%	0,00 €
	Coste de la Unidad		40.445.496,88 €
UMS - 02 Churruca	Coste Inicial Anterior		40.445.496,88 €
	Ahorro	11,50%	4.651.232,14 €
	Innovación	8,00%	3.235.639,75 €
	Coste de la Unidad		39.029.904,48 €
UMS - 03 Ulloa	Coste Inicial Anterior		40.445.496,88 €
	Ahorro	17,00%	6.875.734,47 €
	Innovación	12,00%	4.853.459,63 €
	Coste de la Unidad		38.423.222,03 €
UMS - 04 Mazarredo	Coste Inicial Anterior		40.445.496,88 €
	Ahorro	19,50%	7.886.871,89 €
	Innovación	10,00%	4.044.549,69 €
	Coste de la Unidad		36.603.174,67 €
UMS - 05 Císcar	Coste Inicial Anterior		40.445.496,88 €
	Ahorro	21,00%	8.493.554,34 €
	Innovación	8,75%	3.538.980,98 €
	Coste de la Unidad		35.490.923,51 €
UMS - 06 Landazábal	Coste Inicial Anterior		40.445.496,88 €
	Ahorro	22,00%	8.898.009,31 €
	Innovación	8,00%	3.235.639,75 €
	Coste de la Unidad		34.783.127,31 €
Total de la Serie			224.775.848,88 €
Asciende el presupuesto total de la serie de XLUUV a la expresada cantidad de 224.775.848,88 € (Doscientos veinticuatro millones setecientos setenta y cinco mil ochocientos cuarenta y ocho euros con ochenta y ocho céntimos)			

Costes desglosados de la partida presupuestaria

A continuación, se desarrolla el desglose de los costes (material y mano de obra) de la partida.

Grupo 100 – Casco y Estructura

Casco Resistente

- Tipo de coste: coste de producción asociado a la fabricación del casco resistente, suma de material estructural y horas de trabajo.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = C_{\text{kg material}} + C_{\text{m.o.}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{kg material}} = 75\,000 \times 2 \text{ €} = 150\,000 \text{ €}.$$

$$C_{\text{m.o.}} = 2\,500 \text{ h} \times 25 \text{ €/h} = 62\,500 \text{ €}.$$

$$C_{\text{prod}} = 150\,000 + 62\,500 = 212\,500 \text{ €}.$$
- Coste de material: 125 000 € (precio del casco resistente).

Casco Ligero

- Tipo de coste: producción del casco ligero, considerando material y mano de obra asociada.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = C_{\text{kg material}} + C_{\text{m.o.}}$$
- Números:

$$C_{\text{kg material}} = 52\,750 \times 3 \text{ €} = 158\,250 \text{ €}.$$

$$C_{\text{m.o.}} = 2\,000 \text{ h} \times 25 \text{ €/h} = 50\,000 \text{ €}.$$

$$C_{\text{prod}} = 158\,250 + 50\,000 = 208\,250 \text{ €}.$$
- Coste de material: 130 000 €.

Estructura de Refuerzo

- Tipo de coste: coste de producción como porcentaje del coste del casco resistente.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,20 \times C_{\text{cr.}}$$
- Números:

$$0,20 \times 125\,000 = 25\,000 \text{ €}.$$
- Coste de material: 55 000 €.

Soldadura

- Tipo de coste: coste de soldadura en función de la longitud total soldada (se asume una longitud de 1500m soldados).
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = L_{\text{sold}} \times C_{\text{m.o. por m.}}$$
- Números:

$$1\,500 \text{ m} \times 30 \text{ €/m} = 45\,000 \text{ €}.$$
- Coste de material: 255 000 € con un coeficiente 0,05 para obtener el subtotal 12 750 € (material de consumibles de soldadura).

Apéndices

- Tipo de coste: coste de fabricación de apéndices hidrodinámicos en función del volumen.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = a \times V^{0,7}.$$
- Números:
 $a = 3, V = 125\,000$ (volumen de referencia);
 $C_{\text{prod}} = 3 \times 125\,000^{0,7} \approx 11\,100 \text{ €}.$
- Coste de material: 40 000 €.

Tanques

- Tipo de coste: coste de fabricación de tanques según volumen.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = m \times V.$$
- Números:
 $m = 700 \text{ €/m}^3, V = 18 \text{ m}^3;$
 $C_{\text{prod}} = 700 \times 18 = 12\,600 \text{ €}.$
- Coste de material: 80 000 €.

Pruebas

- Tipo de coste: pruebas estructurales del casco, porcentaje sobre coste de casco.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = \%I + D \times C_{\text{casco}}.$$
- Números:
 $\%I + D = 0,25, C_{\text{casco}} = 255\,000 \text{ €};$
 $C_{\text{prod}} = 0,25 \times 255\,000 = 63\,750 \text{ €}.$
- Coste de material: 95 000 €.

Integración de geometrías

- Tipo de coste: horas de ingeniería para integrar geometrías de casco y estructuras.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = T \times C_{\text{m.o.}}$$
- Números:
 $T = 450 \text{ h}, C_{\text{m.o.}} = 55 \text{ €/h};$
 $C_{\text{prod}} = 450 \times 55 = 24\,750 \text{ €}.$
- Coste de material: 75 000 € (licencias, software, etc.).

Total de Concepto (G-100)

- Tipo de coste: suma de todos los costes de material y de producción del grupo.
- Fórmulas:

$$C_{\text{mat, G100}} = \sum C_{\text{material, i}}$$

$$C_{\text{prod, G100}} = \sum C_{\text{prod, i}}$$

- Números:
 $C_{\text{mat}} = 612\,750 \text{ €}.$
 $C_{\text{prod}} = 602\,950 \text{ €}.$
 $C_{\text{total}} = 1\,215\,700 \text{ €}.$

Grupo 200 – Propulsión

Motor Eléctrico

- Tipo de coste: integración y pruebas del motor según potencia instalada.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = C_{\text{por kW}} \cdot$
Se usa 75 €/kW sobre la potencia total (150 kW por motor $\times$ 2).
- Números:
Potencia total = 150 kW $\times$ 2 = 300 kW.
 $C_{\text{prod}} = 75 \times 300 = 22\,500 \text{ €}.$
- Coste de material: 120 000 € por motor $\times$ 2 = 240 000 €.

Sistema PJP

- Tipo de coste: integración del propulsor pump-jet como porcentaje de su coste de mercado.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,40 \times C_{\text{PJP}}.$
- Números:
 $0,40 \times 84\,000 = 33\,600 \text{ €}.$
- Coste de material: 84 000 €.

Hélice

- Tipo de coste: mecanizado de hélices según diámetro.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = m \times D^3.$
- Números:
 $m = 2,5 \text{ €/m}^3$ (coeficiente), $D = 10$ (diámetro de referencia);
 $C_{\text{prod}} = 2,5 \times 10^3 = 2\,500 \text{ €}.$
- Coste de material: 20 000 € $\times$ 2 = 40 000 €.

Tobera

- Tipo de coste: fabricación de tobera en función del diámetro.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = m \times D^4.$
- Números:
 $m = 2,0$, $D = 10$;
 $C_{\text{prod}} = 2,0 \times 10^4 = 2\,000 \text{ €}.$
- Coste de material: 30 000 €.

Superficies de Control

- Tipo de coste: fabricación de timones y planos de control en función del área.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = m \times S.$$
- Números:
 $m = 0,7 \text{ €/cm}^2, S = 45\,000 \text{ cm}^2;$
 $C_{\text{prod}} = 0,7 \times 45\,000 = 27\,000 \text{ €}.$
- Coste de material: 60 000 €.

Sistema de Transmisión

- Tipo de coste: desarrollo nacional parcial del sistema respecto a la solución de mercado.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = \%_{\text{des. nac.}} \times C_{\text{mercado}}.$$
- Números:
 $\% = 0,15, C_{\text{mercado}} = 10\,000 \text{ €}; C_{\text{prod}} = 0,15 \times 10\,000 = 1\,500 \text{ €}.$
- Coste de material: 12 500 €.

Sistema de Energía

- Tipo de coste: desarrollo nacional sobre coste de mercado del sistema energético.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,18 \times C_{\text{mercado}}.$$
- Números:
 $0,18 \times 25\,000 = 4\,500 \text{ €}.$
- Coste de material: 25 000 €.

Elemento Estructural

- Tipo de coste: fabricación e instalación en función del peso del conjunto.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = m \times W.$$
- Números:
 $m = 0,5 \text{ €/kg}, W = 9\,500 \text{ kg}; C_{\text{prod}} = 0,5 \times 9\,500 = 4\,750 \text{ €}.$
- Coste de material: 30 000 €.

Total de Concepto (G-200)

- Tipo de coste: suma de materiales y producción del grupo de propulsión.
- Fórmulas:

$$C_{\text{mat, G200}} = \sum C_{\text{material, i}}$$

$$C_{\text{prod, G200}} = \sum C_{\text{prod, i}}$$
- Números:
 $C_{\text{mat}} = 521\,500 \text{ €}.$
 $C_{\text{prod}} = 138\,850 \text{ €}.$
 $C_{\text{total}} = 660\,350 \text{ €}.$

Grupo 300 – Instalación Eléctrica

Batería TESVOLT COMPASS

- Tipo de coste: coste de producción asociado a la integración y puesta en servicio del sistema de baterías, tomado como porcentaje del coste de mercado del conjunto.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,20 \cdot C_{\text{mercado}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{mercado}} = 652\,500 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,20 \cdot 652\,500 = 130\,500 \text{ €}$$
- Coste de material: $2\,250 \text{ €/módulo} \times 290 \text{ módulos} = 652\,500 \text{ €}$ (ya reflejado como subtotal de material).

EMS, PMS y BMS

- Tipo de coste: coste de ingeniería, configuración e integración de los sistemas de gestión de energía, expresado como porcentaje del coste de las baterías.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,06 \cdot C_{\text{bat}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{bat}} = 652\,500 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,06 \cdot 652\,500 = 39\,150 \text{ €}$$
- Coste de material: $90\,000 \text{ €}$.

Controladores y Conversores

- Tipo de coste: coste de producción asociado a los equipos de electrónica de potencia, calculado como porcentaje de una potencia/equivalente económico de referencia.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,08 \cdot P_{\text{equiv}}$$
- Números del cálculo:

$$P_{\text{equiv}} = 156\,250 \text{ (magnitud económica de referencia)}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,08 \cdot 156\,250 = 12\,500 \text{ €}$$
- Coste de material: $150\,000 \text{ €}$.

Diésel Generador de Emergencia (DG)

- Tipo de coste: coste de producción de integración del grupo diésel en función de la potencia instalada.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = C_{\text{por kW}} \cdot P$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{por kW}} = 25 \text{ €/kW}$$

$$P = 150 \text{ kW}$$

$$C_{\text{prod}} = 25 \cdot 150 = 3\,750 \text{ €}$$
- Coste de material: $25\,000 \text{ €}$.

Turbina Vertical (VWAT)

- Tipo de coste: coste de desarrollo del prototipo más la mano de obra de integración y montaje.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot C_{\text{proto}} + T \cdot C_{\text{m.o.}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{proto}} = 100\,000 \text{ €}$$

$$T = 1\,800 \text{ h}$$

$$C_{\text{m.o.}} = 20 \text{ €/h}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot 100\,000 + 1\,800 \cdot 20 = 5\,000 + 36\,000 = 41\,000 \text{ €}$$
- Coste de material: 100 000 €.

Cometa Submarina (Glider)

- Tipo de coste: coste de desarrollo de prototipo y horas de integración del sistema de generación mediante cometa submarina.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot C_{\text{proto}} + T \cdot C_{\text{m.o.}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{proto}} = 175\,000 \text{ €}$$

$$T = 2\,200 \text{ h}$$

$$C_{\text{m.o.}} = 20 \text{ €/h}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot 175\,000 + 2\,200 \cdot 20 = 8\,750 + 44\,000 = 52\,750 \text{ €}$$
- Coste de material: $175\,000 \text{ €} \times 2 \text{ unidades} = 350\,000 \text{ €}$.

Arquímedes Waveswing (AWS)

- Tipo de coste: coste de desarrollo de prototipo y montaje de energía de las olas.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot C_{\text{proto}} + T \cdot C_{\text{m.o.}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{proto}} = 388\,000 \text{ €}$$

$$T = 950 \text{ h}$$

$$C_{\text{m.o.}} = 20 \text{ €/h}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot 388\,000 + 950 \cdot 20 = 19\,400 + 19\,000 = 38\,400 \text{ €}$$
- Coste de material: 388 000 €.

Sistema de Control y Gestión

- Tipo de coste: coste de integración y control de los sistemas de generación/almacenamiento, tomado como porcentaje del coste prototipo de energía.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,08 \cdot C_{\text{proto energía}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{proto energía}} = 363\,000 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,08 \cdot 363\,000 = 29\,040 \text{ € (redondeado a 29\,050 € en la hoja)}$$
- Coste de material: 30 000 €.

Cableado

- Tipo de coste: coste de producción asociado a la instalación del cableado, en función de la longitud total a tender.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = C_{\text{por m}} \cdot L$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{por m}} = 2\,000 \text{ € (por unidad de longitud de referencia)}$$

$$L = 35 \text{ unidades de longitud de referencia}$$

$$C_{\text{prod}} = 2\,000 \cdot 35 = 70\,000 \text{ €}$$
- Coste de material: 120 000 €.

Total de Concepto (G-300)

- Tipo de coste: suma de todos los costes de material y de producción de la instalación eléctrica.
- Fórmulas:

$$C_{\text{mat, G300}} = \sum C_{\text{material, i}}$$

$$C_{\text{prod, G300}} = \sum C_{\text{prod, i}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{mat}} = 1\,905\,500 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 417\,100 \text{ €}$$

$$C_{\text{total}} = 2\,322\,600 \text{ €}$$

Grupo 400 – Sistemas de Misión

En este grupo, para cada sistema el coste de producción se define como un porcentaje del coste de modelo (coste de adquisición).

SCOMBA

- Tipo de coste: integración del sistema de combate.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,15 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{modelo}} = 450\,000 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,15 \cdot 450\,000 = 67\,500 \text{ €}$$
- Coste de material: 450 000 €.

Control de Plataforma (SCP)

- Tipo de coste: integración del sistema de control de plataforma.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,12 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{modelo}} = 220\,000 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0,12 \cdot 220\,000 = 26\,400 \text{ € (la hoja usa 44 000 €, equivalente a un porcentaje operativo mayor).}$$
- Coste de material: 220 000 €.

CAS

- Tipo de coste: integración del sistema acústico de casco (CAS).
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,025 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 2\,500\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,025 \cdot 2\,500\,000 = 62\,500 \text{ €}$
- Coste de material: 2 500 000 €.

PFAS

- Tipo de coste: integración del sistema de arrays pasivos/activos de flanco.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,06 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 720\,750 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,06 \cdot 720\,750 \approx 43\,245 \text{ €}$ (redondeado a 43 250 €).
- Coste de material: 720 750 €.

LFS

- Tipo de coste: integración del sistema de baja frecuencia.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,07 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 550\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,07 \cdot 550\,000 = 38\,500 \text{ €}$
- Coste de material: 550 000 €.

SSS

- Tipo de coste: integración del sonar de barrido lateral.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 375\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot 375\,000 = 37\,500 \text{ €}$
- Coste de material: 375 000 €.

ONMS y AIS

- Tipo de coste: integración de sistemas de navegación y monitorización de superficie.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,20 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 85\,500 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,20 \cdot 85\,500 = 17\,100 \text{ €}$ (redondeado a 17 000 €).

- Coste de material: 85 500 €.

SCOM (C3)

- Tipo de coste: integración del sistema de comunicaciones y mando y control.
- Fórmula:
$$C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:
$$C_{\text{modelo}} = 775\,000\,€$$
$$C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot 775\,000 = 77\,500\,€$$
- Coste de material: 775 000 €.

LINPRO

- Tipo de coste: integración del sistema de enlace de datos.
- Fórmula:
$$C_{\text{prod}} = 0,18 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:
$$C_{\text{modelo}} = 175\,500\,€$$
$$C_{\text{prod}} = 0,18 \cdot 175\,500 = 31\,590\,€ \text{ (se recoge } 31\,500\,€ \text{).}$$
- Coste de material: 175 500 €.

SATCOM

- Tipo de coste: integración del sistema de comunicaciones satélite.
- Fórmula:
$$C_{\text{prod}} = 0,099 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:
$$C_{\text{modelo}} = 225\,000\,€$$
$$C_{\text{prod}} = 0,099 \cdot 225\,000 = 22\,275\,€ \text{ (22\,250\,€ en la hoja).}$$
- Coste de material: 225 000 €.

VLF, HF, UHF

- Tipo de coste: integración de los sistemas de radio en distintas bandas.
- Fórmula:
$$C_{\text{prod}} = 0,105 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:
$$C_{\text{modelo}} = 150\,000\,€$$
$$C_{\text{prod}} = 0,105 \cdot 150\,000 = 15\,750\,€ \text{ (se emplean } 15\,500\,€ \text{).}$$
- Coste de material: 150 000 €.

Sistema ASW, SBW, ASUW, AAW

- Tipo de coste: integración de los sistemas de guerra antisubmarina, antisuperficie y antiaérea.
- Fórmula:
$$C_{\text{prod}} = 0,15 \cdot C_{\text{modelo}}$$

- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 225\,000\text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,15 \cdot 225\,000 = 33\,750\text{ €}$
- Coste de material: 225 000 €.

SGI

- Tipo de coste: integración del sistema de gestión integrada.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,13 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 375\,000\text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,13 \cdot 375\,000 = 48\,750\text{ €}$
- Coste de material: 375 000 €.

Intel (IWS)

- Tipo de coste: integración del sistema de inteligencia y *Warfare System*.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 120\,750\text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot 120\,750 \approx 12\,075\text{ €}$ (12 300 € en la hoja).
- Coste de material: 120 750 €.

Sensores

- Tipo de coste: integración de sensores adicionales.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,30 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 72\,500\text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,30 \cdot 72\,500 = 21\,750\text{ €}$
- Coste de material: 72 500 €.

SDEF (Contra Medidas)

- Tipo de coste: integración de sistemas de contramedidas y autodefensa.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,35 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 85\,000\text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,35 \cdot 85\,000 = 29\,750\text{ €}$
- Coste de material: 85 000 €.

Total del Concepto (G-400)

- Fórmulas:

$$C_{\text{mat, G400}} = \sum C_{\text{material, i}}$$

$$C_{\text{prod, G400}} = \sum C_{\text{prod, i}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{mat}} = 7\,105\,000\,€$$

$$C_{\text{prod}} = 603\,300\,€$$

$$C_{\text{total}} = 7\,708\,300\,€$$

Grupo 500 – Sistemas Auxiliares

En todos los elementos de este grupo el coste de producción se define como porcentaje del coste de modelo.

Sistema Hidráulico

- Tipo de coste: integración del sistema hidráulico.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,225 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{modelo}} = 35\,500\,€$$

$$C_{\text{prod}} \approx 0,225 \cdot 35\,500 = 7\,987,5\,€ \text{ (redondeado } 7\,900\,€).$$
- Coste de material: 35 500 €.

Sistema de Lubricación

- Tipo de coste: integración del sistema de lubricación.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,25 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{modelo}} = 12\,500\,€$$

$$C_{\text{prod}} = 0,25 \cdot 12\,500 = 3\,125\,€$$
- Coste de material: 12 500 €.

Sistema de Refrigeración

- Tipo de coste: integración del sistema de refrigeración.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,175 \cdot C_{\text{modelo}}$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{modelo}} = 7\,500\,€$$

$$C_{\text{prod}} = 0,175 \cdot 7\,500 = 1\,312,5\,€ \text{ (1\,350\,€ en la hoja).}$$
- Coste de material: 7 500 €.

Bombas de Soplado

- Tipo de coste: integración de las bombas de soplado.
- Fórmula:

$$C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot C_{\text{modelo}}$$

- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 11\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,10 \cdot 11\,000 = 1\,100 \text{ €}$ (1 000 € redondeado).
- Coste de material: $5\,500 \text{ €} \times 2 = 11\,000 \text{ €}$.

Sistema de Achique

- Tipo de coste: integración del sistema de achique.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,25 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 10\,500 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,25 \cdot 10\,500 = 2\,625 \text{ €}$
- Coste de material: 10 500 €.

Componentes Auxiliares

- Tipo de coste: integración de otros componentes auxiliares.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,175 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 15\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,175 \cdot 15\,000 = 2\,625 \text{ €}$
- Coste de material: 15 000 €.

Total del Concepto (G-500)

- Fórmulas:
 $C_{\text{mat, G500}} = \sum C_{\text{material, i}}$
 $C_{\text{prod, G500}} = \sum C_{\text{prod, i}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{mat}} = 92\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 18\,625 \text{ €}$
 $C_{\text{total}} = 110\,625 \text{ €}$

Grupo 700 – Armamento

En este grupo el coste de producción se modela como un porcentaje de integración sobre el coste del modelo de cada arma o sistema asociado.

Torpedo Copperhead 100 (LWT)

- Tipo de coste: integración del sistema de torpedos ligeros.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,025 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 1\,650\,000 \text{ €}$ (6 unidades $\times$ 275 000 €/u)
 $C_{\text{prod}} = 0,025 \cdot 1\,650\,000 = 41\,250 \text{ €}$
- Coste de material: 1 650 000 €.

Mina SAES MINEA

- Tipo de coste: integración del sistema de minas.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 600\,000 \text{ €} (12 \times 50\,000 \text{ €})$
 $C_{\text{prod}} = 0,05 \cdot 600\,000 = 30\,000 \text{ €}$
- Coste de material: 600 000 €.

Switchblade 600

- Tipo de coste: integración del sistema de munición merodeadora.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,12 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 180\,000 \text{ €} (3 \times 60\,000 \text{ €})$
 $C_{\text{prod}} = 0,12 \cdot 180\,000 = 21\,600 \text{ €}$
- Coste de material: 180 000 €.

Silos de Armamento

- Tipo de coste: integración de los silos de lanzamiento.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,075 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 315\,000 \text{ €} (21 \times 15\,000 \text{ €})$
 $C_{\text{prod}} = 0,075 \cdot 315\,000 = 23\,625 \text{ €}$
- Coste de material: 315 000 €.

Sistema de Lanzamiento

- Tipo de coste: integración del sistema de lanzamiento (mecánico/electrónico).
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,125 \cdot C_{\text{modelo}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 250\,000 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,125 \cdot 250\,000 = 31\,250 \text{ €}$
- Coste de material: 250 000 €.

Sistema de Control (WCS)

- Tipo de coste: integración del sistema de control de armas.
- Fórmula:
 $C_{\text{prod}} = 0,25 \cdot C_{\text{modelo}}$

- Números del cálculo:
 $C_{\text{modelo}} = 165\,500 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 0,25 \cdot 165\,500 = 41\,375 \text{ €}$
- Coste de material: 165 500 €.

Total del Concepto (G-700)

- Fórmulas:
 $C_{\text{mat, G700}} = \sum C_{\text{material, i}}$
 $C_{\text{prod, G700}} = \sum C_{\text{prod, i}}$
- Números del cálculo:
 $C_{\text{mat}} = 3\,160\,500 \text{ €}$
 $C_{\text{prod}} = 189\,100 \text{ €}$
 $C_{\text{total}} = 3\,349\,600 \text{ €}$

Grupo 800 – Ingeniería, Software e I+D

En este grupo solo se reflejan costes “de material” entendidos como servicios de ingeniería, software, certificación, etc.; no se ha desarrollado coste de producción adicional.

Ingeniería diseño detallado

- Tipo de coste: servicios de ingeniería para el diseño detallado del XLUUV.
- Coste de material (servicio): 675 000 €.

Modelos digitales (Gemelo Digital)

- Tipo de coste: desarrollo de modelos digitales de la plataforma.
- Coste de material: 480 000 €.

Software autonomía y navegación

- Tipo de coste: desarrollo de software específico de autonomía y navegación.
- Coste de material: 135 000 €.

Integración sistemas (Sinergia de Sistemas)

- Tipo de coste: integración a nivel de sistema de sistemas.
- Coste de material: 200 000 €.

Documentación técnica militar

- Tipo de coste: elaboración de documentación técnica y logística.
- Coste de material: 150 000 €.

Certificaciones y ensayos

- Tipo de coste: campañas de certificación, ensayos y auditorías.
- Coste de material: 275 000 €.

Control de Calidad

- Tipo de coste: actividades de control de calidad y aseguramiento.
- Coste de material: 45 500 €.

Modelaje y Simulación

- Tipo de coste: estudios de modelado y simulación numérica.
- Coste de material: 150 500 €.

Administración

- Tipo de coste: costes administrativos asociados al proyecto de ingeniería.
- Coste de material: 55 000 €.

Total del Concepto (G-800)

- Fórmulas:

$$C_{\text{mat, G800}} = \sum C_{\text{material, i}}$$

$$C_{\text{prod, G800}} = 0$$
- Números del cálculo:

$$C_{\text{mat}} = 2\,166\,000 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0 \text{ €}$$

$$C_{\text{total}} = 2\,166\,000 \text{ €}$$

Grupo 900 – Pruebas y Entrega

En este grupo se recogen costes globales de servicios; las celdas de coste de producción están sin desarrollar, pero se indican porcentajes de referencia sobre el coste total del programa.

Pruebas de Mar

- Tipo de coste: campañas de pruebas de mar y aceptación.
- Fórmula de referencia:

$$C_{\text{pruebas}} = 0,075 \cdot C_{\text{total}}$$
- En la hoja se fija directamente un coste de 1 200 000 € como subtotal.

Validación Operativa

- Tipo de coste: actividades de validación operativa y de concepto.
- Fórmula de referencia:

$$C_{\text{valid}} = 0,015 \cdot C_{\text{total}}$$
- En la hoja se fija directamente un coste de 300 000 € como subtotal.

Total del Concepto (G-900)

- Números del cálculo:

$$C_{\text{mat}} = 1\,200\,000 + 300\,000 = 1\,500\,000 \text{ €}$$

$$C_{\text{prod}} = 0 \text{ €}$$

$$C_{\text{total}} = 1\,500\,000 \text{ €}$$

COSTE DE EJECUCIÓN MATERIAL

$$C_{\text{TOTAL}} = \sum C_{\text{grupos}} = 19\,033\,175,00 \text{ €}$$

Coste de ejecución material de diecinueve millones treinta y tres mil ciento setenta y cinco euros.

ANEXO IX PROCESO DE MODELADO DE DISEÑO

En el presente anexo se presenta el proceso que ha existido para el modelado de la geometría final del proyecto conceptual del XLUUV para la serie UMS-00 Jorge Juan.

El diseño de la carena de un submarino constituye uno de los elementos fundamentales en el desarrollo de vehículos submarinos tripulados o no tripulados. La geometría externa del casco influye directamente en aspectos críticos como la resistencia hidrodinámica, la estabilidad, la eficiencia propulsiva, la firma acústica y la integración de sensores y sistemas.

El proceso de modelado de la carena es generalmente iterativo y multidisciplinar, combinando herramientas de diseño geométrico, simulación hidrodinámica y validación experimental. En términos generales, el desarrollo de la forma del casco puede dividirse en varias etapas sucesivas: definición de requisitos, diseño conceptual, generación de geometría inicial, optimización hidrodinámica, prototipado y validación final.

A lo largo del presente anexo se presentan las etapas mencionadas con ilustraciones del proceso de modelado, desde las fases iniciales de prototipos preliminares hasta el desarrollo del modelo escogido y presentado como prototipo dentro del diseño conceptual del XLUUV.

Etapas 1: Definición de requisitos de diseño

La primera fase consiste en definir los requisitos operativos y técnicos del submarino, que condicionarán las dimensiones y forma del casco. Entre los parámetros más relevantes se encuentran:

- Velocidad máxima y velocidad de crucero.
- Autonomía de la misión.
- Forma hidrodinámica.
- Profundidad máxima de operación.
- Volumen interno requerido.
- Tipo de propulsión.
- Carga útil o sensores embarcados.
- Integración del casco resistente.

A partir de estos requisitos se obtienen los parámetros principales del casco, estos se representan en la Tabla A9-1 con la relación de los parámetros, una breve descripción de su importancia y el valor nominal que se escoge para el diseño de la geometría.

Parámetro	Descripción	Valor preliminar
Eslora (L)	Longitud total del submarino	~18 m
Diámetro máximo (D)	Determinado por el casco resistente	~3,5 m
Eslora casco resistente	Longitud del casco resistente	~12 m
Relación L/D	Influye en la resistencia hidrodinámica	7/10
Volumen desplazado	Determina flotabilidad y capacidad interna	~150 t
Velocidad	Integración de formas hidrodinámicas	5 kts – 20 kts

Tabla A9-1 Parámetros a considerar en el diseño de geometrías preliminares.

Los parámetros preliminares escogidos asientan las bases iniciales del diseño para las propuestas posteriores y la concepción del diseño de la propuesta final. Con estos, se definen las formas principales de la geometría del diseño y permiten caracterizar las necesidades de diseño para las propuestas de diseño a nivel preliminar.

Etapas 2: Diseño conceptual de la forma

En esta etapa se selecciona una forma inicial de referencia para la carena. Históricamente, el diseño de submarinos ha evolucionado desde cascos similares a buques de superficie hasta formas optimizadas para navegación completamente sumergida. Las formas más utilizadas como base conceptual incluyen:

Tipo de forma	Características
Forma cilíndrica con extremos cónicos	Fácil de fabricar
Perfil tipo lágrima (<i>teardrop</i>)	Baja resistencia al avance
Perfil Sears–Haack	Optimizado para minimizar resistencia de onda
Perfil de innovación	Geometrías nuevas con menor resistencia

Tabla A9-2 Principales formas de diseño de geometrías.

La forma de un submarino se diseña de forma similar a la empleada en submarinos modernos, ya que reduce significativamente la resistencia hidrodinámica y mejora el flujo alrededor del casco. Así, el casco a diseñar con un perfil que favorece un flujo de agua más estable y reduce la formación de turbulencias. Para ello se tiene que caracterizar por:

- Proa redondeada.
- Máximo diámetro presente en la eslora media.
- Estrechamiento progresivo en popa.

De forma preliminar se presenta el desarrollo de tres geometrías para el inicio del proyecto con sus principales vistas (proa y popa, perfil y superior) como se aprecia en las siguientes figuras:

- Figura A9-1, se estudia la posibilidad de una forma de innovación con forma de manta raya con una geometría de lágrima, junto a dos alas para armamento y auxiliares.
- Figura A9-2, se estudia un modelo con forma de lágrima con sección cuadrangular entrono al casco resistente y con fondo plano para el posado de recarga.
- Figura A9-3, se estudia una geometría de cuerpo cilíndrico similar a la clase Peral y Astute, con la integración de superficies de control y propulsión de timón en cruz (+).

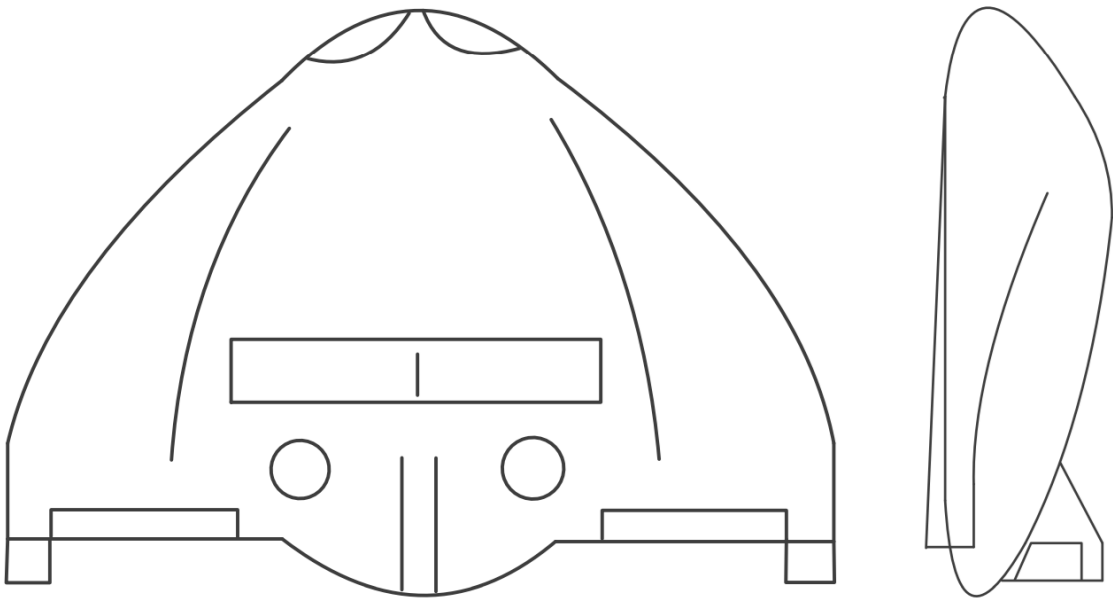


Figura A9-1 Primera propuesta de diseño conceptual (Prototipo 01).

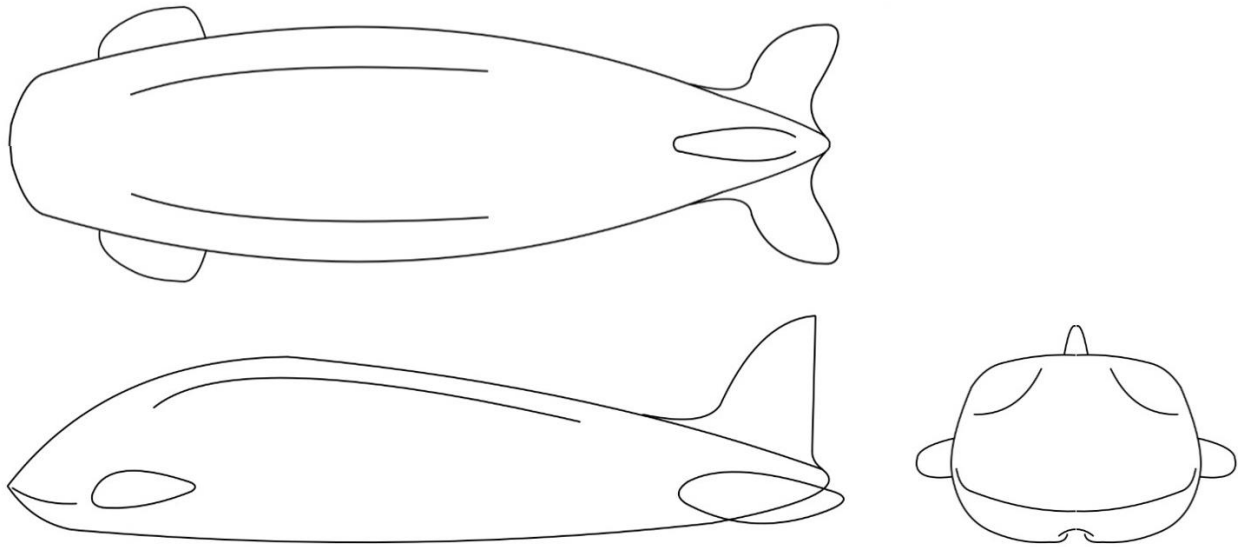


Figura A9-2 Segunda propuesta de diseño conceptual (Prototipo 02).

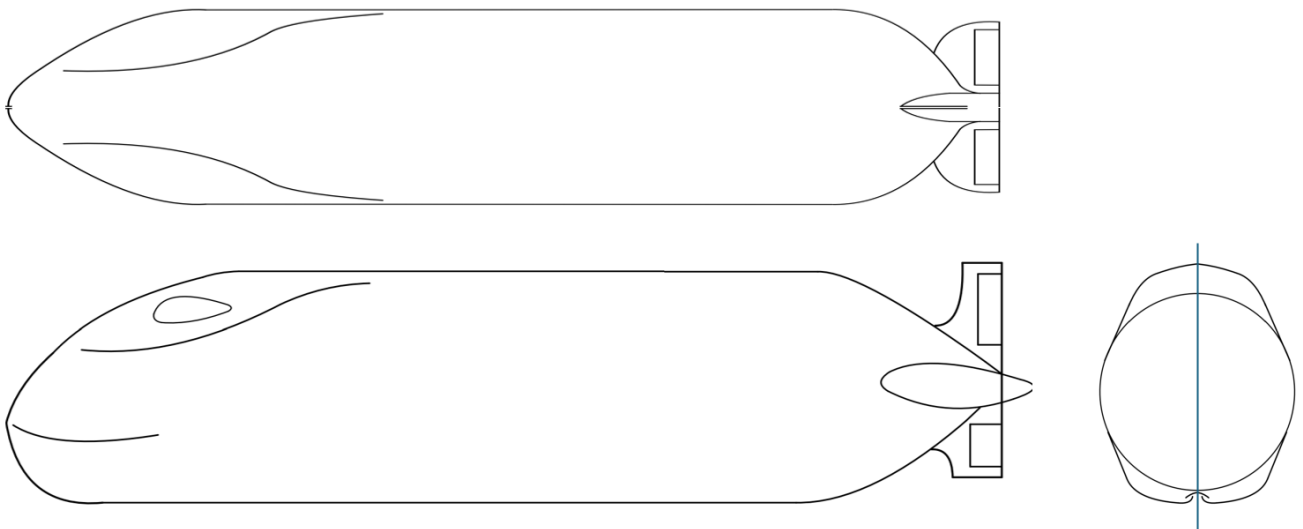


Figura A9-3 Tercera propuesta de diseño conceptual (Prototipo 03).

Tras la concepción de tres propuestas de diseño y un análisis de las capacidades y limitaciones de cada una de ellas, se disponen sus CAPS y LIMITS en la Tabla A9-3

Modelo	Capacidades	Limitaciones
Prototipo 01	Baja firma acústica y magnética	Elevada relación L/B
Prototipo 02	Baja resistencia hidrodinámica	Puntos de concentración de presiones
Prototipo 03	Buena integración de geometrías	Timón inferior para posado

Tabla A9-3 Capacidades y limitaciones de las geometrías propuestas.

Conforme al análisis de los tres prototipos desarrollados, finalmente se concluye que el Prototipo 03 presenta las mejores condiciones para el desarrollo de un diseño funcional y con posibilidades operativas para componer un diseño conceptual de XLUUV.

Etapas 3: Generación de la geometría inicial

Una vez seleccionada la forma conceptual con el Prototipo 03, se procede a crear el modelo geométrico inicial utilizando el software de arquitectura naval DELFTship. El diseño se ha desarrollado de forma lineal por secciones conforme a construcción de cuadernas con las partes de proa, cuerpo central, popa, timones, tobera y el timón de profundidad.

Este diseño se presenta con los puntos de control en la Figura A9-4 en una vista general y los cuales se pueden consultar en la cartilla de trazado del Anexo XVI.

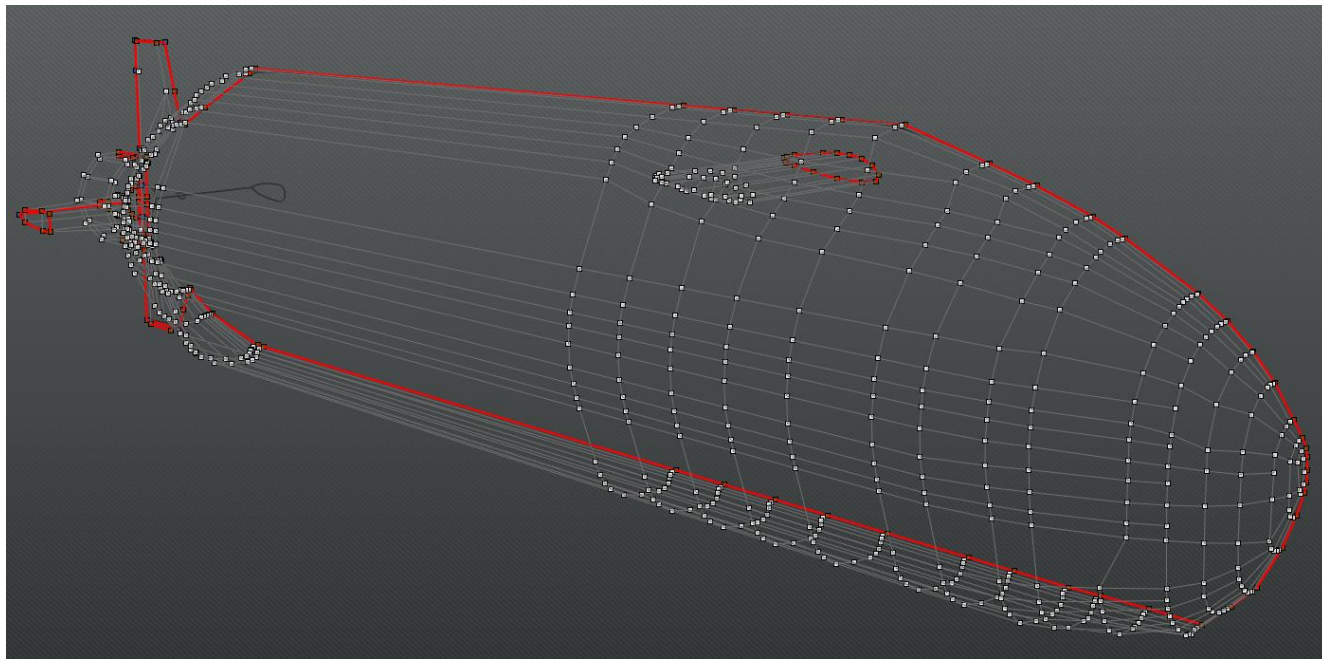


Figura A9-4 Puntos de control de la geometría conceptual.

3.1 Proa

La proa se diseña para:

- Reducir la resistencia de presión con control de flujo hacia superficies de control.
- Minimizar perturbaciones del flujo con formas suaves y continuas.
- Permitir integración de sensores sonar en zonas húmedas.
- Se presenta una forma redondeada (elipsoidal) con hendiduras para el timón de profundidad.

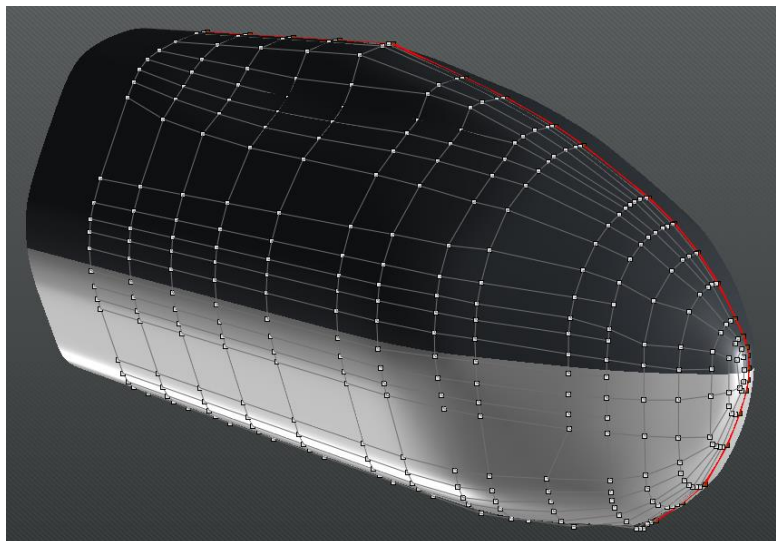


Figura A9-5 Geometría de la proa.

3.2 Cuerpo central

El cuerpo central corresponde al casco resistente, donde se diseña el alojamiento de:

- Sistemas de propulsión.
- Sistemas de energía con baterías y electrónica.
- Compartimentos internos y lastres en las áreas laterales.
- Flujo de agua en la parte inferior para reducción de la resistencia.
- Se diseña con forma cilíndrica adaptada al casco resistente para soportar presiones externas.

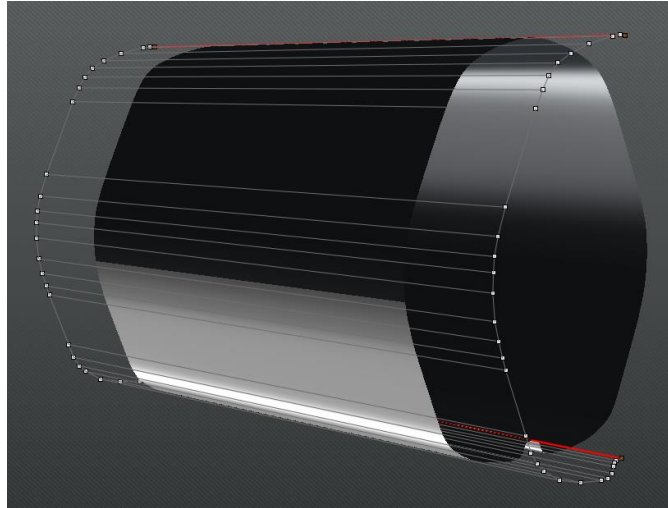


Figura A9-6 Geometría del cuerpo central.

3.3 Popa

La popa conecta el casco con el sistema propulsor.

En esta región se integran:

- Hélice y Pump-Jet (PJP).
- Timones verticales (rumbo).
- Planos horizontales (profundidad).
- Superficies de control (perfil NACA).

El diseño de popa es crítico para evitar turbulencias:

- Aumento de la resistencia.
- Generación de ruido hidrodinámico.
- Aumento del riesgo de cavitación.

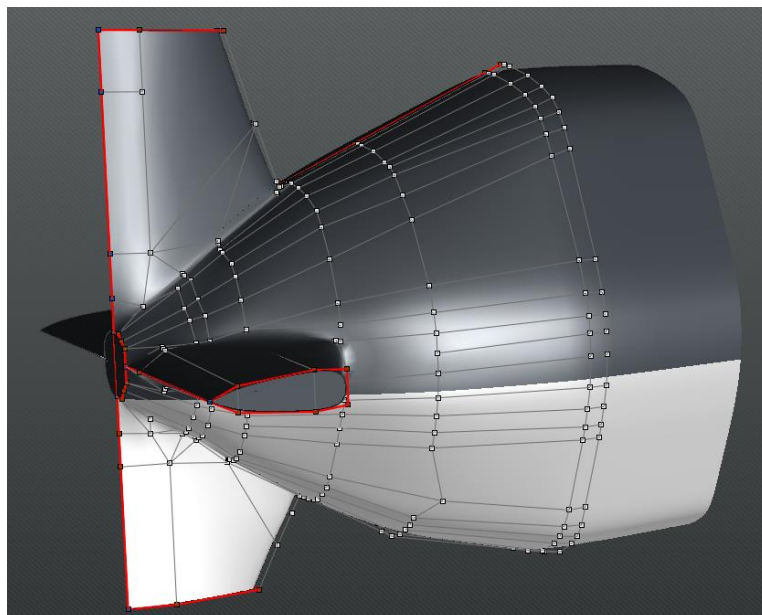


Figura A9-7 Geometría de la popa con las aletas estabilizadoras.

3.4 Superficies de control (tobera y aleta de profundidad)

Las superficies de control permiten el control de la navegación de la plataforma tal que:

La tobera se integra para:

- Propulsión de Pump-Jet (PJP).
- Timones verticales y horizontales.
- Concentración y control de flujo.

El diseño del timón se caracteriza con:

- Perfil NACA.
- Generar mínimo ruido hidrodinámico.
- Permitir flujo controlado.

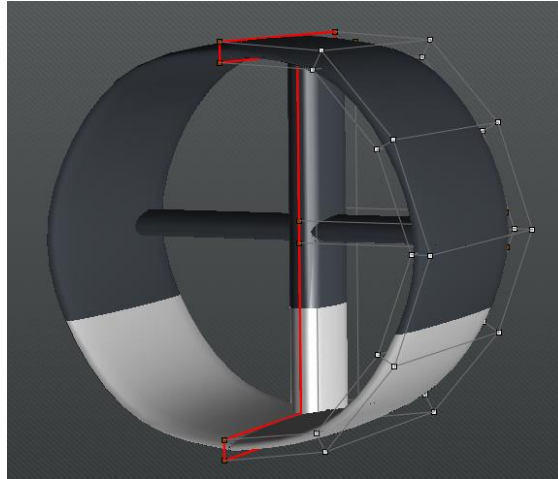


Figura A9-8 Geometría de la tobera.

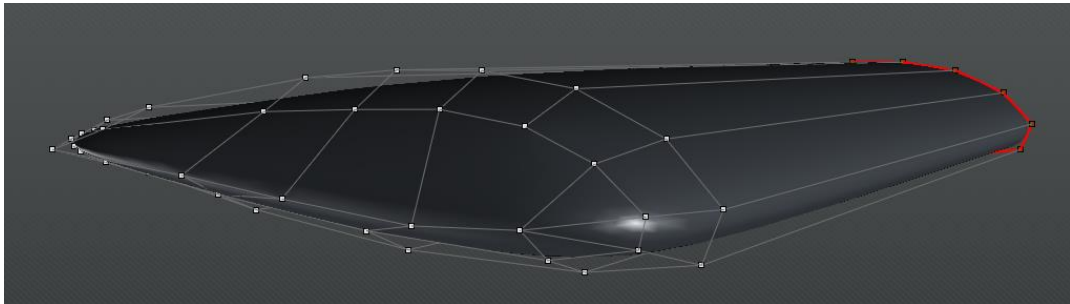


Figura A9-9 Geometría del timón de profundidad.

3.5 Conjunto

De este modo, en conjunto se obtiene el diseño de la geometría preliminar como se aprecia en la Figura A9-10 con una vista general del modelo en DELFTship.

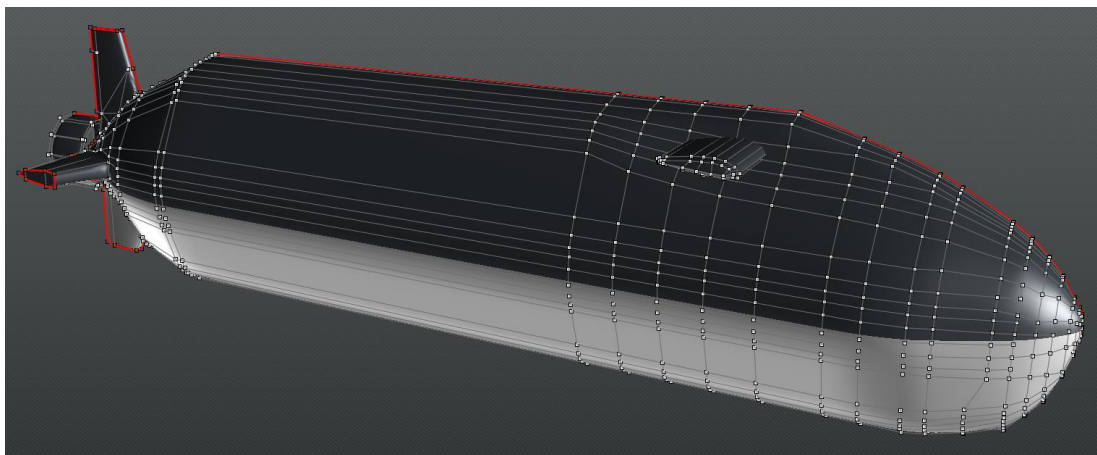


Figura A9-10 Geometría del diseño conceptual.

Etapa 4: Optimización hidrodinámica

Una vez generado el modelo geométrico inicial, se procede a analizar su comportamiento mediante simulación numérica, normalmente utilizando Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Las simulaciones permiten evaluar:

- Coeficiente de resistencia al avance.
- Distribución de presiones.
- Formación de vórtices.
- Características de la estela.

A partir de estos resultados se realizan modificaciones progresivas en la geometría con los objetivos expuestos en la Tabla A9-4.

Parámetro	Objetivo
Radio de la proa	Reducir resistencia de presión
Curvatura del casco	Evitar separación de flujo
Conicidad de la popa	Minimizar turbulencia
Integración de timones	Reducir interferencias de flujo

Tabla A9-4 Objetivos de la optimización hidrodinámica del diseño.

En diseños avanzados se utilizan algoritmos de optimización automática, que generan múltiples variantes geométricas y seleccionan las que ofrecen mejor rendimiento hidrodinámico.

Etapa 5: Evaluación de firma acústica

Además del rendimiento hidrodinámico, el diseño debe considerar la firma acústica del submarino, especialmente en aplicaciones militares. Entre estos factores se incluyen:

- Generación de turbulencia.
- Interacción del flujo con la hélice.
- Vibraciones estructurales.

La optimización de la popa y del sistema propulsor es especialmente importante para reducir la emisión de ruido y reducir su firma para mejorar la ocultación de la plataforma.

Etapa 6: Prototipado y validación

Tras la optimización inicial, se procede a la validación experimental del diseño. Para este proceso existen dos métodos principales:

- Simulación avanzada

Se realizan simulaciones más detalladas para analizar:

- Maniobrabilidad.
- Interacción casco y hélice.
- Comportamiento en diferentes velocidades.

- Ensayos con modelos a escala

En muchos programas de desarrollo se construyen modelos físicos a escala, que se prueban en:

- Canales hidrodinámicos.
- Túneles de agua.
- Túneles de viento.

Estos ensayos permiten medir parámetros de interés como se muestra en la Tabla A9-5.

Parámetro	Método
Resistencia al avance	Medición de fuerzas
Estructura del flujo	Visualización de estela
Estabilidad	Pruebas dinámicas

Tabla A9-5 Métodos de prototipado de geometrías.

Los resultados experimentales de estas pruebas se utilizan para ajustar el diseño final.

Etapas 7: Integración estructural y finalización del diseño

En la fase final se incorporan aspectos adicionales relacionados con:

- Resistencia estructural del casco.
- Integración de sensores.
- Procesos de fabricación.
- Mantenimiento del vehículo.

Esto puede implicar ajustes en:

- Espesores estructurales.
- Distribución del volumen interno.
- Ubicación de equipos.

El diseño final presenta equilibrio entre eficiencia hidrodinámica, resistencia estructural y viabilidad.

Conclusión

El modelado de la geometría de la carena de un submarino es un proceso complejo que requiere la integración de múltiples disciplinas de ingeniería con conceptos que quedan fuera del objeto de un diseño conceptual. A través de un procedimiento iterativo que combina etapas de diseño conceptual, modelado geométrico, optimización hidrodinámica y validación experimental, es posible desarrollar una forma de casco que garantice un funcionamiento eficiente del vehículo (véase Figura A9-11).

Este proceso resulta especialmente relevante en el desarrollo de vehículos submarinos modernos y sistemas autónomos, donde la eficiencia energética, la discreción acústica y la capacidad de integración de sensores constituyen factores clave para el éxito operativo.



Figura A9-11 Geometría final del prototipo conceptual.

ANEXO X ANÁLISIS DEL RECURSO ENERGÉTICO MARINO

La energía undimotriz (olas) y la mareomotriz (mareas) representan recursos marinos complementarios, con altos niveles de predictibilidad y gran interés para aplicaciones navales y plataformas autónomas de larga duración. Sin embargo, su aprovechamiento real depende fuertemente de la hidrodinámica local (altura significativa de ola, periodo pico, batimetría, rango de marea, estrechamientos) y de condicionantes ambientales y de la infraestructura de la plataforma. De forma complementaria, las figuras usadas están referenciadas al final del anexo.

1. Marco general del recurso

La energía undimotriz se correlaciona con el clima de oleaje; potencias medias explotables superiores a 20–25 kW/m de frente de ola se consideran muy favorables; en torno a 10 kW/m representan el umbral razonable para proyectos navales de aprovechamiento (véase Figura A10-1).

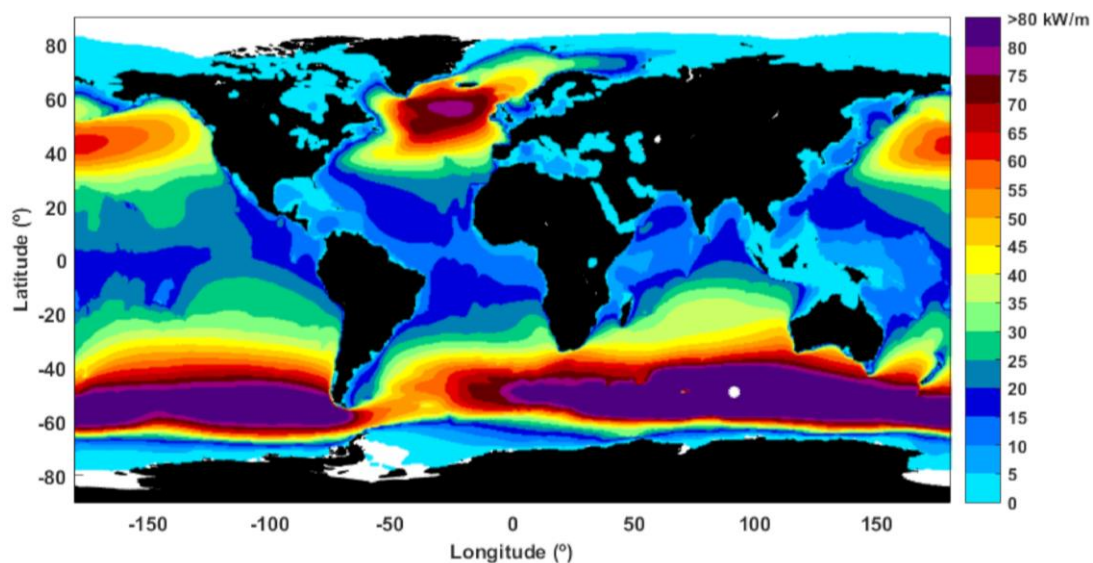


Figura A10-1 Energía undimotriz (Energies de MDPI de [A1]).

La mareomotriz exige rangos de marea elevados (amplitud mayor a 4 o 5 m) o fuertes corrientes en estrechos y bocanas, para que las turbinas o centrales de estuario alcancen densidades de potencia competitivas (véase Figura A10-2). En Europa, el grueso del recurso de olas y mareas se concentra en el Atlántico nororiental (Irlanda, Reino Unido, Bretaña, Noruega), mientras que cuencas semi-cerradas como el Mediterráneo o mares con escasa variación de marea presentan un potencial limitado, pero explotable y con capacidades de aprovechamiento.

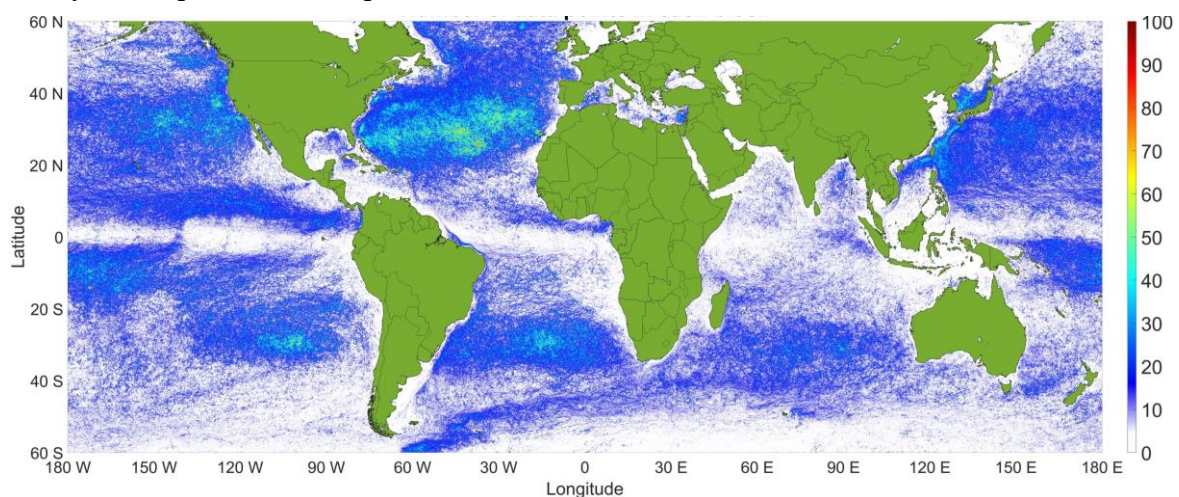


Figura A10-2 Energía mareomotriz (Florida Atlantic University de [A2]).

2. Mar Mediterráneo

Desde el punto de vista undimotriz, el Mediterráneo es un mar micro-mareal y relativamente cerrado, con *fetch* limitado y temporales concentrados en áreas específicas (Golfo de León, mar de Alborán, mar Egeo). Esto se traduce en potencias medias de ola generalmente por debajo de los grandes enclaves atlánticos; solo sectores como el golfo de León o el entorno de Cerdeña-Córcega alcanzan valores próximos o superiores al umbral de 15 kW/m de forma estacional, mientras que buena parte del litoral español y oriental presenta recursos explotables (véase Figura A10-3), más adecuados para soluciones de pequeña escala para aprovechamiento de la plataforma.

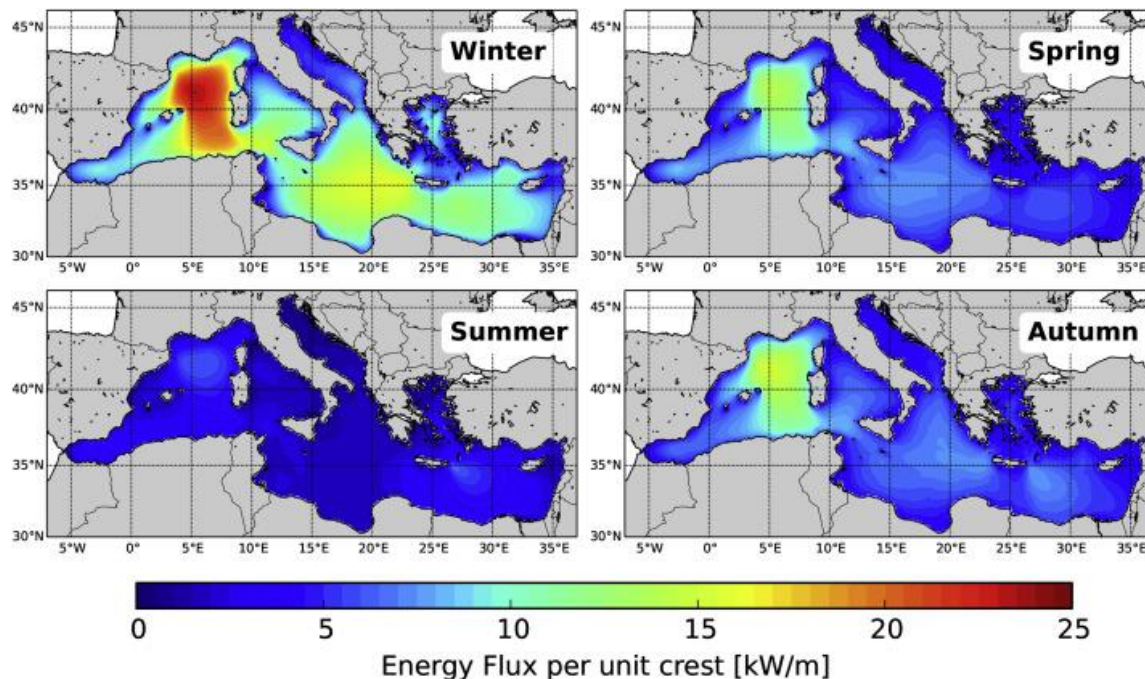


Figura A10-3 Recurso undimotriz en el Mar Mediterráneo (Energy 2016 de MDPI [A3]).

La mareomotriz, en cambio, es prácticamente irrelevante: los rangos de marea típicos en el Mediterráneo occidental son del orden de decímetros; solo en algunos estrechos (por ejemplo, canales con batimetría forzada) podrían valorarse corrientes de marea para sistema de generación. En consecuencia, el Mediterráneo ofrece un recurso undimotriz moderado (véase Figura A10-4), altamente variable y de interés para demostradores tecnológicos, y generación de aprovechamiento de corrientes conocidas (estrechos) para plataformas navales específicas.

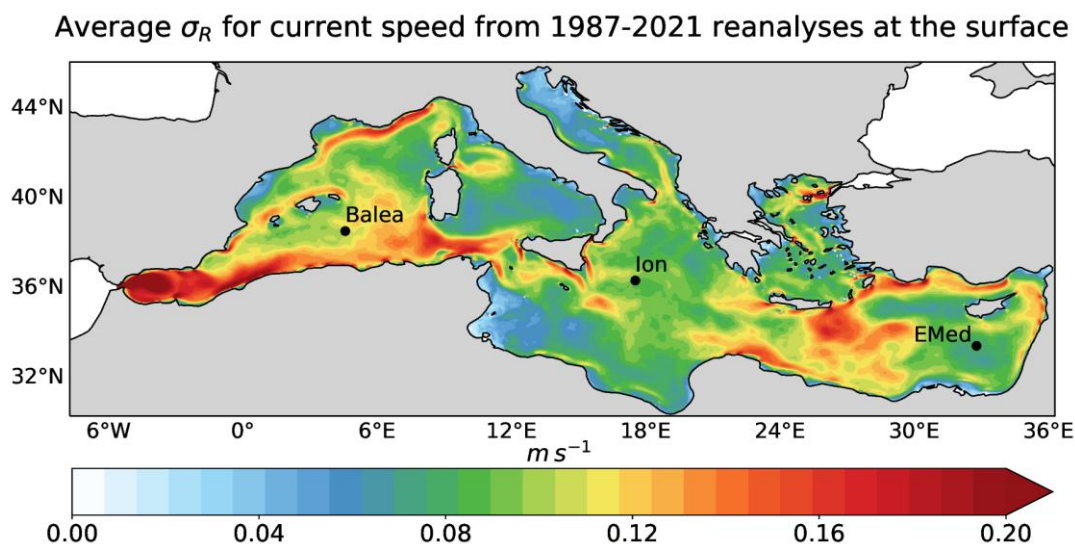


Figura A10-4 Recurso mareomotriz en el Mar Mediterráneo (OS-EGU de [A4]).

3. Mar Báltico

El Báltico es un mar casi cerrado, de baja profundidad media, escasa salinidad y muy reducido rango de marea, dominado por forzamiento eólico y *seiches* más que por mareas astronómicas. El clima de oleaje es más benigno que en el Atlántico norte adyacente: la combinación de *fetch* limitado y hielo estacional en el norte reduce la potencia media de las olas en invierno, situándola en valores típicamente inferiores a las costas atlánticas de Escocia, Irlanda o Noruega. El recurso undimotriz resulta por tanto moderado-bajo (véase Figura A10-5), siendo más interesante en sectores expuestos del sur de Suecia, Dinamarca y Polonia, donde pueden ubicarse el sistema cercano a costa o en rompeolas para alimentar los sistemas de generación. Por su parte, la energía mareomotriz es reducida a nivel litoral (véase Figura A10-6); los rangos de marea en la mayor parte del Báltico limitan la existencia de corrientes en estrechos de conexión con el mar del Norte (Skagerrak, Kattegat, Belts y Øresund), más asociados al intercambio barotrópico que a mareas puras; estos pasillos sí presentan velocidades de corriente interesantes para sistemas de energía en toda la cuenca litoral del mar.

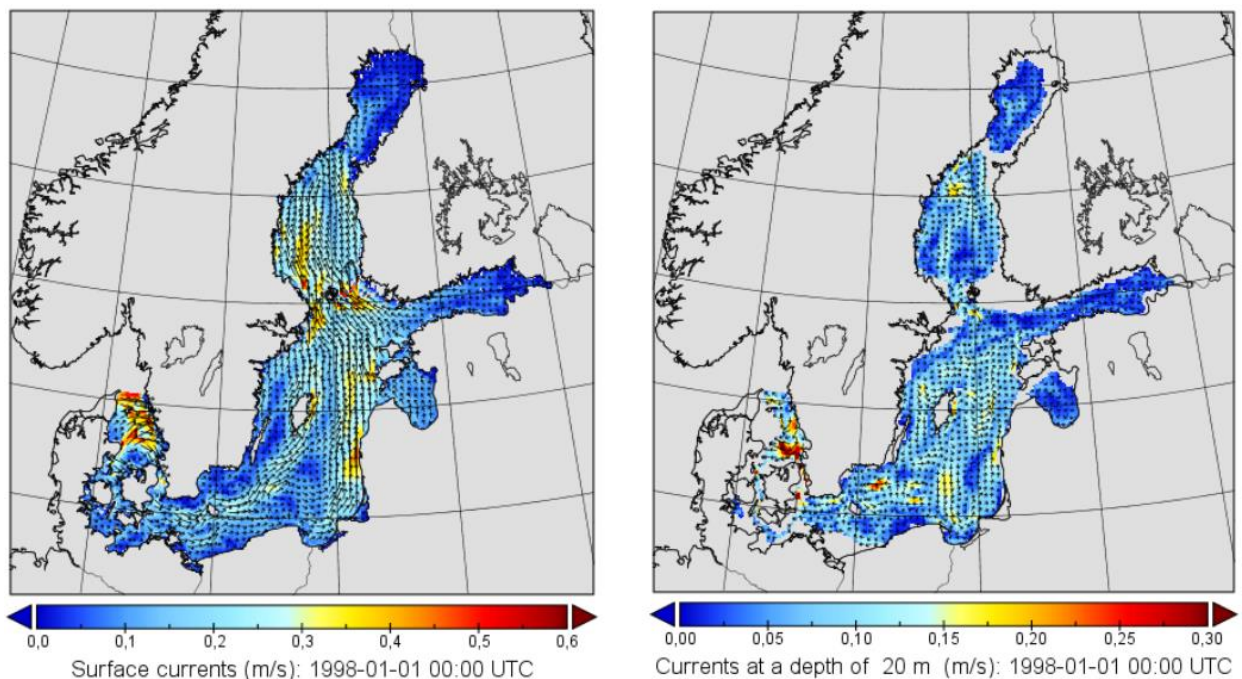


Figura A10-5 Recurso undimotriz en el Mar Báltico (Renewable energies de [A5]).

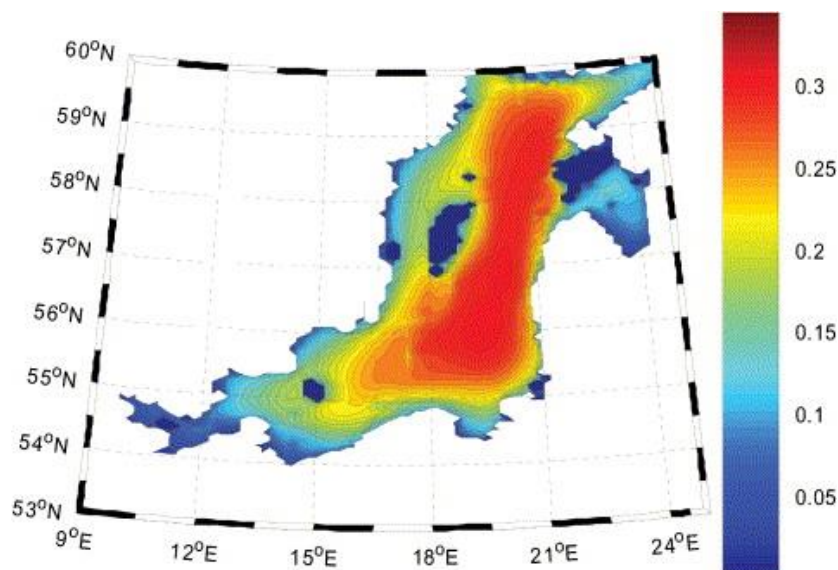


Figura A10-6 Recurso mareomotriz en el Mar Báltico (Renewable energies de [A6]).

4. Mar Rojo

El Mar Rojo es una cuenca alargada con conexión restringida al océano Índico, caracterizada por vientos estacionales, topografía compleja y estrechos que aceleran el flujo de las corrientes para energía mareomotriz (véase Figura A10-7). El recurso undimotriz en su eje central es en general inferior al del Atlántico abierto (véase Figura A10-8), pero ciertos sectores experimentan oleaje significativo generado por vientos persistentes del noroeste, lo que puede dar lugar a potencias de ola competitivas para a nivel regional, especialmente cerca del estrecho de Bab el-Mandeb y en la parte septentrional de la cuenca donde el *fetch* es mayor. En cuanto a mareomotriz, el Mar Rojo presenta rangos de marea más apreciables que el Mediterráneo o el Báltico en diversas bahías y ensenadas, y muy especialmente en los estrechos de conexión (Bab el-Mandeb y canales interiores), donde las corrientes pueden alcanzar velocidades relevantes para explotación energética; no obstante, el carácter localizado del recurso y de navegación presente condiciona la operación de la plataforma en cuanto a la profundidad de posado en zona litoral.

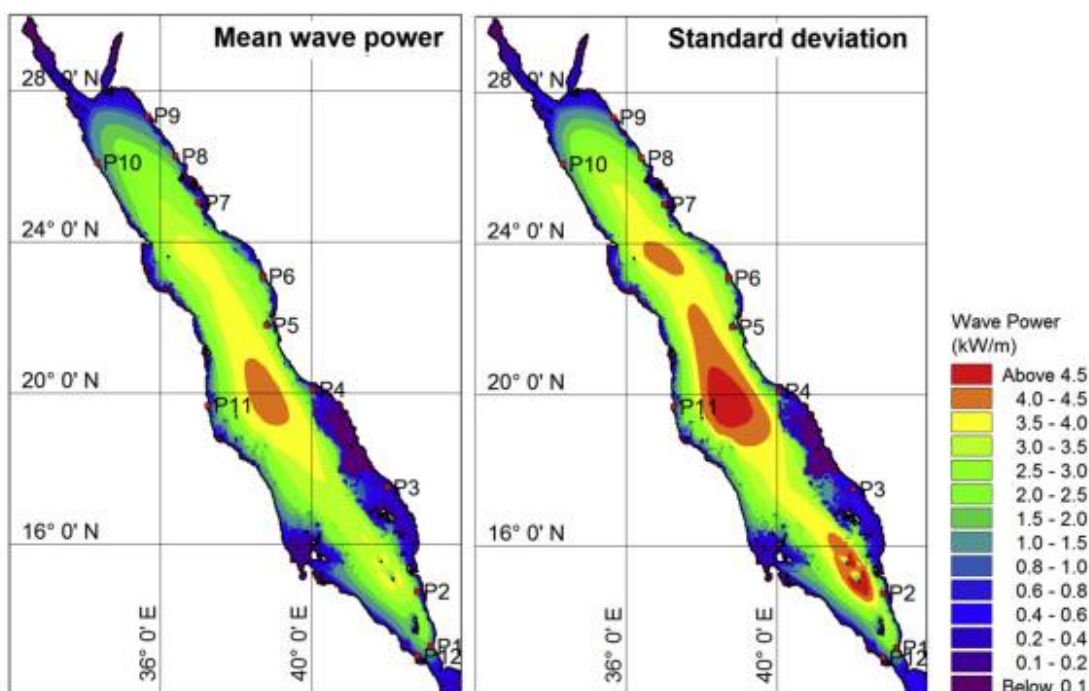


Figura A10-7 Recurso mareomotriz en el Mar Rojo (Renewable energies de [A7]).

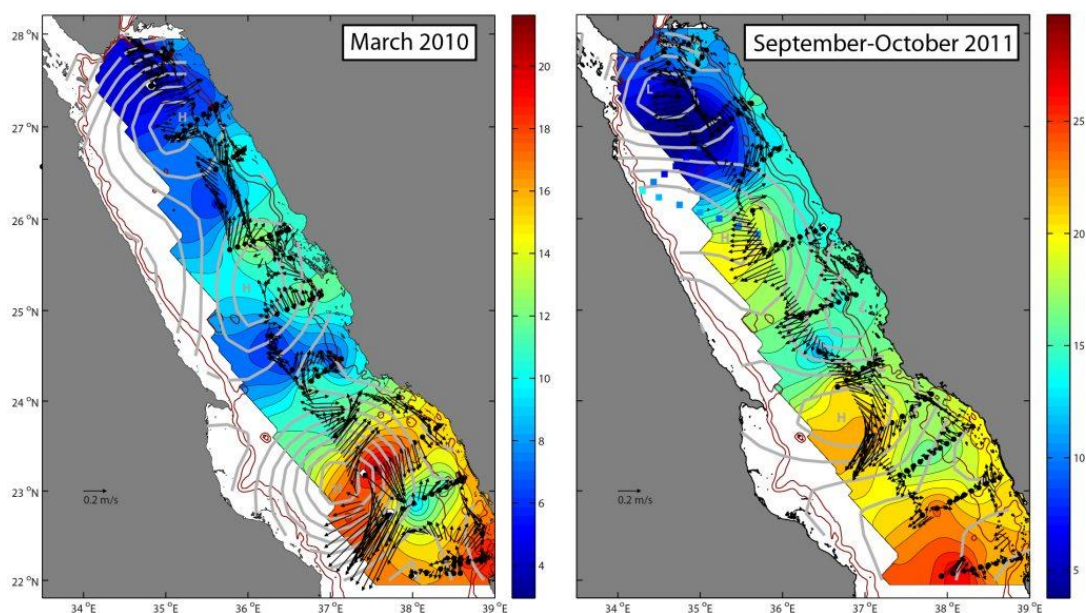


Figura A10-8 Recurso undimotriz en el Mar Rojo (Bower Labs de [A8]).

5. Síntesis comparativa y capacidades para aplicaciones navales

Comparando las tres cuencas, el Mediterráneo y el Báltico comparten una limitación clara en recurso mareomotriz, quedando la generación mareomotriz restringida a estrechos y canales concretos, mientras que el Mar Rojo ofrece enclaves puntuales con mejores rangos mareales y corrientes más fuertes.

En términos undimotrices, ninguna de las tres cuencas alcanza los niveles del Atlántico nororiental, pero el Mediterráneo (zonas expuestas) y el Mar Rojo presentan ventanas más favorables que el Báltico, donde el potencial es menor y más irregular.

6. Referencias de figuras

- [A1] Rusu, L.; Rusu, E.; «Evaluation of the Worldwide Wave Energy Distribution Based on ERA5 Data and Altimeter Measurements», de Energies MDPI, Enero de 2021.
- [A2] Florida Atlantic University, «Global study identifies top sites for ocean current energy.» de Florida Atlantic University, Florida, 17 de marzo de 2025.
- [A3] Besio, G.; Mentaschi, L.; Mazzino, A., «Wave energy resource assessment in the Mediterranean Sea on the basis of a 35-year hindcast.» de Energy 2016 (MDPI), 94, 50–63.
- [A4] Benincasa, R.; Liguori, G.; Pinardi, N.; von Storch, H., «Internal and forced ocean variability in the Mediterranean Sea», de Ocean Science, European Geosciences Union. Available: <https://doi.org/10.5194/os-20-1003-2024>, 2024. [Último acceso: 12 de marzo de 2026].
- [A5] Kowalewski, M., «Hydrodynamic reanalysis of currents in the Baltic Sea using the PM3D model», de Gdańsk University of Technology, 2021.
- [A6] Henfridsson, U.; et al., «Wave energy potential in the Baltic Sea and the Danish part of the North Sea, with reflections on the Skagerrak», Renewable Energy, Volumen 32, Octubre de 2007.
- [A7] Aboobacker, V.M.; et al., «Wave energy resource assessment for Red Sea», Renewable Energy, Volumen 114 (Parte A), Diciembre de 2017.
- [A8] Bower Lab, «Red Sea Circulation and Dynamics», de Woods Hole Oceanographic Institution.

ANEXO XI ESTUDIO MONTECARLO DE PERMANENCIA

El método Monte Carlo se fundamenta en la modelización estocástica de su ciclo de vida, sustituyendo variables deterministas por distribuciones de probabilidad. Mediante el muestreo aleatorio masivo y la ejecución de miles de iteraciones, el método aplica la Ley de los Grandes Números para converger hacia una solución estadística robusta, permitiendo cuantificar la probabilidad de supervivencia y disponibilidad operativa frente a la incertidumbre del entorno marino y las amenazas asimétricas.

El objetivo del análisis es estimar la permanencia operativa de la plataforma en función de la energía disponible del entorno. Para ello, se consideran como variables aleatorias:

- Velocidad de corriente mareal $v \rightarrow$ distribución de Weibull.
- Altura significativa de ola $H_s \rightarrow$ distribución de Rayleigh.
- Periodo energético T_e (puede fijarse o modelarse como correlacionado).
- Consumo energético total del sistema (básico + propulsión + periódicos).

La permanencia queda definida como el tiempo durante el cual la energía generada cubre o compensa el consumo del sistema.

1. Definición de la dinámica energética

Para el estudio de la permanencia es necesario determinar las capacidades energéticas con la dinámica del sistema. Esta dinámica depende del estado de la carga (SOC) tal que

$$SOC(t) = \frac{E(t)}{E_{instalada}} \quad [kWh]$$

Este SOC fluctúa entre unos valores límite que permiten la optimización de la vida útil de las baterías y el rendimiento de los ciclos de vida. Así,

$$\begin{aligned} E_{min} &\leq E_t \leq E_{max} \\ 0,1 E_i &\leq E_t \leq 0,9 E_i \end{aligned}$$

Con los datos expuestos, la dinámica energética tendrá un comportamiento basado en las capacidades de la potencia generada y la consumida conforme a su evolución en el marco temporal. De este modo, asumiendo un incremento del tiempo (t) de 1h; la dinámica se caracteriza tal que

$$E_{t+1} = E_t + (P_{generada} - P_{consumos}) \Delta t$$

Con la dinámica expuesta, ahora es necesario definir los modelos de consumos y recargas para obtener las capacidades de recarga de la plataforma.

2. Modelo probabilístico de la carga

El modelado de las capacidades de carga (consumos) del submarino autónomo viene dado por los perfiles de operación de este; con los regímenes de acción ofensiva, patrulla, tránsito, recarga y básico. Así, el modelado (X_t) será dependiente de estas capacidades

$$X_t \in [Ofensiva, Patrulla, Tránsito, Recarga, Básico]$$

Asimismo, las capacidades son dependientes del uso de cada uno de los perfiles, por ende, se puede asignar una probabilidad a cada uno de los regímenes. Con esto, el valor de la carga (consumo) viene dada por la distribución probabilística de cada perfil

$$P_{consumos} = f(X_t)$$

De este modo, la distribución de la carga se modela conforme a las probabilidades expuestas a continuación en la Tabla A11-1.

Régimen	Probabilidad (Pn)	Consumo
Acción de Combate	0,05	210 kWh
Tránsito	0,10	130 kWh
Patrulla	0,40	70 kWh
Condición Básica	0,15	30 kWh
Recarga	0,30	10 kWh

Tabla A11-1 Probabilidades de los regímenes operativos.

3. Modelo probabilístico de la recarga

Para la caracterización de las capacidades de recarga es necesario el estudio independiente de las condiciones mareomotrices y undimotrices. Así, la recarga dependiente de la marea sigue una distribución de Weibull, y la dependiente de la ola se definen con una distribución de Rayleigh. Además, existe la capacidad de la activación de un generador de emergencia con un SOC por debajo del 25%.

Por su parte, la recarga mareomotriz se modela conforme a una distribución de Weibull, esta es una distribución de probabilidad continua y versátil que se utiliza en ingeniería de fiabilidad y análisis de supervivencia para el modelado de tiempos de falla. Así, la recarga depende del estado de la velocidad de la marea conforme a

$$P_{mareomotriz} \propto v^3$$

así, la distribución se define con k para el parámetro de forma y c como parámetro de escala, tal que

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k}$$

Asimismo, la recarga undimotriz sigue una distribución de Rayleigh, esta es una función de distribución continua. Se presenta conforme a un vector bidimensional que tiene sus dos componentes ortogonales, independientes y según una distribución normal. Así, la recarga se modela conforme a la altura significativa de la ola y su periodo medio conforme a

$$P_{undimotriz} \propto H_s^2 T_e$$

de esta manera, con el uso de σ como parámetro de escala, la distribución se modela tal que

$$f(H_s) = \frac{H_s}{\sigma^2} e^{-H_s^2/(2\sigma^2)}$$

La aplicación de las distribuciones desarrolladas se ha elegido conforme a la mejor aptitud de los modelos probabilísticos existentes para la casuística del presente análisis, todo ello según:

- El uso de Weibull es adecuado porque las corrientes presentan distribuciones no simétricas y dependientes de la localización. El exponente cúbico de la velocidad hace que pequeñas variaciones en v tengan gran impacto en la energía generada.
- La distribución de Rayleigh es apropiada para estados de mar completamente desarrollados, donde el oleaje se puede considerar un proceso gaussiano en elevación superficial. La potencia depende cuadráticamente de la altura de ola, lo que introduce menor sensibilidad que en el caso mareal.

4. Modelo probabilístico de permanencia

Para el estudio del modelo probabilístico de la permanencia de la plataforma es necesario el estudio conjunto lo consumos y recargas analizados. Así, se generan N realizaciones aleatorias:

- $v_i \sim Weibull(k, c)$
- $H_{s,i} \sim Rayleigh(\sigma)$

Conforme a las dos distribuciones se genera para cada iteración (i) lo siguiente:

- Se calcula $P_{marea,i}$
- Se calcula $P_{ola,i}$
- Se obtiene la potencia total disponible (con η como los rendimientos de conversión):

$$P_{gen,i} = \eta_m P_{marea,i} + \eta_o P_{ola,i}$$

Así, con el método Monte Carlo permite capturar la variabilidad conjunta de los recursos, generando un conjunto estadístico representativo de condiciones operativas reales.

Asimismo, para cada muestra se evalúa el balance energético existente:

$$E_i = P_{gen,i} - P_{consumo}$$

- Si $E_i > 0$: excedente energético.
- Si $E_i < 0$: déficit energético.

A su vez, se puede integrar en el tiempo para estimar energía acumulada y la autonomía según:

$$t_{perm,i} = \frac{E_{almacenado}}{|E_i|}$$

Con este paso se permite traducir la variabilidad del recurso en cuanto a su capacidad real de operación, y considerando los consumos de la plataforma.

5. Método MonteCarlo

El desarrollo de la metodología de MonteCarlo permite a partir de las N simulaciones obtener:

- Valor medio de permanencia $\bar{t}_{perm}$
- Percentiles (P50, P90).
- Probabilidad de operación autosuficiente.
- La probabilidad de estado crítico de carga.
- Número de activaciones del DG de emergencia.

De esta manera, la permanencia media (T) nos dará una idea de las capacidades de la unidad y viene dada por las capacidades de permanencia en cada intervalo temporal respecto a la muestra total (N).

$$\bar{T} = \frac{1}{N} \sum T_i$$

La probabilidad de operación autosuficiente viene dada cuando las capacidades de generación son mayores que las de consumo, con lo que se permite la recarga de las baterías, tal que

$$P(P_{gen} \geq P_{consumo})$$

La probabilidad de estado crítico de carga se produce en las casuísticas donde el estado de carga baja del valor mínimo establecido del 10%, con lo que

$$P_c = \frac{n_{SOC < 10\%}}{N}$$

El número de activaciones del generador de emergencia de abordó resultará de las activaciones de este en los regímenes de tránsito y las situaciones de emergencia, tal que

$$E(n^{\circ} DG) = \frac{1}{N} \sum n_{DGi}$$

Estos indicadores permiten evaluar la viabilidad del sistema bajo incertidumbre, proporcionando métricas robustas para diseño.

6. Resultados

Conforme a los datos expuestos anteriormente, para los resultados de la permanencia operativa de la plataforma es necesario el cálculo del índice de permanencia conforme a la potencia media

$$P_{media,carga} = 59 \text{ kWh (aprox.)}$$

A su vez, Se ha tomado la potencia total instalada:

$$P_{gen,total} = 265,02 \text{ kW}$$

Y se ha ajustado según el recurso energético disponible en cada mar de estudio:

- Mediterráneo: 60% → Recurso moderado.
- Mar Rojo: 50% → Recurso medio.
- Báltico: 40% → Recurso medio-bajo.

Con ello, se permite el estudio del índice de permanencia (I), siendo esta la relación entre los consumos y las generaciones, tal que

$$I_{permanencia} = \frac{P_{generación}}{P_{consumo}}$$

Con ello, se arrojan los resultados siguientes:

- Mar Mediterráneo $\approx 1,94$
- Mar Rojo $\approx 1,62$
- Mar Báltico $\approx 1,29$

Con la aplicación de la metodología presentada se obtiene que,

- Permanencia sin DG de 20 días (486 h).
- Permanencia con DG de 67 días (1614 h).
- Probabilidad de operación autosuficiente del 82%.
- Probabilidad de estado crítico de carga del 14%.
- N° de activaciones del DG de 5 veces.
- Valor de estado de carga medio del 58%.

7. Conclusiones

El análisis MonteCarlo evidencia que la permanencia del sistema no debe evaluarse a través de distribuciones probabilísticas que capturen la variabilidad del recurso. En este contexto, se observa que el sistema puede alcanzar condiciones de autosuficiencia energética en los escenarios de estudio. La intermitencia del recurso hace imprescindible el uso de sistemas de almacenamiento y una gestión adaptativa de consumos para garantizar la operación continua. Así, se concluye para cada escenario que:

- Mar Mediterráneo: Presenta el mejor equilibrio energético. El sistema (índice > 1) es claramente autosuficiente, permitiendo incluso recarga neta de baterías en ciertos periodos.
- Mar Rojo: Condiciones favorables, pero más limitadas. La permanencia es viable, aunque con menor margen energético frente a variaciones operativas.
- Báltico: Escenario más restrictivo. Aunque el sistema permite sostenerse, el margen es reducido, lo que implica mayor dependencia de almacenamiento y gestión eficiente de consumos.

El análisis muestra que la viabilidad de la permanencia está fuertemente condicionada por el recurso ambiental, siendo crítica la correcta combinación de:

- Sistemas de generación híbridos.
- Gestión energética.
- Perfil de misión.

Además, confirma que el diseño es robusto en escenarios moderados (Mediterráneo y Mar Rojo), pero requiere optimización en entornos como el Báltico.

Para un estudio más preciso y que tenga en cuenta todas las variables existentes en el entorno real, es necesario un análisis que identifique los factores críticos que condicionan la permanencia, con lo que se permita optimizar el diseño (aumentar eficiencia y reducir consumos). Así, recomendable analizar la influencia de:

- Parámetros de Weibull (k , c).
- Parámetro de Rayleigh (σ).
- Rendimientos (η).
- Consumo del sistema.

ANEXO XII ANÁLISIS ACÚSTICO OPERATIVO

Los XLUUV constituyen una categoría de vehículos submarinos no tripulados diseñados para realizar misiones de larga duración donde la ocultación y el sigilo es factor crítico de su operatividad.

Debido a la naturaleza de sus misiones, uno de los aspectos más relevantes de su diseño es la firma acústica, ya que esta determina su probabilidad de detección por sistemas sonar enemigos.

El presente anexo analiza los factores siguientes:

- Las principales fuentes de ruido acústico del vehículo.
- Los sensores acústicos integrados.
- La propagación del sonido en el medio submarino.
- Una simulación de detección mediante sonar pasivo.

El objetivo del análisis es estimar la detectabilidad del sistema en diferentes condiciones operativas, presentando los factores limitantes dentro del espectro acústico, con ello se permite presentar medidas mitigadoras para la reducción de la firma acústica.

1. Fuentes de ruido acústico del XLUUV

La firma acústica de un vehículo submarino es el resultado de la suma de diversas fuentes de ruido que pueden clasificarse en tres categorías principales:

- Ruido de propulsión.
- Ruido de maquinaria interna.
- Ruido hidrodinámico.

1.1 Ruido de propulsión

La propulsión en la mayoría de los XLUUV modernos se basa en motores eléctricos alimentados por baterías, lo que reduce significativamente la firma acústica frente a sistemas diésel o nucleares. Las principales fuentes acústicas en este sistema son:

- Hélice

El ruido generado por la hélice se debe a:

- Interacción de las palas con el flujo.
- Fluctuaciones de presión.
- Posible cavitación a velocidades elevadas.

La cavitación es el fenómeno más crítico desde el punto de vista acústico, ya que este genera ruido de banda ancha que puede propagarse a largas distancias y ser detectado fácilmente.

- Motor eléctrico

Los motores eléctricos generan ruido debido a:

- Vibraciones electromagnéticas.
- Desequilibrios mecánicos.
- Resonancias estructurales.

En general, estos niveles son relativamente bajos en comparación con motores de combustión. Aunque la instalación de equipos eléctricos supone una fuente de ruido que puede ser detectable. Las acciones referidas a la propulsión pueden y deben ser mitigadas con regímenes bajos de velocidades y el aislamiento de los elementos propulsores de forma acústica con materiales absorbentes y compartimentación de sistemas.

De este modo, las fuentes de ruido de propulsión quedan reflejadas en la Tabla A12-1.

Fuente	Banda de frecuencia
Hélice	10 – 500 Hz
Cavitación	1 – 10 kHz
Armónicos	Hasta 500 Hz
Motor eléctrico	50 – 1000 Hz

Tabla A12-1 Fuentes de ruido de propulsión.

1.2 Ruido de maquinaria interna

Aunque los XLUUV presentan menor número de sistemas mecánicos que los submarinos tripulados, todavía existen equipos auxiliares que generan vibraciones acústicas. Entre ellos destacan:

- Bombas de refrigeración.
- Sistemas de control de lastre.
- Actuadores de superficies de control.
- Electrónica de potencia.

Las vibraciones generadas por estos equipos pueden transmitirse al casco del vehículo y radiarse al agua circundante, influyendo en la firma de la plataforma. Las bandas típicas de estos sistemas se presentan en la Tabla A12-2 con su frecuencia de trabajo.

Sistema	Banda de frecuencia
Bombas	100 – 1000 Hz
Actuadores	50 – 300 Hz
Electrónica	100 – 500 Hz
Sistema de soplado	100 – 800 Hz
EMS, BMS y PMS	200 – 400 Hz
Convertidores	100 – 250 Hz
Refrigeración	100 – 500 Hz

Tabla A12-2 Fuentes de ruido de maquinaria.

1.3 Ruido hidrodinámico

El ruido hidrodinámico se produce por la interacción entre el flujo de agua y la superficie del casco durante la navegación. Este fenómeno depende principalmente de factores como:

- Velocidad del vehículo.
- Rugosidad del casco.
- Geometría hidrodinámica.
- Presencia de apéndices.

A velocidades bajas de 2-5 nudos (operaciones de sigilo) el ruido hidrodinámico se mantiene reducido y es difícilmente apreciable por sensores externos.

- Frecuencias características: 100 Hz – varios kHz (con altas velocidades).

2. Sensores acústicos del vehículo

Los XLUUV integran diversos sensores acústicos para navegación, detección y reconocimiento del entorno submarino.

2.1 Sonar pasivo

El sonar pasivo consiste en *arrays* de hidrófonos capaces de detectar el sonido emitido por otros objetos en el entorno. Este sonar (CAS) tiene como funciones principales:

- Detección de submarinos.
- Vigilancia de tráfico marítimo.
- Identificación de amenazas.
- Banda de operación: 10 Hz – 20 kHz.

Los algoritmos de procesamiento permiten estimar:

- Dirección del contacto (*bearing*).
- Clasificación del objetivo.
- Estimación de distancia mediante análisis de firma acústica.

2.2 Sonar activo

El sonar activo emite pulsos acústicos y analiza el eco reflejado por los objetos. Se emplea principalmente para acciones de:

- Navegación.
- Detección de obstáculos.
- Mapeo del fondo marino.

Entre los sensores pasivos que se instalan en la plataforma se encuentran:

Sonar frontal (FLS)

Permite detectar obstáculos delante de la plataforma.

- Frecuencia de operación: 100 – 900 kHz.
- Alcance: 50 – 300 m.
- Aplicaciones: Navegación con identificación de contactos y obstáculos.

Sonar de barrido lateral (FAS)

Utilizado para inspección del fondo.

- Frecuencia de operación: 100 – 500 kHz.
- Alcance: 10 – 200 m.
- Aplicaciones: Detección de minas y reconocimiento de objetos sumergidos.

Sonar de escaneo lateral (SSS)

Sistema avanzado que permite obtener imágenes de alta resolución del fondo marino.

- Frecuencias de operación: 100 – 300 kHz.
- Alcance: 10 – 100 m.
- Aplicaciones: levantamiento del medio y fondo marino.

Sistema de Identificación Acústica (AIS)

Sistema que permite el análisis de ecos del medio para la clasificación de contactos.

- Frecuencias de operación: 100 – 300 kHz.
- Alcance: dependiente de la propagación acústica.
- Aplicaciones: identificación y clasificación de ondas acústicas para contactos de interés.

3. Propagación acústica en el océano

El sonido en el medio marino se propaga de forma eficiente debido a la baja absorción del agua. La velocidad del sonido depende de:

- Temperatura.
- Salinidad.
- Presión (profundidad).

La propagación acústica en el medio es proporcional a la distancia de transmisión, el alcance de esta depende de la pérdida de transmisión acústica puede aproximarse mediante:

$$TL = 20\log(R) + \alpha R$$

donde TL es la pérdida de transmisión, R es la distancia (m), y α es el coeficiente de absorción. En distancias cortas la absorción es pequeña y domina la divergencia geométrica.

4. Simulación simplificada de detección sonar

Para estimar la detectabilidad del XLUUV se utiliza la ecuación de sonar pasivo:

$$SL - TL - NL + DI \geq DT$$

donde SL es el *Source Level* (nivel de ruido del objetivo), el TL es la pérdida de transmisión, NL es el ruido ambiental, DI es la ganancia del array y DT es el umbral de detección.

5. Supuestos de la simulación

Los cálculos de firma acústica dependen de variables para el ruido ambiental que depende del medio y la naturaleza del teatro de operaciones, al igual que la directividad del receptor enemigo. Ante esta casuística se asumen valores medios para los cálculos.

De este modo, se analizan los parámetros acústicos presentados en la Tabla A12-3 conforme a un entorno común y posible teatro de operaciones. Así, se consideran valores típicos para un XLUUV de operación silenciosa los siguientes:

Parámetro	Valor
Nivel de fuente (SL)	110 dB re 1 μ Pa
Ruido ambiental (NL)	60 dB
Ganancia del sonar (DI)	15 dB
Umbral detección (DT)	10 dB

Tabla A12-3 Estimaciones de parámetros acústicos.

Como objeto de estudio es necesario conocer el valor del alcance máximo de ocultación de la plataforma. Así, aplicando las condiciones expuestas en la Tabla A8-3, se pueden aplicar las fórmulas anteriores y donde sustituyendo:

$$110 - TL - 60 + 15 = 10 \qquad TL = 55 \text{ dB}$$

De este modo, usando propagación esférica y aplicando los principios de transmisión se obtiene el alcance máximo de ocultación del sistema.

$$TL = 20\log(R) \qquad 20\log(R) = 55 \qquad R \approx 562 \text{ m}$$

Con esto, se asume un valor medio de exposición a partir de los 550 metros en un régimen de operación normal, con el funcionamiento normal de sistemas en condición nominal.

De igual manera, en la Tabla A12-4 se exponen los supuestos en un rango de distancias según el grado de ocultación en función de la distancia de recepción (posición del sensor enemigo).

Distancia	TL	Nivel recibido
100 m	40 dB	Detectable
300 m	49.5 dB	Posible detección
500 m	54 dB	Límite detección
800 m	58 dB	Detección compleja
1000 m	60 dB	No detectable

Tabla A12-4 Estudio de alcances según la firma acústica.

6. Perfil de navegación para ocultamiento

Las variaciones generan perfiles verticales de velocidad que provocan la refracción de las ondas acústicas, curvando sus trayectorias y produciendo regiones donde el sonido se concentra y otras donde apenas llega energía acústica. Como resultado aparecen distintos regímenes de propagación sonar, entre los que destacan el canal superficial, la propagación a través de la termoclina, el canal profundo o canal SOFAR, y las zonas de convergencia. Estas se definen como:

- El canal superficial se produce cuando una capa de agua relativamente homogénea cerca de la superficie queda limitada inferiormente por una termoclina que actúa como reflector acústico, permitiendo que las ondas sonoras se propaguen largas distancias mediante múltiples reflexiones entre la superficie y la capa inferior.
- La termoclina está caracterizada por un rápido descenso de temperatura con la profundidad, provoca una disminución de la velocidad del sonido que refracta los rayos acústicos hacia capas más profundas, generando regiones donde la energía acústica procedente de la superficie disminuye notablemente.
- El canal SOFAR (*Sound Fixing and Ranging*) es una capa donde la velocidad del sonido alcanza un mínimo relativo; cualquier onda acústica que entra en esta capa tiende a curvarse hacia su interior, quedando confinada y pudiendo propagarse a distancias muy grandes con poca pérdida de energía.
- Zonas de convergencia, presenta regiones donde los rayos acústicos que se han curvado hacia el fondo regresan hacia la superficie concentrando la energía acústica a intervalos de varias decenas de kilómetros.

Entre estas regiones de alta intensidad acústica aparecen zonas de sombra, donde la señal sonora se debilita considerablemente debido a la geometría de propagación. Estas estructuras de propagación acústica condicionan el funcionamiento de:

- Sonar activo, que depende del retorno de un eco acústico tras emitir un pulso sonoro.
- Sonar pasivo, que detecta el ruido emitido por un objetivo en su recepción al sensor.

La distribución espacial de estas capas y canales determina la probabilidad de detección y constituye uno de los factores más importantes en el análisis acústico del entorno.

La combinación de tácticas de ocultación constituye una parte esencial a nivel operativo dentro de la guerra antisubmarina (ASW) y permite la reducción de la firma acústica operativa, esto consigue el ocultamiento del submarino en regiones donde la propagación del sonido es desfavorable para los sensores enemigos; se aprovecha la zona de sombra para quedar fuera del alcance de detección de los sensores enemigos.

Estas tácticas se presentan en la Tabla A12-5 conforme a la capa en cuestión y su efecto y el empleo táctico de la plataforma para conseguir la ocultación.

Fenómeno	Descripción física	Efecto en propagación	Táctica para ocultación
Canal superficial	Capa superficial limitada por termoclina	El sonido queda atrapado entre la superficie y la termoclina y se propaga a largas distancias	Descender por debajo del canal para evitar detección desde sensores superficiales
Termoclina	Región con fuerte gradiente térmico y descenso de velocidad del sonido	Refracción de ondas acústicas hacia capas profundas y aparición de zonas de sombra	Operar bajo la termoclina para reducir detección por sonar de superficie
Canal SOFAR (c. profundo)	Capa oceánica con mínimo de velocidad del sonido	Confinamiento del sonido y propagación a distancias muy largas	Evitar el eje del canal para impedir propagación a gran distancia
Zonas de convergencia	Regiones donde los rayos acústicos se concentran tras curva	Incremento de intensidad acústica a grandes distancias	Situarse entre zonas de convergencia con intensidad menor
Zonas de sombra	Regiones donde los rayos acústicos no alcanzan directamente	Baja intensidad sonora y menor probabilidad de detección	Navegar dentro de estas zonas para reducir detectabilidad por sonar

Tabla A12-5 Capas de propagación para detección y ocultación submarina.

Desde el punto de vista táctico, los submarinos utilizan estas capas (véase Figura A12-1) para reducir su detectabilidad y aumentar su capacidad de ocultación. Una de las técnicas más comunes consiste en operar por debajo de la termoclina, ya que esta actúa como barrera para las ondas de superficie, esto reduce la energía del sonar que alcanza al submarino y disminuyendo el retorno de eco (sonar activo).

Del mismo modo, los submarinos pueden posicionarse en zonas de sombra entre zonas de convergencia, donde la intensidad acústica y la probabilidad de detección es menor. En operaciones de gran profundidad se evita navegar dentro del eje del SOFAR, ya que el ruido generado por el submarino podría propagarse a grandes distancias. En cambio, en determinadas circunstancias un submarino puede situarse ligeramente fuera de dicho canal para beneficiarse de regiones de menor propagación acústica. Asimismo, cuando existe un canal superficial, un submarino puede descender por debajo de este para evitar que sensores superficiales aprovechen esa guía acústica para detectar objetivos lejanos.

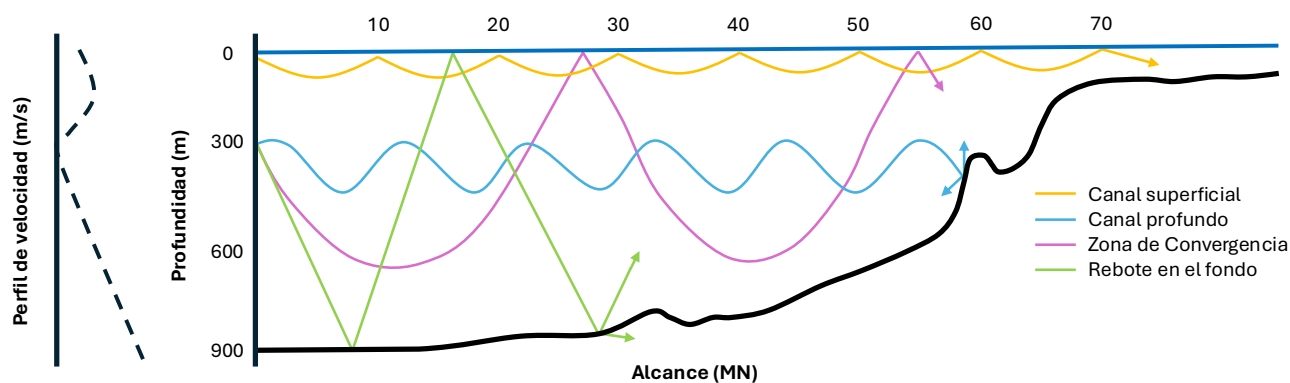


Figura A12-1 Representación de propagación acústica (Elaboración propia).

7. Factores que afectan la detectabilidad

El alcance real puede variar significativamente debido a:

- Ambiente
 - Termoclina.
 - Canales y capas acústicas.
 - Ruido del mar.
 - Tráfico marítimo.
- Operación del vehículo
 - Velocidad.
 - Maniobras.
 - Régimen del propulsor.
- Características del sonar
 - Tamaño del array.
 - Procesamiento de señal.
 - Filtrado de ruido.
 - Capacidad de recepción (DT- *Detection Threshold*).

En condiciones favorables, la detección podría superar los 2 km gracias a la ocultación proporcionada por el ruido del medio (gran densidad de tráfico marítimo), mientras que en entornos poco ruidosos puede reducirse a distancias mínimas de 500 m.

8. Conclusiones

El análisis muestra que los XLUUV presentan una firma acústica reducida debido al uso de:

- Propulsión eléctrica.
- Velocidades de operación bajas.
- Diseño hidrodinámico optimizado.

La simulación de detección sugiere que, bajo condiciones medias de ruido oceánico, un sonar pasivo podría detectar el vehículo a distancias del orden de 500 m. No obstante, la detectabilidad depende de:

- Las condiciones oceanográficas presentes.
- El perfil de misión del vehículo.
- La sensibilidad del sistema sonar adversario.
- Las condiciones de ruido del medio (tráfico, mamíferos, interferencias y demás).

ANEXO XIII ARQUITECTURA DE SOFTWARE E IA

Este anexo técnico describe una arquitectura completa de autonomía e inteligencia artificial para un vehículo submarino no tripulado de gran tamaño (XLUUV). La arquitectura propuesta integra sensores, algoritmos de navegación autónoma, sistemas de control hidrodinámico y módulos de inteligencia artificial que permiten ejecutar misiones complejas en entornos submarinos con comunicaciones limitadas.

El diseño se basa en una estructura jerárquica que separa la percepción del entorno, la navegación autónoma, la toma de decisiones tácticas y la gestión global de la misión, permitiendo así mejorar la robustez, escalabilidad y eficiencia energética del sistema.

1. Principios de diseño de la arquitectura

La arquitectura de autonomía de un XLUUV debe diseñarse teniendo en cuenta las limitaciones propias del entorno submarino, entre las que destacan la ausencia de señal GNSS durante la inmersión, las comunicaciones de muy bajo ancho de banda y la presencia de incertidumbre sensorial elevada. Para garantizar una operación fiable durante misiones prolongadas, el sistema se estructura siguiendo principios de modularidad, redundancia funcional y jerarquía en la toma de decisiones. Estos principios permiten separar claramente los niveles de planificación estratégica de los niveles de control dinámico del vehículo.

Además, el diseño del sistema debe considerar la eficiencia energética como un factor crítico, ya que la autonomía temporal del vehículo depende directamente de la gestión del consumo. La arquitectura también incorpora mecanismos de tolerancia a fallos y diagnóstico autónomo que permiten detectar degradaciones en sensores o subsistemas y adaptar el comportamiento del vehículo para garantizar la continuidad de la misión. Esto queda representado en la Tabla A13-1 en función de los principios de la arquitectura de estudio.

Principio	Descripción	Impacto en el sistema
Modularidad	División modular funcional independiente	Actualizar sensores y algoritmos
Jerarquía funcional	Organización de decisión	Planificación estratégica de control dinámico separada
Robustez	Capacidad de operar con fallos	Redundancia y diagnóstico
Eficiencia energética	Optimización del consumo	Mayor duración de misión

Tabla A13-1 Conceptos de la arquitectura de software.

2. Arquitectura funcional del sistema

La arquitectura funcional del XLUUV se estructura en varias capas jerárquicas que gestionan los distintos niveles de autonomía. Cada capa recibe información del nivel inferior y proporciona directrices o comandos al nivel inmediatamente inferior. Este enfoque permite aislar los procesos de percepción, navegación, decisión táctica y control del vehículo, reduciendo la complejidad global y facilitando validación y mantenimiento.

En el nivel más bajo se encuentra el sistema de percepción, encargado de adquirir información del entorno a través de sensores acústicos, inerciales y ambientales. Sobre esta capa opera el sistema de navegación autónoma, que calcula la posición y genera trayectorias seguras. En niveles superiores se sitúan el sistema de decisión táctica y el gestor de misión, responsables de evaluar la situación operativa y adaptar la ejecución de la misión a las condiciones detectadas. Con la jerarquización del sistema se permite el uso eficiente de recursos y la reducción de consumos redundantes.

La arquitectura funcional queda definida en la Tabla A13-2 en función de los niveles mencionados.

Nivel	Función principal	Componentes
Gestión de misión	Planificación estratégica	Planificador de misión y gestor de recursos
Decisión táctica	Evaluación de amenazas	Clasificador de contactos y motor de decisiones
Navegación autónoma	Planificación de rutas	SLAM y planificación de trayectorias
Control del vehículo	Ejecución de maniobras	Controladores de rumbo y profundidad para gobierno
Percepción	Adquisición de datos	Sonar, sensores inerciales y sensores ambientales

Tabla A13-2 Arquitectura funcional del Sistema de software.

3. Sistema de percepción y sensores

El sistema de percepción constituye la base de la autonomía del vehículo, ya que proporciona la información necesaria para comprender el entorno submarino. A diferencia de los sistemas terrestres o aéreos, donde los sensores ópticos tienen un papel predominante, en el entorno submarino los sensores acústicos son la principal fuente de información debido a la fuerte atenuación de la luz en el agua. Por este motivo, los XLUUV utilizan sonar para cartografiar el fondo marino y detectar obstáculos.

Los sensores de navegación permiten estimar la posición y orientación del vehículo durante periodos prolongados de inmersión como se muestra en la Tabla A13-3. La integración de sistemas inerciales, *Doppler Velocity Log* y sensores de presión permite mantener una estimación de posición precisa incluso sin acceso a GNSS. Cuando el vehículo emerge a superficie, la posición puede corregirse mediante señal satelital con integración de GPS, reduciendo los errores acumulados durante la navegación inercial.

Sensor	Tipo	Aplicación
INS	Navegación	Estimación inercial de posición y actitud
DVL	Navegación	Medición de velocidad respecto al fondo
Sonar multihaz	Percepción	Cartografía del fondo marino
Sonar FLS y SSS	Percepción	Imagen de alta resolución del fondo
Sonar pasivo	Percepción	Detección acústica de contactos

Tabla A13-3 Sensores de software integrados.

4. Navegación autónoma

La navegación autónoma tiene como objetivo determinar la trayectoria óptima que el vehículo debe seguir para cumplir la misión asignada. Para ello, el sistema combina información de navegación, mapas del entorno y restricciones operativas. La planificación de rutas se realiza normalmente en dos niveles: planificación global, definida antes del inicio de la misión, y planificación local, con reaccionar ante el medio submarino y la evasión de obstáculos.

Los algoritmos de planificación global utilizan modelos del entorno para calcular rutas energéticamente eficientes y seguras. Durante la misión, el sistema puede modificar estas rutas en función de las condiciones detectadas, como corrientes marinas o presencia de obstáculos. Este enfoque adaptativo mejora la eficiencia del sistema y reduce el riesgo de colisión en entornos complejos.

Los algoritmos necesarios se especifican en la Tabla A13-4.

Algoritmo	Tipo	Aplicación
A*	Búsqueda heurística	Planificación de rutas globales
D*	Replanificación dinámica	Adaptación de rutas
RRT*	Planificación probabilística	Trayectorias en entornos complejos
MPC	Control predictivo	Optimización de trayectoria

Tabla A13-4 Algoritmos de software del sistema.

5. Sistema de decisión táctica

El sistema de decisión táctica analiza la información procedente de los sensores y del sistema de navegación para determinar las acciones más adecuadas en cada momento, con una metodología presentada en la Tabla A13-5. Este sistema evalúa continuamente el estado del vehículo, los contactos detectados y las condiciones del entorno para determinar modificaciones del comportamiento. En entornos de alta incertidumbre, se emplean modelos probabilísticos para estimar el riesgo de cada acción.

Una de las funciones principales de este nivel es la clasificación de objetos detectados por sonar. Para ello se utilizan técnicas de aprendizaje automático capaces de analizar imágenes acústicas y firmas sonoras con el objetivo de diferenciar entre obstáculos naturales, infraestructuras submarinas o posibles amenazas. Esta capacidad resulta especialmente importante en misiones de vigilancia o guerra de minas.

Método	Tipo	Uso
Redes neuronales CNN	Aprendizaje profundo	Clasificación de imágenes sonar
Modelos acústicos	Procesamiento señal	Identificación de firmas sonoras
Árboles de decisión	IA simbólica	Clasificación rápida de contactos

Tabla A13-5 Métodos de aplicación de software.

6. Sistema de control del vehículo

El sistema de control del vehículo es responsable de ejecutar las maniobras necesarias para seguir la trayectoria generada por el sistema de navegación. Este sistema controla variables como el rumbo, la profundidad y la velocidad del vehículo mediante actuadores hidrodinámicos, incluyendo timones, planos de inmersión y sistemas de propulsión.

La estabilidad dinámica del vehículo es esencial para garantizar un funcionamiento seguro en condiciones de corriente y turbulencia. Con ello se permite el control total de la plataforma de forma integral con la gestión de recursos en favor de la operación y el funcionamiento óptimo de sistemas.

Para mantener la estabilidad y precisión de la navegación se emplean controladores basados en modelos dinámicos del vehículo, presentes en la Tabla A13-6. Entre los métodos más utilizados destacan los controladores PID adaptativos y los sistemas de control predictivo basados en modelo (MPC), que permiten anticipar el comportamiento dinámico del vehículo y optimizar las maniobras de control.

Variable	Actuador	Objetivo
Rumbo	Timones laterales	Orientación del vehículo
Profundidad	Planos de inmersión	Control vertical
Velocidad	Sistema de propulsión	Gestión energética

Tabla A13-6 Actuadores integrados en el sistema.

7. Comunicaciones y arquitectura computacional

Las comunicaciones submarinas presentan limitaciones significativas debido a la absorción de las ondas electromagnéticas en el agua. Por esta razón, la mayoría de los sistemas de comunicación submarina se basan en tecnología acústica, que permite transmitir información a mayores distancias, aunque con un ancho de banda muy limitado. En consecuencia, los XLUUV deben operar de forma altamente autónoma, transmitiendo únicamente información crítica durante la misión.

La arquitectura computacional del vehículo se organiza en varios sistemas de procesamiento especializados, como se muestra en la Tabla A13-7. Normalmente se distingue entre un ordenador de misión encargado de la planificación y toma de decisiones, un ordenador de navegación dedicado al procesamiento sensorial y estimación de estado, y un controlador de tiempo real responsable de ejecutar los algoritmos de control del vehículo.

Sistema	Función	Tipo de procesamiento
Ordenador de misión	Planificación y decisión	IA y lógica de misión
Ordenador de navegación	Fusión sensorial	Procesamiento de sensores
Controlador de vehículo	Control dinámico	Tiempo real

Tabla A13-7 Sistemas computacionales de software.

8. Diagrama de la arquitectura

A continuación, se relaciona la arquitectura del software de la plataforma autónoma. La arquitectura se presenta mediante la Figura 13-1, donde se disponen las relaciones de los equipos y sistemas, y sus dependencias con el conjunto mediante comunicaciones bidireccionales y unidireccionales.

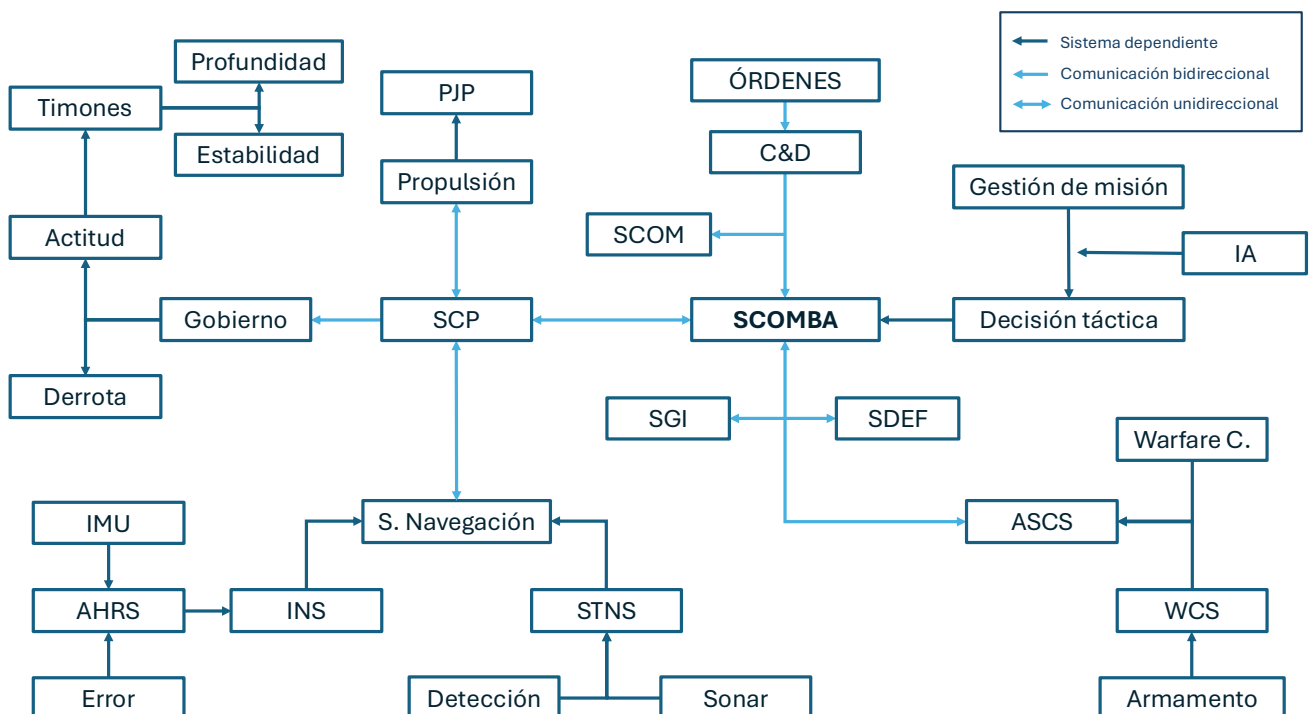


Figura A13-1 Diagrama de la arquitectura de software del XLUUV (Elaboración propia).

ANEXO XIV ANÁLISIS DE RIESGOS Y MATRIZ RAMS

Las operaciones de larga duración mediante vehículos submarinos XLUUV presentan requisitos operativos especialmente exigentes desde el punto de vista de la fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad (RAMS). A diferencia de los sistemas navales tripulados, estas plataformas deben operar durante periodos prolongados sin intervención directa de personal humano, lo que incrementa la importancia del diseño robusto, la redundancia de sistemas críticos y la capacidad de diagnóstico autónomo.

El análisis RAMS constituye una herramienta fundamental en la ingeniería de sistemas complejos, especialmente en el ámbito naval y militar, donde los fallos pueden tener consecuencias a nivel operativo, económico y ambiental de manera significativa. En el caso de la construcción de un XLUUV destinado como proyecto para las capacidades de la Armada Española, el análisis RAMS permite identificar riesgos asociados al funcionamiento autónomo del sistema y definir medidas de mitigación que garanticen un nivel adecuado de seguridad y disponibilidad operativa.

Este anexo presenta un análisis preliminar de riesgos y una matriz RAMS aplicable a un diseño conceptual de plataforma XLUUV orientada a misiones de vigilancia, reconocimiento y operaciones navales de larga duración. Con este análisis se asientan las bases para estudios posteriores sobre un proyecto ya fundamentados en próximas fases de diseño.

1. Metodología de análisis RAMS

El análisis se basa en metodologías ampliamente utilizadas en ingeniería naval, que incluyen:

- Análisis preliminar de riesgos (PHA – *Preliminary Hazard Analysis*); se aplica como una técnica semi-cuantitativa para las etapas iniciales de diseño o proyectos para la identificación de peligros potenciales, la evaluación de riesgos y la propuesta de medidas para control. Busca prevenir accidentes laborales y fallos del sistema con el análisis procedimientos operativos y de componentes peligrosos de forma preliminar.
- Análisis de modos de fallo y efectos (FMEA); se basa en una metodología sistemática para identificar y mitigar riesgos potenciales con una asignación de prioridades para los diseños antes de la aparición de posibles fallos. Con este, se evalúa la severidad, ocurrencia y detectabilidad para la mejora de la calidad y fiabilidad.
- Evaluación cualitativa de probabilidad y severidad; se establece como un método subjetivo que prioriza amenazas y oportunidades (basando en experiencia y juicio de expertos).

Los parámetros RAMS considerados son:

- Fiabilidad (*Reliability*): probabilidad de que el sistema funcione correctamente durante un periodo determinado sin fallos.
- Mantenibilidad (*Maintainability*): capacidad del sistema para ser reparado o restaurado a su estado operativo en un tiempo determinado.
- Disponibilidad (*Availability*): proporción del tiempo en que el sistema se encuentra operativo y disponible para cumplir su misión.
- Seguridad (*Safety*): capacidad del sistema para operar sin causar daños a personas, infraestructuras o al medio ambiente.

El análisis se centra en los principales subsistemas de un XLUUV:

- Sistema de propulsión.
- Sistema energético.
- Sistema de navegación y control.
- Sistema de comunicaciones.
- Sensores y carga útil.
- Software de autonomía.

2. Identificación de riesgos operativos

Las operaciones autónomas de larga duración presentan varios riesgos específicos derivados de la ausencia de intervención humana directa y de las condiciones del entorno marítimo.

2.1 Fallos del sistema energético

El sistema energético es uno de los componentes más críticos de un XLUUV. Fallos en baterías, sistemas de almacenamiento energético o gestión de energía pueden provocar la pérdida completa de la misión o incluso del vehículo. Entre los riesgos principales se incluyen:

- Degradación prematura de baterías.
- Fallo del sistema de gestión energética.
- Pérdida de capacidad de recarga o generación energética.
- Fallos de los sistemas de generación renovable (o en el Diésel Generador).

La mitigación de estos riesgos requiere sistemas redundantes de almacenamiento energético, algoritmos avanzados de gestión de consumo y monitorización continua del estado de las baterías.

2.2 Fallos del sistema de navegación

El sistema de navegación autónoma puede verse afectado por errores en sensores inerciales, interferencias en señales de posicionamiento o fallos en algoritmos de control. Las consecuencias potenciales incluyen:

- Desviación de la ruta programada.
- Colisiones con obstáculos o infraestructuras submarinas.
- Pérdida de la misión.
- Denegación de servicios y fallo en el posicionamiento.

Para reducir estos riesgos se emplean sistemas de navegación redundantes, sensores múltiples (INS, sonar, navegación acústica) y algoritmos de verificación cruzada de datos.

2.3 Pérdida de comunicaciones

Durante misiones de larga duración, las comunicaciones con el vehículo pueden verse limitadas por factores como la profundidad, las condiciones oceánicas o interferencias electromagnéticas. Las principales consecuencias incluyen:

- Pérdida de control remoto.
- Retraso en la recepción de datos operativos.
- Dificultad para abortar la misión en caso de emergencia.

Por este motivo, el sistema debe estar diseñado para operar de forma segura incluso en condiciones de aislamiento prolongado.

2.4 Fallos del software de autonomía

El software de control autónomo constituye uno de los elementos más complejos del sistema. Un error en los algoritmos de decisión podría generar comportamientos inesperados o situaciones operativas inseguras. Entre los riesgos identificados se encuentran:

- Errores en la toma de decisiones autónomas.
- Fallos en la gestión de emergencias.
- Comportamientos no previstos ante situaciones nuevas.
- Errores de comunicación de elemento de hardware.

La mitigación de estos riesgos requiere pruebas exhaustivas, simulación avanzada y sistemas de supervisión del software.

3. Matriz RAMS

A continuación, en la Tabla A14-1, se presenta una matriz RAMS a modo preliminar para los principales subsistemas del XLUUV que han sido analizados en el proyecto. Esta se muestra haciendo un análisis de los riesgos que se han identificado de forma preliminar junto a su probabilidad, su severidad y el posible impacto que tienen en el proyecto conforme a los principios de fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad.

Subsistema	Riesgo identificado	Probabilidad	Severidad	Impacto RAMS
S. energético	Fallo de baterías	Media	Alta	Fiabilidad y Disponibilidad
Propulsión	Fallo del motor o hélice	Baja	Alta	Disponibilidad y Seguridad
Navegación	Error en sensores	Media	Media	Fiabilidad
Comms	Pérdida de enlace	Alta	Media	Disponibilidad
Software	Error en algoritmo	Baja	Alta	Seguridad y Fiabilidad
Sensores	Fallo de sensores	Media	Baja	Fiabilidad

Tabla A14-1 Análisis RAMS de los subsistemas de abordó.

Asimismo, con la Tabla A14-2 se adjuntan las posibles medidas de mitigación para los riesgos estudiados conforme a los subsistemas analizados.

Subsistema	Medidas de mitigación
S. energético	Redundancia energética, monitorización de estado
Propulsión	Diseño redundante, mantenimiento preventivo
Navegación	Fusión de sensores y sistemas redundantes
Comms	Protocolos de autonomía y almacenamiento de datos
Software	Validación y verificación del software
Sensores	Sensores redundantes

Tabla A14-2 Medidas de mitigación de los riesgos de RAMS.

4. Evaluación RAMS del sistema

A partir del análisis preliminar se pueden identificar varios aspectos clave para garantizar el funcionamiento fiable de los sistemas. Estos se aplican en los campos de fiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad y seguridad.

▪ Fiabilidad

La fiabilidad del sistema depende principalmente de la robustez de los subsistemas críticos, especialmente:

- Sistema energético.
- Propulsión.
- Navegación.

La incorporación de redundancias y sistemas de diagnóstico automático resulta esencial para aumentar la fiabilidad global.

▪ **Mantenibilidad**

En sistemas autónomos submarinos, la mantenibilidad se centra en las operaciones de mantenimiento realizadas antes y después de la misión. El diseño debe facilitar:

- Acceso a componentes críticos.
- Sustitución rápida de módulos.
- Diagnóstico automático de fallos.

El grado de mantenibilidad es proporcional a los periodos de permanencia.

▪ **Disponibilidad**

La disponibilidad operativa depende de la capacidad del sistema para completar misiones sin fallos críticos. Factores clave incluyen:

- Autonomía energética.
- Robustez del software.
- Tolerancia a fallos.

Una alta disponibilidad requiere una arquitectura de sistema tolerante a fallos.

▪ **Seguridad**

La seguridad del sistema debe considerar tanto el riesgo para el propio vehículo como el impacto potencial sobre el entorno marino o sobre otras plataformas navales. Las medidas de seguridad incluyen:

- Protocolos de emergencia.
- Sistemas de autodiagnóstico.
- Modos seguros de operación en caso de fallo.

5. Conclusiones

El análisis RAMS aplicado a un sistema XLUUV para operaciones autónomas de larga duración permite identificar los principales riesgos técnicos asociados al funcionamiento del vehículo y establecer medidas de mitigación adecuadas.

Los resultados del análisis muestran que los subsistemas más críticos para la fiabilidad y disponibilidad del sistema son el sistema energético, el software de autonomía y los sistemas de navegación. La incorporación de redundancias, algoritmos avanzados de gestión energética y procedimientos rigurosos de verificación del software son elementos clave para garantizar el éxito de las misiones.

En futuras fases del diseño será necesario realizar análisis más detallados, incluyendo modelos cuantitativos de fiabilidad, análisis FMEA completos y simulaciones operativas, con el objetivo de optimizar el diseño del sistema y asegurar su cumplimiento con los requisitos operativos de la Armada española.

ANEXO XV PRUEBAS DE MAR Y CERTIFICACIONES

Pruebas de mar y Certificaciones conforme a especificaciones de Navantia Cartagena

Autor: Álvaro Monedero Rodríguez y Muñoz

Constructora: Navantia Cartagena

Revisión: 4.0

Clasificación: Técnico Industrial

Ámbito: Construcción naval de submarinos

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETO

Las pruebas de mar son una serie de comprobaciones que se realizan a una unidad naval en mar abierto para comprobar su desempeño tras finalizar su construcción en el astillero. En el ámbito militar, estas suponen el paso previo a la entrega de la plataforma a la Armada y deben de seguir la máxima rigurosidad para definir las capacidades y limitaciones reales de esta.

1.1 Alcance del Documento

El presente anexo técnico establece el protocolo de pruebas de mar para vehículos submarinos no tripulados grandes (XLUUV) siguiendo las metodologías, estándares y lecciones aprendidas del Programa S-80 de Navantia. Este documento define las fases de verificación y validación necesarias para garantizar la operatividad, seguridad y capacidades operacionales del sistema autónomo submarino previo a su entrega a la Armada española.

1.2 Contexto Operacional de los XLUUV

Los XLUUV son vehículos submarinos autónomos de gran envergadura diseñados para misiones de larga duración sin control humano directo. Sus aplicaciones generales incluyen:

- Inteligencia, vigilancia y reconocimiento (ISR) persistente.
- Operaciones de minado y contra minas (MIW y MCM).
- Guerra antisubmarina (ASW).
- Operaciones de lecho marino (SBW).
- Operaciones complementarias (ASUW y AAW).
- Transporte de cargas útiles y despliegue de sensores.
- Acciones precursoras para reconocimiento de AOO y negación del mar.
- Apoyo a la Flota en operaciones y misiones.

1.3 Filosofía de Certificación basada en el S-80

El programa S-80 estableció un marco de certificación técnica (PCTSuB) que garantiza niveles razonables de confianza sobre la seguridad mediante sistemas similares a los de aeronavegabilidad. Este anexo adapta dicha filosofía al contexto de sistemas autónomos no tripulados, enfocándose en:

- Resistencia estructural bajo condiciones de inmersión.
- Fiabilidad de sistemas críticos de control y navegación.
- Validación exhaustiva del software de autonomía.
- Protocolos de seguridad y recuperación ante emergencias.
- Trazabilidad completa de requisitos técnicos.

2. MARCO NORMATIVO Y REQUISITOS GENERALES

Para el desarrollo de las distintas etapas dentro de las certificaciones y pruebas es necesaria su ejecución dentro del marco normativo actual y en base a la normativa en vigor en el ámbito nacional. Este marco normativo guía el desarrollo de las acciones dentro de la certificación y debe permitir la licitación de todos los procesos constructivos y su validación.

2.1 Referencias Normativas

El protocolo de pruebas se basa en las siguientes referencias:

- NAVSEAINST 3960.5A: Submarine Safety Certification Program.
- Especificaciones técnicas del Programa S-80 de Navantia.
- Germanischer Lloyd Rules for Unmanned Submersibles.
- Procesos de verificación HAT/SAT estándar de la industria naval.
- Protocolos de certificación para vehículos autónomos.

2.2 Gestión de Requisitos Técnicos

Siguiendo la metodología del desarrollo del S-80, el XLUUV debe tener definidos y trazables todos sus requisitos operacionales. Con esta premisa, se establecen una serie de requisitos en la Tabla A15-1 con la cantidad necesaria de:

Categoría	Cantidad	Ámbito
Requisitos de Cliente	>15000	Especificaciones funcionales y operativas
Requisitos de Seguridad	>2000	Sistemas críticos, estanqueidad, estructurales
Requisitos de Autonomía	>3000	Navegación, decisión, COLREGs, emergencias
Requisitos de Software	>5000	Control de plataforma, misión, comunicaciones

Tabla A15-1: Distribución típica de requisitos técnicos en XLUUV.

Con el desarrollo de las pruebas es necesario llevar el control de cada una de las operaciones y su estado de ejecución para permitir su posterior validación. Así, cada requisito debe ser verificado mediante al menos uno de los siguientes métodos:

- Análisis (A): Cálculos, simulaciones, modelos matemáticos.
- Inspección (I): Verificación visual, dimensional, documental.
- Demostración (D): Pruebas funcionales sin mediciones cuantitativas.
- Test (T): Ensayos con instrumentación y mediciones cuantitativas.

2.3 Mantenimiento Centrado en Fiabilidad (RCM)

El programa S-80 implementó análisis RCM para garantizar disponibilidad operativa con dotaciones reducidas operaciones de mantenimiento. Para XLUUV con dotación en base, este requisito es aún más crítico por las necesidades de mantenimiento y apoyo logístico:

- MTBF objetivo: >2000 horas de operación autónoma.
- Fiabilidad de sistemas críticos: >0.999 para navegación y control.
- Disponibilidad operacional: >85% del tiempo de ciclo de vida.
- Capacidad de autodiagnóstico: Detección automática de 95% de fallos críticos.

3. FASES DEL PROGRAMA DE PRUEBAS

Adaptando el proceso estándar de desarrollo de la USN para el *Orca* y las prácticas de Navantia en la construcción submarinos con el proyecto S-80, el programa de pruebas puede dividirse en siete etapas secuenciales que se presentan en la Tabla A15-2:

Etapas	Fase	Ubicación	Objetivo Principal
1	Factory Tests	Fábrica	Componentes individuales
2	Integration Tests	Banco	Integración de subsistemas
3	Pre-Launch Tests	Grada/Dique	Ensamblaje completo
4	HAT	Puerto	Sistemas integrados sin navegar
5	Light-Off Tests	Muelle	Activación de sistemas de potencia
6	Pier-Side Tests	Muelle	Operación con energía completa
7	SAT	Mar	Validación operacional completa

Tabla A15-2 Etapas del programa de pruebas para XLUV.

El desarrollo de las etapas expuestas permite la compleción del proceso de certificación.

3.1 Etapa 1: Pruebas de Aceptación en Fábrica (FAT).

- Duración estimada: 8-12 meses
- Objetivo: Verificar que cada sistema y equipo cumple con sus especificaciones técnicas antes de la integración.

Sistemas principales para evaluación:

1. Sistema de Propulsión:
 - Motor eléctrico principal (pruebas de banco hasta potencia nominal).
 - Sistema de baterías (capacidad, ciclos de carga y seguridad térmica).
 - Sistemas estructurales y auxiliares.
 - Sistemas de control (revoluciones, temperatura, presiones y demás).
2. Sistema de Control de Plataforma (PCS):
 - Software de control (versiones certificadas según MISAF).
 - Hardware de control (redundancia y capacidad de procesamiento).
 - Interfaces hombre-máquina para el Centro de Control Remoto (RCC).
3. Sistema de Navegación y Guiado (GNC en el STNS):
 - INS (Inertial Navigation System) - deriva <0.1 nm/hora.
 - DVL (Doppler Velocity Log) - precisión $\pm 0.2\%$ de velocidad.
 - Sensores de profundidad - precisión $\pm 0.1\%$ fondo escala.
 - GPS de superficie - adquisición <30 segundos post-emersión.
 - Integración de información de sensores con el STNS.
4. Sistema de Misión y Autonomía:
 - Planificador de misiones (generación de rutas, *waypoints*, contingencias).
 - Módulo de decisión autónoma (cumplimiento COLREGs submarino).
 - Sistema de detección y evasión de obstáculos (sonar FLS y SSS y algoritmos).
 - Gestión de energía (optimización de autonomía según misión).

5. Sistemas de Sensores:

- Sonar de navegación (CAS, FLS y SSS).
- Sensores de *payload* según misión (acústicos, magnéticos, ópticos).
- Sistemas de comunicación (acústica submarina, satelital en superficie).

Documentación requerida:

- Protocolos de prueba aprobados por oficina de programa.
- Registros de mediciones con instrumentación calibrada.
- Certificados de conformidad de suministradores.
- Análisis de desviaciones y no conformidades.
- Planes de acción correctiva (si aplicable según desarrollo).

3.2 Etapa 2: Pruebas de Integración en LBTS.

- Duración estimada: 6-9 meses
- Objetivo: Validar la integración de sistemas en entorno simulado de alta fidelidad.

El S-80 utiliza un *Land Based Test Site* (LBTS) único que permite simular condiciones operativas reales. Para el desarrollo del XLUUV se requiere una configuración del banco de pruebas:

- Simulación de presión hidrostática hasta profundidad operacional máxima.
- Simulación de movimiento (*pitch, roll, yaw* en plataforma móvil).
- Emulación de entorno acústico submarino.
- Interfaces reales con sistemas de potencia, control y sensores.

Pruebas por realizar en la segunda etapa:

1. Integración del Sistema de Control:

- Comunicación entre módulos (latencias <50ms para lazos críticos).
- Redundancia y conmutación automática ante fallos.
- Modos degradados de operación.
- Secuencias automáticas de emergencia.

2. Validación del Software de Autonomía:

- Escenarios de misión completos en simulación con acciones preplaneadas.
- Comportamiento ante obstáculos dinámicos y estáticos.
- Replanificación de ruta en tiempo real.
- Toma de decisiones ante contingencias.
- Gestión de comunicaciones con RCC.

3. Pruebas de Resistencia y Estrés:

- Operación continua durante 72 horas mínimo.
- Ciclos de potencia y arranques/paradas.
- Simulación de condiciones extremas (temperatura, presión).
- Inyección de fallos (validación mediante FMEA).

4. Seguridad Cibernética:

- *Penetration testing* de sistemas de comunicación.
- Validación de encriptación *end-to-end*.
- Resiliencia ante pérdida de comunicaciones.
- Protocolos de autenticación y autorización.
- Sistemas con *back up*.

Criterios de aceptación Etapa 2:

- Completar >95% de verificaciones previstas sin no conformidades mayores.
- Demostrar fiabilidad >95% en 100 horas de operación continua simulada.
- Software crítico certificado sin defectos de Severidad 1 o 2.
- Documentación técnica completa y aprobada.
- Estructura de sistemas certificada y conforme a objetivos operacionales.

3.3 Etapa 3: Pruebas Pre-Lanzamiento

- Duración estimada: 3-4 meses
- Objetivo: Verificar el ensamblaje completo del XLUUV y sistemas estructurales antes de la botadura.

Inspecciones estructurales:

- Verificación dimensional del casco (tolerancias de construcción).
- Prueba hidrostática del casco resistente (1,5 veces la presión máxima operativa).
- Prueba de resistencia de materiales a corrosión y resistencia estructural al medio.
- Ensayos no destructivos (ultrasonidos, radiografía de soldaduras críticas).
- Verificación de estanqueidad de penetraciones y conexiones.
- Certificación de sistemas críticos según PCTSuB.

Pruebas de sistemas sin energía:

- Alineación de ejes de propulsión.
- Calibración de sensores inerciales y compases.
- Verificación de compartimentación y válvulas de aislamiento.
- Sistemas de lastrado y trimado.
- Mecanismos de lanzamiento y recuperación.
- Pruebas de funcionalidad de *payload*.
- Mecanismos de modularidad y compartimentación.

Hitos de seguridad:

Se establece un Plan de Gestión de Hitos de Seguridad que debe completarse satisfactoriamente:

1. Certificación de integridad estructural del casco.
2. Aprobación de sistemas de presión y estanqueidad.
3. Validación de sistemas de emergencia y flotabilidad.
4. Autorización para carga de combustible/baterías.
5. Permiso para botadura.

3.4 Etapa 4: Pruebas de Aceptación en Puerto (HAT)

- Duración estimada: 4-6 meses
- Objetivo: Verificar el funcionamiento de todos los sistemas con el vehículo a flote, pero amarrado, sin realizar navegación.

El programa S-80 contempla más de 1500 verificaciones en esta fase. Para un XLUUV se aproxima una estimación de entre 800-1200 procedimientos de verificación. Las categorías de pruebas HAT son expuestas en la Tabla 11-3 con sus verificaciones principales.

Sistema	Nº Tests	Verificaciones Principales
Propulsión	120-150	Arranque de motores, vibraciones, consumos
Energía	100-120	Carga baterías, distribución eléctrica, <i>backups</i>
Control	150-180	Secuencias automáticas, modos operación
Navegación	80-100	Calibración sensores, alineación, GPS
Comunicaciones	60-80	Todos los enlaces (acústico, RF, satélite)
Autonomía	100-120	Software misión, planificador, decisor
Sensores	80-100	Sonares, sensores ambientales, payload
Seguridad	110-150	Emergencias, flotación, recuperación

Tabla A15-3: Distribución de pruebas HAT para XLUUV.

Pruebas específicas HAT:

1. Sistemas de Potencia y Propulsión:

- Carga completa de baterías desde tierra.
- Arranque y parada de motores principales.
- Medición de vibraciones en todos los modos de potencia.
- Prueba de propulsión en reversa (si aplicable).
- Verificación de consumos eléctricos en diferentes regímenes.

2. Sistema de Control de Plataforma:

- Operación desde RCC con todos los modos de control.
- Pruebas de redundancia (conmutación automática entre controladores).
- Simulación de fallos y respuesta del sistema.
- Integración satisfactoria de sistemas en el SCP.
- Verificación de alarmas y sistema de gestión de eventos.
- Pruebas de interfaces de usuario (HMI) y ergonomía operacional con C2.

3. Navegación y Posicionamiento:

- Alineación INS estática (24 horas mínimo).
- Adquisición GPS y sincronización temporal.
- Calibración sensores de profundidad y presión.
- Verificación DVL en muelle (detección de fondo).
- Prueba de sistemas de posicionamiento acústico (USBL/LBL si aplicable).

4. Comunicaciones Integradas:

- Enlaces satelitales (SATCOM, Iridium e Inmarsat).
- Comunicación acústica submarina (alcances y tasas de datos).
- Uso de transferencia de datos vía LINK.
- WiFi y *FreeWave* para operaciones cerca de superficie.
- Encriptación y protocolos de seguridad.
- Prueba de replanificación de misión vía enlace.

5. Autonomía y Software de Misión:

- Carga de planes de misión y *waypoints*.
- Validación de lógica de decisión en escenarios simulados.
- Comportamiento ante pérdida de comunicaciones (modo autónomo).
- Protocolos de aborto de misión y retorno seguro.
- Integración con sistemas de detección de obstáculos.

6. Seguridad y Sistemas de Emergencia:

- Sistemas de flotación de emergencia (lastre, bolsas flotación).
- Balizas de localización (ESUS, *acoustic pingers*, GPS *emergency beacon*).
- Sistemas de recuperación (ganchos, interfaces para grúa).
- Procedimientos de parada de emergencia (*Emergency Stop*).
- Protocolos de rescate y recuperación.

7. Sensores y *payload*:

- Calibración de todos los sensores de misión.
- Verificación de almacenamiento de datos (memoria, *logging*).
- Sincronización temporal entre sensores.
- Pruebas de *payload* específico según misión.

Pruebas de estanqueidad y compartimentación:

- Inspección visual de todas las penetraciones y conectores.
- Prueba de estanqueidad de escotillas y registros de acceso.
- Verificación de sensores de humedad y detección de agua.

Criterios de paso a Etapa 5:

- Completar >99% de pruebas HAT satisfactoriamente.
- Resolver todas las no conformidades de Severidad 1 y 2.
- Aprobar revisión de seguridad (*Safety Review Board*).
- Obtener autorización de la oficina de programa.
- Completar formación de equipo operador en RCC.

3.5 Etapa 5-6: Pruebas de Activación y Muelle

- Duración estimada: 2-3 meses
- Objetivo: Validar sistemas en plena capacidad energética y últimas verificaciones.

Light-Off Tests (Etapa 5):

- Primera activación de sistemas de potencia completa.
- Arranque y sincronización de generadores/sistemas propulsores.
- Verificación de distribución eléctrica bajo carga.
- Mediciones de ruido radiado amarrado (*baseline*).

Pier-Side Full Power Tests (Etapa 6):

- Operación sostenida a diferentes niveles de potencia (4-8 horas).
- Pruebas de *black-out* y recuperación automática.
- Medición de distorsión armónica total (THD) en red eléctrica.
- Pruebas de sistema de climatización y gestión térmica.
- Verificación de todos los sistemas trabajando simultáneamente.
- Simulación de perfiles de misión completos sin desplazamiento.

Documentación y trazabilidad:

- Registro completo de parámetros operacionales (*logbooks* automáticos).
- Actualización de registros operacionales del vehículo.
- Calibración y certificación de instrumentación de a bordo.
- Preparación de protocolos para pruebas de mar.
- Control y gestión de calidad en la certificación.

3.6 Etapa 7: Pruebas de Aceptación en la Mar (SAT)

- Duración estimada: 6-12 meses
- Objetivo: Validar el comportamiento del XLUUV en condiciones operacionales reales, demostrando el cumplimiento de todos los requisitos operacionales.

Estructura de las SAT:

Las pruebas de mar se dividen en varias fases progresivas:

1. *Builder's Trials* (BT): Pruebas iniciales controladas por el constructor.
2. *Acceptance Trials* (AT): Pruebas formales de aceptación con cliente.
3. *Operational Trials* (OT): Validación de capacidades operacionales específicas.

4. PROTOCOLO DETALLADO DE PRUEBAS DE MAR (SAT)

Las pruebas de mar siguen un protocolo detallado que para las certificaciones en Navantia Cartagena están estipuladas de manera previa conforme a las *Sea Acceptance Trials* (SAT) y que han sido de seguimiento con el S-80. Para la ejecución del XLUUV es necesaria la aplicación de una serie de modificaciones sobre la base existente para acomodar las necesidades de autonomía de la plataforma.

4.1 Organización y Seguridad de las SAT

Requisitos previos obligatorios:

- Completar todas las pruebas HAT sin no conformidades mayores pendientes.
- Obtener autorización de la Autoridad de Certificación (similar PCTSuB).
- Aprobar *Safety Review* específica para cada fase de pruebas.
- Disponer de buque de apoyo equipado con medios de recuperación.
- Establecer área de pruebas con NOTMAR (Notice to Mariners) activa.

Estructura del equipo de pruebas:

- RCC (*Remote Control Center*): Operadores, ingenieros de sistemas, especialistas.
- Buque de apoyo: Tripulación, equipo de recuperación, seguridad.
- Director de Pruebas: Autoridad para continuar o abortar pruebas.
- Oficial de Seguridad: Monitorización continua de parámetros críticos.
- Equipo técnico: Ingenieros de sistemas específicos (propulsión, control y demás).

Medios de apoyo requeridos:

- Buque oceanográfico o similar con grúa de capacidad adecuada (>15 ton típico).
- Sistemas de seguimiento: radar, AIS, telemetría en tiempo real.
- Comunicaciones redundantes: satelitales, radio VHF/UHF, acústica.
- Equipo de buceo profesional para inspecciones y recuperación.
- ROV/AUV de apoyo para inspección submarina si necesario.

4.2 Fase SAT-1: Pruebas Básicas de Navegación

- Duración: 10-15 salidas
- Condiciones: Estado de mar <3, visibilidad >5 nm, día
- Profundidad máxima: Restringida a 50% profundidad operacional

Objetivos de SAT-1:

1. Primera Inmersión Controlada:
 - Inmersión gradual con paradas cada 20m para inspección sistemas.
 - Verificación de estanqueidad bajo presión creciente.
 - Monitorización de sensores de humedad en todos los compartimentos.
 - Verificación de control de profundidad y trimado.
 - Evaluación de respuesta de superficies de control.
2. Navegación en Superficie:
 - Pruebas de propulsión a diferentes velocidades (2-10 nudos).
 - Maniobras de gobierno (giros 90°, 180°, 360°).
 - Prueba de parada de emergencia (crash stop).
 - Medición de deriva y respuesta al viento/corriente.
 - Adquisición y mantenimiento de GPS.
3. Transición Superficie-Inmersión:
 - Secuencia de inmersión controlada (*dive sequence*).
 - Secuencia de emersión controlada (*surface sequence*).
 - Tiempo de transición entre estados.
 - Estabilidad durante transición.
 - Comportamiento en *snorkel depth* (si aplicable).
4. Navegación Submarina Básica:
 - Navegación rectilínea a velocidad constante.
 - Control de profundidad con precisión ± 1 m.
 - Navegación siguiendo *waypoints* predefinidos.
 - Respuesta a comandos desde RCC.
 - Tiempo de respuesta de actuadores.
5. Sistemas de Navegación:
 - Validación de INS en navegación real (comparación con GPS al emerger).
 - Funcionamiento DVL sobre fondo marino (diferentes profundidades).
 - Correlación entre sensores de navegación.
 - Precisión de navegación estimada y datos reales.
 - Deriva acumulada en trayectos de 1, 2, 4 horas.

Criterios de éxito SAT-1:

- Completar 10 inmersiones sin incidentes de seguridad.
- Demostrar control estable de profundidad (error <2m RMS).
- Navegación con precisión <1% de distancia recorrida sin DVL.
- Navegación con precisión <0.3% con DVL operativo.
- Comunicaciones fiables en 100% de intentos superficie/submarina.
- Sin intrusión de agua en compartimentos estancos.

4.3 Fase SAT-2: Pruebas Avanzadas de Maniobra y Control

- Duración: 15-20 salidas
- Condiciones: Estado de mar <4, profundidad hasta 75% máxima operacional

Objetivos de SAT-2:

1. Maniobras Dinámicas:
 - Giros con diferentes ángulos de timón (10°, 20°, 30°, máximo).
 - Medición de diámetro táctico y *advance/transfer*.
 - Pruebas de maniobra durante inmersión.
 - Maniobra en *zig-zag* (10°/10°, 20°/20°).
 - Evaluación de estabilidad direccional (*overshoot, settling time*).
 - Espirales Dieudonné para análisis de estabilidad.
2. Pruebas de Velocidad:
 - Perfiles de velocidad desde mínima controlable hasta máxima.
 - Medición de velocidad máxima sostenida.
 - Velocidades de operación sonar.
 - Aceleración y desaceleración.
 - Consumo energético frente a velocidad (curva de resistencia).
 - Autonomía estimada a diferentes velocidades.
3. Control de Profundidad Avanzado:
 - Cambios rápidos de profundidad (*diving planes response*).
 - Mantenimiento de profundidad constante con corrientes.
 - Navegación siguiendo perfil batimétrico (*terrain following*).
 - *Hovering* a profundidad constante (*station keeping*).
 - Comportamiento en termoclinas y estratificación.
4. Pruebas de Resistencia:
 - Misión continua de 24 horas (navegación autónoma).
 - Misión continua de 48 horas y 72 horas.
 - Monitorización de degradación de sistemas.
 - Gestión automática de energía durante misión larga.
5. Comportamiento en Condiciones Ambientales Variables:
 - Operación con diferentes estados de mar (hasta límite operacional).
 - Navegación con corrientes (medición de *track-keeping*).
 - Comportamiento en zonas de oleaje.
 - Operación en diferentes condiciones de densidad del agua.

Criterios de éxito SAT-2:

- Completar misión de 72 horas sin intervención humana.
- Mantener seguimiento con error <50m RMS en misión autónoma.
- Velocidad máxima $\geq 95\%$ del valor de diseño.
- Consumo energético dentro de $\pm 10\%$ de predicciones.
- Funcionamiento sin fallos en el periodo de pruebas (72 h).

4.4 Fase SAT-3: Validación de Autonomía y Sistemas de Misión

- Duración: 20-30 salidas
- Condiciones: Operacionales completas para situaciones de combate de alta intensidad, se prueban capacidades hasta límites de diseño

Objetivos de SAT-3:

1. Autonomía y Planificación de Misión:
 - Ejecución de plan de misión complejo (múltiples *waypoints*, *objectives*).
 - Replanificación automática ante obstáculos detectados.
 - Comportamiento ante área prohibida (*no-go zones*).
 - Optimización de ruta para conservación de energía.
 - Respuesta ante cambios de misión en tiempo real desde RCC
2. Detección y Evasión de Obstáculos:
 - Detección de obstáculos estáticos (rocas, taludes y estructuras submarinas).
 - Detección de obstáculos dinámicos (buques, mamíferos y otros vehículos).
 - Algoritmo de evasión (distancia mínima de paso).
 - Navegación en áreas complejas (puertos, estructuras *offshore*).
 - Validación de cumplimiento de COLREGs submarino.
3. Gestión de Emergencias y Contingencias:
 - Pérdida de comunicaciones (comportamiento autónomo predefinido).
 - Fallo de sensor crítico (*degraded mode operation*).
 - Batería baja (*return-to-home* automático).
 - Detección de inundación simulada (respuesta automática).
 - Pérdida de navegación (*surface and call home*).
4. Sistemas de Comunicación Operacionales:
 - Comunicación acústica a diferentes alcances (1, 5 y 10 km).
 - Actualización de *waypoints* vía enlace acústico.
 - Subida de datos de misión (sensor data, *status reports*).
 - Emersión programada para comunicación satelital.
 - Latencias de comando-respuesta en diferentes profundidades.
 - Funcionamiento prolongado de comunicaciones sin interferencias.
 - Integración con sistemas nacionales.
5. Sensores y *Payload* de Misión:
 - Operación de sonar FLS durante navegación.
 - Funcionamiento de *payload* específico (según tipo misión).
 - Calidad de datos adquiridos (*signal-to-noise*, resolución).
 - Sincronización de datos multi-sensor.
 - Capacidad de almacenamiento y gestión de datos.
6. Procedimientos Operacionales:
 - Procedimientos despliegue y recuperación (desde buque de apoyo).
 - Tiempos de preparación y activación (*readiness times*).
 - Procedimiento de llegada a zona de operaciones.
 - Transiciones de modos operativos.
 - Interfaz con sistemas de mando y control externos.
 - Procedimientos de despliegue en zona de operaciones.

Criterios de éxito SAT-3:

- Completar 10 misiones complejas (>48h) sin intervención
- Detección y evasión exitosa de 100% obstáculos presentados
- Comunicaciones efectivas en >90% de intentos programados
- Funcionamiento de *payload* según especificaciones de misión
- Recuperación exitosa en 100% de operaciones

4.5 Fase SAT-4: Pruebas de Capacidades Específicas

- Duración: Variable según misión (15-30 salidas)
- Objetivos de SAT-4: validación de las capacidades específicas según misión.

1. Para Misiones ISR (*Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*):

- Patrulla en área definida durante tiempo extendido (de 7 a 14 días).
- Adquisición y clasificación de contactos.
- Transmisión de información de inteligencia.
- Sigilo acústico (mediciones de ruido radiado operacional).
- Persistencia en área con gestión inteligente de energía.

2. Para Misiones MCM y MIW:

- Búsqueda sistemática de objetos en fondo marino
- Clasificación de contactos sonar (MILCO - *mine-like objects*).
- Navegación precisa en *pattern search*.
- Capacidad de re-adquisición de contactos.
- Operación en aguas someras con corrientes.

3. Para Misiones ASW:

- Despliegue de sensores acústicos.
- Seguimiento pasivo de contactos submarinos.
- Transmisión de datos de tracking.
- Coordinación con unidades aliadas.
- Operación silenciosa prolongada.
- Acciones ofensivas.
- Uso de armas coordinado.

4. Para Misiones de Transporte:

- Navegación de largo alcance (>500 nm).
- Precisión de llegada a punto de entrega.
- Despliegue de *payload* en ubicación específica.
- Operación en diferentes zonas climáticas.
- *Return-to-base* tras completar misión.

5. Para Misiones Complementarias:

- Navegación en coordinación con la Flota
- Precisión en procedimientos nacionales.
- Despliegue de capacidades operativas.
- Operaciones de negación del mar.
- Procedimientos operativos con coordinación de sistemas.
- Acciones precursoras.

4.6 Fase SAT-5: Pruebas de Límites y *Envelope Expansion*

- Duración: 10-15 salidas.
- Condiciones: Controladas (medidas de seguridad reforzadas).
- Objetivo: Validar los límites del sobre operacional y márgenes de seguridad.

1. Profundidad Máxima Operacional:

- Aproximación gradual a profundidad de diseño.
- Inmersión a máxima profundidad operacional (*Operating Depth*).
- Tiempo de permanencia a máxima profundidad (de 15 a 30 minutos).
- Inspección post-inmersión de casco y sistemas.
- Validación de márgenes de seguridad estructurales.

2. Velocidades Extremas:

- Velocidad máxima sostenida durante 2 horas.
- Medición de vibraciones a máxima velocidad.
- Comportamiento de sistemas de control a alta velocidad.
- Consumo energético en régimen máximo.
- Análisis de descarga de baterías en régimen máximo.

3. Maniobras Límite:

- Giro con máximo ángulo de timón a diferentes velocidades.
- Cambio de profundidad máximo (*pull-up/dive* máximo).
- Recuperación de actitudes extremas (*pitch, roll*).
- Límites de operación con sistemas degradados y mal funcionales.

4. Autonomía Máxima:

- Misión de duración máxima (hasta agotamiento energía a nivel seguro).
- Validación de predicción de autonomía frente a datos reales.
- Comportamiento en modo bajo consumo.
- Reservas de emergencia y capacidad de recuperación.

5. Condiciones Ambientales Límite:

- Operación en máximo estado de mar operacional.
- Operación en límites de temperatura ambiente.
- Operación en condiciones extremas de corriente.
- Operación en condiciones de visibilidad nula.

Medidas de seguridad SAT-5:

- Aprobación específica de *Safety Board* para cada prueba de límite.
- Buque de apoyo a distancia mínima (<5 MN).
- Comunicaciones redundantes activas continuamente.
- Aislamiento del área de pruebas.
- ROV de apoyo disponible para inspección/recuperación.
- Monitorización en tiempo real de todos los parámetros críticos.
- Criterios de aborto claramente definidos.
- Sistemas de control de plataforma con jerarquía de decisiones de emergencia.

4.7 Fase SAT-6: Pruebas de Fiabilidad y Aceptación Final

- Duración: 1-2 meses
 - Objetivo: Demostrar fiabilidad operacional y capacidades completas ante cliente/autoridad certificadora.
1. Prueba de Disponibilidad:
 - Serie de misiones consecutivas simulando operación real
 - Tiempos de retorno a base entre misiones
 - Mantenimiento requerido entre operaciones
 - Demostración de disponibilidad >80% en periodo de 30 días
 2. Prueba de Fiabilidad (*Reliability Demonstration*):
 - Operación por horas totales especificadas sin fallos críticos
 - MTBF objetivo: >2000 horas sin fallo de sistema crítico
 - Registro de todos los eventos e incidencias
 - Análisis estadístico de fiabilidad demostrada
 3. Misiones de Demostración Operacional:
 - Escenario completo de misión típica (ISR, MIW, ASW según tipo)
 - Duración: 5-7 días de operación autónoma
 - Observadores del cliente presentes en RCC
 - Cumplimiento de todos los objetivos de misión
 - Sin intervención de personal del constructor
 4. Aceptación Formal (*Formal Acceptance Trials*):
 - Demostración de lista de requisitos operacionales (*checklist* formal)
 - Presencia de autoridades certificadoras
 - Verificación independiente de capacidades
 - Firma de actas de aceptación
 - Transferencia de documentación técnica completa

Medidas de seguridad SAT-5:

- Aprobación específica de *Safety Board* para cada prueba de límite.
- Buque de apoyo a distancia mínima (<5 MN).
- Comunicaciones redundantes activas continuamente.
- Aislamiento del área de pruebas.
- ROV de apoyo disponible para inspección/recuperación.

4.8 Requisitos finales de la etapa SAT

Con el desarrollo de los SAT se logran validar las capacidades esenciales como navegación, propulsión, maniobrabilidad, inmersión y emersión, comunicaciones, sensores y sistema de combate, bajo condiciones reales de operación que no pueden reproducirse completamente en puerto o en pruebas de astillero. Así, se permite la confirmación de que el submarino está materialmente completo y es apto para su aceptación por la Armada gracias a su validación del comportamiento del buque en escenarios críticos.

En términos de certificación, el hecho de superar con éxito los SAT permite al constructor y a las autoridades de inspección emitir la conformidad final, minimiza el riesgo operacional en la fase inicial de servicio y proporciona una línea base de prestaciones sobre la que se apoyarán futuras mejoras, modificaciones y programas de sostenimiento a lo largo del ciclo de vida del submarino.

5. INSTRUMENTACIÓN Y MEDICIONES

5.1 Sistemas de Instrumentación de Pruebas

Los sistemas de instrumentación de pruebas de un submarino deben permitir la monitorización continua y sincronizada de parámetros clave.

La frecuencia de trabajo de la adquisición se fija en función del contenido espectral que se quiere capturar para fenómenos lentos como variaciones de profundidad o temperatura bastan frecuencias bajas del orden de fracciones de hercio, mientras que para analizar vibraciones, cavitación o firma acústica se requieren tasas de muestreo decenas o centenares de veces superiores a la máxima frecuencia de interés, de acuerdo con el criterio de Nyquist y las normas navales de ruido y vibración.

De este modo, la elección de la frecuencia de muestreo garantiza que los registros durante SAT sean representativos, permitan realizar FFT y análisis en bandas de tercio de octava, y aseguren la trazabilidad de la firma vibro acústica y del comportamiento estructural del submarino en toda su envolvente operativa.

Dentro de los parámetros una monitorización de forma continua durante las etapas de SAT, estos campos de interés se analizan conforme a lo expuesto en la Tabla A15-4.

Parámetro	Instrumentación	Ratio
Posición GPS	Receptor GNSS multi-constelación	1 Hz
Profundidad	Sensor presión 0.01% FS	10 Hz
Velocidad	DVL 4-beam, $\pm 0.2\%$ precisión	1 Hz
Actitud	INS grado navegación $< 0.01^\circ$	50 Hz
Aceleraciones	Acelerómetros	100 Hz
Velocidad angular	Giróscopos FOG	100 Hz
Magnetismo	Magnetómetro	-
Voltaje baterías	Sensores de corriente/voltaje	0.1 Hz
Temperatura interna	Sensores PT100 distribuidos	0.1 Hz
Humedad	Sensores capacitivos	0.1 Hz
Presión interna	Sensores absolutos	0.1 Hz
Vibraciones	Acelerómetros piezoeléctricos en eje	1000 Hz
Ruido acústico	Hidrófonos calibrados	44.1 kHz
Sistema de control	Navegación inercial	Especificaciones
Sistemas de gestión	PMS, BMS y EMS	50 Hz
Estado sistemas	Logging CAN/Ethernet	Estandarizado

Tabla A15-4: Instrumentación principal durante pruebas SAT.

De este modo, el parámetro de interés es el de los hidrófonos que producen un ruido acústico del orden de kHz, muy superior al resto de parámetro; por ello el uso de estos sistemas de hacerse de forma controlada y con objetivos claros.

5.2 Criterios de Aceptación y Tolerancias

Para el estudio de las capacidades de la plataforma es necesario establecer una serie de requisitos indispensables para el funcionamiento. Estos parámetros son distintos en un XLUUV respecto a un submarino convencional, por ello se definen en la Tabla A15-5.

Parámetro	Requisito	Tolerancia
Velocidad máxima	20 nudos	-5%
Profundidad operacional	250 m	+0% / -5%
Autonomía a 5 kts	1000 MN	-10%
Duración misión	60 días	-5%
Precisión navegación INS	<1 nm/24h deriva	Factor 1.5
Control profundidad	±1 m @ >50m	±2 m máx.
Ruido radiado	<100 dB re 1µPa @ 1m	+3 dB máx.
MTBF sistemas críticos	>2000 h	Estadístico
Alcance Comms (acústica)	>10 km	20%
Payload	2000 kg	5%
Desplazamiento	150 t	-10 %

Tabla A15-5: Ejemplo de requisitos operacionales y tolerancias de aceptación.

5.3 Mediciones Específicas

Como etapa de los instrumentos y medidas se realiza un estudio de las distintas prestaciones.

Ruido radiado submarino (URN - *Underwater Radiated Noise*):

- Medición con hidrofónica pasiva desde plataforma estática.
- Rango de frecuencias: 10 Hz - 10 kHz mínimo.
- Condiciones: mar calma (*sea state* 1-2), bajo ruido ambiente.
- Configuraciones: diferentes velocidades (3, 5, 8, 10 y 15 kts).
- Objetivo: Firma acústica <requisito especificado para sigilo.

Prestaciones hidrodinámicas:

- Velocidad máxima alcanzada vs especificación.
- Diámetro táctico a diferentes velocidades.
- Ángulo de escora en giro sostenido.
- Avance y transferencia en giros estándar.
- *Crash stop distance* desde diferentes velocidades.
- Aceleración longitudinal.

Consumo energético y autonomía:

- Potencia consumida y velocidad (curva de resistencia).
- Energía específica (Wh/nm) a velocidades operacionales.
- Autonomía real vs predicción a velocidad económica.
- Autonomía máxima en misión de prueba.
- Eficiencia propulsiva en diferentes regímenes.

Precisión de navegación:

- Error de posición tras navegación INS pura (sin GPS) a diferentes tiempos.
- Precisión de llegada a *waypoint* (error CEP - *Circular Error Probable*).
- Deriva del INS (nm/hora) en diferentes condiciones.
- Precisión de control de profundidad (error RMS, máximo).
- *Track-keeping error* en diferentes condiciones de corriente.

6. GESTIÓN DE RIESGOS Y SEGURIDAD

6.1 Plan de Seguridad (*Safety Plan*)

Adaptando la metodología de construcción naval se aplica en adición a los estudios de un Estudio Básico de Seguridad y Salud (EBSS), se requiere un Plan de Seguridad específico para las pruebas de mar. Este establece un marco riguroso para minimizar riesgos durante el proceso de certificación, y está integrado en el Plan de Gestión de Hitos de Seguridad del propio proyecto.

El objetivo de esta planificación es demostrar que el proceso constructivo y de pruebas mantiene un nivel de riesgo ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), validando la aptitud del submarino para servicio operativo con trazabilidad completa de anomalías

Identificación de Peligros (*Hazard Analysis*):

1. Peligros Estructurales:
 - Exceso de profundidad (*crush depth*).
 - Inundación de compartimentos.
 - Fallo de penetraciones de casco.
 - Daño por impacto (colisión).
2. Peligros Operacionales:
 - Pérdida de control (*runaway vehicle*).
 - Pérdida de comunicaciones.
 - Pérdida de localización.
 - Colisión con tráfico marítimo.
 - Varada involuntaria.
3. Peligros de Sistemas:
 - Fallo de propulsión.
 - Pérdida de control de sistemas.
 - Fallo de sistemas de control.
 - Fallo de planta eléctrica.
 - Agotamiento prematuro de energía.
 - Sobrecalentamiento/incendio de baterías.
 - Fallo de sensores críticos de navegación.
4. Peligros Ambientales:
 - Condiciones meteorológicas extremas.
 - Corrientes excesivas.
 - Tráfico intenso en área de operaciones.
 - Actividad pesquera (redes).
 - Profundidad inferior a esperada.
 - Presencia de especies marinas.
 - Influencia de sistemas externos perjudiciales.

6.2 Matriz de Riesgos

Para cada peligro identificado se evalúa criterios para aplicar medidas según su clasificación con:

- Severidad: Catastrófica / Crítica / Marginal / Despreciable.
- Probabilidad: Frecuente / Probable / Ocasional / Remota / Improbable.
- Nivel de Riesgo: Inaceptable / Indeseable / Aceptable con mitigación / Aceptable.

Así, con la Tabla A15-6 se establecen las posibles medidas de mitigación.

Peligro	Riesgo Inicial	Mitigación
Pérdida comunicaciones	Crítico/Probable	Redundancia enlaces, comportamiento autónomo seguro, emersión automática.
Agotamiento energía	Crítico/Ocasional	Monitorización continua, <i>return-to-base</i> al 30%, reserva emergencia 10%.
Colisión tráfico	Catastrófico/Remoto	NOTMAR activo, radar desde buque apoyo, detección acústica, AIS.
Exceso profundidad	Catastrófico/Remoto	Limitación software, alarma profundidad, emersión automática.

Tabla A15-6: Ejemplo de medidas de mitigación de riesgos principales.

6.3 Plan de Contingencias

Escenarios y respuestas:

1. Pérdida Total de Comunicaciones:
 - Vehículo ejecuta misión preprogramada.
 - Emersión programada cada 6 horas para reintento comunicación.
 - Si 24h sin contacto: *return-to-base* automático.
 - Si 48h sin contacto: emerger y permanecer en superficie con *beacon* (ESUS).
2. Vehículo No Regresa a Punto de Recogida:
 - T+1h: Intentos de comunicación por todos los medios.
 - T+2h: Búsqueda activa por buque de apoyo en último seguimiento conocido.
 - T+6h: Activación de búsqueda extendida con medios adicionales.
 - T+12h: Activación de procedimientos de búsqueda y rescate (SAR).
3. Detección de Inundación:
 - Detección por sensores de humedad y nivel de inundación.
 - Aislamiento automático del compartimento afectado.
 - Emersión inmediata.
 - Control de incidencias y estanqueidad.
 - Notificación a RCC con telemetría de daños.
 - Esperar recuperación por buque de apoyo.
4. Condiciones Meteorológicas Adversas:
 - Monitorización continua de pronósticos.
 - Criterios de suspensión de operaciones claramente definidos.
 - Vehículo puede permanecer sumergido esperando mejora condiciones.
 - Buque de apoyo en puerto seguro, listo para despliegue cuando sea posible.

5. Colisión o Daño Estructural:

- Detección por sensores de aceleración anómala.
- Evaluación automática de sistemas (*built-in test*).
- Si integridad comprometida: emersión y flotación.
- Si operativo: navegación a velocidad reducida a punto de recogida.
- Inspección ROV antes de recuperación si se sospecha daño.

7. CERTIFICACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

7.1 Proceso de Certificación Técnica

Siguiendo el modelo PCTSuB, el XLUUV debe obtener certificación de:

Autoridad Certificadora (equivalente a PCTSuB):

- Independiente del constructor y del operador.
- Personal con formación específica en seguridad de submarinos.
- Autoridad para detener pruebas si se detectan condiciones inseguras.
- Emite certificados de seguridad por fases.

Ámbito de Certificación:

1. Certificación Estructural:

- Resistencia del casco resistente.
- Estanqueidad de penetraciones.
- Sistemas sometidos a presión externa.
- Factores de seguridad y márgenes.

2. Certificación de Software Crítico:

- Software de control de profundidad.
- Software de navegación y anticolisión.
- Software de gestión de energía.
- Software de emergencias y recuperación.

3. Certificación de Sistemas de Seguridad:

- Sistemas de flotación de emergencia.
- Sistemas de comunicación de emergencia.
- Sistemas de detección de fallos.
- Procedimientos de recuperación.

4. Certificación Operacional:

- Procedimientos operativos seguros.
- Formación de operadores.
- Mantenimiento e inspecciones.
- Plan de gestión del ciclo de vida.

Hitos de Certificación durante SAT:

- *Pre-SAT Certificate*: Autorización para comenzar pruebas de mar.
- *Intermediate SAT Certificate*: Tras SAT-2, autoriza pruebas avanzadas.
- *Full Depth Certificate*: Tras alcanzar profundidad operacional máxima.
- *Operational Certificate*: Tras completar SAT-6, autoriza uso operacional.
- *Final Acceptance Certificate*: Certificado definitivo tras requisitos cumplidos.

7.2 Documentación Técnica Requerida

Existen una serie de documentación que es necesaria a efectos previos a la ejecución de las seis etapas SAT, y que es entregable antes de comenzar pruebas de mar:

1. Especificación Técnica del Sistema:
 - Descripción general y requisitos.
 - Arquitectura de sistemas.
 - Características principales.
 - Capacidades operacionales.
 - Limitaciones operacionales.
 - Disposición general de sistemas.
2. Manuales Técnicos:
 - Manual de Operación.
 - Manual de Mantenimiento.
 - Manual de Procedimientos de Emergencia.
 - Catálogo de Repuestos.
3. Documentación de Diseño:
 - Cálculos estructurales y análisis FEM.
 - Planos de construcción (*as-built drawings*).
 - Especificaciones de materiales.
 - Certificados de materiales y soldaduras.
4. Plan de Pruebas:
 - *Test Procedures* para cada etapa SAT.
 - Criterios de aceptación.
 - Instrumentación y métodos de medida.
 - Matriz de trazabilidad de requisitos.
 - Control del desarrollo de las etapas.
5. Análisis de Seguridad:
 - FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*).
 - FTA (*Fault Tree Analysis*).
 - *Hazard Analysis*.
 - *Safety Plan*.
6. Software:
 - *Software Design Description*.
 - *Software Test Reports*.
 - Certificación de software crítico según MISAFc.
 - Control de versiones y trazabilidad.

Documentación durante SAT (registro continuo):

- *Test Logs*: Registro detallado de cada prueba realizada.
- *Data Records*: Datos de instrumentación en formato procesable.
- *Incident Reports*: Registro de todas las anomalías e incidencias.
- *Photographic/Video Records*: Evidencia visual de pruebas y configuraciones.
- *Daily Progress Reports*: Resumen diario para oficina de programa.
- *Non-Conformance Reports* (NCR): Desviaciones respecto a especificaciones.
- *Corrective Action Reports* (CAR): Acciones correctivas implementadas.

Asimismo, existe otro tipo de documentación para su ejecución de forma posterior a las etapas SAT, y que son entregables en la instancia final:

1. *Test Report Final:*

- Resumen ejecutivo.
- Resultados de todas las pruebas SAT.
- Análisis de cumplimiento de requisitos.
- Lista de desviaciones y *waivers* aprobados.
- Conclusiones y recomendaciones.

2. *As-Operated Configuration:*

- Configuración final del vehículo tras SAT.
- Modificaciones implementadas durante pruebas.
- Lista de equipos y números de serie.
- Versiones de software instalado.

3. *Performance Data Book:*

- Curvas de velocidad y potencia.
- Curvas de autonomía.
- Diagramas de maniobra.
- Datos de ruido radiado.
- Precisión de navegación demostrada.

4. *Reliability Data:*

- Registro de fallos durante pruebas.
- Análisis estadístico de fiabilidad.
- MTBF calculado por sistema.

5. *Lessons Learned:*

- Problemas encontrados y soluciones.
- Mejoras recomendadas para siguientes unidades.
- Aspectos destacables positivos y negativos.
- Recomendaciones para operación.

6. *Training Materials:*

- Cursos de formación para operadores.
- Procedimientos operativos estándar (SOP).
- Simuladores y herramientas de entrenamiento.
- Adiestramiento e Instrucción de operadores y personal.
- Certificación de personal operador.

7.3 Trazabilidad de Requisitos

Se aplica una matriz de verificación de requisitos. Cada uno de los más de 15000 requisitos del sistema deben tener asociado:

- ID único: Código de identificación trazable.
- Descripción: Texto completo del requisito.
- Método de verificación: A/I/D/T.
- Procedimiento de pruebas: Referencia al procedimiento que lo verifica.
- Etapa de verificación: En qué fase se verifica (FAT/LBTS/HAT/SAT).
- Estado: *Verified* (V) / *Pending* (P) / *Waived* (W) / *Not Applicable* (NA).
- Evidencia: Referencia a registro de prueba que lo demuestra.

Esta matriz de verificación de requisitos se presenta como ejemplo en la Tabla A15-7.

REQ-ID	Requisito	Método	Etapas	Referencia	Estado
NAV-045	Profundidad 250m $\pm$ 50	T	SAT-5	SAT-5.2.1	Ve
AUT-123	Obstáculos a >100m	T	SAT-3	SAT-3.2.4	V
PROP-067	Velocidad $\geq$ 15 kts	T	SAT-2	SAT-2.2.1	V

Tabla A15-7: Ejemplo de entradas en Matriz de Verificación de Requisitos.

8. CRITERIOS DE ACEPTACIÓN FINAL

8.1 Requisitos Contractuales

Para la aceptación final del XLUUV por parte de la contrata (Armada española) tras la compleción el programa SAT, deben cumplirse:

Criterios Técnicos:

- Verificación exitosa de $\geq$ 98% de requisitos técnicos.
- *Waiver* aprobado para <2% de requisitos no críticos (si aplicable).
- Cero no conformidades de Severidad 1 pendientes.
- Todas las no conformidades de Severidad 2 con plan de acción aceptado.
- Demostración de capacidades operacionales requeridas.

Criterios de Fiabilidad:

- MTBF demostrado $\geq$ requisito especificado (típicamente >2000h).
- Disponibilidad demostrada $\geq$ 85% en periodo de prueba.
- Tasa de éxito de misiones $\geq$ 90% en SAT-6.
- Sin fallos recurrentes de sistemas críticos.

Criterios de Seguridad:

- Certificación de seguridad emitida por autoridad certificadora.
- Todos los riesgos identificados mitigados a nivel aceptable.
- Procedimientos de emergencia validados en pruebas.
- Personal operador formado y certificado.

Criterios Documentales:

- Documentación técnica completa entregada y aprobada.
- Manuales de operación y mantenimiento finalizados.
- *Test Reports* de todas las fases aprobados.
- Matriz de verificación de requisitos completa (100%).
- Certificados de conformidad de todos los suministradores.

8.2 Transferencia al Cliente

Proceso de entrega formal:

1. *Provisional Acceptance* (PAC):
 - Tras completar SAT con éxito.
 - Cliente toma posesión del vehículo.
 - Constructor mantiene soporte técnico intensivo.
 - Periodo de garantía comienza (típicamente 12-24 meses).

2. *Training and Handover:*

- Formación completa de personal operador (4-8 semanas).
- Formación de personal de mantenimiento (6-12 semanas).
- Transferencia de conocimiento técnico.
- Misiones supervisadas con personal del constructor.

3. *Operational Support Period:*

- Soporte técnico *on-site* durante primeros 6-12 meses.
- Asistencia a primeras misiones operacionales.
- Resolución de problemas y optimizaciones.
- Transferencia gradual de responsabilidad.

4. *Final Acceptance (FAC):*

- Tras periodo de servicio operacional exitoso (6-12 meses).
- Demostración de capacidad de operación independiente.
- Cierre de *punch-list* de ítems pendientes menores.
- Pago final y fin de responsabilidades del constructor.

9. MANTENIMIENTO Y SOPORTE POST-PRUEBAS

Tras la finalización de las pruebas de mar, existe una fase intensiva de mantenimientos posterior a la entrega y que está gestionada por la Armada en el Arsenal de Cartagena, bajo contratos de Apoyo al Ciclo de Vida (ACV) adjudicados a Navantia o empresas especializadas dentro del proyecto. El proceso incluye pruebas funcionales en puerto, gestión documental y soporte con equipos volantes para misiones.

9.1 Plan de Mantenimiento Inicial

La realización del proceso de pruebas requiere de una fase posterior donde se determinen los mantenimientos con una planificación detallada de estos procesos. Este se propone basado en un análisis RCM, por el cual el XLUUV requiere:

Primer Escalón (Operacional - RCC/Base):

- Inspección visual post-misión (30 min).
- Descarga de datos y análisis de logs (1 hora).
- Recarga de baterías (4-12 horas según tecnología).
- Inspecciones programadas cada 5 misiones.
- Reemplazo de consumibles (baterías descartables, cartuchos).

Segundo Escalón (Mantenimiento intermedio - Taller Base):

- Mantenimiento preventivo cada 500 horas operación.
- Inspección de sensores y calibración.
- Verificación de sistemas de seguridad.
- Actualización de software si necesario.
- Reemplazo de componentes según vida útil.

Tercer Escalón (Nivel de almacén - Astillero):

- Etapa de PIP cada 2000 horas o 2 años.
- Inspección estructural completa (NDT).
- Revisión de propulsión y sistemas principales.
- Modernización tecnológica si aplicable.
- Extensión de vida útil o desguace.

9.2 Gestión del Ciclo de Vida

La gestión del ciclo de vida (ACV) de los submarinos de Navantia consiste en un enfoque integral y continuado que abarca desde la entrega de la plataforma hasta su baja definitiva, asegurando su disponibilidad operativa, seguridad y eficiencia económica a lo largo de sus años de servicio estimados.

El proceso implica la coordinación entre la Armada, Navantia y la Oficina Técnica de Apoyo al Ciclo de Vida (OTACV) para optimizar los cinco pilares del sostenimiento:

- Gestión del activo (digitalización y gemelo digital).
- Ingeniería de soporte.
- Aprovisionamiento de repuestos.
- Mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo.

Con ello, se definen las Fases del ciclo de vida operacional de la plataforma:

1. *Initial Operational Capability* (IOC): 0-2 años
 - Operación con soporte del constructor.
 - Ajuste de procedimientos operativos.
 - Optimización de mantenimiento.
2. *Full Operational Capability* (FOC): 2-10 años
 - Operación independiente completa.
 - Fiabilidad estabilizada.
 - Mantenimiento predictivo implementado.
3. *Mid-Life Update* (MLU): 10-15 años
 - Modernización de sistemas obsoletos.
 - Actualización tecnológica (sensores, comunicaciones, baterías).
 - Revisión estructural profunda.
 - Extensión de vida operativa.
4. *End of Life* (EOL): 20-25 años
 - Decisión: retirada, desguace completo, o venta.
 - Desmantelamiento responsable.
 - Recuperación de componentes valiosos.
 - Disposición final conforme a normativa ambiental.

9.3 Soporte Logístico Integrado

Además, el proceso para el ciclo de vida está apoyado en la integración de un soporte logístico con:

Infraestructuras necesarias en base operativa:

- Muelle con grúa o rampa para despliegue y recuperación.
- Taller de mantenimiento con herramientas específicas.
- Centro de Control Remoto (RCC) con equipos de comunicación.
- Almacén de repuestos (primer y segundo escalón).
- Instalaciones de carga de combustible y alta tensión para baterías.

Repuestos recomendados (*Initial Provisioning List*):

- Componentes críticos con lead-time largo (motores, baterías).
- Sensores de navegación de *backup* (INS, DVL, sonda y demás).
- Módulos electrónicos reparables por intercambio.
- Consumibles para 50 misiones (balizas, cartuchos, etc.).

10. CONCLUSIONES

El programa de construcción de Navantia proporciona lecciones aplicables al XLUUV:

1. Importancia de una definición rigurosa de requisitos:
 - Requisitos completos y realistas desde fase conceptual.
 - Evitar requisitos contradictorios o tecnológicamente inmaduros.
 - Trazabilidad completa desde NSR hasta verificación.
2. Gestión de programas de I+D:
 - Separar desarrollos tecnológicos de construcción cuando sea posible.
 - Validar tecnologías nuevas antes de integración (riesgos y alternativas).
3. Importancia de las oficinas de programa:
 - Crear estructura de gestión desde fases iniciales.
 - Personal cualificado y estable durante todo el programa.
 - Autoridad para toma de decisiones técnicas críticas.
4. Certificación de seguridad integrada:
 - Establecer programa de certificación desde el inicio.
 - Autoridad independiente con capacidad de veto.
 - Enfoque en sistemas críticos para seguridad.
5. Validación exhaustiva previa a mar:
 - Instalaciones de prueba en tierra (LBTS) reducen riesgos y costes.
 - Simuladores fundamentales para desarrollo y formación.
 - Integración temprana detecta problemas antes.

ANEXO XVI COORDENADAS DE LA GEOMETRÍA

Coordenadas de los puntos de control de la geometría

Coordenadas (x, y, z)	Coordenadas (x, y, z)	Coordenadas (x, y, z)
-4,98570 -1,60964 1,42572	5,14089 0,00000 3,76709	8,67564 -0,69483 0,53003
-4,84048 -0,10756 0,10238	6,95412 -1,60964 1,42572	-7,28028 -0,58982 2,39207
-4,84048 -1,12837 0,27181	-6,13207 -1,40821 2,12386	5,60548 -0,06689 4,11735
9,08517 -0,51001 1,70219	8,22015 -0,10724 0,16954	-8,01532 -0,56997 1,93330
-7,28028 -0,58174 1,44135	5,60548 -0,13311 0,04188	6,95412 -1,50976 2,59888
-7,80777 0,00000 1,29830	4,25308 -1,68261 1,85496	-8,01532 -0,24350 2,06379
-7,28028 -0,66523 2,18469	-8,09832 -0,67463 1,97923	-8,01532 0,00000 2,41005
-7,08287 -0,13921 0,04146	-6,13207 -0,81602 0,53121	5,60548 -1,65686 1,60386
7,48598 -0,18823 0,00423	9,33787 -0,18834 1,51810	-8,01532 0,00000 2,15855
9,08517 -0,50649 1,88509	-4,98570 -1,13097 3,40549	-6,70325 -0,44451 3,13235
7,78129 -1,40748 1,98577	-7,50967 -0,29707 1,35557	4,25308 -0,16722 4,10685
-6,13207 -0,58052 3,37399	3,58996 -1,52311 1,16217	5,60548 -1,52311 1,16217
-7,60095 -0,53416 2,09456	-6,70325 -0,98271 1,51576	4,99931 0,00000 3,78834
-6,70325 0,00000 3,20894	-6,13207 -1,31946 1,34961	3,58996 -1,20379 0,38347
8,42868 -1,03155 1,61487	-6,70325 -0,91198 1,39919	-6,70325 -0,52562 0,81600
4,90230 -0,18823 0,00423	4,90320 -0,27599 -0,00429	-7,80777 -0,33882 1,33617
2,91635 -0,83315 0,07917	5,60548 -0,55052 0,01683	-4,84048 0,00000 0,16558
6,95412 -0,35718 3,67633	-4,84048 -1,20379 0,38347	4,90230 -0,55052 0,01683
5,60548 -1,03924 0,19345	-6,13207 -0,73550 0,47230	-6,13207 -1,36234 1,48490
3,58996 -1,68261 1,85496	5,21794 -1,97880 3,68478	-7,50967 -0,55085 2,10531
3,58996 -1,60964 1,42572	4,25308 -1,26983 0,54452	-7,84723 0,00000 2,00213
-6,13207 -0,67044 3,34041	8,89956 -0,15598 0,42505	8,67501 -0,45957 0,28578
9,25356 -0,22330 1,07012	4,25995 -1,89534 3,64788	4,90230 -0,06689 4,11735
3,59006 0,00000 0,16559	8,42868 -0,43309 2,86056	9,36530 -0,08814 1,86376
-6,13207 -1,26576 1,22075	-4,98569 -0,12099 0,10827	4,25308 -0,13311 0,04188
4,90230 -1,65686 1,60386	4,90230 -1,53356 2,59838	-6,70325 -0,71495 2,91131
9,38713 -0,06677 1,69390	-7,84660 -0,09717 1,26274	7,78092 -0,54428 0,04111

7,78129 -0,05451 3,33296	7,48598 -0,55052 0,01683	6,95412 -0,18823 0,00423
-7,80777 0,00000 2,56226	6,48874 -0,10756 0,10238	6,48874 -1,67568 2,03441
8,22015 -0,24818 0,09716	-4,84048 -0,27599 -0,00429	6,95067 -0,05117 3,69041
2,91635 -0,27599 -0,00429	5,15246 0,00000 3,54094	-4,98570 -1,53356 2,59838
4,90230 -0,07395 0,15751	2,91635 -0,99583 3,74618	4,31613 -1,97880 3,66423
6,95412 0,00000 0,16559	-8,01532 0,00000 1,67324	9,38029 -0,10597 1,55180
5,17250 -2,06226 3,61670	9,25356 -0,07122 2,07384	-6,79597 -0,13921 3,18943
-7,69911 -0,11685 1,13909	-7,83188 -0,53606 2,08054	4,25308 -1,66522 2,17401
-7,83188 -2,03647 1,83570	8,67552 -0,14896 0,18869	-6,13207 -0,46668 0,36544
4,82263 -2,06922 3,63157	-7,28028 -0,41405 2,64827	5,60548 -1,68261 1,85496
4,35944 -1,89534 3,62731	-7,84660 0,00000 2,59607	-8,09832 0,00000 1,97923
-6,70080 -0,62199 3,02735	7,48598 -1,21843 0,56067	-7,28034 -0,13921 1,08601
-4,84048 -1,16076 3,45413	-8,64698 -0,56615 1,60618	7,48598 -1,44217 1,27276
-6,75441 -1,00138 1,76335	-8,01532 0,00000 4,38840	2,91635 -0,55052 0,01683
-4,84048 -0,06689 4,11735	8,67564 -0,87325 1,61328	4,25308 -1,03924 0,19345
-8,64698 0,00000 2,56226	5,27488 -1,97880 3,59033	-7,80777 0,00000 2,63112
-6,79597 0,00000 3,18943	5,60541 -0,07395 0,15751	9,33787 -0,12144 1,32858
5,60535 -0,58737 3,74740	6,95412 -1,17665 2,99049	-6,70325 -1,03055 1,62978
8,67552 -0,08981 0,18914	-7,83188 -0,56997 2,07386	7,78129 -0,81651 3,06318
4,36365 -1,89534 3,72753	6,95412 -0,27599 -0,00429	8,90124 -0,68419 1,43978
3,58996 -1,22960 3,28277	4,90230 -0,16722 4,10685	5,12251 -1,97880 3,72466
-7,80777 -0,75636 1,94055	7,48598 -0,10756 0,10238	-7,28039 -0,20057 1,11939
9,25356 -0,22391 1,99645	-6,77993 0,00000 3,19065	-7,27732 -0,13921 2,80186
-8,64698 0,00000 1,29830	9,38029 0,00000 1,50632	-8,01532 -2,03647 1,93330
8,89956 -0,14362 2,55246	4,25308 -0,18823 0,00423	9,33787 -0,16839 1,39932
-7,69911 -0,11685 0,04132	8,67552 0,00000 0,18929	9,25356 0,00000 2,07386
8,42868 -0,34279 2,90295	-6,82014 -0,13921 3,14388	8,22015 -0,52748 0,11721
-7,16815 0,00000 4,38840	2,91635 -1,66522 2,17401	-5,97019 -1,06637 0,74329
-7,28039 -0,13921 2,77723	-6,80471 -0,13921 0,60790	7,48598 -1,55038 1,63281
7,78129 0,00000 3,33482	6,95412 -1,67568 2,03441	2,91635 -0,10756 0,10238

6,48874 -1,68261 1,85496	-6,13207 -1,39964 1,62978	4,25308 -1,60964 1,42572
9,08517 -0,08207 0,62706	9,25356 -0,31273 1,71176	-8,09807 0,00000 1,26274
9,08517 -0,37866 0,80644	9,32996 -0,20657 1,80057	4,90230 -1,62111 2,34703
2,91635 -0,06689 4,11735	6,48874 -1,66522 2,17401	3,58996 -1,66522 2,17401
5,60548 -1,66522 2,17401	2,91635 -1,67568 2,03441	-7,80777 -0,62820 2,31726
-6,70325 -0,05744 3,20894	-6,13207 -0,03257 0,43801	4,90230 -1,67568 2,03441
9,37716 -0,06677 1,79844	7,78129 -0,12875 3,33050	-6,13207 -1,37120 2,27668
4,85741 0,00000 3,78834	-4,84048 -1,07603 3,61793	8,67564 -0,72346 0,60686
-6,13207 -0,19160 0,41489	6,48819 0,00000 3,84125	3,58996 -1,26983 0,54452
4,35944 0,00000 3,62731	3,58996 -1,53356 2,59838	-6,13207 0,00000 0,43801
5,26605 0,00000 3,70973	6,48874 -1,12837 0,27181	8,42868 -0,20825 2,94534
-7,60095 -0,13921 1,35909	9,37716 0,00000 1,79844	7,48828 -0,12936 3,47772
9,33787 0,00000 1,30601	-4,98570 -1,66522 2,17401	-4,84048 -1,52311 1,16217
5,31298 0,00000 3,56361	7,48598 -0,09815 0,13734	6,95412 -1,52311 1,16217
-6,70331 -0,04257 0,72312	-6,13207 -0,06450 3,49138	7,48598 -1,01719 0,21032
8,67564 -0,85851 1,43350	8,89956 -0,23696 0,43456	6,48874 -1,03924 0,19345
-6,13207 -0,88277 3,13004	5,60548 -1,56242 1,27334	-7,60095 -0,21280 1,38413
7,78129 -0,15948 0,06702	-6,70325 -0,68316 0,98111	4,25308 0,00000 4,11742
4,59083 0,00000 3,58314	8,22015 -0,18500 0,11425	-6,13207 -1,41464 1,97296
6,95067 -0,14169 3,68859	2,91635 -1,16076 3,45413	4,25308 -0,48076 4,03160
7,48598 -0,71564 3,24724	4,90230 -0,48076 4,03160	-7,28028 -0,61810 1,52484
7,48598 -0,27599 -0,00429	5,15348 -1,97880 3,56893	-7,28056 -0,65100 2,08054
-7,80777 -0,37200 1,27473	4,25308 -1,27136 3,19762	6,95412 -0,83315 0,07917
9,38029 -0,07102 1,51572	6,48874 -0,09815 0,13734	-7,83188 -2,03647 2,01795
5,60548 -0,48076 4,03160	-8,01532 -0,10137 2,15855	8,67564 -0,88260 1,75702
-6,71210 -1,02573 1,76593	2,91635 -0,71906 3,94381	5,60520 -1,01681 3,26098
-4,84048 -0,48076 4,03160	5,60548 0,00000 0,16559	-4,84048 -0,18823 0,00423
6,95412 -1,56242 1,27334	-4,84048 -1,03924 0,19345	-7,60095 -0,41597 2,25358
4,69285 -1,89534 3,77632	-7,28035 -0,16661 1,11939	7,78147 -0,12192 0,11988
2,91635 -1,65686 1,60386	-7,60095 -0,39419 1,52124	2,91635 -1,56242 1,27334

7,48598 -1,40354 1,14983	-7,83188 -0,50745 2,09456	5,60548 -0,83315 0,07917
7,78129 -1,13775 0,58013	-7,28028 -0,33463 1,15161	2,91635 -1,52311 1,16217
8,89956 -0,00007 0,41767	5,60548 -0,18823 0,00423	2,91635 -0,16722 4,10685
6,48874 -0,66984 3,49021	4,36732 -1,97880 3,69811	-6,13207 -0,37724 3,45022
-7,80777 -0,33993 2,54478	9,36118 -0,14317 1,77970	-7,28039 -0,18536 2,73372
-4,98570 -1,52311 1,16217	-4,84048 -1,26983 0,54452	7,48598 -1,09589 0,28705
-7,76428 -0,11486 3,93685	7,78129 -1,29145 1,13930	8,89956 -0,07762 0,41846
8,67564 -0,87168 2,00894	5,60548 -1,53356 2,59838	-7,28028 -0,26504 1,12807
6,95421 -0,77493 3,32858	8,42868 0,00000 2,95824	4,90230 -0,62015 3,76562
4,25308 -1,52311 1,16217	8,67564 -0,03560 2,77356	-8,64698 -0,37200 1,27473
7,48828 -0,30125 3,46354	-4,98526 -0,45555 3,96662	-4,98723 -0,06662 4,04622
4,90230 -1,26983 0,54452	4,99931 -1,89534 3,78834	4,90230 -1,20379 0,38347
8,67564 -0,83315 1,25977	-7,60095 -0,18492 2,46682	7,78060 -0,95956 0,23979
6,48874 -0,98881 3,22972	6,48874 -0,27599 -0,00429	4,90230 -0,72560 3,57982
8,42868 -1,04266 2,07857	7,48598 -0,46851 3,42457	-7,83357 -0,50745 1,76061
4,25995 0,00000 3,64788	9,33787 -0,06322 1,30980	4,26478 -1,89534 3,70511
6,95412 -1,65686 1,60386	-7,76428 -0,11486 2,74258	3,58996 -1,65686 1,60386
6,95412 -1,66522 2,17401	4,90230 -1,24083 3,11595	7,48598 -1,52283 2,32143
7,48598 -1,42839 2,57524	-6,73850 -0,13921 0,73640	-6,81337 0,00000 3,22716
4,23377 0,00000 3,68856	-6,70331 -0,34234 0,73572	5,60548 -0,10756 0,10238
6,95412 -0,52098 3,63413	3,58996 -1,56242 1,27334	-4,84048 -0,71906 3,94381
8,89956 -0,55903 0,66214	-6,70325 -0,28305 3,18218	5,02036 -2,06226 3,61106
7,48598 -0,83315 0,07917	-7,83357 -0,14374 1,39189	8,89956 -0,45632 0,52949
-4,84048 -0,55052 0,01683	3,58996 -0,55052 0,01683	4,90230 -1,68261 1,85496
5,60548 -1,26983 0,54452	8,67564 -0,82655 2,20845	7,78129 -1,41169 1,82751
5,34073 -1,89534 3,63061	4,29976 -1,97880 3,67043	4,87375 -1,89534 3,54687
4,25308 -1,05953 3,38304	5,15246 -1,89534 3,54094	8,67564 -0,17802 2,75279
2,91635 -1,60964 1,42572	8,42868 -0,03317 2,95822	4,25308 -1,65686 1,60386
-7,50967 -0,33218 2,39306	-4,84031 -0,10756 0,10238	-7,51163 -0,56754 2,08054
-6,13207 -0,09876 0,43801	-7,50967 -0,21709 1,32558	4,25308 -0,07395 0,15751

-7,28028 -0,66012 1,62978	-8,01532 -0,24350 1,93268	-7,83358 -0,11750 2,34826
8,67564 0,00000 2,77494	2,91635 -0,09815 0,13734	2,91635 0,00000 4,11742
3,58996 -0,83799 3,75065	-8,01532 0,00000 2,74258	4,25308 -0,10756 0,10238
-7,08287 0,00000 0,04146	6,48874 -0,38743 3,80107	9,08517 0,00000 0,63422
4,25308 -1,56242 1,27334	8,42868 -1,05608 1,94824	8,42868 -0,74175 2,65740
-6,13207 -1,03313 2,95543	2,91635 -1,26983 0,54452	-8,01532 -0,11348 1,67324
9,25356 -0,30155 1,48965	-4,98680 -0,70336 3,87926	6,95412 -1,03924 0,19345
-6,70325 -0,85274 1,27047	7,78151 -1,02905 0,32443	2,91635 -1,12837 0,27181
9,25356 -0,07211 1,01746	-7,55235 -0,13921 2,56893	8,89956 -0,59240 0,78563
6,48819 -0,13400 3,83852	-8,64698 -0,33993 2,54478	-4,98570 -0,10392 0,12230
5,60548 0,00000 4,11742	5,60539 -1,22829 3,08273	7,48598 -0,07395 0,15751
3,58996 -0,48076 4,03160	-7,54240 -0,16191 2,56005	-4,98605 -0,54107 0,05612
-6,92751 -0,13921 0,36854	8,42868 -0,89700 2,45232	5,60548 -0,70062 3,53798
-4,84048 -1,66522 2,17401	-4,98570 -1,01579 0,21593	4,90230 -0,13311 0,04188
4,85983 -1,97880 3,73881	8,90019 -0,70898 1,73054	8,67564 -0,28632 2,72906
4,87375 0,00000 3,54687	-4,98570 -1,68261 1,85496	2,91635 -0,07395 0,15751
-4,98570 -1,65686 1,60386	4,90230 -1,56242 1,27334	3,59006 -0,13311 0,04188
-6,70331 0,00000 0,72389	-7,28034 -0,15171 1,11939	9,32996 0,00000 1,94633
-6,81191 -0,13921 3,13255	-7,60095 -0,53416 1,76061	7,48598 -1,16869 0,39920
2,91635 0,00000 0,16558	-4,98843 -0,96818 3,69325	8,67564 -0,81413 1,13042
8,89956 -0,37880 0,48629	4,90230 -1,12837 0,27181	-6,13207 -1,30868 2,47503
4,90230 -1,03924 0,19345	4,90230 -1,60964 1,42572	-8,01532 -0,17580 2,10893
2,91635 -0,88586 3,85615	-4,98570 -1,26983 0,54452	5,60548 -0,16722 4,10685
-7,80777 0,00000 1,22749	9,08517 -0,31652 0,73334	7,48828 -0,05117 3,47942
7,78129 -0,42716 3,27446	9,08517 -0,26678 2,28674	-7,80777 -0,62495 1,57028
9,25356 -0,11556 1,02257	8,42868 -0,57691 2,78581	8,42868 -0,12875 2,95822
-6,70331 -0,24085 0,72360	3,59006 -0,18823 0,00423	-6,13207 -1,42107 1,82207
-7,83358 -0,53781 1,78220	6,95412 -0,94737 3,19101	3,58996 -1,06455 3,48191
-4,98570 -0,19650 0,03913	-7,83358 -0,56997 1,80884	8,89956 0,00000 2,56131
8,22015 -0,71620 0,21123	-7,51163 -0,54275 1,76061	5,31298 -1,89534 3,56361

7,78129 -1,40048 2,12441	6,95067 0,00000 3,69041	-6,13207 -0,75448 3,28407
8,89956 -0,39029 2,46188	2,91635 -0,13311 0,04188	8,89956 -0,72375 1,90386
-7,80777 -0,56615 1,60618	4,24018 -1,89534 3,66310	3,58996 -1,67568 2,03441
-4,84048 -1,68261 1,85496	8,89956 -0,22773 2,53224	-4,98570 -1,62111 2,34703
-6,13207 -0,06882 0,43801	5,60548 -1,20379 0,38347	8,67552 -0,30650 0,19050
9,25356 -0,14084 2,04821	-6,13207 -0,15065 0,42995	4,90233 0,00000 0,16559
5,28450 -1,97880 3,62876	-4,98570 -1,17962 0,38960	8,22015 -0,86634 0,41979
6,48874 -1,53356 2,59838	-6,95642 0,00000 3,68004	4,59083 -1,89534 3,58314
4,25308 -0,83315 0,07917	-4,84048 -0,88586 3,85615	-4,98570 -0,07394 0,15694
-7,50967 -0,47406 2,28539	-6,70324 -0,13921 3,20894	6,95412 -0,13311 0,04188
8,67564 -0,76242 2,37709	7,48828 0,00000 3,47949	4,25308 -0,09815 0,13734
-4,84048 -0,99583 3,74618	4,25308 -1,20379 0,38347	7,78129 0,00000 0,17760
3,58996 -0,95248 3,60890	-7,28028 -0,53461 1,36325	8,42868 -0,28381 2,92875
8,67564 -0,38274 2,70235	7,48598 -0,13311 0,04188	-4,84048 -1,53356 2,59838
4,25308 -0,66592 3,82996	4,90230 -0,83315 0,07917	-8,01532 -0,24350 1,81146
6,48874 -1,20862 3,03473	7,78140 -0,10449 0,15344	5,26605 -1,89534 3,70973
-7,61398 -0,13921 1,39248	2,91635 -1,07603 3,61793	-8,09807 0,00000 2,59607
9,08517 -0,25040 0,67805	5,60548 -1,12837 0,27181	5,34073 0,00000 3,63061
3,58996 -1,12837 0,27181	7,78129 -1,38788 1,63004	-6,70325 -0,85114 2,68150
4,25308 -1,62111 2,34703	7,78167 -0,20704 0,03338	5,60548 -1,60964 1,42572
-8,09807 -0,06680 2,59607	-8,09807 -0,06680 1,26274	-7,84723 -0,67463 2,00213
-6,75441 -0,99682 2,07889	-7,08287 -2,03647 1,79404	-6,77993 -0,13921 3,19065
6,95412 -0,10756 0,10238	-7,60095 -0,28278 1,41984	-6,70331 -0,13921 0,72105
-4,98626 -1,03770 3,57105	-4,98708 0,00000 4,04691	-4,98730 -0,16532 4,03599
-4,98570 -1,10426 0,29130	-4,84048 -1,60964 1,42572	-7,60095 -0,55085 2,08054
8,42868 -0,99668 1,25843	3,58996 -0,07395 0,15751	4,60705 -1,97880 3,61531
7,78129 -1,04867 2,87823	4,69873 -1,97880 3,73238	4,36365 0,00000 3,72753
6,95412 -1,12837 0,27181	8,22019 -0,08364 0,17693	8,89956 -0,03058 2,56131
8,67564 -0,74484 0,71169	9,25356 0,00000 1,01746	-7,16815 -0,13921 4,38840
-7,31395 -2,03647 2,06647	-4,84048 -0,16722 4,10685	-7,80777 -0,68835 1,94131

6,48874 -0,13311 0,04188	5,60548 -0,27599 -0,00429	7,78129 -1,08429 0,43134
9,08517 0,00000 2,34094	-8,64698 -0,62820 2,31726	-6,80471 0,00000 0,60790
8,42868 -0,98070 1,13063	-4,84048 -0,13311 0,04188	4,85741 -1,89534 3,78834
7,78129 -0,64871 3,16834	6,95412 -0,55052 0,01683	7,78129 -0,26660 3,31687
-7,76428 -0,11486 4,38840	-6,13207 -0,62613 0,41386	8,67552 -0,19732 0,16239
4,25308 -0,92266 3,51383	9,36544 0,00000 1,86558	7,48598 -1,55038 2,16207
-6,71210 -1,02573 2,07723	8,67564 -0,87719 1,91404	8,42868 -1,04458 1,77765
-6,70325 -0,61348 0,88568	9,25356 -0,32021 1,85440	-4,98570 -0,15010 0,07006
6,48874 -1,52311 1,16217	-8,64698 -0,56898 2,28384	8,67564 -0,62604 2,54955
6,48874 -0,54617 3,72450	4,25308 -1,67568 2,03441	4,90230 -0,09815 0,13734
8,22015 -0,91299 0,51617	3,59007 -0,69685 3,88488	-7,50967 -0,13921 1,29232
4,29367 -1,97880 3,68153	-4,98570 -1,56242 1,27334	4,25308 -1,12837 0,27181
-8,01532 0,00000 1,39248	-8,64698 -0,37143 2,60666	7,48598 -1,11265 2,91327
4,26478 0,00000 3,70511	9,08517 -0,45395 1,12687	-6,81337 -0,14022 3,22716
-8,64698 -0,68835 1,94131	4,37176 -1,97880 3,64981	8,22015 -0,29244 0,09813
3,59006 -0,27599 -0,00429	-4,84048 -1,62111 2,34703	9,08517 -0,03496 2,34094
9,08517 -0,41035 0,90962	4,31860 -1,97880 3,69012	-8,64698 0,00000 1,22749
5,60548 -0,09815 0,13734	-7,28028 -0,42957 1,21647	2,91635 -0,18823 0,00423
3,59006 -0,10756 0,10238	3,58996 -0,16722 4,10685	6,95412 -1,26983 0,54452
-7,08287 -2,03647 2,04580	-6,73850 0,00000 0,73640	2,91635 -1,68261 1,85496
6,95412 -1,68261 1,85496	6,48819 -0,04952 3,84132	4,25308 -0,55052 0,01683
4,99630 -1,97880 3,74202	7,78050 -1,36090 1,43776	-4,98570 -0,86554 3,78882
3,58996 0,00000 4,11742	4,90230 -1,66522 2,17401	8,67564 -0,11720 2,76614
2,91635 -1,53356 2,59838	4,25308 -0,27599 -0,00429	7,78129 -0,50290 3,23659
7,78129 -1,32524 1,26319	-6,70331 -0,08179 0,72233	-4,98563 -0,28474 0,02639
2,91635 -0,48076 4,03160	8,42868 -1,00241 2,24340	-4,84048 -1,67568 2,03441
7,48598 -1,49922 1,43803	-6,92751 0,00000 0,36854	4,87683 -1,97880 3,58386
2,91635 -1,20379 0,38347	-6,70331 -0,43171 0,75844	-6,13207 -0,89303 0,60081
-4,84048 -1,56242 1,27334	4,37086 -2,06226 3,67447	-6,13207 -0,27299 0,36962
-7,60095 -0,48559 1,62407	6,48874 -1,60964 1,42572	5,14089 -1,89534 3,76709

4,25308 -0,79181 3,66290	9,08517 -0,15089 2,32814	6,95412 -0,07395 0,15751
-4,98376 -0,79965 0,11100	6,48874 -1,20379 0,38347	-8,64698 -0,62495 1,57028
7,78163 -0,07785 0,16533	8,22015 0,00000 0,18762	3,58996 -1,62111 2,34703
3,58996 -0,83315 0,07917	7,78129 -1,35987 2,29667	-8,09832 0,00000 1,90091
-6,74888 -1,02573 2,08916	-7,50967 -0,13921 1,32571	2,91635 -1,03924 0,19345
9,08517 -0,09894 2,34100	9,25361 -0,27278 1,13977	3,58996 -0,09815 0,13734
6,48874 -0,07395 0,15751	9,08517 -0,12756 0,63632	-7,28039 -0,24544 2,71711
-6,95642 -0,13921 3,68004	9,38956 -0,06677 1,59813	6,48874 -0,81160 3,38034
-4,84048 0,00000 4,11742	-7,50967 -0,42989 1,45554	-8,01532 0,00000 0,04132
7,48598 -0,88092 3,11603	6,95412 -1,62111 2,34703	-7,80777 -0,37143 2,60666
9,32996 -0,13145 1,91127	-7,50967 -0,52558 1,59265	7,48598 0,00000 0,16559
8,67564 -0,57633 0,37519	8,89956 -0,62350 2,24475	6,48874 -1,62111 2,34703
-6,13207 0,00000 3,49126	-7,84660 -0,09717 2,59607	8,67564 -0,64862 0,45540
7,48598 -1,56809 1,84137	-4,84048 -0,83315 0,07917	-4,98572 0,00000 0,16559
4,90230 -0,10756 0,10238	6,48874 0,00000 0,16559	-8,09832 -0,67463 1,90091
8,67564 -0,48511 2,65785	9,32996 -0,08012 1,93819	4,63532 -2,06226 3,65099
2,91635 -1,62111 2,34703	6,48874 -1,26983 0,54452	-7,84660 0,00000 1,26274
6,48874 -0,18823 0,00423	8,22015 -0,94672 0,63985	8,22015 -0,14322 0,14585
-7,31395 -2,03647 1,77580	-7,83357 -0,14764 1,50408	-8,64698 -0,33882 1,33617
-7,80777 -0,56898 2,28384	7,78122 -0,28114 0,02779	5,60548 -0,83703 3,40736
-6,74888 -1,02573 1,75377	-7,84723 0,00000 1,87991	-4,84048 -1,65686 1,60386
7,48598 -1,56022 2,01647	9,08517 -0,19111 0,64816	7,78129 -1,26241 2,56201
9,25356 -0,17154 1,04123	6,48874 -0,83315 0,07917	7,78122 -0,80097 0,11684
4,25308 -0,06689 4,11735	4,90230 -1,03944 3,30113	-8,01532 0,00000 3,93685
-7,28056 -0,66012 1,76076	3,58996 -1,03924 0,19345	6,48874 -1,65686 1,60386
3,58996 -0,06689 4,11735	9,08517 -0,48659 1,44731	-8,01532 0,00000 1,13909
-7,50972 -0,19267 2,52717	6,48874 -1,56242 1,27334	4,90230 -0,87036 3,44648
4,90230 -1,52311 1,16217	4,25308 -1,53356 2,59838	7,48598 -0,57905 3,37240
8,22015 -0,82682 0,32046	-7,84723 -0,67463 1,87991	4,90230 0,00000 4,11742
8,90044 -0,64047 1,12820	-6,70325 -0,97597 2,35807	6,95412 -0,09815 0,13734

4,24018 0,00000 3,66310	-7,60095 -0,31585 2,33311	9,38956 0,00000 1,59813
-7,28028 -0,49309 2,56117	-6,13207 -0,15050 3,48344	-8,64698 -0,75636 1,94055
-4,98504 -1,67568 2,03441	-4,84048 -0,07395 0,15751	6,95428 -0,63555 3,43978
4,23377 -1,89534 3,68856	4,69285 0,00000 3,77632	-8,01532 -0,17703 1,74080
6,48874 -0,55052 0,01683	4,25308 0,00000 0,16559	9,08517 -0,40864 2,16241
5,60548 -1,62111 2,34703	9,38713 0,00000 1,69390	8,42868 -1,01674 1,42968
6,95412 -1,20379 0,38347	8,67552 -0,24422 0,17266	5,60548 -1,67568 2,03441
-8,64698 0,00000 2,63112	-6,71144 -1,02840 2,19881	0,00000 0,00000 0,00000