



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño conceptual del casco para un futuro Buque Escuela de la Armada Española

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Andrea Mustafá López

DIRECTORES: Pedro Jesús Carrasco Pena

Gerardo González-Cela Echevarría

CURSO ACADÉMICO: 2024-2025

UniversidadeVigo

Firmado por
MUSTAFA LOPEZ
ANDREA - ***1943**
el día 25/03/2025
con un certificado
emitido por AC
FNMT Usuarios



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño conceptual del casco para un futuro Buque Escuela de la Armada Española

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

Universida_{de}Vigo

RESUMEN

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) tiene como objetivo el diseño conceptual de un Buque Escuela moderno para la Armada, adaptado a las necesidades formativas actuales de los futuros oficiales. Este tipo de embarcación desempeña un papel fundamental en la instrucción naval de los Guardiamarinas, proporcionando un entorno realista para la adquisición de habilidades prácticas en navegación, maniobra y liderazgo.

El trabajo comienza con un análisis de los buques escuela actuales, evaluando sus características, ventajas y limitaciones. A partir de esta base, se establecen los requisitos operativos y académicos que debe cumplir el nuevo diseño. Se aplican principios de ingeniería naval y eficiencia energética para garantizar un buque innovador, sostenible y funcional. En este sentido, se apuesta por el empleo de velas rígidas y palos de carbono, tecnologías que optimizan el rendimiento aerodinámico y reducen el impacto ambiental, mejorando la eficiencia en la navegación a vela.

El desarrollo del diseño conceptual se fundamenta en metodologías de ingeniería avanzada, incluyendo simulaciones y análisis comparativos. Los resultados presentan un concepto de buque optimizado, que combina tradición y modernidad en su estructura y capacidades. Finalmente, se plantean conclusiones y posibles líneas de mejora para futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVE

Buque escuela, velas rígidas, palos de carbono, eficiencia, sostenibilidad.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	6
1 Introducción y objetivos.....	7
1.1 Motivación del trabajo	9
1.2 Caracterización del problema	9
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Metodología.....	10
1.5 Estructura de la memoria	11
2 Estado del arte	13
2.1 Buques escuela.....	13
2.1.1 Definición	13
2.1.2 Tipos de buques escuela	13
2.2 Requisitos del proyecto conceptual	13
2.2.1 Etapas del proyecto conceptual	13
2.3 Elementos particulares en el proyecto de buques de vela.....	15
2.3.1 Energía eólica	16
2.3.2 Velocidad y presión del viento	17
2.3.3 Viento real y viento relativo	17
2.3.4 Cálculo de la superficie vélica.....	19
2.3.5 Tipos de velas en la actualidad.....	20
2.3.6 Rumbos de navegación a vela	23
2.3.7 Análisis de la estabilidad.....	24
2.3.8 Diseño de los mástiles	27
2.4 Base de datos para el desarrollo del proyecto.....	28
2.4.1 Buques considerados y características	28
2.4.2 Normativas especiales	33
2.5 Series Sistemáticas.....	34
2.6 Astilleros nacionales	36
2.6.1 Navantia.....	36
2.6.2 Bound4Blue.....	36
3 Desarrollo del TFG	38
3.1 Misiones.....	38
3.2 Dimensiones y coeficientes	38

3.2.1 Juego de dimensiones	39
3.2.2 Juego de coeficientes.....	41
3.2.3 Pesos y centros de gravedad	42
3.3 Estudio de potencia.....	43
3.4 Diseño conceptual del aparejo	46
3.4.1 Superficie vélica	47
3.4.2 Velas	47
3.4.3 Palos	47
3.4.4 Perfiles alares	49
3.4.5 Centros vélicos	50
3.5 Generación de formas	53
3.6 Planta de propulsión	56
3.6.1 Motor de propulsión	56
3.6.2 Reductora Marina	58
3.6.3 Generadores.....	58
3.6.4 Dimensionamiento de tanques y capacidades	59
3.7 Presupuesto del proyecto	60
4 Análisis de resultados.....	62
4.1 Características de la plataforma.....	62
4.1.1 Análisis de resultados: Comparativa con otros Buques Escuela similares	62
4.1.2 Impacto de los coeficientes de forma en la Resistencia al Avance y la Estabilidad	63
4.1.3 Innovación en velas rígidas y palos de carbono	64
4.1.4 Cumplimiento de normativas medioambientales	64
4.1.5 Estabilidad y maniobrabilidad.....	64
4.1.6 Potencia y autonomía	65
4.1.7 Análisis del Informe de Diseño Hidrostático	65
4.1.8 Análisis de los Cálculos de Resistencia	66
4.1.9 Análisis del Informe Hidrostático	66
5 Conclusiones y líneas futuras.....	67
5.1 Conclusiones.....	67
5.2 Líneas futuras.....	67
6 Bibliografía	69
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	72
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	73
Anexo III: Plano de formas.....	74

Anexo IV: Plano Vélido	75
Anexo V: Cartilla de Trazado	76
Anexo VI: Presupuesto	77
Anexo VII: Informe de Diseño Hidrostático.....	78
Anexo VIII: Hidrostáticas	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Línea de tiempo de los buques de vela.....	8
Figura 1-2 Metodología	11
Figura 1-3 .- Estructura de la memoria	12
Figura 2-1.- Escala Beaufort	15
Figura 2-2.- Representación gráfica escala Beaufort.....	16
Figura 2-3.- Vientos térmicos	17
Figura 2-4.- Sumatorio vectorial del viento real y el viento relativo.....	18
Figura 2-5.- Velas tradicionales	20
Figura 2-6.- Velamen Juan Sebastián Elcano	21
Figura 2-7.- Velas rígidas en barcos de la Copa América	21
Figura 2-8.- Perfil alar.....	22
Figura 2-9.- Rumbos	24
Figura 2-10.- Diagrama de estabilidad longitudinal y transversal	24
Figura 2-11.- Plano de formas.....	25
Figura 2-12.- Dimensiones principales	26
Figura 2-13.- Bergantín-goleta Juan Sebastián Elcano	29
Figura 2-14.- Goleta con estays Madonna	29
Figura 2-15.- Goleta con velas de cuchillo Linden.....	30
Figura 2-16.- Galeaza Jacobstads Wapen	30
Figura 2-17.- Bricbarca BAP Unión	31
Figura 2-18.- Goleta Fulton	31
Figura 2-19.- Barco de aparejo completo ARA Libertad.....	32
Figura 2-20.- Ketch Bonavista.....	32
Figura 2-21.- Yate de vela Sailing Yatch A.....	33
Figura 2-22. Sociedades de clasificación.....	33
Figura 2-23.- Escudo del convenio SOLAS.....	34
Figura 2-24.- Escudo convenio MARPOL	34
Figura 2-25.- Series sistemáticas	35
Figura 2-26.- Series sistemáticas para superficie vélica	36
Figura 3-1.- Perfil NACA 0012	50
Figura 3-2.- Perfil NACA 6412	50
Figura 3-3.- Perfil NACA 2412	50
Figura 3-4.- Distribución de CE.....	53
Figura 3-5.- Área de secciones.....	54
Figura 3-6.- Plano longitudinal	54

Figura 3-7.- Plano transversal Ppp	55
Figura 3-8 Plano transversal Ppr	55
Figura 3-9.- Planta.....	55
Figura 3-10.- Boceto	55
Figura 3-11.- Motor CAT C280-8.....	56
Figura 3-12.- Reductora MB270A	58
Figura 3-13.- Generadores C9.3B	59
Figura 3-14.- Recorrido Santa Cruz de Tenerife - Rio de Janeiro (Crucero XCV)	60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1.- Relación de dimensiones	39
Tabla 3-2.- Dimensiones	41
Tabla 3-3.- Dimensiones principales del buque.....	43
Tabla 3-4.- Dimensiones principales para el diseño del aparejo.....	46
Tabla 3-5.- Dimensiones velas.....	47
Tabla 3-6.- Distribución superficie vélica.....	48
Tabla 3-7.- Alturas de los mástiles.....	48
Tabla 3-8.-Comparación fibra de carbono vs acero	48
Tabla 3-9.- Altura de los palos.....	49
Tabla 3-10.- Perfiles NACA	49
Tabla 3-11.- Distribución de los mástiles desde la proa	51
Tabla 3-12.- Centroides individuales	52
Tabla 3-13.- Superficies vélicas y CE.....	52
Tabla 3-14.- Características CAT C280-8	56
Tabla 3-15.- Comparación Tier II y III - Convenio MARPOL [37] [30] [38]	57
Tabla 3-16.- Características MB270A	58
Tabla 3-17.- Características generadores C9.3B.....	58
Tabla 3-18.- Espacio-Peso	59
Tabla 3-19.- Presupuesto de construcción	60
Tabla 4-1.- Características finales.....	62
Tabla 4-2.- Análisis de resultados: Comparativa	63
Tabla 4-3.- Coeficientes de forma.....	63
Tabla 4-4.- Comparación de potencias	65

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La navegación a vela, símbolo perenne del espíritu humano de exploración y conquista de los mares, ha sido durante siglos un motor de intercambio cultural, progreso tecnológico y conexión entre civilizaciones. Desde las primeras embarcaciones fluviales egipcias del 4000 a.C. hasta los sofisticados clíperes del siglo XIX, la evolución de los veleros no solo ha respondido a avances tecnológicos, sino también a las necesidades sociales y económicas de cada época. Originalmente, las embarcaciones se construyeron con maderas como el roble, la haya, el pino y el cedro, utilizando herramientas manuales. Incluso se han hallado restos fósiles de balsas, canoas y remos que datan de antes del período neolítico [1]. Sin embargo, se considera a los egipcios como la primera civilización en construir barcos a vela. Estas primeras embarcaciones fluviales combinaban remos con una única vela cuadra para navegar a favor viento. Además, los egipcios lograron diseñar grandes barcos de carga, de hasta 90 metros de eslora, capaces de transportar obeliscos desde las canteras hasta los templos [2].

A partir de este desarrollo, los pueblos costeros del mundo comenzaron a diseñar embarcaciones adaptadas a su nivel tecnológico y a las condiciones de sus costas. Por ejemplo, los fenicios construyeron naves comerciales y de guerra que dominaron el Mediterráneo; los griegos perfeccionaron los trirremes, rápidas y maniobrables; mientras que los romanos adoptaron y mejoraron estas tecnologías para construir una poderosa flota marítima. Más tarde, en la era vikinga, los drakkar destacaron por su velocidad y versatilidad, ideales para exploración y saqueo. Durante el Renacimiento, las carabelas y naos ibéricas jugaron un papel crucial en los descubrimientos transoceánicos, marcando una nueva era en la navegación. Finalmente, en el siglo XIX, los clíperes se consolidaron como veleros veloces y eficientes, optimizados para el comercio global. Cada uno de estos barcos no solo representó un avance técnico, sino que también fue un reflejo del impacto de la navegación en la conexión cultural y el progreso humano [3]. La Figura 1-1 muestra una línea de tiempo de la evolución de los barcos de las principales civilizaciones y pueblos de la historia.

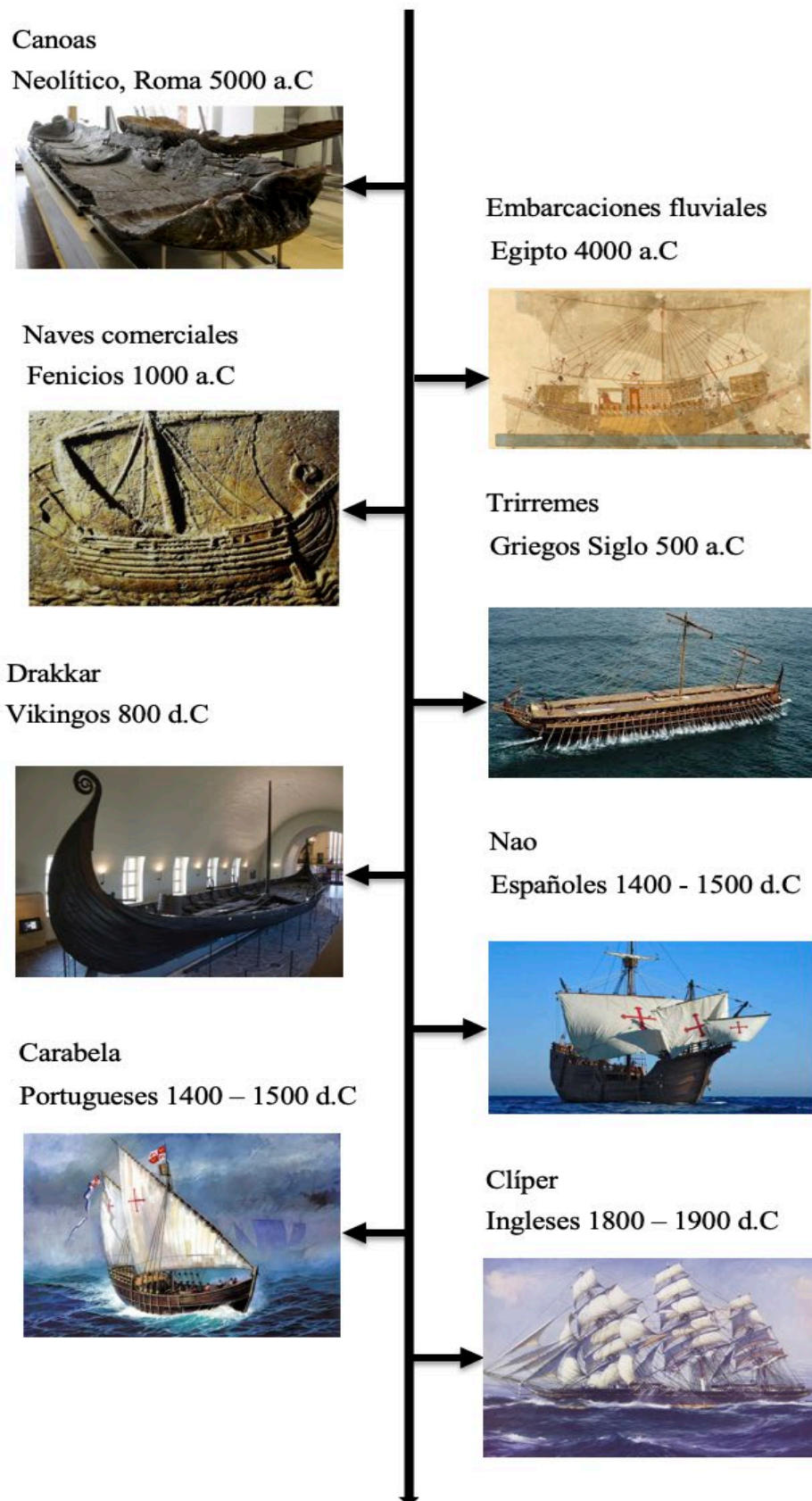


Figura 1-1 Línea de tiempo de los buques de vela
Elaboración propia (2025)

Hoy en día, la navegación a vela se emplea principalmente en actividades recreativas y competiciones deportivas. Sin embargo, algunas marinas, incluida nuestra Armada, siguen apostando por la formación de sus futuros oficiales mediante la navegación tradicional a vela, utilizando emblemáticos buques escuela. Un ejemplo destacado es la Armada de Chile, que cuenta con el buque escuela Esmeralda, construido en los astilleros Echevarrieta y Larrinaga [4], considerado un buque gemelo del Juan Sebastián Elcano pese a su diferencia de edad. A nivel internacional, también destacan buques como el Amerigo Vespucci de la Marina Italiana, un bergantín que combina tradición y majestuosa estética [5]; el Kruzenshtern de Rusia, uno de los mayores veleros operativos del mundo [6]; el Sagres de Portugal, conocido por su distintiva cruz de la Orden de Cristo en sus velas [7]; y el Eagle, el buque escuela de la Guardia Costera de los Estados Unidos, que se utiliza para la formación práctica de cadetes en navegación y liderazgo [8]. Todos ellos son ejemplos de cómo la navegación a vela sigue siendo un elemento clave en la instrucción naval moderna.

1.1 Motivación del trabajo

La Armada Española desempeña un papel fundamental en la defensa y seguridad del país, así como en la proyección internacional de los intereses nacionales. Su misión no solo se limita a operaciones navales, sino que también incluye actividades de colaboración en misiones de paz, asistencia humanitaria y representación diplomática [9]. Dentro de esta amplia gama de funciones, la formación de sus oficiales constituye un pilar esencial para garantizar su capacidad operativa y la excelencia profesional que caracteriza a la institución [10].

Desde su construcción en 1927, el bergantín-goleta Juan Sebastián de Elcano ha servido como piedra angular en la formación de los oficiales de la Armada Española, combinando tradición naval, excelencia técnica y diplomacia internacional. Sin embargo, a medida que se acerca su centenario, el creciente desafío de mantener su operatividad plantea la necesidad de diseñar un sucesor que no solo preserve su legado, sino que también se adapte a los estándares tecnológicos, sostenibles y formativos del siglo XXI. Este bergantín-goleta, considerado un emblema flotante de la tradición naval española, realiza cruceros de instrucción que combinan formación técnica, navegación astronómica y experiencia en liderazgo. Además, en el ámbito diplomático, el Elcano actúa como embajador de España en puertos de todo el mundo, fortaleciendo lazos internacionales.

El legado y relevancia del Juan Sebastián de Elcano para la Armada son innegables. Su papel en la formación de generaciones de marinos no solo garantiza habilidades técnicas esenciales, sino también valores fundamentales como el honor, el valor, la disciplina, la lealtad y el compañerismo [11]. Estos principios son esenciales para forjar el carácter de los futuros Oficiales y garantizar una Armada comprometida con sus responsabilidades. Subrayando esta importancia, el objetivo de este Trabajo Fin de Grado es diseñar conceptualmente un buque escuela que pueda asumir esta responsabilidad cuando llegue el momento de dar de baja al Elcano, asegurando que las futuras promociones de oficiales puedan contar con una plataforma formativa única y adaptada a las necesidades del siglo XXI.

1.2 Caracterización del problema

En 2027, el Juan Sebastián de Elcano alcanzará un siglo de servicio, consolidándose como uno de los buques escuela más longevos en operación a nivel mundial [12, 13]. Sin embargo, su avanzada edad supone limitaciones estructurales y técnicas crecientes, a pesar de las múltiples carenas y modernizaciones realizadas a lo largo de su historia. Estas dificultades incluyen un mantenimiento más costoso, menor eficiencia operativa y desafíos para cumplir con las normativas medioambientales actuales, lo que refuerza la necesidad de planificar su relevo. A lo largo de su vida operativa, ha pasado por cuatro grandes cadenas, intervenciones esenciales para mantener su operatividad y adaptarlo a las exigencias modernas [13].

Además de ser un buque escuela insustituible en la formación práctica de los futuros oficiales, el Elcano también constituye una experiencia vital para los guardiamarinas, quienes desarrollan habilidades fundamentales como el trabajo en equipo, la toma de decisiones bajo presión y la navegación tradicional a vela [13, 11]. Privar a las nuevas generaciones de esta herramienta pedagógica supondría una pérdida significativa en su preparación.

Por tanto, el diseño conceptual de un futuro buque escuela no solo busca preservar esta experiencia, sino también incorporar avances en construcción naval que aseguren su sostenibilidad y eficiencia en el contexto actual.

1.3 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado es el estudio conceptual de un futuro buque escuela diseñado específicamente para la Armada española, destinado a sustituir y mejorar las funciones que hasta la fecha ha desempeñado el Juan Sebastián Elcano como buque más emblemático y símbolo de esta institución. Este nuevo diseño persigue mantener las capacidades fundamentales de el Elcano, a la vez que implementa mejoras en la eficiencia de navegación a vela debido a un aparejo optimizado, mayor sostenibilidad a través de la incorporación e innovación de una planta de propulsión eléctrica, y una habitabilidad ligeramente superior para garantizar un entorno cómodo y funcional para su dotación. A partir de estos objetivos principales, se establecen cuatro objetivos secundarios, que serán desarrollados a lo largo del trabajo de manera detallada para alcanzar los resultados deseados en el diseño y conceptualización del buque.

Estos objetivos secundarios reflejan:

1. Conocer el estado del arte en materia de construcción naval, recopilando información sobre los avances tecnológicos en la construcción de veleros escuela y buques similares, analizando tendencias en sostenibilidad, eficiencia y diseño.
2. Determinar las dimensiones óptimas del buque, levantando una base de datos que compila información sobre buques escuela y veleros comparables para definir las dimensiones conceptuales óptimas para maximizar su rendimiento y capacidad operativa.
3. Efectuar un análisis de viabilidad constructiva, evaluando las capacidades de los astilleros nacionales para llevar a cabo la construcción del nuevo buque, asegurando que el proyecto sea realizable con los recursos industriales disponibles en España.
4. Integrar sistemas de propulsión eléctrica y soluciones de eficiencia energética, alineados con las normativas medioambientales internacionales y que a su vez cumplan con los requerimientos funcionales y operativos de la Armada.

1.4 Metodología

La metodología empleada para este trabajo se apoya en los siguientes pasos:

1. Se construirá una base de datos con las características de buques escuela internacionales similares al Elcano. Este análisis servirá de referencia para establecer los parámetros preliminares del nuevo diseño realizando un estudio comparativo.
2. Para determinar algunas de las dimensiones óptimas del futuro buque, se utilizarán series sistemáticas adaptadas a embarcaciones de vela. Estas series permiten relacionar las dimensiones clave del buque con su desempeño operativo y requisitos funcionales.
3. Estudio de los avances y mejoras tecnológicas para su incorporación en el proyecto. Se integrarán avances tecnológicos en el diseño conceptual considerando tecnologías sostenibles y eficientes, alineadas con las tendencias actuales en construcción naval.

Este enfoque asegura una solución integral que preserve el legado del Juan Sebastián de Elcano y garantice que la Armada Española continúe contando con un buque escuela de referencia mundial. A continuación, la Figura 2 muestra un resumen de la metodología a seguir en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado.

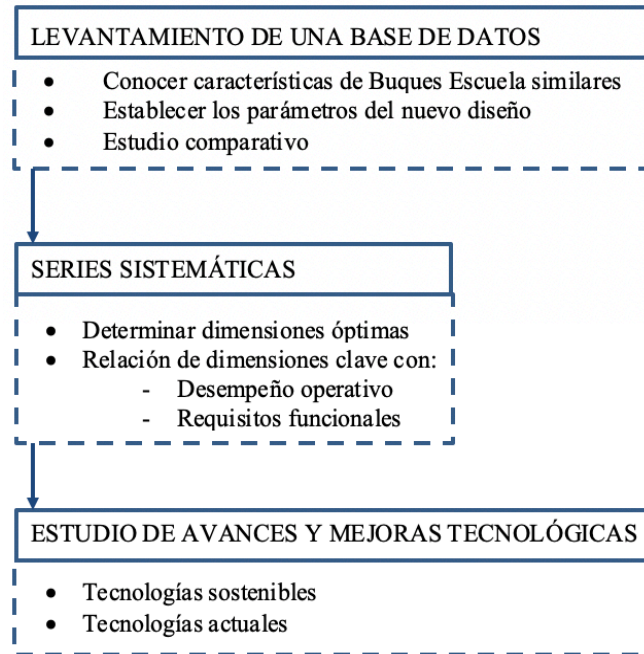


Figura 1-2 Metodología
Elaboración propia (2025)

1.5 Estructura de la memoria

El presente trabajo estará dividido en cuatro partes principales, en las que se abordará el tema de estudio de manera deductiva, recorriendo de lo general a lo más específico.

En primer lugar, se analizará la metodología empleada, así como los requisitos del proyecto conceptual, centrándose en particularmente en los requisitos de Estado Mayor por parte de la Armada y las etapas del proyecto que conlleva el desarrollo de un trabajo de tal envergadura.

En segundo lugar, una vez expuestas las bases del trabajo, se procederá a un análisis del objeto de estudio y se desglosarán los datos incluidos en la base de datos a partir de los cuales se procederá al dimensionamiento del buque y selección de parámetros para la solución.

En tercer lugar, se realizará un análisis de los valores obtenidos y se expondrán las propuestas obtenidas.

En cuarto y último lugar, se redactarán unas breves conclusiones resumiendo los hallazgos y analizando las líneas futuras.

Diseño conceptual de un futuro Buque Escuela para la Armada

Este trabajo desarrolla la propuesta de un nuevo Buque Escuela para la Armada, combinando innovación, eficiencia y funcionalidad. Se busca definir un concepto que optimice la formación de los futuros Oficiales, garantizando un equilibrio entre tradición y modernidad en su diseño.

CONTEXTUALIZACIÓN

Breve introducción sobre la historia y evolución de los buques a vela, su importancia en la formación naval y la necesidad de modernizar este tipo de embarcaciones.

- ¿Qué es un Buque Escuela?
- ¿Cuál es su importancia en la formación naval?
- ¿Qué elementos deben considerarse en su diseño?

REQUISITOS Y NECESIDADES

Identificación de las necesidades operativas, académicas y tecnológicas que deben cumplir el nuevo Buque Escuela para responder a las exigencias de la Armada del futuro.

REFERENCIAS Y BUQUES ESCUELA ACTUALES

Análisis de buques escuela en servicio a nivel nacional e internacional, identificando sus fortalezas y debilidades como referencia para el nuevo diseño.

PROPUESTA DE DISEÑO CONCEPTUAL

Definición del concepto de diseño, incluyendo:

- Dimensiones y configuración general.
- Sistemas de propulsión y energía.
- Tecnologías aplicadas a la formación y navegación.

¿CÓMO SE DESARROLLA EL DISEÑO?

Explicación de la metodología utilizada para definir el diseño conceptual, justificando cada elección técnica y operativa.

RESULTADOS

Presentación de los planos y esquemas conceptuales del buque, destacando sus características innovadoras y beneficios para la formación naval.

CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE DESARROLLO

Breve síntesis del diseño propuesto y posibles mejoras o desarrollos para futuras etapas del proyecto.

Figura 1-3.- Estructura de la memoria
Elaboración propia (2025)

2 ESTADO DEL ARTE

El presente estado del arte tiene por finalidad definir las bases conceptuales para la realización del diseño de un buque escuela que permita cubrir las exigencias operacionales y formativas que hasta ahora viene cubriendo el principal buque escuela de la Armada Española, el Juan Sebastián Elcano. A lo largo de este informe, se detallarán los elementos claves considerados previamente, desde la conceptualización y clasificación de los buques escuela; los principios del diseño naval y las especificaciones técnicas indispensables en el desarrollo de un proyecto de tales magnitudes [14].

2.1 Buques escuela

2.1.1 Definición

Un buque escuela es una embarcación diseñada principalmente para la formación práctica y en valores de los futuros oficiales y dotación de las Armadas y Marinas del mundo. Se persigue con ellos, proporcionar experiencia en navegación a vela, navegación astronómica, maniobras con aparejo y operaciones marítimas reales, complementando la formación teórica que se imparte en las academias navales [14].

2.1.2 Tipos de buques escuela

Existen diversos tipos buques escuela, que vamos a dividir en dos familias [15]:

- Los propulsados a vela, que priorizan los métodos tradicionales de navegación a vela y navegación astronómica.
- Los motorizados o híbridos, que integran tecnologías modernas que permiten la navegación incluso en condiciones adversas.

Además, todos ellos suelen tener un papel diplomático, contribuyendo en la representación de sus respectivos países en el extranjero y fortaleciendo así los lazos internacionales.

2.2 Requisitos del proyecto conceptual

2.2.1 Etapas del proyecto conceptual

En primer lugar, con el fin de definir las etapas de este proyecto se han definido unos objetivos y actividades a desempeñar por el buque para reflejar las características, funciones y misiones de un buque dedicado a la formación, representación diplomática y sostenibilidad. A continuación, se presentan los dos objetivos principales:

Análisis de alternativas; estudiar alternativas de buques escuelas similares que han existido a lo largo de los años que cumplan con los Objetivos Tácticos Generales, siendo estos la formación de los futuros Oficiales, la representación diplomática y la sostenibilidad ambiental.

Estimación de costes iniciales; estimar de manera preliminar los costes del proyecto y del buque escuela, considerando la implementación de tecnologías tradicionales; navegación a vela y modernas; propulsión híbrida.

En base a estos objetivos se han definido las siguientes fases:

Fase 1: definición de las misiones

Establecer las misiones asignadas al buque escuela, como el adiestramiento teórico y práctico de los Guardiamarinas, la representación diplomática y cultural, y el entrenamiento en navegación tradicional y moderna.

Evaluar los requisitos específicos en cuanto a su capacidad para poder navegar en aguas internacionales, teniendo en cuenta aspectos como las condiciones meteorológicas relativas al viento y oleaje que se pueden encontrar en las diferentes localizaciones geográficas que el buque atraviesa a lo largo de cada travesía.

Fase 2: identificación de problemas y desarrollo del modelo inicial

Analizar los desafíos que enfrentará el buque en cuanto a sostenibilidad, maniobrabilidad y operatividad durante sus periodos de adiestramiento y representación. Desarrollar un modelo inicial de la Plataforma; casco, aparejo, sistema de propulsión híbrida.

Fase 3: estudio de sistemas y objetivos funcionales

Evaluar los sistemas de propulsión mixta; vela y motor, y la capacidad de operación en condiciones meteorológicas adversas.

Determinar los objetivos funcionales del buque, como garantizar un ambiente óptimo para la formación, operar de manera eficiente y mantener un bajo impacto ambiental.

Fase 4: análisis de proyectos similares y desarrollo de configuraciones

Estudiar buques escuelas a nivel internacional como el Esmeralda (Chile), el Unión (Perú), el Eagle (EE.UU) o el Gloria (Colombia), para obtener ideas de disposición general, capacidades y tecnologías.

Diseñar configuraciones preliminares que incluyan las áreas de formación, alojamiento, y sistemas de propulsión y navegación.

Fase 5: selección inicial de equipos y modificaciones

Seleccionar equipos y sistemas acordes con las necesidades del buque escuela, velas, motores auxiliares y sistemas de adiestramiento.

Proponer modificaciones para adaptarlos a los requisitos específicos del buque.

Fase 6: presupuestos del proyecto

Determinar un presupuesto inicial y estimar el coste del buque.

Fase 7: revisión por la Armada

La Armada revisa cada una de las fases del proyecto de diseño conceptual y la documentación técnica para asegurar que cumpla con los requisitos establecidos en el REM.

2.3 Elementos particulares en el proyecto de buques de vela

Un barco de vela navega impulsado por un conjunto de fuerzas, cuya acción cambia continuamente, tanto en dirección como en magnitud. El viento puede variar desde calma hasta un temporal huracanado en la escala Beaufort [16]. Su fuerza aumenta con la altura de manera que la parte superior de las velas recibe mayor empuje que la parte más baja. La Figura 3 muestra la escala Beaufort completa; rango en el que se establece cada viento, simbología y estado de la mar correspondiente.

Fuerza	Denominación	Vel. Viento Km/h	Vel. Viento Nudos	Símbolo	Mar
0	Calma	0 a 1	< 1		Como un espejo
1	Ventolina	2 a 5	1 a 3		Pequeñas olas, pero sin espuma
2	Flojito (brisa muy débil)	6 a 11	4 a 6		Crestas de apariencia vitrea, sin romper
3	Flojo (brisa débil)	12 a 19	7 a 10		Pequeñas olas, crestas rompientes. Borreguillos dispersos
4	Bonancible (Brisa moderada)	20 a 28	11 a 16		Borreguillos numerosos, olas cada vez más largas
5	Fresquito (brisa fresca)	29 a 38	17 a 21		Olas medianas y alargadas, borreguillos muy abundantes
6	Fresco (brisa fuerte)	39 a 49	22 a 27		Comienzan a formarse olas grandes, crestas rompientes, espuma. Aumentan los rociones
7	Frescachón(viento fuerte)	50 a 61	28 a 33		Mar gruesa, con espuma arrastrada en dirección del viento formando nubecillas
8	Temporal (viento duro)	62 a 74	34 a 40		Grandes olas rompientes, franjas de espuma arrastrada en nubes blancas
9	Temporal Fuerte (muy duro)	75 a 88	41 a 47		Olas muy grandes, rompientes. Visibilidad mermada. Los rociones dificultan la visibilidad
10	Temporal duro(temporal)	89 a 102	48 a 55		Olas muy gruesas con crestas empenachadas. Superficie del mar blanca. La visibilidad se reduce
11	Temporal muy duro (borrasca, tempestad)	103 a 117	56 a 63		Olas excepcionalmente grandes, mar completamente blanca, visibilidad muy reducida (las embarcaciones de mediano tonelaje pueden perderse de vista)
12	Temporal huracanado(huracán)	118 y más	64 a 71>		El aire está lleno de espuma y rociones. Enorme oleaje. El mar está completamente blanca debido a los bancos de espuma Visibilidad casi nula

Figura 2-1.- Escala Beaufort

Para facilitar la comprensión de la Figura 2-1, en la Figura 2-2 se representa un resumen visual de los diferentes niveles de la escala Beaufort [17].

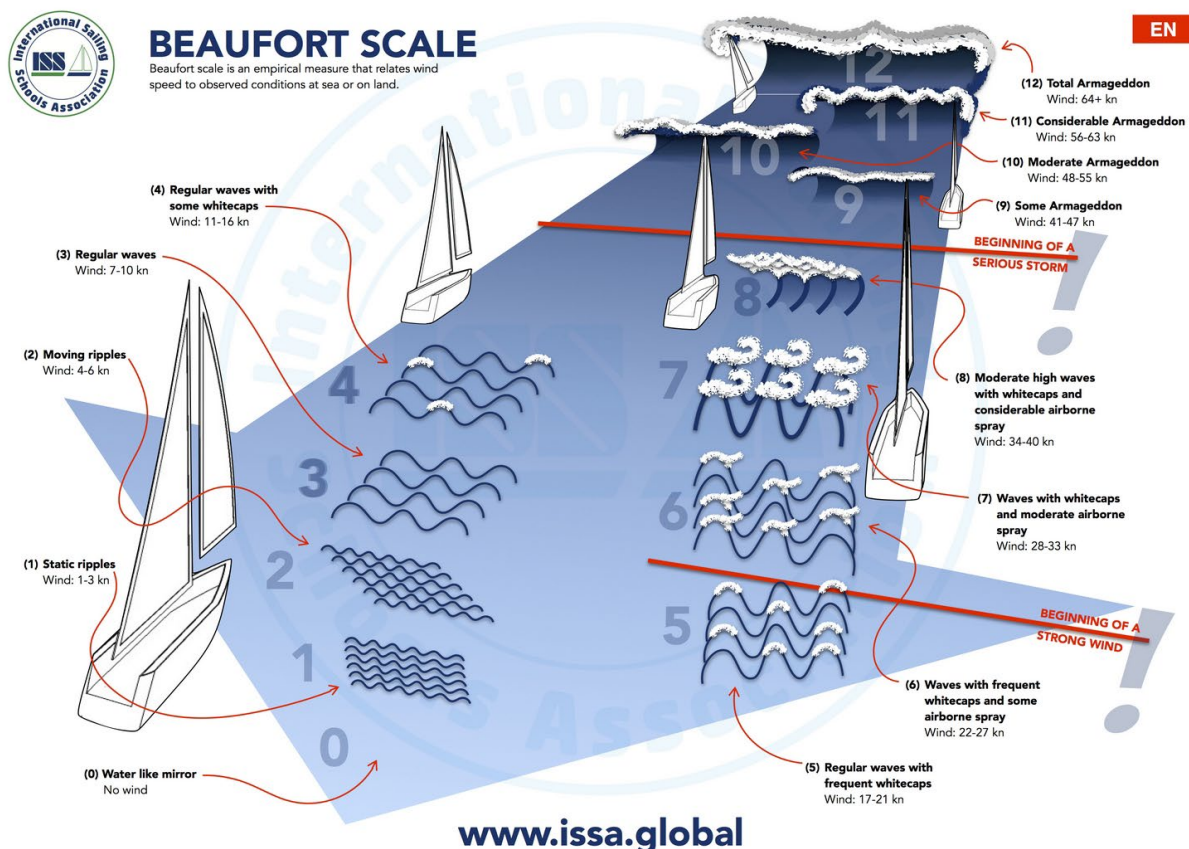


Figura 2-2.- Representación gráfica escala Beaufort

La corriente del viento queda defecionada al actuar sobre las velas, y hasta la humedad y la densidad del aire tienen cierta influencia. Es por este motivo, que una vez definidas sus dimensiones y su forma es difícil confeccionarlas y conservarlas exactamente de acuerdo a este y mayoritariamente quedan distorsionadas en cierto grado por la acción del viento.

Al tratarse el diseño de un barco a vela, se presenta la tarea de conocer previamente cuál es la energía que las propulsa y factores que esta conlleva, es por ello que previa a la elección del aparejo y cálculo de la superficie vélica se deben considerar ciertos aspectos teóricos.

2.3.1 Energía eólica

Dado que es una energía proveniente del viento, se trata de una energía renovable. El origen de esta energía se debe al movimiento de las masas de aire que ocurren en la atmósfera.

En referencia a los vientos térmicos, se consideran estos un fenómeno provocado por la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra [18]. Principalmente, pueden darse dos tipos de vientos térmicos, durante el día y durante la noche. Durante el día, su sentido es desde el mar hacia la tierra, ocurre ya que durante el día la tierra se calienta adquiriendo así una mayor temperatura que el agua del mar, lo que provoca una ascensión de las masas de aire que se calientan y disminuyendo así su densidad. Por este motivo, las masas de aire del mar, siendo más frías y densas, tienden a ocupar el espacio libre del aire que ha ascendido en la tierra. Por otra parte, el viento térmico producido durante la noche, tiene un sentido del mar, con mayor temperatura y menor densidad como consecuencia de un fenómeno completamente inverso al anteriormente mencionado. En conclusión, las masas de aire provenientes del mar, con mayor temperatura y menor densidad que las terrestres, ascienden. Este afecto, produce que las masas de aire más frías de la tierra tiendan a ocupar el espacio libre producido por la ascensión de las

masas de aire del mar. La Figura 4 muestra el sentido en el que se producen los vientos térmicos diurnos y nocturnos.

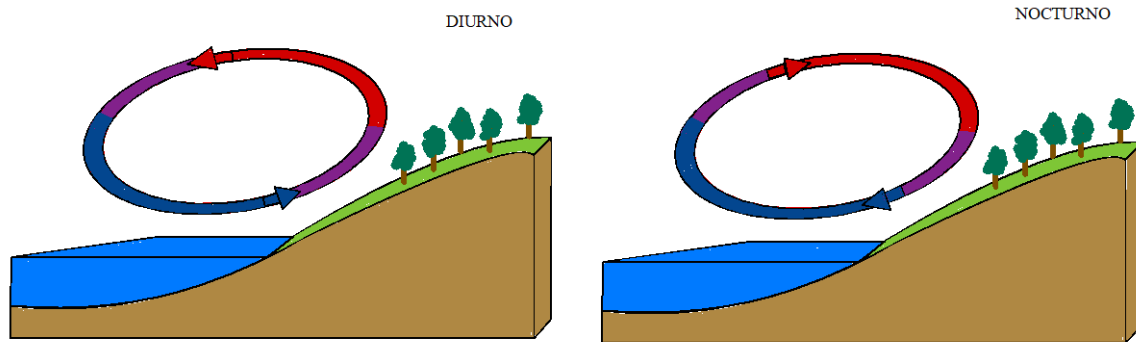


Figura 2-3.- Vientos térmicos
Elaboración propia (2025)

2.3.2 Velocidad y presión del viento

La velocidad y la presión del viento son factores claves en la propulsión de un buque de vela. La cantidad de energía transmitida por el viento a las velas es directamente proporcional a la magnitud de la velocidad y presión del viento. De manera simplificada, se entiende que a mayor velocidad y presión mayor energía reciben las velas. La presión que proviene del viento, produce en primer lugar, una escora debida a la fuerza ejercida sobre las velas y, en segundo lugar, una fuerza de avance. Sin embargo, no es esto un factor determinante en el rendimiento del barco. Siéndolo de otro modo el adaptar el aparejo en función de la intensidad para obtener rendimientos óptimos [19].

2.3.3 Viento real y viento relativo

En la navegación a vela, es fundamental comprender la diferencia entre los distintos tipos de viento que influyen en el comportamiento de una embarcación. El viento real, también conocido como “true wind”, se define como aquel que se percibe desde un punto de referencia estático, es decir, aquel que afectaría a un barco fondeado o amarrado en puerto. Su comportamiento se estudia en función de dos parámetros fundamentales: su velocidad, denominada *True Wind Speed* (TWS), y su ángulo de incidencia con respecto a la proa del barco, conocido como *True Wind Angle* (TWA). Estos valores permiten caracterizar la dirección e intensidad del flujo de aire sin la influencia del movimiento de la embarcación.

Sin embargo, cuando el barco se encuentra en movimiento, la percepción del viento cambia significativamente. La velocidad de desplazamiento genera un efecto que modifica tanto la dirección como la intensidad del viento que se experimenta a bordo. A este nuevo viento resultante se le conoce como viento aparente, o *Apparent wind*, y se obtiene como la combinación vectorial entre el viento real y la velocidad del barco. En términos de parámetros de navegación, se expresa a través de la *Apparent Wind Speed* (AWS), que representa la velocidad del viento tal como es percibida en la embarcación en movimiento, y el *Apparent Wind Angle* (AWA), que indica su dirección relativa a la proa.

Con la dirección del viento directamente por la proa o por la popa, la magnitud del viento relativo será: $R = w + v$ y $R = w - v$, respectivamente.

Para los vientos de costado la magnitud del viento relativo varía entre estos límites, siendo mayor el viento verdadero cuando ambos están hacia proa y menos cuando ambos están hacia popa. Se puede expresar la relación con las siguientes ecuaciones donde α y β representan los ángulos.

Conociendo la dirección α y la magnitud w del viento real:

$$\text{Viento relativo: } R = \sqrt{(\pm w \cos \alpha + v^2) + (w \sin \alpha)^2}$$

$$\text{Dirección del viento relativo: } \cos \beta = \frac{\pm w \cos \alpha + v}{R}$$

Conociendo la dirección β y magnitud R del viento relativo:

$$\text{Viento real: } w = \sqrt{(\pm R \cos \beta - v^2) + (R \sin \beta)^2}$$

$$\text{Dirección del viento real: } \sin \alpha = \frac{R \sin \beta}{w}$$

Donde:

- w : el viento real.
- v la velocidad del buque.
- R : el viento relativo o aparente.

El estudio detallado de la interacción entre el viento real y el viento aparente es clave para optimizar la navegación, ya que permite determinar la mejor orientación de las velas y el ajuste del aparejo en función del rumbo y las condiciones meteorológicas. Comprender cómo estos factores influyen en el rendimiento de la embarcación resulta esencial para maximizar la eficiencia aerodinámica y garantizar una navegación segura y eficaz en cualquier circunstancia. Estos elementos penden verse representados en la Figura 2-4.

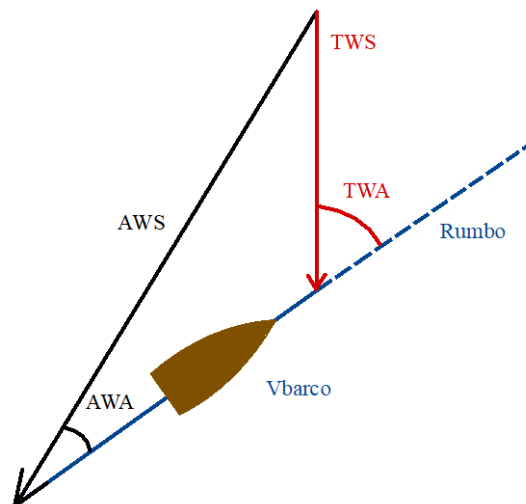


Figura 2-4.- Sumatorio vectorial del viento real y el viento relativo
Elaboración propia (2025)

Cuando un barco está navegando, no puede fijarse únicamente en el viento real siendo este aquel que se percibiría si el barco estuviera detenido, porque el desplazamiento del barco modifica la percepción del viento. Este nuevo viento, llamado viento aparente o relativo, es el resultado de combinar el viento real con la velocidad y dirección del barco. El viento aparente es crucial porque:

1. Dirección: el viento aparente puede venir de una dirección diferente a la del viento real debido a la velocidad y dirección en que se mueve el barco.
2. Velocidad: el viento aparente generalmente es más fuerte que el viento real porque se suma la velocidad del viento real y la velocidad de avance del barco.

Los navegantes deben considerar el viento aparente porque es el viento que realmente afecta directamente a cómo se deben ajustar las velas y variar la dirección del barco para optimizar el rendimiento y la seguridad. Definitivamente, para maniobrar eficazmente y aprovechar al máximo las

condiciones del viento, los navegantes siempre deben tener en cuenta el viento aparente, ya que es el que influye en la navegación activa del barco [19].

2.3.4 Cálculo de la superficie vélica

El área de la vela es un parámetro fundamental en el diseño de un barco y en los cálculos de las fuerzas generadas por el viento. Esta área se emplea para determinar la magnitud de la fuerza de empuje y vuelco que actúa sobre la embarcación. En el contexto del análisis de perfiles alares, el área se refiere al área de planta o superficie alar, siendo esta la superficie proyectada por el ala. En el caso de las velas rígidas, este valor es determinante para los cálculos de rendimiento y eficiencia.

Cuando se trabaja con un velamen, se debe tener en cuenta la superficie de cada una de ellas por separado y luego realizar el sumatorio.

Las velas rígidas se basan en perfiles alares, que son geometrías obtenidas al seccionar transversalmente un ala, capaces de generar una diferencia de presión entre sus caras. Estos perfiles son esenciales para generar fuerzas de sustentación y arrastre que impulsan la embarcación.

Los perfiles alares se clasifican en familias o series, donde las características geométricas se definen de manera específica. La serie NACA de cuatro dígitos simétrica es una de las familias más utilizadas en el diseño de velas rígidas. Para perfiles alares trapezoidales como las velas, se utiliza la cuerda media aerodinámica para el cálculo del centro de presiones. La cuerda media es, aquella que multiplicada por la envergadura, es igual al área de la vela. Esta se encuentra en el punto que divide la superficie del perfil en dos mitades [20].

Sin embargo, hay que tener en cuenta otros parámetros adicionales, como la altura de la vela ya que es un parámetro que influye en las fuerzas resultantes y se define como el cociente entre la envergadura al cuadrado y la superficie alar. Del mismo modo, el diseño de una vela rígida implica la determinación de los coeficientes aerodinámicos, como el coeficiente de sustentación (CI) y el coeficiente de arrastre (Cd), siendo estos fundamentales para calcular las fuerzas que actúan sobre la vela. Se emplean principalmente para calcular las fuerzas de empuje y vuelco que actúan sobre el barco.

En relación a las fuerzas y coeficientes mencionados anteriormente, se obtienen las siguientes relaciones y fórmulas [20]. La fuerza total del viento (Ft) que incide sobre las velas viene dada por:

$$F_t = 1,394 \cdot 10^{-3} \cdot CI \cdot S \cdot v^2$$

Donde:

- CI: es el coeficiente de sustentación.
- S: es el área de la vela en pies cuadrados.
- v: es la velocidad del viento en nudos.

El coeficiente de empuje ascensional varía según la curvatura de la vela y el ángulo de incidencia del viento. La fuerza de resistencia de fricción (Rf) se puede expresar:

$$R_f = f \cdot S \cdot v^2$$

Donde:

- f: es el coeficiente de fricción.
- S: el área de la superficie en contacto con el agua.
- v: la velocidad en nudos.

La fuerza de arrastre (Fd) se calcula como:

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

Donde:

- p : la densidad del fluido.
- C_d : el coeficiente de arrastre.
- S : el área de la vela.
- v : la velocidad del viento.

2.3.5 Tipos de velas en la actualidad

Existen dos tipos de velas para impulsar un buque, las velas tradicionales y las velas rígidas [20].

Vela tradicional

Una vela tradicional, es generalmente una pieza de tela, lámina de kevlar o carbono utilizada para propulsar una embarcación mediante la acción del viento sobre ella.

Las velas presentan diversas denominaciones según su forma, siendo las más habituales las velas cuadras, velas latinas o velas de cuchillo. La Figura 2-5 muestra el velamen del buque escuela Juan Sebastián Elcano.

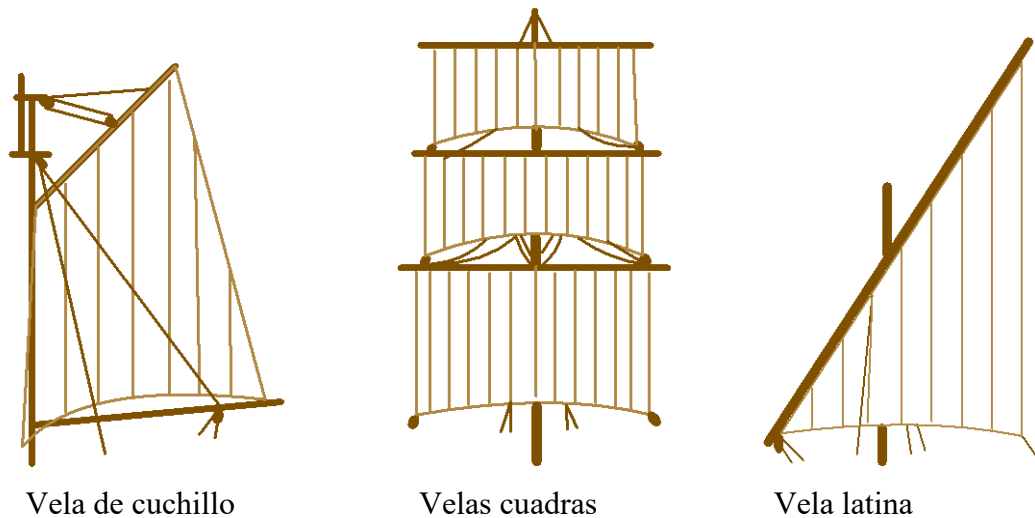


Figura 2-5.- Velas tradicionales
Elaboración propia (2025)

Las velas tradicionales en la actualidad, no se colocan de manera individual como al principio de la historia de la navegación, sino de manera conjunta para maximizar la eficacia del empuje que realizan en la embarcación. Al conjunto de varias tradicionales se le denomina velamen. Por este motivo, las velas presentan una geometría y un tamaño concreto en función de la posición que ocupen en el velamen. La Figura 2-6 muestra un ejemplo de como un conjunto de velas tradicionales, forman el velamen del buque escuela Juan Sebastián Elcano.

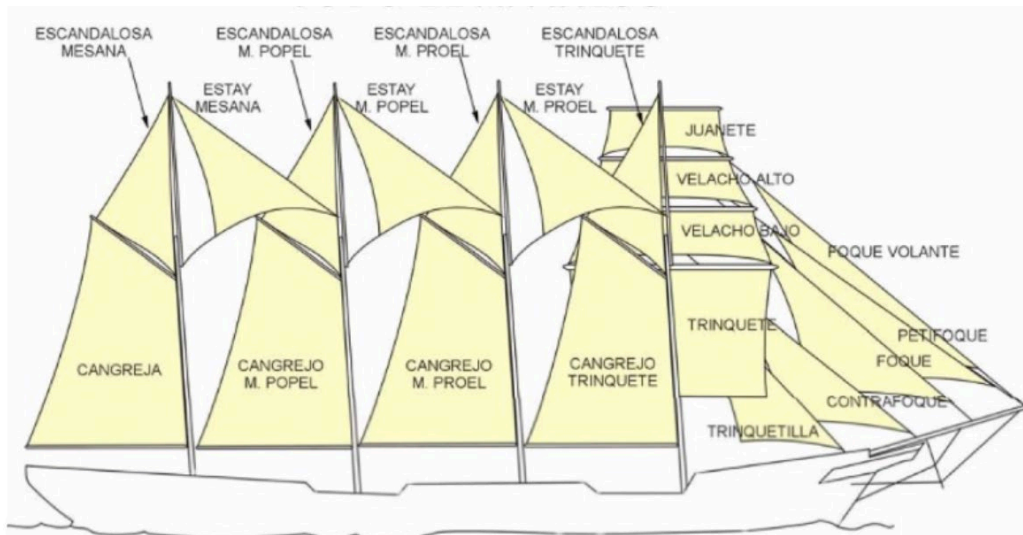


Figura 2-6.- Velamen Juan Sebastián Elcano

El uso de las velas tradicionales en la actualidad queda relegado, en su mayoría a pequeños veleros con fines recreativos, a regatas, buques escuelas y algún crucero turístico.

Vela rígida

Las velas rígidas, a diferencia de las velas tradicionales, tienen un origen relativamente reciente. La creación de este tipo de velas surge motivado por la búsqueda de mayores empujes. Estas consisten en una estructura rígida cuya morfología permite que, al pasar el viento a través de ellas, se genere una diferencia de presiones entre sus caras que origina dos fuerzas; la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre. El correcto uso de estas fuerzas es lo que permite generar un mayor empuje en la dirección de avance de la embarcación, lo que disminuye la necesidad del uso del motor. La Figura 2-7 muestra uno de los ejemplos más conocidos en el empleo de velas rígidas que son los barcos que participan en la regata de Copa América.



Figura 2-7.- Velas rígidas en barcos de la Copa América

El diseño de estas velas se fundamenta en el uso de perfiles alares, inspirados en la industria aeronáutica. Generalmente, estos perfiles presentan una configuración simétrica, lo que aporta mayor estabilidad ante variaciones en la dirección del viento. En algunos casos, las velas rígidas pueden incorporar “flaps”, elementos ajustables que optimizan la generación de empuje al modificar la curvatura del perfil.

El funcionamiento de las velas rígidas se basa en la diferencia de presión que se genera entre sus dos caras. A medida que el fluido se desplaza sobre la superficie del extradós, su velocidad aumenta, generando una región de baja presión, mientras que, en el intradós, el flujo es más lento y la presión es mayor. Esta distribución de presiones crea una fuerza de sustentación que, al ser orientada adecuadamente, se convierte en empuje útil para la propulsión del buque.

Un parámetro clave en su desempeño es el ángulo de ataque, definido como la inclinación de la vela respecto al viento aparente. Para maximizar la eficiencia aerodinámica, la vela debe posicionarse con un ángulo de ataque óptimo, evitando pérdidas de sustentación o generación excesiva de fuerzas de vuelco. De hecho, las fuerzas inducidas por la vela se descomponen en fuerza de empuje, responsable del avance del buque, y fuerza de vuelco, que genera una inclinación sobre el casco y debe ser contrarrestada mediante un adecuado diseño de estabilidad y distribución de pesos. La Figura 2-8 muestra claramente las partes de un perfil alar y su ángulo de ataque.

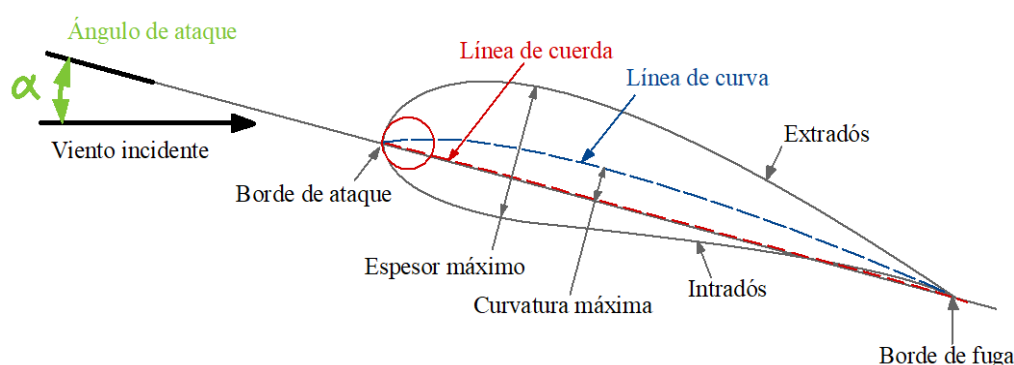


Figura 2-8.- Perfil alar
Elaboración propia (2025)

En cuanto a los materiales empleados, a diferencia de las velas convencionales de lona, las velas rígidas están construidas con materiales estructurales resistentes que garantizan el mantenimiento de su forma bajo la acción del viento, lo que contribuye a su eficiencia aerodinámica. Además, pueden incorporar sistemas de control electrónico, que permiten ajustar su orientación de manera automatizada para optimizar la captación del viento y mejorar su rendimiento en distintas condiciones de navegación.

Su diseño ofrece ventajas significativas, como un mayor empuje gracias al uso de perfiles alares, una mayor estabilidad debido a la simetría de estos perfiles y la posibilidad de automatización, lo que facilita su manejo y optimización en tiempo real.

No obstante, estas velas presentan ciertas limitaciones que deben considerarse en su implementación. Su eficacia sigue estando condicionada por la disponibilidad del viento, lo que puede restringir la velocidad y la ruta de la embarcación. Asimismo, su diseño estructural es más complejo que el de las velas tradicionales, lo que puede suponer desafíos en su construcción y mantenimiento. Finalmente, su correcto funcionamiento requiere de sistemas de control avanzados para gestionar su orientación y maximizar su eficiencia.

En conclusión, las velas rígidas constituyen una alternativa altamente eficiente para la propulsión eólica en el ámbito naval, al aprovechar la aerodinámica de los perfiles alares para convertir la energía del viento en empuje. Su implementación permite mejorar el rendimiento de la embarcación, reducir el impacto ambiental y avanzar hacia sistemas de navegación más sostenibles, aunque su éxito depende de un diseño optimizado y de la integración de tecnologías de control que permitan su correcta operación en condiciones de navegación variables.

2.3.6 Rumbos de navegación a vela

Cuando se habla de rumbos en el mundo de la vela, se hace referencia al ángulo comprendido entre la proa del barco y la dirección del viento aparente, es decir, siempre se tiene en cuenta el relativo y no el real.

Un principio fundamental en la navegación a vela es que un barco no puede avanzar proa al viento, es decir, contra la dirección de la que viene el viento. En ese caso, las velas perderían presión y flamearían, impidiendo el avance del velero. Debido a esta limitación, se pueden clasificar los rumbos en tres principales.

El rumbo de ceñida es aquel en el que el barco navega prácticamente en contra de la dirección del viento de manera que se desplaza con el menor ángulo posible, generalmente 30 y 45 grados, sin embargo, este ángulo varía en función del tipo de barco. En estos rumbos, el aparejo irá lo más a crujía posible.

Cuando se lleva el viento en un ángulo de 60 grados, se denomina descuartelar y se libera tensión de los aparejos de cada vela. El siguiente rumbo se conoce como través. En este caso, el viento relativo se recibe justo a 90 grados de la proa.

A medida que el ángulo con respecto al viento aumenta hasta los 120 grados, se entra en el rumbo de largo. En estos rumbos, el viento aparente incide por la aleta del buque favoreciendo una navegación más estable y rápida. Finalmente, cuando el viento comienza a incidir por la popa, se habla de navegar de popa o empopada. En estos rumbos el viento actúa impulsando las velas de manera directa y la estabilidad puede verse comprometida por el riesgo de trasluchadas involuntarias. En este rumbo, si el viento llega a incidir en 180 grados, se conoce como popa cerrada redonda, siendo un rumbo difícil de controlar debido a la falta de sustentación lateral. La Figura 2-9 es un ejemplo gráfico de todos los rumbos mencionados.

Como resultante de estos efectos, en los rumbos más cerrados se tiende a orzar a la par que se cazan las velas y, por el contrario, a la vez que se arriba, se sueltan. Al navegar, lo que se busca es el punto de flameo de las velas, ya que es en ese punto donde se alcanza el punto óptimo de rendimiento de los aparejos. Del mismo modo que hay que tener en cuenta el trimado en función del viento, se debe tener en cuenta la tensión de los aparejos en función de la intensidad del viento. A menor viento, menos tensión lo que permite embolsar las velas y sacar el máximo rendimiento a su diseño y por el contrario, a más viento, mayor tensión se les debe proporcionar para conseguir aplanar su superficie y facilitar la navegación [18].

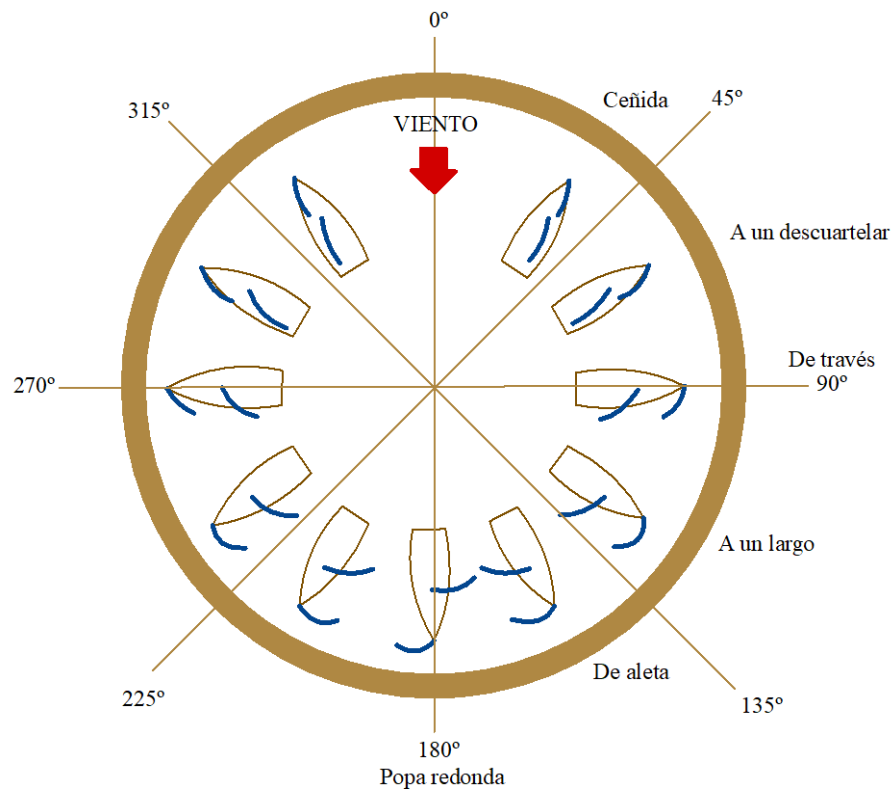


Figura 2-9.- Rumbos
Elaboración propia (2025)

2.3.7 Análisis de la estabilidad

La estabilidad de un barco es un aspecto crucial en el diseño naval, esta se refiere a su capacidad para regresar a una posición de equilibrio después de verse afectado por una fuerza externa. Algunos puntos clave para entender la estabilidad son [21]:

- K: el punto más bajo de la quilla.
- B: el centro de carena, que el centro de gravedad del volumen de agua desplazada por el casco.
- G: el centro de gravedad del buque.
- M: el metacentro, el punto con respecto al cuál el buque balance y cabecea.

En la Figura 11 se representan de manera gráfica los puntos anteriormente mencionados.

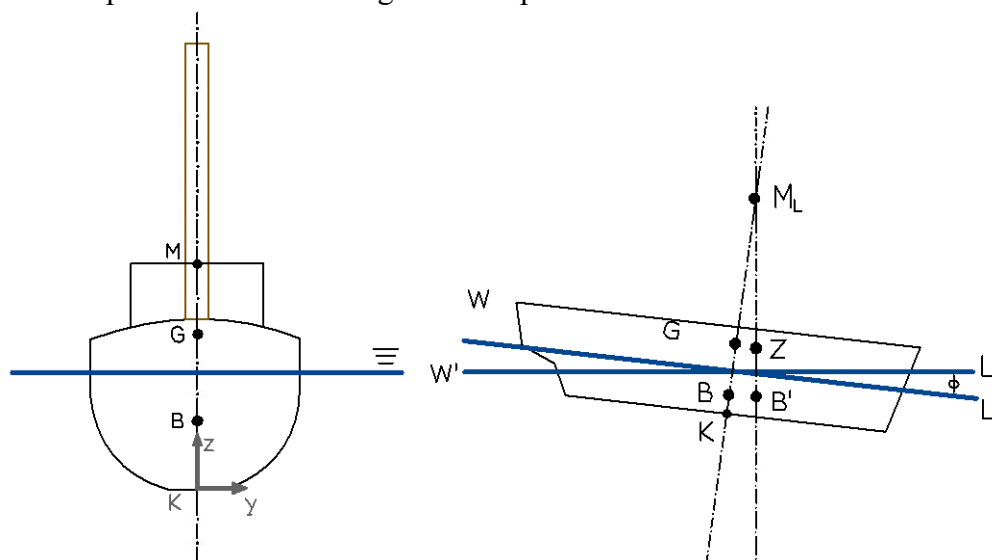


Figura 2-10.- Diagrama de estabilidad longitudinal y transversal
Elaboración propia (2025)

Cuando el barco se encuentra en equilibrio estable, todos estos puntos se encuentran en la vertical. Sin embargo, cuando el barco se escora, el punto B se desplaza, y la relación entre estos puntos determina la estabilidad del buque. Del mismo modo, hay que tener en cuenta que los movimientos tanto transversales (balance) como longitudinales (cabezada), ocurren con respecto al punto M.

Por otra parte, el brazo de adrizamiento es la distancia horizontal entre la línea de acción del empuje (que pasa por B) y el peso (que pasa por G). Este brazo es crucial para entender la estabilidad del buque. Otro parámetro importante a tener en cuenta, es el momento de adrizamiento, es el momento que tiende a volver el barco a su posición inicial y se calcula como:

$$\text{Momento de adrizamiento} = \Delta \cdot GZ$$

Donde:

- Δ : el desplazamiento del buque.
- GZ : el brazo de adrizamiento (distancia entre la línea de acción del empuje y el peso).

El momento de escora es el momento causado por una fuerza externa que “inclina” el barco y para que el barco sea estable, el momento de adrizamiento debe ser mayor que el momento de escora.

También se debería de tener en cuenta la altura metacéntrica GM , es la distancia entre el centro de gravedad y el metacentro, y es un indicador importante de la estabilidad inicial. Una mayor GM , indica una mayor estabilidad. El ángulo de escora es el ángulo en el cuál el momento de adrizamiento alcanza su valor máximo. Las curvas de estabilidad representan el brazo de adrizamiento en función del ángulo de escora. Estas curvas son esenciales para evaluar la estabilidad en diferentes condiciones [21]. Además, hay determinados factores que influyen en la estabilidad:

1. La forma del casco afecta directamente la flotabilidad y la estabilidad, esta forma viene definida por el plano de formas del buque que se muestra en la Figura 2-11.

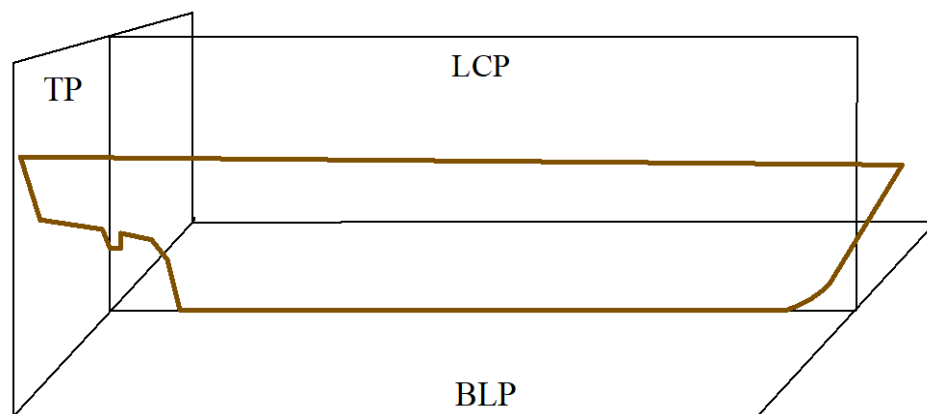


Figura 2-11.- Plano de formas
Elaboración propia (2025)

Donde los tres planos principales vienen representados por: plano transversal (TP), plano central longitudinal o plano de crujía (CLP) y el plano de la línea de base (BLP).

2. Las dimensiones principales del buque; eslora, manga, puntal y calado, representadas en la Figura 2-12.

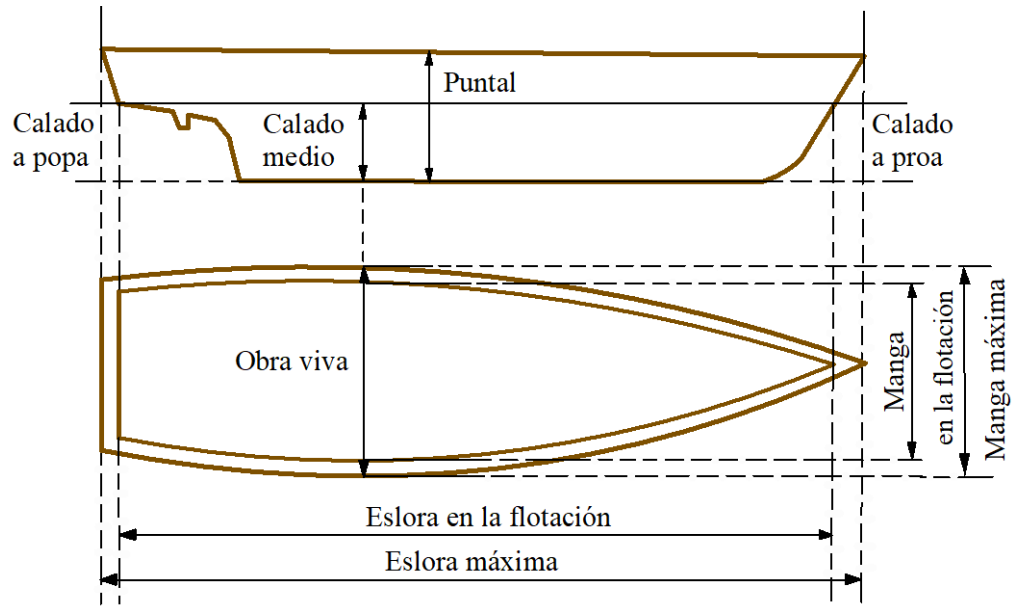


Figura 2-12.- Dimensiones principales
Elaboración propia (2025)

3. Los coeficientes de formas: bloque, maestra, prismático longitudinal y de superficie del plano de agua [22].

- I. El coeficiente de bloque: relaciona el volumen desplazado (∇) con el volumen del paralelepípedo formado por la eslora (L), la manga (B) y el calado (T).

$$Cb = \frac{\nabla}{L \times B \times T}$$

- II. El coeficiente de la maestra es la relación entre el área de la sección media sumergida (Am) y el área del rectángulo formado por ese calado (T) y la manga (B).

$$Cm = \frac{Am}{B \times T}$$

- III. El coeficiente prismático longitudinal se relaciona con la velocidad del buque y la distribución de la flotabilidad

$$Cp = \frac{\nabla}{Am \times L}$$

- IV. El coeficiente de superficie del plano de agua relaciona la superficie del plano del agua con el producto de la manga y la eslora.

$$Cwp = \frac{Awp}{L \times B}$$

4. La distribución de los pesos dentro del buque es crucial. Un centro de gravedad bajo mejora la estabilidad.
5. El francobordo (distancia vertical entre la línea de flotación y a cubierta) también influye en la estabilidad y se calcula durante el diseño conceptual.
6. El calado, influye en la estabilidad, y junto con la manga, condicionan las necesidades de estabilidad inicial.

La estabilidad de un buque debería calcularse para el buque intacto y después de averías, en diferentes condiciones de carga y para diferentes condiciones meteorológicas [23] [24] [25]. Sin embargo, al tratarse de un diseño conceptual, estos cálculos serán simplificados. Por último, la metodología de cálculo vendrá pautada por los siguientes pasos:

1. Comenzaremos por el análisis de las dimensiones principales y los coeficientes de forma del buque.

2. Se utilizarán los planos de formas obtenidos en el diseño para conocer la geometría del casco y efectuar los cálculos de arquitectura naval.
3. Se procederá con el cálculo de momentos de inercia de las secciones del buque y el cálculo de las fuerzas de flotación y de escora.
4. Se analizarán las curvas hidrostáticas que incluyen los datos relacionados con la estabilidad del buque.

2.3.8 Diseño de los mástiles

El diseño de un mástil destinado a soportar velas rígidas, requiere un enfoque altamente técnico que combine ingeniería estructural, aerodinámica y dinámica de fluidos. A diferencia de los mástiles tradicionales, con el diseño de estos mástiles se busca que sean ligeros, resistentes y aerodinámicos, optimizando la relación entre rigidez estructural y reducción de peso.

El primer paso en el diseño es la definición de sus objetivos funcionales y estructurales. En nuestro caso se trataría principalmente de 4 palos que sostendría el peso y la tensión producida por sus correspondientes velas rígidas, asegurando la transmisión de fuerzas entre la vela y el casco del barco. Además, el diseño debe garantizar una interacción aerodinámica eficiente, minimizando la resistencia y maximizando la sustentación generada por la vela. También es fundamental integrar un sistema de control de orientación, que permita variar la inclinación del mástil y, si requiere, un sistema de enrollado parcial que permita modificar la superficie vélica en función de la intensidad del viento.

En lo referente al análisis de fuerzas y cargas actuantes, es esencial realizar un análisis exhaustivo de las cargas que actúan sobre él. La presión del viento sobre la vela rígida genera fuerzas aerodinámicas de sustentación y arrastre, las cuales se transmiten al mástil y a los sistemas de fijación [19]. La presión del viento viene dada por la ecuación:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$$

Donde:

- P: es la presión dinámica del viento.
- ρ : es la densidad del aire.
- v: es la velocidad del viento relativo.

Por otra parte, el empuje aerodinámico sobre la vela, que el mástil debe soportar, se calcula como:

$$F = C_L \cdot P \cdot A$$

Donde:

- C_L : es el coeficiente de sustentación.
- A: el área efectiva de la vela rígida.

El momento flector sobre la base del mástil se obtiene multiplicando la fuerza aerodinámica por la altura a la que se aplica:

$$M = F \cdot h$$

Donde:

- h: la distancia entre el centro de presiones y la base del mástil.

Además, el mástil experimenta fuerzas de torsión, causadas por la interacción entre el viento y la orientación de la vela rígida. La ecuación de la torsión viene expresada por:

$$T = F \cdot r$$

Donde:

- r: es la distancia al eje de giro del mástil.

Es fundamental que el diseño considere sistemas de arriostamiento, como jarcias y obenques, para redistribuir estas cargas y evitar deformaciones excesivas en la estructura.

En cuanto a la selección de los materiales, es crucial garantizar la resistencia estructural sin comprometer la ligereza. Mientras que en los buques de vela tradicionales se observan mástiles principalmente de madera o acero/aluminio, en nuestro caso dado que estos palos tendrán que soportar el peso de velas rígidas, optaremos por materiales más resistentes como la fibra de carbono pudiendo estar preimpregnada con resinas epoxi de alta resistencia. El proceso de fabricación de fabricación del mástil incluye el moldeo de la fibra de carbono, seguido de un curado en autoclave para consolidar las capas y eliminar imperfecciones industriales. Todo esto, seguido de sus correspondientes pruebas no destructivas con ultrasonidos y rayos X para verificar la integridad del material. Finalmente, en cuanto la fase de elección de materiales, como se ha comentado anteriormente se debería considerar refuerzos en las zonas de alta carga, como son los puntos de fijación de la jarcia, donde se pueden implementar núcleos, así como intersecciones de titanio o aluminio aeoespacial para aumentar la durabilidad y resistencia a vibraciones e impactos en las zonas críticas. Sin embargo, al tratarse de un diseño conceptual, nos centraremos únicamente en la estructura del mástil y sus dimensiones.

Para el diseño, se utilizarán perfiles aerodinámicos tipo NACA, los cuales reducen la resistencia aerodinámica y optimizan la sustentación generada. Empleándose a su vez, simulaciones que permiten evaluar el flujo de aire alrededor del mástil y ajustar su diseño para mejorar el rendimiento en diversas condiciones de viento. El número de Reynolds [26] es un parámetro clave en este análisis, determinado por:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu}$$

Donde L es la longitud característica del mástil y μ la viscosidad dinámica del aire. Un número de Reynolds elevado indica un flujo turbulento, lo que influye en la sustentación y el arrastre del mástil.

Por otra parte, para garantizar la seguridad del mástil, se realizan análisis estructurales mediante el Método de Elementos Finitos (FEM). Estos estudios permiten evaluar los esfuerzos máximos y las deformaciones, asegurando que el mástil pueda soportar las cargas esperadas. Del mismo modo, se lleva a cabo un cálculo de estabilidad del barco, considerando el momento adrizante generado por el mástil y la vela rígida. A través de la ecuación:

$$GZ = \frac{v \cdot hht}{V} - n0 \cdot \sin\theta$$

Donde:

- GZ: es el brazo adrizante.
- θ : el ángulo de escora.
- hht: el momento de transferencia de cuñas.
- n0: la constante de ajuste que dependerá de la forma del casco, la distribución de pesos a bordo y la influencia de las cuñas de agua en la escora.

2.4 Base de datos para el desarrollo del proyecto

2.4.1 Buques considerados y características

Para la realización de este estudio, se llevó a cabo la recopilación y análisis de una base de datos que recogía de manera exhaustiva las características de más de 100 barcos. Esta base de datos recoge información fundamental de cada barco, incluyendo eslora, manga, calado, puntal, desplazamiento y superficie vélica, proporcionando una visión integral de sus características constructivas y de diseño. Para ello se han tenido cuenta barcos de diferentes tipos en cuanto a sus cascos y arboladura, con el objeto de garantizar una muestra representativa de la diversidad existente en el ámbito de la navegación a vela. Asimismo, se consideraron barcos procedentes de diferentes países de origen y distintas épocas, lo que ha permitido analizar la evolución de diferentes países de origen y distintas épocas [27]. La principal forma de clasificación de estas embarcaciones se ha basado en su aparejo, lo que ha permitido dividir la base de datos en ocho categorías principales. Cada una de estas clases se caracteriza

por la disposición de sus mástiles y velas, lo que influye directamente en sus prestaciones y maniobrabilidad. A continuación, se presentan las categorías identificadas con sus principales características.

Bergantín-goleta caracterizados por tener una configuración híbrida que combina velas cuadras en el mástil de proa y velas de cuchillo en el mástil de popa, ofreciendo un equilibrio entre velocidad y capacidad. Un claro ejemplo sería nuestro buque escuela de referencia el Juan Sebastián Elcano que podemos observar en la Figura 2-13.



Figura 2-13.- Bergantín-goleta Juan Sebastián Elcano

Goletas con estay son embarcaciones de dos o más mástiles con velas de estay entre ellos. Esta configuración optimiza el rendimiento en rumbos abiertos y facilita la maniobra en condiciones de viento variable. Uno de los buques estudiados dentro de esta familia es el barco danés Madonna, Figura 2-14.



Figura 2-14.- Goleta con estays Madonna

Goleta con vela de cuchillo, caracterizadas por el uso exclusivo de velas cangrejas, sin velas cuadras, lo que mejora la capacidad de ceñida y reduce la necesidad de una dotación numerosa para su maniobra. Como ejemplo tenemos el buque finlandés Linden, Figura 2-15.



Figura 2-15.- Goleta con velas de cuchillo Linden

Galeaza una variante entre una galera y un velero, con velas latinas y en algunos casos con aparejo cuadrado en el trinquete, lo que aporta versatilidad tanto en la navegación a vela como a remo. El Jacobstads Wapen es un ejemplo de esta familia representado en la Figura 2-16.



Figura 2-16.- Galeaza Jacobstads Wapen

Barca o Bricbarca, embarcaciones con tres o más mástiles con velas cuadras en los mástiles de proa y mayor, mientras que la mesana porta una vela cangreja, optimizando de esa forma su comportamiento en largas travesías. El ejemplo más reciente que tenemos es el BAP Unión de la Armada del Perú, arbolado en astilleros españoles y que se puede observar en la Figura 2-17.



Figura 2-17.- Bricbarca BAP Unión

Goletas, aquellas consideradas como buques con dos o más mástiles predominantemente aparejados con velas cangrejas, lo que les permite una navegación eficiente en vientos moderados y facilita su maniobrabilidad en espacios reducidos. Como ejemplo, se muestra la goleta danesa Fulton en la Figura 2-18.



Figura 2-18.- Goleta Fulton

Barcos con aparejo completo, son grandes veleros de tres o más mástiles totalmente aparejados con velas cuadras, optimizados para la navegación oceánica y capaces de desarrollar altas velocidades con viento a favor como es el caso del ARA Libertad representado en la Figura 2-19.



Figura 2-19.- Barco de aparejo completo ARA Libertad

Ketch, una embarcación de dos mástiles, donde el mástil mayor se encuentra en la proa y el mástil de mesana, que es más bajo, se sitúa por detrás de la línea del timón. Su característica principal es que ambos mástiles llevan velas cangrejas, aunque en algunos casos también pueden incluir velas de estay como podemos observar en la Figura 2-20.



Figura 2-20.- Ketch Bonavista

Yates de vela, son embarcaciones diseñadas para la navegación a vela, aunque cuentan con motores auxiliares. Se clasifican según su aparejo en sloop, ketch, yawl o goleta, entre otros, y pueden tener monocasco o multicasco. Se emplean en recreo, regatas y travesías oceánicas, combinando eficiencia y tecnología en la navegación. A día de hoy el yate de vela más grande del mundo y de los más modernos es el Sailing Yatch A, un yate con diseño alemán propiedad de un importante magnate ruso, Figura 2-21.



Figura 2-21.- Yate de vela Sailing Yatch A

Siendo estas las principales familias de barcos de vela que hemos obtenido tras el levantamiento de la base de datos, también se deben mencionar ciertos casos particulares como las fragatas, los bergantín-barca, carabelas o lugger de los cuáles también se han obtenido datos como parte del trabajo.

2.4.2 Normativas especiales

El análisis del entrono normativo es fundamental para el diseño de cualquier buque, principalmente, debido a las exigencias que terceros puedan presentar a la hora de asegurar el buque, autorizar su navegación, permitir el paso por canales o garantizar su amarre en diferentes puertos.

Todos los buques de la Armada cumplimentan una serie de normativas, entre ellas el Naval Ship Code [28], el cuál proporciona objetivos que permiten certificar los buques como seguros para operar.

Este código es publicado por la OTAN, pero su redacción recae en la Asociación internacional de seguridad naval (INSA), diferentes armadas y Sociedades de clasificación (CCSS) representadas en la Figura 2-22.



Figura 2-22. Sociedades de clasificación

La INSA fue establecida en 2008 con el objetivo de promover la seguridad en las operaciones navales y facilitar la cooperación entre armadas y sociedades de clasificación. Entre estas últimas destacan, Lloyd's Register, Bureau Veritas, American Bureau of Shipping o el Registro Italiano Navale.

Del mismo modo, otras regulaciones aplicables incluyen el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS) [29], Figura 15, el cuál establece los estándares mínimos de seguridad; el Convenio MARPOL [30], Figura 16, que si bien no es de obligado cumplimiento al tratarse de un buque militar, en la Armada se cumple ya que regula la prevención de la contaminación del entorno marítimo.



Figura 2-23.- Escudo del convenio SOLAS



Figura 2-24.- Escudo convenio MARPOL

En un buque escuela, la normativa ambiental supone de gran relevancia, dado que estas plataformas suelen operar durante largos periodos de tiempo y pueden recorrer áreas sensibles desde un punto de vista ecológico. Por ello, la incorporación de tecnologías limpias y la optimización del diseño para reducir emisiones son elementos prioritarios.

2.5 Series Sistemáticas

Las series sistemáticas son un método analítico para la predicción de la resistencia al avance de buques, utilizadas principalmente en las primeras etapas del diseño. Consiste en variaciones sistemáticas de las formas de la carena de un buque a partir de un modelo patrón, modificando tanto sus dimensiones principales como sus coeficientes geométricos adimensionales. El objetivo de estas variaciones es optimizar las formas de la carena de un tipo de barco determinado [31]. Su aplicación se puede resumir en cinco tareas principales:

1. Predicción de resistencia: estimando la resistencia al avance del buque, siendo fundamental para el diseño de la propulsión.
2. Diseño de formas: ayudan a entender como las variaciones en la forma del casco afectan a la resistencia.
3. Optimización de carenas: permiten identificar las formas de carena más eficientes para un tipo de buque y condiciones de operación específicos.
4. Herramienta comparativa: empleadas como base para comparar resultados con otros métodos, como los métodos numéricos y la dinámica de fluidos computacional (CFD).
5. Diseño conceptual: en la fase de diseño conceptual, permiten una primera aproximación a las formas del buque y sus características hidrodinámicas.

En el caso de este estudio, su aplicación principal será en las primeras etapas del diseño, cuando se conocen pocas características del buque. En estas etapas, no son viables los métodos experimentales debido a la falta del plano de formas. Las series sistemáticas, por lo tanto, nos permitirán:

En primer lugar, estimar la resistencia, proporcionando valores de resistencia al avance y permitiendo una primera evaluación del rendimiento del buque.

En segundo lugar, definir las dimensiones principales del buque, como la eslora, la manga y el calado, y las relaciones entre ellas.

Por otra parte, permiten ajustar parámetros clave de la carena, tales como el coeficiente de bloque (C_b), el coeficiente prismático (C_p) y la relación eslora manga (L/B).

También la visualización mediante el empleo de herramientas CAD y modificación de formas, así como la comparación de los resultados obtenidos con otros métodos de cálculos.

Entre las diversas series sistemáticas existentes, las principales que con posible aplicación a barcos de vela serían:

- Serie NPL: desarrollada por el laboratorio Nacional de Física Británico, esta serie se basa en modelos de formas redondeadas y es útil para buques de semidesplazamiento.
- Serie de Groot: empleada principalmente para embarcaciones rápidas de pantoque redondeado.
- Serie Nordstrom: también empleada para embarcaciones rápidas de pantoque redondeado, similar a la serie De Groot.

No obstante, existen diversas series sistemáticas. Además de las más relevantes para nuestro trabajo, en la Figura 2-26 pueden observarse otros tipos.

SERIES SISTEMÁTICAS

SERIE	L/B	B/T	C_b	C_p	LCB (%)	$L/\Delta^{1/3}$	F_n	i_E (grados)
MarAd	6.50	4.50	0.875				0.18	
	4.50	3.00	0.800		2.50		0.13	
Serie 60	8.50	3.50	0.800	0.805	3.51	7.50	0.29	47.8
	5.50	2.50	0.600	0.614	-2.48	4.55	0.16	6.2
Taylor		3.75	0.796	0.860		11.26	0.64	
		2.25	0.444	0.480	0.00	4.85	0.16	
C-HSVA						9.00	0.80	
		3.75		0.645		6.00	0.15	
S. 64	18.26	4.00	0.550				3.0*	7.8
	8.45	2.00	0.350	0.630	-6.56	8.00	0.8*	3.7
Nordstrom	6.94	3.57	0.410	0.599	-1.79	7.75	1.6*	22.5
	4.83	3.16	0.373	0.576	-2.88	5.50	0.9*	15.1
De Groot	10.09	6.55	0.560	0.791	3.09	9.00	2.7*	
	3.53	2.72	0.293	0.463	-11.50	4.50	0.8*	
S. 63	6.00	9.50	0.636	0.764	0.30	6.50	2.2*	28.6
	2.50	2.89	0.383	0.577	-5.80	4.50	0.9*	16.9
SSPA	8.21	4.00				8.00	2.0*	14.4
	4.62	3.00	0.400	0.680	-4.15	6.00	1.0*	8.2
NPL	7.50	10.21				8.50	2.8*	
	3.33	1.72	0.397	0.693	-6.40	4.50	0.5*	20.5
NSMB	12.00	5.5	0.500	0.690		13.10	1.40	
	4.00	2.5	0.350	0.560	-5.20	4.20	0.00	

Figura 2-25.- Series sistemáticas

Por último, aunque no están consideradas explícitamente para buques de vela, las series como la SSPA, la serie 63, a la serie SKLAD podrían servir de referencia para entender los efectos de la forma del casco en el rendimiento de un buque.

La Figura 2-26 muestra de manera gráfica y resumida como sería el proceso de cálculo de la superficie vélica si para ello se emplearan series sistemáticas.

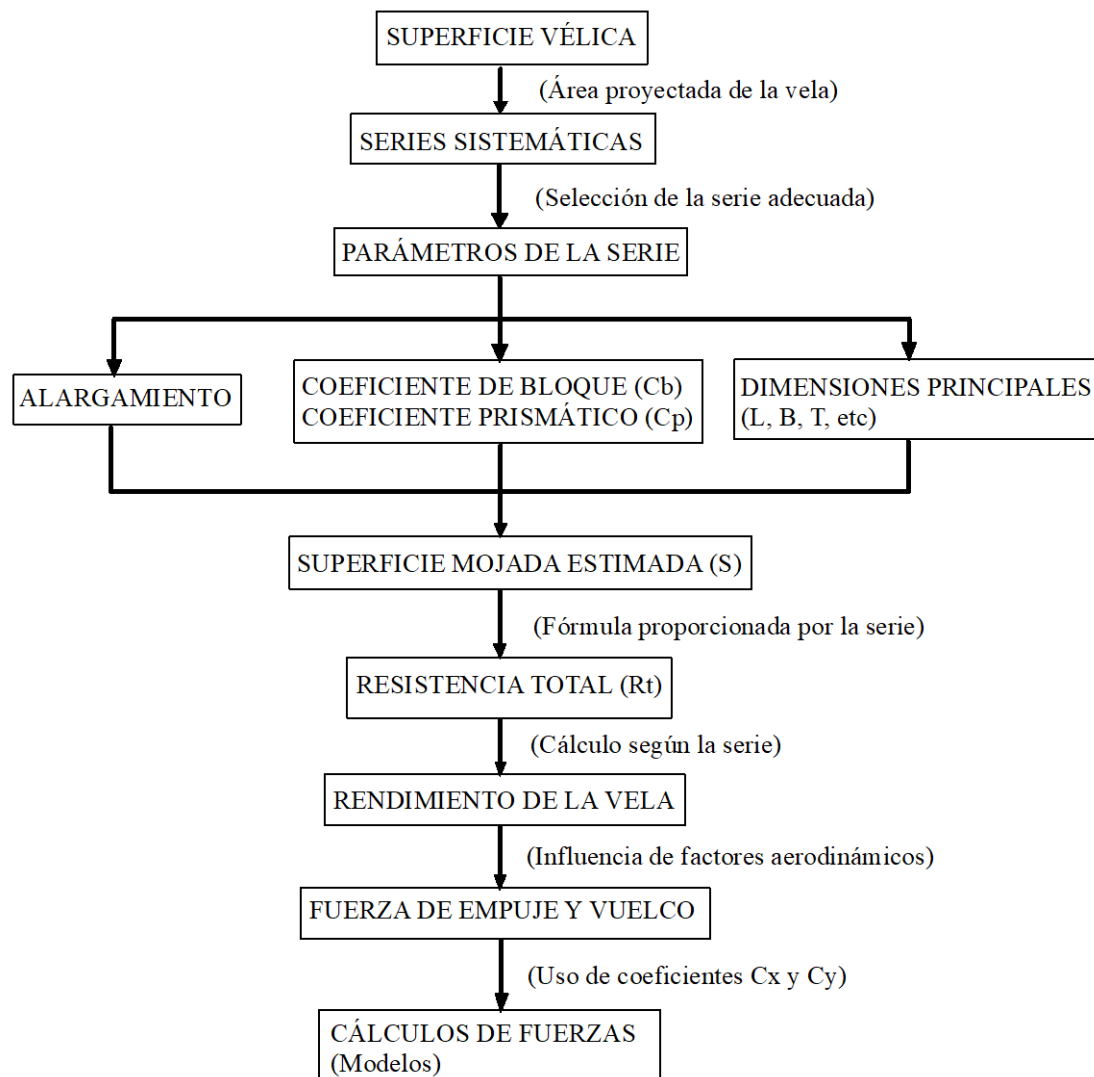


Figura 2-26.- Series sistemáticas para superficie vélica
Elaboración propia (2025)

2.6 Astilleros nacionales

2.6.1 Navantia

Navantia es una empresa española líder en diseño y construcción de buques militares y civiles. Tiene una amplia experiencia en la integración de sistemas avanzados y tecnologías innovadoras en sus proyectos. Cuenta con un historial probado en la construcción de buques para la Armada, como fragatas, submarinos y buques de apoyo. Tiene capacidad para integrar sistemas complejos, como propulsión híbrida y automatización, esenciales para un buque escuela moderno. Su experiencia garantiza un diseño robusto, seguro y adaptado a las necesidades de formación de la Armada.

2.6.2 Bound4Blue

Bound4Blue es una empresa española pionera en el desarrollo de sistemas de propulsión eólica asistida mediante velas rígidas y automatizadas. Su tecnología reduce el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Además, de ser modular y fácil de integrar en buques existentes o nuevos, lo que la hace perfecta para un proyecto de modernización o diseño desde cero. Por otra parte, contribuye a los objetivos de descarbonización de la Armada, alineándose con las normativas internacionales de reducción de emisiones.

Por lo tanto, Navantia aporta su experiencia en construcción naval y diseño de buques militares, mientras que Bound4Blue proporciona tecnología innovadora y sostenible. Juntas, pueden desarrollar un buque escuela moderno, eficiente y respetuoso con el medioambiente, que sirva como plataforma de formación y ejemplo de innovación tecnológica.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Misiones

Los buques escuela desempeñan un papel esencial en la formación de oficiales de la armada, combinando enseñanza técnica, experiencia en navegación y representación internacional. Sus principales funciones son:

1. Formación naval integral: proporcionan instrucción práctica en maniobra, navegación, estabilidad y meteorología, además de fomentar habilidades clave como el liderazgo, la disciplina y el trabajo en equipo.
2. Presencia y diplomacia internacional: a través de cruceros de instrucción de hasta seis meses, refuerzan la proyección internacional del país, promoviendo relaciones bilaterales y la cultura marítima nacional.
3. Entrenamiento en navegación a vela: priorizan el aprendizaje en gestión del viento, ajuste de velas y optimización de rumbos, competencias fundamentales para la operación de cualquier unidad naval.
4. Tradición y prestigio: buques como el Juan Sebastián Elcano han consolidado su legado en la formación naval, con más de 95 cruceros de instrucción y millones de millas náuticas navegadas.
5. Representación cultural: actúan como embajadores marítimos, promoviendo la tradición naval y la ingeniería marítima del país en cada puerto visitado.

3.2 Dimensiones y coeficientes

Para el desarrollo de esta parte del trabajo, se ha procedido a realizar un estudio exploratorio de los buques escuelas de otras marinas y países del mundo. Mediante el empleo de Excel, hemos creado una base de datos que recoge los buques que cumplen unas características similares a nuestro buque escuela. Esta base de datos nos brinda un amplio abanico de opciones de buques escuelas y veleros que nos han servido para establecer unas dimensiones aproximadas de partida. Destacar, que no solo se ha tenido en cuenta las dimensiones de estos veleros sino también sus características principales. El proceso de dimensionamiento es fundamental en el inicio de un nuevo proyecto dado que conseguir establecer unas primeras dimensiones, es imprescindible para ver cómo se va tomando forma el proyecto.

Para obtener la información perteneciente a las diferentes embarcaciones recogidas en la base de datos, se ha recurrido principalmente a las páginas de sus correspondientes armadas en el caso de los

buques militares y a algunos libros que recogen cantidad de ejemplos de barcos de vela de diferentes países del mundo a lo largo de varias décadas como por ejemplo el Chapman Great Sailing Ships [27].

Todos los datos y cálculos recogidos en este apartado utilizan unidades del sistema internacional y notación europea, es decir, los decimales representados por comas y los millares por puntos. Tras el estudio de los resultados obtenidos, tenemos una muestra lo suficientemente amplia para, mediante regresión estadística, extraer los valores máximos y mínimos de las principales relaciones de dimensiones y, sus relaciones como se puede observar en la Tabla 3-1.

	L/B	L/D	L/T	B/D	B/T	T/P	SV/D
MÁX	15,818	0,494	22,000	0,164	4,583	1,000	13,971
MÍN	2,433	0,021	4,620	0,003	0,647	0,382	0,239

Tabla 3-1.- Relación de dimensiones

3.2.1 Juego de dimensiones

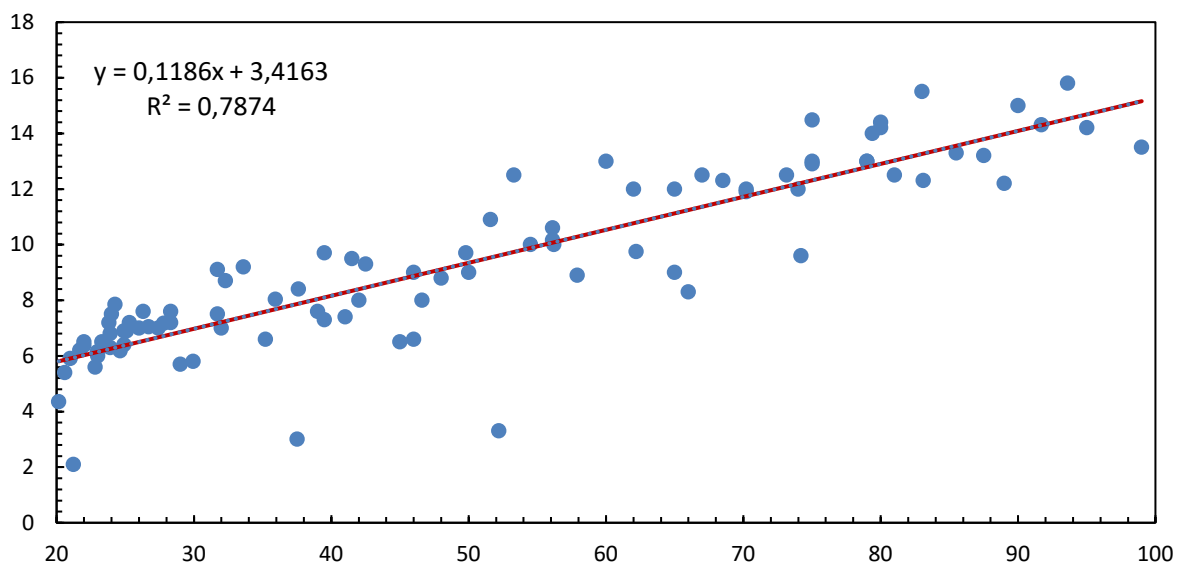
No todos los valores de la Tabla 3-1 son adimensionales, sin embargo, algunos de ellos pueden ser empleados para obtener una primera estimación del dimensionamiento de nuestro proyecto, por métodos tradicionalmente aceptados en construcción naval en esta fase del proyecto general del buque y otros que simplemente han sido una base de referencia entre magnitudes que nos han permitido mediante cálculos posteriores comprobar la calidad de los resultados y su ajuste.

En nuestro diseño, dado que queremos diseñar un barco que sea capaz de suplir las necesidades del Juan Sebastián Elcano o incluso mejorarlas, se ha decidido partir de una eslora entre perpendiculares de 90m. Por lo tanto, empleando la Ecuación (3-1) de la Gráfica 3-1 para poder calcular la manga en función de la eslora obtenemos la ecuación:

$$B = 0,1186 \cdot L + 3,4163 \quad (3-1)$$

Donde:

- B: manga en m.
- L: eslora en m.



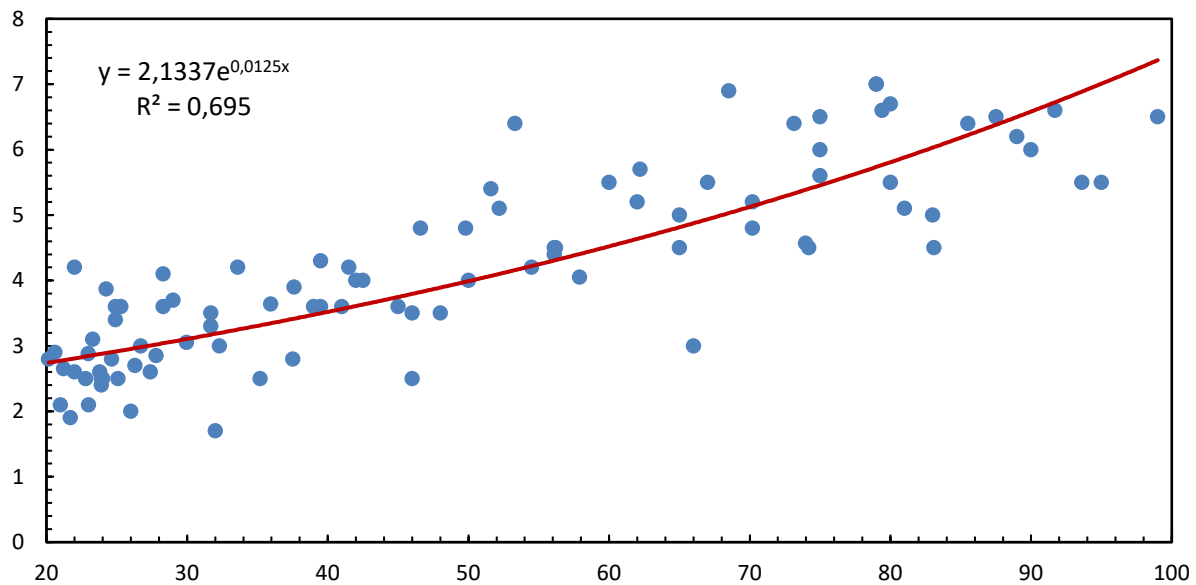
Gráfica 3-1.- Relación eslora (m)-manga (m)

Realizando el mismo procedimiento en el Gráfica 3-2, obtenemos la Ecuación (3-2) para el calado en función de la eslora.

$$T = 2,1337 \cdot e^{0,0125 \cdot L} \quad (3-2)$$

Donde:

- T: calado en m.



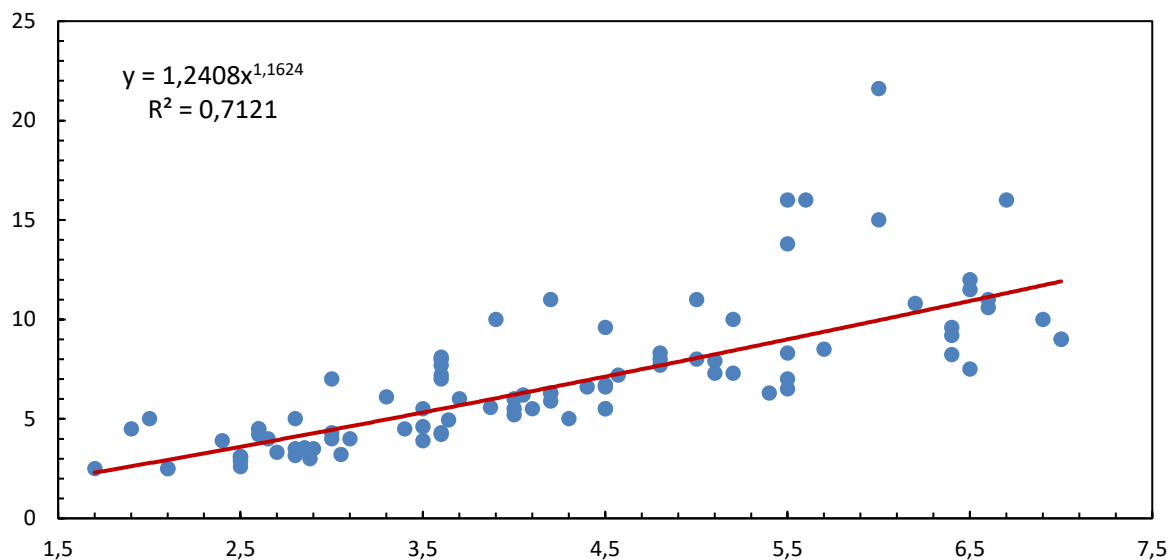
Gráfica 3-2.- Relación eslora (m)-calado (m).

Para obtener un valor inicial de puntal, se ha obtenido la Ecuación (3-3) que relaciona el calado del buque y el puntal. En este caso como se puede observar en la Gráfica 3-3:

$$P = 1,2408 \cdot B^{1,1624} \quad (3-3)$$

Donde:

- P: puntal en m.



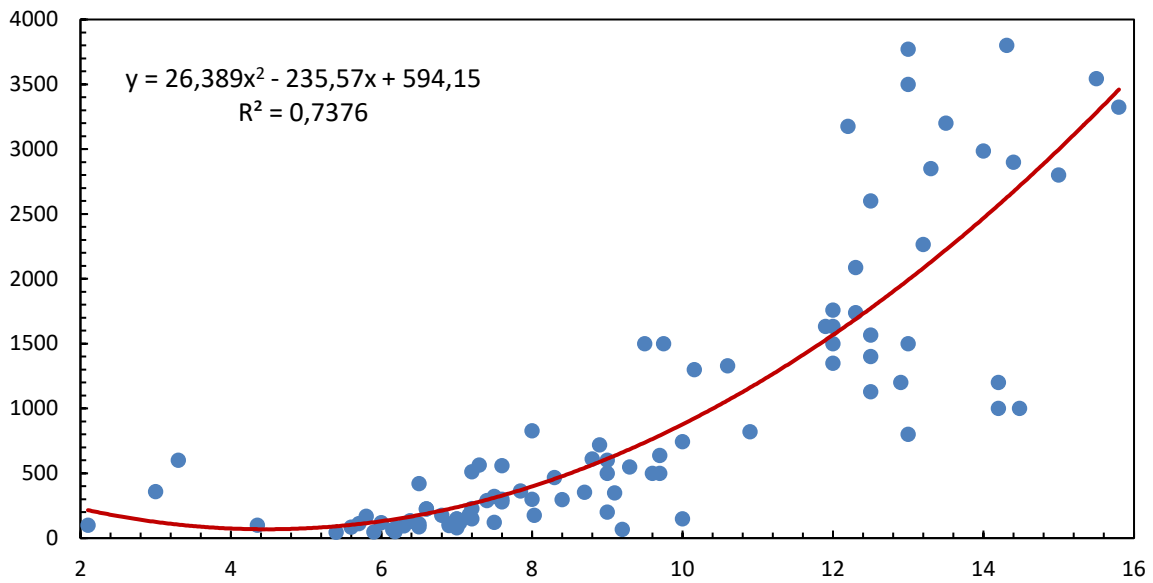
Gráfica 3-3.- Relación calado (m)-puntal (m)

Teniendo ya con las relaciones principales, comenzamos a obtener las primeras dimensiones. Vamos a partir de un valor de desplazamiento, este valor se obtiene de la Gráfica 4 de la que se extrae la Ecuación (3-4):

$$\Delta = 26,389 \cdot B^2 - 235,57 \cdot B + 594,15 \quad (3-4)$$

Donde:

- Δ : desplazamiento en t.



Gráfica 3-4.- Relación manga (m)-desplazamiento (t)

Con el valor aproximando de la eslora que hemos establecido de 90 m entre perpendiculares y las ecuaciones obtenidas en los gráficos anteriores, hemos sacado de las Ecuaciones (3-1) a (3-4), las cuales tienen los valores finales que se representan a continuación.

$$L = 90m$$

$$B = 0,1186 \cdot L + 3,4163 \quad (3-1)$$

$$T = 2,1337 \cdot e^{0,0125 \cdot L} \quad (3-2)$$

$$P = 1,2408 \cdot B^{1,1624} \quad (3-3)$$

$$\Delta = 26,389 \cdot B^2 - 235,57 \cdot B + 594,15 \quad (3-4)$$

En base a las Ecuaciones (3-1) a (3-4) se obtienen los resultados reflejados en la Tabla 2 que representan las dimensiones principales del proyecto.

Dimensión	Valor
Eslora (L)	90,000 m
Manga (B)	14,090 m
Calado (T)	6,572 m
Puntal (P)	11,072 m
Desplazamiento (Δ)	2514,079 t

Tabla 3-2.- Dimensiones

3.2.2 Juego de coeficientes.

Una vez obtenidas las dimensiones principales, pasamos a calcular los diferentes coeficientes de forma del buque [22], comenzando por el coeficiente de bloque mediante la Ecuación (3-5):

$$Cb = \frac{\Delta}{B \cdot L \cdot T \cdot 1,025} = \frac{2312,860}{14,090 \cdot 90 \cdot 6,572 \cdot 1,025} = 0,30 \quad (3-5)$$

Donde:

- C_b : coeficiente de bloque.

A continuación, procedemos a calcular el número de Froude [32] a partir de la fórmula de Alexander (3-6):

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{(g \cdot L)}} = \frac{10}{\sqrt{(9,81 \cdot 90)}} = 0,34 \quad (3-6)$$

Donde:

- Fn: número de Froude.
- g: aceleración de la gravedad en m/s^2 .

Para calcular este número hemos considerado una velocidad media de nuestro buque de 10kts siendo esta por lo general la velocidad media de un buque de estas características.

El número de Froude, es un parámetro adimensional utilizado en ingeniería naval para analizar el comportamiento de un barco en el agua, especialmente en lo que respecta a la resistencia al avance y la formación de olas. Se define como la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas gravitatorias.

Por lo tanto, a partir del número de Froude calculamos el coeficiente de la maestra mediante la Ecuación (3-7):

$$C_m = 0,75 + (1 - Fn)^4 = 0,75 + (1 - 0,34)^4 = 0,94 \quad (3-7)$$

Donde:

- C_m : coeficiente de la maestra.

Una vez obtenido el coeficiente de la maestra y el coeficiente de bloque, se puede calcular el coeficiente prismático con la Ecuación (3-8) ya que es una relación de los mismos:

$$C_p = \frac{C_b}{C_m} = \frac{0,3}{0,94} = 0,31 \quad (3-8)$$

Donde:

- C_p : coeficiente prismático.

Y por último, a partir del coeficiente prismático podemos obtener el coeficiente de flotación representado en la Ecuación (3-9):

$$C_f = 1 - 0,3 \cdot (1 - C_p) = 1 - 0,3 \cdot (1 - 0,31) = 0,79 \quad (3-9)$$

Donde:

- C_f : coeficiente de flotación.

3.2.3 Pesos y centros de gravedad

En el siguiente apartado lo que se pretende es calcular los diferentes pesos de nuestro buque, tanto el peso muerto como en rosca que están relacionados en base a la Ecuación (3-10):

$$\Delta = DW + LS \quad (3-10)$$

Donde:

- DW: peso muerto en t.
- LS: peso en rosca en t.

Para calcular el peso muerto (DW) y en peso en rosca (LS), hay que calcular en primer lugar el valor de C_d siendo este el coeficiente que relaciona el DW y el desplazamiento (Δ). Para ello partimos de una aproximación de $C_d = 0,095$, obtenida del documento (Ship design: methodologies of preliminary design) [33] que recoge diferentes C_d en función del tipo de buque.

$$C_d = \frac{DW}{\Delta} \quad (3-11)$$

$$DW = 0,095 \cdot 2514,079 = 238,84 \text{ t} \quad (3-11)$$

$$LS = 2514,079 - 238,84 = 2275,24 \text{ t} \quad (3-10)$$

En cuanto a la situación longitudinal del centro de carena de nuestro buque utilizaremos la Ecuación (3-12):

$$\frac{X_{cc}}{L} \cdot 100 = 17,5 \cdot C_p - 12,5 \quad (3-12)$$

$$X_{cc} = (17,5 \cdot 0,31 - 12,5) \cdot \frac{90}{100} = -6,37 \quad (3-12)$$

Donde:

- X_{cc} : centro de carena referido a la semieslora del buque, positivo de a proa de la cuaderna maestra en m.

Una vez obtenido X_{cc} , se puede calcular el valor de LCG con la Ecuación (3-13).

$$LCG = \frac{L}{2} - X_{cc} = \frac{90}{2} - 6,37 = 38,63 \text{ m} \quad (3-13)$$

Donde:

- LCG: centro de gravedad longitudinal en m.

A continuación, se estima el KG empleando el método ZS con la Ecuación (3-14), un enfoque específico para estimar el KG en buques de vela ya que considera:

- Separación del peso de dos componentes:
 - Casco y equipo fijo.
 - Mástiles, velamen y jarcia.
- Cálculo individual de cada componente.
- Correcciones por estabilidad.

$$KG = 0,01 \cdot P \cdot \left(46,6 + 0,135 \cdot (0,81 - C_b) \cdot \frac{L^2}{P^2} \right) + \left(\frac{L}{B} - 6,5 \right) \cdot 0,008 \cdot P \quad (3-14)$$

$$KG = 6,31 \text{ m}$$

Donde:

- KG: centro de gravedad en m.
- P: puntal.
- C_b : coeficiente de bloque.
- L: eslora.
- B: manga.

Como resumen de los parámetros calculados hasta el momento construimos la Tabla 3.

Dimensión	Valor
Eslora (L_{pp})	90 m
Manga (B)	14,090 m
Calado (T)	6,572 m
Puntal (P)	11,072 m
Desplazamiento (Δ)	2514,079 t
Velocidad (v)	10 kn
Peso en rosca (LS)	2275,24 t
Peso muerto (DW)	238,84 t

Tabla 3-3.- Dimensiones principales del buque

3.3 Estudio de potencia

Para el cálculo aproximado de la potencia deseada se ha empleado el método de Holtrop [34], este método lo que permite es calcular la resistencia total del buque al avance. Al emplear este método hay que tener en cuenta una serie de simplificaciones. Todas las fórmulas utilizadas en el cálculo de la resistencia se han extraído de la ITTC-57.

$$R_t = R_v + R_{ap} + R_w + R_b + R_{tr} + R_a \quad (3-15)$$

Donde:

- R_t : resistencia total.
- R_v : resistencia viscosa.
- R_{ap} : resistencia de los apéndices.
- R_w : resistencia por formación de olas.
- R_b : resistencia de presión por el bulbo.
- R_{tr} : resistencia de presión de las popas de estampa cuando están sumergidas.
- R_a : resistencia debida al coeficiente de la correlación modelo-buque, C_a .

A raíz de estos parámetros se ha decidido llevar a cabo una serie de simplificaciones:

En primer lugar, como nuestro barco no cuenta con aletas estabilizadoras, el único apéndice que tiene es el timón y dado que su ubicación es en la popa del barco, despreciaremos el valor (3-16).

$$R_{ap} = 0 \quad (3-16)$$

Al tratarse de un barco de vela, tampoco tiene bulbo de proa, por lo que también podemos despreciar ese valor de la resistencia (3-17).

$$R_b = 0 \quad (3-17)$$

Nuestro espejo de popa no se encuentra sumergido, por lo tanto, el valor de su resistencia no se tendrá en cuenta (3-18).

$$R_{tr} = 0 \quad (3-18)$$

Como lo que se está haciendo es el diseño conceptual del modelo, no tendremos en cuenta tampoco esa resistencia (3-19).

$$R_a = 0 \quad (3-19)$$

Además, sabemos que la resistencia viscosa va a ser significativamente mayor que la resistencia por formación de olas, en torno a un 80% mayor, por lo que asumiremos lo siguiente (3-20).

$$R_w = 0,2 \cdot R_v \quad (3-20)$$

Teniendo en cuenta las simplificaciones anteriores obtenemos la siguiente fórmula (3-21):

$$R_t = 1,2 \cdot R_v \quad (3-21)$$

Para sacar el valor de la resistencia necesitamos obtener en previamente el valor de R_v mediante la Ecuación (3-22), para este cálculo emplearemos además las Ecuaciones (3-23) a (3-26) las cuales nos darán los valores de los diferentes valores que componen R_v .

$$R_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot C_f \cdot (1 + k_1) \quad (3-22)$$

$$C_f = \frac{0,075}{(\log(Re)-2)^2} \quad (3-23)$$

$$(1 + k_1) = \quad (3-24)$$
$$= 0,93 + 0,487118 \cdot \left(\frac{B}{L}\right)^{1,06806} \cdot \left(\frac{T}{L}\right)^{0,46106} \cdot \left(\frac{L}{L_r}\right)^{0,0121563} \cdot \left(\frac{L^3}{\nabla}\right)^{0,36486} \cdot (1 - C_p)^{-0,604247}$$

$$\frac{L_r}{L} = 1 - C_p + \frac{0,06 \cdot C_p \cdot LCB}{4 \cdot C_p - 1} \quad (3-25)$$

$$Re = \frac{V \cdot L}{\nu} \quad (3-26)$$

Donde:

- V: velocidad en m/s.
- Cf: coeficiente de resistencia de fricción del buque.
- Re: número de Reynolds.
- ν : viscosidad cinemática en m²/s.
- LCB: $LCB = \frac{L_{pp}}{2} = 45 \text{ m}$

Para la realización de los siguientes cálculos se ha tomado como de la viscosidad cinemática a 20°C del agua de mar y a 1 atm de presión.

$$\nu = 1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (3-27)$$

En cuanto al cálculo de la superficie mojada aplicaremos la fórmula de Denny (3-28), la cuál, es de las más empleadas en esta fase del proyecto.

$$S = 1,7 \cdot L \cdot T + \frac{\nabla}{T} \quad (3-28)$$

Ahora que disponemos de todas las fórmulas necesarias, procedemos a despejar los distintos valores en las ecuaciones analizadas previamente, obteniendo así los resultados representados en (3-29) a (3-33) que utilizaremos para el cálculo de resistencia viscosa.

$$Re = 4,59 \cdot 10^8 \quad (3-29)$$

$$Cf = 0,002632284 \quad (3-23)$$

$$Lr = 363,025 \quad (3-25)$$

$$(1 + k) = 1,130873783 \quad (3-24)$$

$$S = 1378,754 \quad (3-28)$$

$$Rv = 35978,730 \text{ N} \quad (3-22)$$

Una vez obtenida la resistencia viscosa, mediante la Ecuación (3-20) se calcula la resistencia total.

$$Rt = 1,2 \cdot Rv \approx 43174,47 \text{ N} \quad (3-20)$$

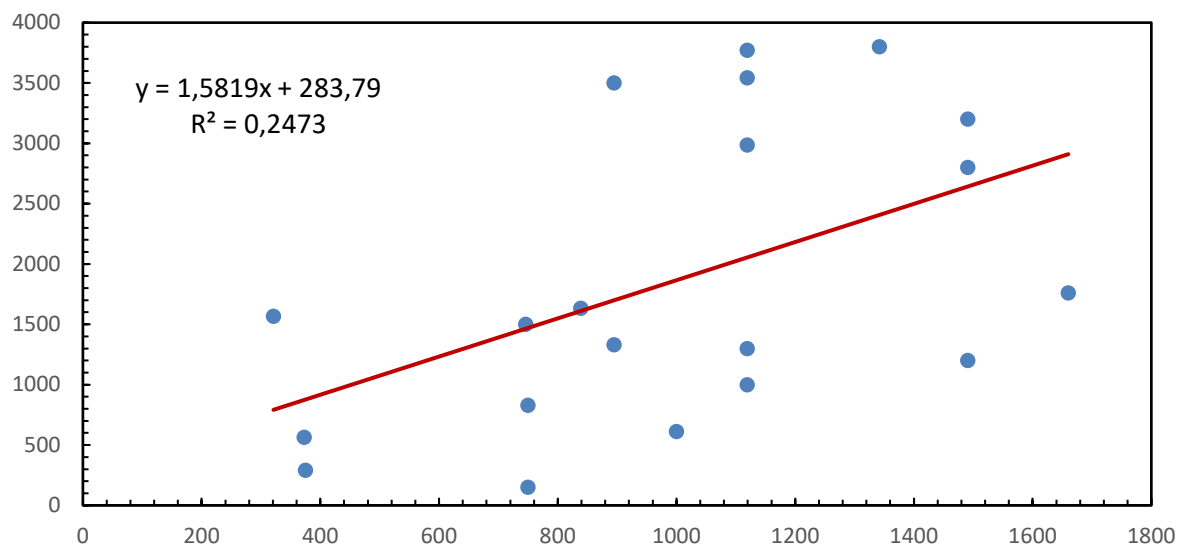
A continuación, se calcula la potencia necesaria de nuestro buque mediante la Ecuación (3-30).

$$Pot = Rt \cdot V = 222,089 \text{ kW} \quad (3-30)$$

En el caso de un buque escuela de vela, aunque la propulsión a vela es el medio principal de avance, es crucial contar con una potencia mecánica de respaldo que permita alcanzar velocidades máximas en situaciones específicas, como evitar mal tiempo, maniobrar en puertos o garantizar la seguridad de la dotación. Por ello, es necesario ajustar la potencia del motor para cumplir con estos requerimientos. Utilizando regresión lineal con datos de buques de vela similares, podemos estimar la potencia máxima necesaria para alcanzar velocidades superiores a las habituales, por ejemplo 12-15 nudos en lugar de los 10 nudos típicos de un buque escuela navegando a propulsión mixta. Este enfoque nos permitirá dimensionar correctamente el motor de apoyo, asegurando que el buque pueda operar de manera eficiente y segura en todas las condiciones.

El valor de regresión obtenido de la Gráfica 3-5 y su ecuación (3-31) correspondiente quedarían de esta forma.

$$Pot = 1,5819 \cdot \Delta + 283,79 = 4215,81 \text{ kW} \quad (3-31)$$



Gráfica 3-5.- Relación Desplazamiento (t)-Potencia (kW)

El valor obtenido es significativamente mayor al calculado previamente, por lo tanto, vamos a tomarlo con un valor máximo de potencia para cuando se escoja el motor propuesto como propulsor. Los valores de potencia finalmente serán siempre superiores a 250 kW y sin llegar a exceder los 4500 kW. El valor obtenido debe ser adaptado en una fase posterior de diseño, sin embargo, sirve como valor inicial.

3.4 Diseño conceptual del aparejo

En esta parte del diseño conceptual se ha empleado la serie sistemática NPL (National Physical Laboratory) [31], que es ampliamente utilizada para buques de vela. Esta serie relaciona:

Superficie vélica (A_v) con el desplazamiento (Δ).

Distribución de la superficie vélica entre los palos.

Altura de los palos en función de la eslora y la manga.

El parejo propuesto consiste en un aparejo con 4 palos y velas rígidas de bermuda, incluyendo foques adicionales para mejorar el rendimiento en ceñida. Partiendo de las dimensiones principales anteriormente especificadas en la Tabla 3-3 se ha realizado el diseño considerando los datos de la Tabla 3-4.

Dimensión	Valor
Eslora (L_{pp})	90 m
Manga (B)	14 m
Desplazamiento (Δ)	2514,079 t
Velocidad (v)	10 kn
Superficie vélica (A_v)	1850,538 m ²
Resistencia al avance (R_t)	43174,47 N

Tabla 3-4.- Dimensiones principales para el diseño del aparejo

3.4.1 Superficie vélica

La serie NPL sugiere una distribución proporcional de la superficie vélica entre los palos [31], por lo que aplicando la fórmula general (3-32):

$$Av = k \cdot \Delta^{\frac{2}{3}} \quad (3-32)$$

Donde:

- K: coeficiente que depende del tipo de barco. Para buques escuela, $k \approx 18$.
- Δ : desplazamiento del barco en toneladas (t).

Se obtiene:

$$Av = 18 \cdot 2514,079^{\frac{2}{3}}$$

Primero calculamos $\Delta^{\frac{2}{3}}$:

$$2514,079^{\frac{2}{3}} \approx 187,5$$

Luego:

$$Av = 18 \cdot 187,5 \approx 3375 \text{ m}^2 \quad (3-32)$$

Sin embargo, se tomará como valor inicial una superficie vélica estimada como un valor intermedio entre la superficie vélica obtenida mediante la recta de regresión ($1850,588 \text{ m}^2$) y entre la calculada de manera empírica (3375 m^2). Esta decisión se ha tomado con la finalidad de trabajar con un valor que resulte más fácil de distribuir y dimensionar de cara a al modelado en AutoCAD.

3.4.2 Velas

Por otra parte, la cuerda de las velas (ancho) se calcula en función de la superficie y la relación de aspecto (AR) como se puede observar en la Ecuación (3-33) [20]:

$$Cuerda = \sqrt{\frac{Av}{AR}} \quad (3-33)$$

Donde:

- AR: relación de aspecto (altura/cuerda).

Finalmente, se ha optado por una superficie vélica de 2150 m^2 , siendo este un valor intermedio entre el obtenido por la recta de regresión y el resultado calculado de manera empírica. Una vez realizados los cálculos anteriores, los valores obtenidos de cuerda y relación de aspecto de cada vela quedan recogidos en la Tabla 3-5.

Vela	Superficie vélica (m^2)	Cuerda (m)	Relación de aspecto
Foque 1 (proa)	200	10	4,0
Foque 2	150	8	4,4
Palo mayor 1	500	15	6,0
Palo mayor 2	500	15	6,0
Pelo mesana	500	15	6,0
Palo de popa	300	12	6,5

Tabla 3-5.- Dimensiones velas

3.4.3 Palos

Para los 4 palos y focues adicionales, se propone la siguiente distribución especificada en la Tabla 3-6.

Elemento	Superficie vélica (m ²)	Distribución
Foque 1 (bauprés)	200	9,30%
Foque 2 (bauprés)	150	6,98%
Palo trinquete	500	23,26%
Palo mayor 1	500	23,26%
Palo mayor 2	500	23,26%
Palo mesana	300	13,95%

Tabla 3-6.- Distribución superficie vélica

Las dimensiones de los palos y velas se calculan en función de la eslora, la manga y la superficie vélica. La serie NPL [31] proporciona relaciones empíricas para determinar la altura de los palos y la cuerda de las velas. Por lo tanto, la altura de los palos vendrá dada en la Tabla 3-7.

Palo	Ecuación	Valor
Bauprés	$0,25 \cdot L_{pp}$	$0,25 \cdot 90 = 22,5 \text{ m}$
Palo mayor 1 y 2	$1,0 \cdot L_{pp}$	$1,0 \cdot 90 = 90,0 \text{ m}$
Palo mesana	$0,85 \cdot \text{Altura del palo mayor}$	$0,85 \cdot 90 = 76,5 \text{ m}$
Palo de popa	$0,75 \cdot \text{Altura del palo mayor}$	$0,75 \cdot 90 = 67,5 \text{ m}$

Tabla 3-7.- Alturas de los mástiles

El enfoque principal es diseñar los mástiles de fibra de carbono. Esta decisión se debe a que la fibra de carbono es un material 8,3 veces más resistente que el acero y 1,15 veces más rígida, pero solo con una fracción del peso [35]. Estas relaciones se pueden corroborar según los datos de la Tabla 3-8.

Propiedad	Fibra de carbono	Acero estructural AISI 1020	Comparación
Resistencia a la tracción	3500 MPa	420 MPa	Fibra de carbono: 8,3 veces más resistente
Módulo de elasticidad	230 GPa	200 GPa	Fibra de carbono: 1,15 veces más rígida
Densidad	1,6 g/cm ³	7,85 g/cm ³	Fibra de carbono: 5 veces más ligera
Relación resistencia/peso	Alto	Bajo	Fibra de carbono: muy superior

Tabla 3-8.-Comparación fibra de carbono vs acero

Esto reduce el peso total del aparejo, mejorando la estabilidad del barco. Además, a diferencia de los palos metálicos, la fibra es inmune a la corrosión, lo que es especialmente importante en un entorno marino. Tiene una larga vida útil y requiere menos mantenimiento que otros materiales. Por último, la flexibilidad de este permite diseñar formas complejas y optimizadas aerodinámicamente.

En cuanto a las dimensiones, las alturas obtenidas mediante la serie NPL quedan resumidas en la Tabla 3-9.

Palo	Altura (m)
Palo trinquete	90,0
Palo mayor 1	90,0
Palo mayor 2	76,5

Palo mesana 67,5

Tabla 3-9.- Altura de los palos

En lo referente al diámetro, debe calcularse en función de las cargas aerodinámicas y estructurales. Para un mástil de 90m, un diámetro típico podría estar entre 1,0 y 1,5 m en la base, reduciéndose gradualmente hacia la parte superior.

El espesor de la pared del mástil debe ser suficiente para soportar las cargas de viento y el peso de las velas rígidas. Un espesor típico para un mástil de fibra de carbono es de 10 a 20 mm, dependiendo de la altura y las cargas.

A su vez, los mástiles deben incluir refuerzos internos para aumentar la rigidez y resistir las cargas de flexión y torsión. Respecto al tipo de fibra hay dos opciones posibles:

- Fibra de alto módulo: ofrece la máxima rigidez y es ideal para aplicaciones donde la deformación debe ser mínima.
- Fibra de carbono estándar: es más económica y se utiliza en aplicaciones donde la rigidez extrema no es crítica.

Cualquiera de estas fibras se debe combinar con una resina epoxi para formar el material compuesto. La resina epoxi es resistente al agua y a los UV, lo que la hace idónea para aplicaciones marinas. Una vez impregnada la fibra en la resina se enrollarían en un mandril con forma de mástil, lo que se conoce como moldeo por enrollamiento filamentario y posteriormente, se curan en una autoclave para maximizar la resistencia y la rigidez. En cuanto al estudio de cargas aerodinámicas se considerarían las fuerzas aerodinámicas generadas por las velas rígidas que incluyen:

- Sustentación: empuja el palo hacia delante.
- Resistencia: empuja el palo hacia atrás.
- Momento de flexión: causado por la distribución de las fuerzas a lo largo del palo.

Las cargas estructurales son el peso propio; el sumatorio del mástil y las velas rígidas y las cargas dinámicas causadas por el movimiento del barco y el estado de la mar.

3.4.4 Perfiles alares

Al tratarse de un aparejo compuesto por velas rígidas, se recomienda perfiles alares de alta eficiencia aerodinámica. Los perfiles NACA [20] son por lo tanto una excelente opción y en la Tabla 3-7 se exponen los perfiles concretos propuestos para cada vela.

Vela	Perfil alar	Descripción	Curvatura máxima	Espesor máximo
Foque 1	NACA 0012	Perfil simétrico, ideal para focos.	0%	12%
Foque 2	NACA 0012	Perfil simétrico, mejora el rendimiento en ceñida.	0%	12%
Trinquete	NACA 6412	Perfil asimétrico, optimizado para generar máxima sustentación.	6%	12%
Mayor Proel	NACA 6412	Perfil asimétrico, similar a la vela del Trinquete.	6%	12%
Mayor Popel	NACA 6412	Perfil asimétrico, similar a la vela del Trinquete y Mayor Proel.	6%	12%
Mesana	NACA 2412	Perfil asimétrico, diseñado para bajas velocidades y alta maniobrabilidad	2%	12%

Tabla 3-10.- Perfiles NACA

1. Perfil NACA 0012: representado en la Figura 29 ideal para aplicaciones donde se necesita un perfil que genere sustentación en ambos sentidos, como en los foces. Ofrece un buen equilibrio entre sustentación y resistencia. Se utiliza en los foces porque son velas que trabajan en ambos bordos (babor y estribor) y necesitan un perfil simétrico para maximizar la eficiencia en ceñida.

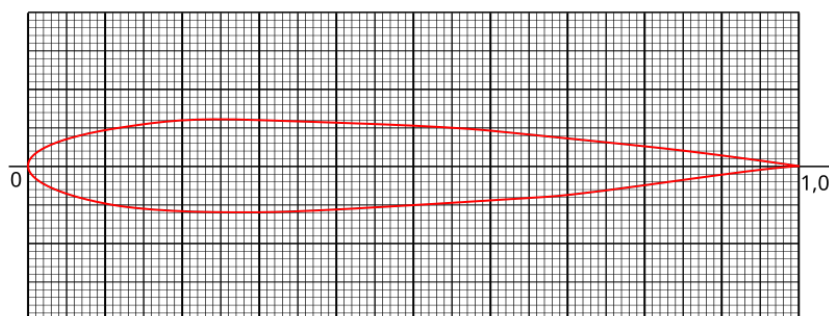


Figura 3-1.- Perfil NACA 0012

2. Perfil NACA 6412: representado en la Figura 30 está optimizado para generar máxima sustentación con una resistencia moderada. Es idea para aplicaciones donde se necesita un alto rendimiento en condiciones de viento constante. Se utiliza en las velas de los palos mayores porque son las velas principales y necesitan generar la mayor sustentación posible.

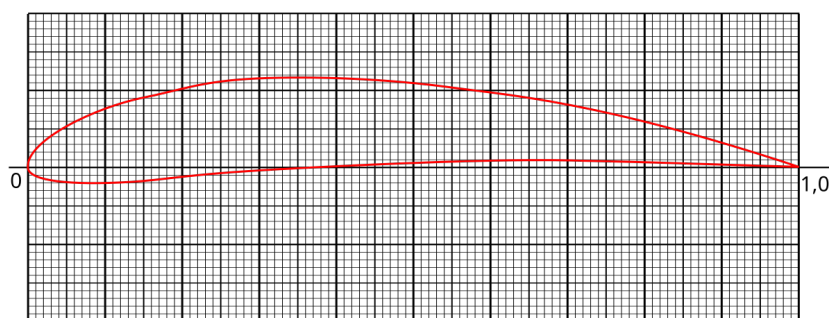


Figura 3-2.- Perfil NACA 6412

3. Perfil NACA 2412: diseñado para generar sustentación a bajas velocidades y es muy maniobrable. Es ideal para aplicaciones donde se necesita un perfil eficiente en condiciones de viento ligero. Se utiliza en el palo de popa porque es una vela que trabaja en condiciones de viento ligero y necesita ser muy maniobrable.

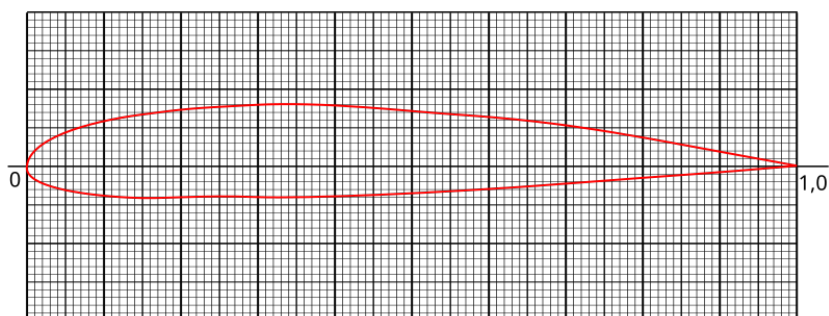


Figura 3-3.- Perfil NACA 2412

3.4.5 Centros vélicos

En el diseño de un buque escuela, la distribución de los palos y el cálculo de los centros vélicos son elementos clave para lograr un equilibrio óptimo entre la propulsión generada por el viento y la estabilidad del buque. La disposición de los palos no solo debe maximizar la eficiencia del aparejo, sino también garantizar que el centro vélico total se alinee con el centro de escora o cabeceo que comprometan la seguridad y el rendimiento. Para ello, se ha diseñado una configuración con los 4 palos anteriormente

propuestos y los dos focos. Esta distribución permite una repartición uniforme de las velas a lo largo de la eslora, optimizando la fuerza propulsora y facilitando las maniobras.

Por lo tanto, los palos y las velas se han distribuido principalmente en función de porcentajes de la eslora entre perpendiculares expuestos en la Tabla 3-11, tomando como referencia la proa, para optimizar el rendimiento del aparejo y garantizar la estabilidad del buque.

Palo	Porcentaje	Distancia desde proa [m]
Foque 1	-11,1%	-20
Foque 2	-5,6%	-10
Palo Trinquete	16,7%	15
Palo Mayor Proel	38,9%	35
Palo Mayor Popel	61,1%	55
Palo Mesana	83,3%	75

Tabla 3-11.- Distribución de los mástiles desde la proa

El cálculo de los centros vélicos se aborda en dos fases [36]: primero, se determina el centro vélico individual de cada vela, considerando su geometría y su posición respecto al palo. En segundo lugar, se calcula el centro vélico total del aparejo con la Ecuación (3-34) y Ecuación (3-35), integrando las contribuciones de todas las velas en función de su superficie y ubicación. Este proceso no solo proporciona una estimación precisa del punto de aplicación de la fuerza del viento, sino que también permite evaluar el comportamiento del buque bajo diversas condiciones de navegación, asegurando un diseño robusto y eficiente.

$$C_x = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot x_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3-34)$$

$$C_z = \frac{\sum_{i=1}^n (A_i \cdot z_i)}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (3-35)$$

Donde:

- A_i es el área de la figura i .
- (x_i, y_i) son las coordenadas del centro de la figura i .

Por lo tanto, para el cálculo del centroide de las velas Trinquete, Mayor Proel y Mayor Popel, se ha considerado que tenemos tres velas rígidas iguales. El centro de áreas de una de ellas estará en la misma posición relativa, por lo que calculando el centro de una podemos posicionar el de las otras dos en el dibujo. Hemos tomado una que tras dibujarla en AutoCAD se encuentra definida con la polilínea cerrada así:

Dada una polilínea cerrada con n vértices (x_i, y_i) , el centroide (C_x, C_y) se calcula como se muestra en la Ecuación (3-36) y Ecuación (3-37):

$$C_x = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^n (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3-36)$$

$$C_y = \frac{1}{6A} \sum_{i=1}^n (y_i + y_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3-37)$$

Donde:

- A es el área del polígono
- $(x_{n+1}, y_{n+1}) = (x_1, y_1)$.

A continuación, empleando el comando list se pueden extraer los puntos de la polilínea, obtenerse sus vértices y resultando un área de $A = 499,8438 \text{ m}^2$. Es por ello que una vez calculados Cx y Cy , se obtiene el centroide:

$$(Cx, Cy) = (48,50, 60,00)$$

Hay que tener presente que el área no varía esté donde esté posicionada la polilínea, y el centro de gravedad relativo tampoco, solo variarán sus coordenadas respecto de la posición del origen de coordenadas. Por ello, tras calcular las áreas del resto de velas, debemos desplazarlas a sus posiciones exactas en los palos del buque, que tienen su origen de coordenadas en el punto de corte de la perpendicular de popa con la línea de base en el punto (0,0,0) de AutoCAD.

Este mismo proceso se ha repetido para la obtención de los centroides de la Mesana, el foque 1 y foque 2, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 3-12:

Vela	Cx	Cy
Trinquete	48,50	60,00
Mayor Proel	48,50	60,00
Mayor Popel	48,50	60,00
Mesana	10,50	55,00
Foque 1	96,50	54,00
Foque 2	89,50	53,00

Tabla 3-12.- Centroides individuales

Como ya se ha explicado, una vez posicionadas las velas con su centro vélico identificado con un pequeño círculo en el punto en el que tenemos el centroide de áreas. Debemos listar estos centros para conocer sus coordenadas reales con respecto a la perpendicular de popa y la línea de base. De esta forma, y conocidas las áreas que no variarían esté donde esté la vela, podemos componer el centro vélico del buque de forma sencilla. A continuación, en la Tabla 3-13 se pueden observar los datos obtenidos en este apartado de manera resumida:

Vela	Superficie [m²]	Centro (X,Z) [m]
Foque 1	217	(96,485; 27,013)
Foque 2	148	(89,485; 26,013)
Trinquete	500	(68,493; 33,013)
Mayor proel	500	(48,485; 33,013)
Mayor popel	500	(28,663; 33,013)
Mesana	321	(10,485; 28,013)

Tabla 3-13.- Superficies vélicas y CE

Por último, dadas varias áreas con sus respectivos centroides (Cx, Cy), se calcula el centroide del conjunto de velas mediante la Ecuación (3-34) y Ecuación (3-35) anteriormente mencionadas.

$$\sum A_i = 217 + 148 + 500 + 500 + 500 + 321 = 2186 \text{ m}^2$$

$$Cx = 48,66 \text{ m} \quad (3-34)$$

$$C_z = 31,21 \text{ m} \quad (3-35)$$

El centroide de la suma de las áreas de todas las figuras ha resultado:

$$(C_x, C_y) = (48,66, 31,21)$$

La Figura 3-4, muestra el plano final obtenido mediante AutoCAD donde se ven reflejados cada CE individual en color negro y en del conjunto de velas en color verde. Este plano se puede encontrar además en el Anexo IV al final de este TFG.

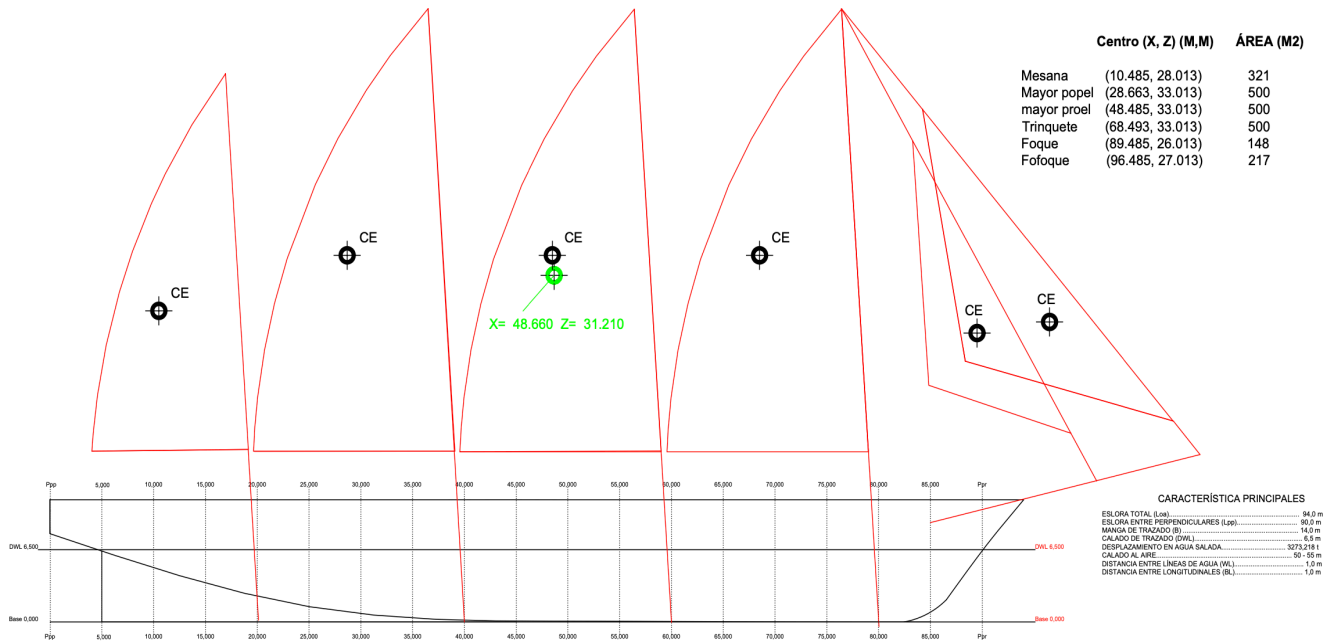


Figura 3-4.- Distribución de CE

3.5 Generación de formas

Una vez determinadas las dimensiones principales del buque y sus coeficientes, se han definido sus formas. Para representarlas gráficamente, se ha empleado la herramienta AutoCAD, siguiendo el método tradicional basado en la aproximación de una curva de áreas seccionales mediante trapecios.

Los planos de formas (Anexo III) muestran las vistas del casco de nuestro buque. Al tratarse de un diseño conceptual, las formas del casco son una aproximación que se ajusta al dimensionamiento previo, en función de las dimensiones y coeficientes calculados anteriormente en el desarrollo de este TFG. La elaboración de los planos de formas parte de un trapecio como base. No obstante, en nuestro caso, en lugar de utilizar un trapecio para la curva de áreas seccionales, se podría aproximar más un triángulo, como se puede observar en la Figura 3-5.

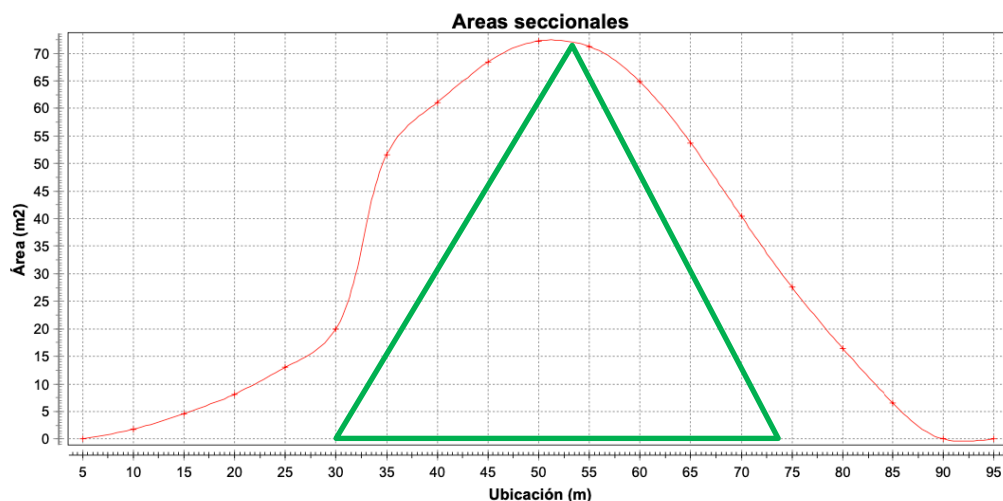


Figura 3-5.- Área de secciones

Como se puede observar en la Figura 3-5, nuestra área seccional presenta una pequeña desviación entre los 30 y 40 metros de eslora, considerando la perpendicular de popa en el espejo de nuestro buque. Esa desviación se debe a que en esa zona debería haber un quillote que recorriera desde el espejo y fuera a morir con las formas del barco, sin embargo, al tratarse de un diseño conceptual, no se ha considerado este quillote.

Nuestras líneas de agua (W.L) se ajustarán a la curva de áreas seccionales, tomando como referencia la eslora entre perpendiculares (Lpp), que en este caso es de 90 metros. En las tres vistas disponibles, se representan la línea de base (B.L) y los piques de proa y popa (Ppp y Ppr). Estas vistas se complementan con la Figura 3-6 donde se muestran el plano longitudinal del casco de nuestro buque, detallando las formas y dimensiones principales.

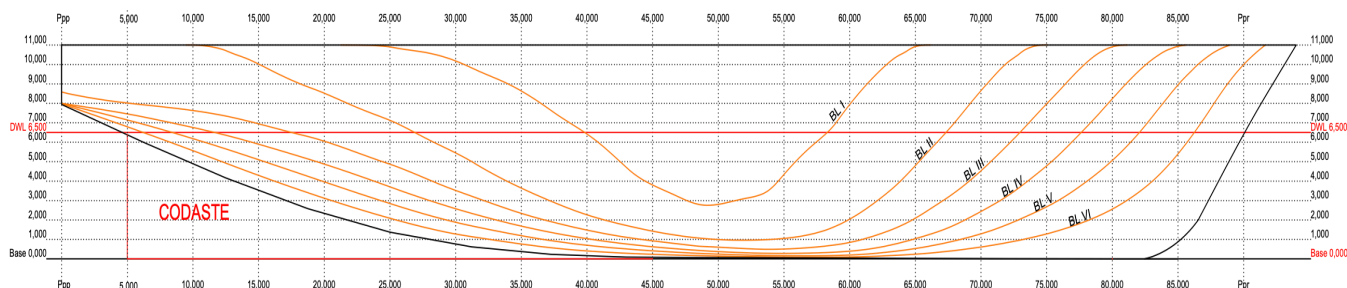


Figura 3-6.- Plano longitudinal

Las Figura 3-8 y Figura 3-9 presentan la caja de cuadernas, donde se pueden apreciar las formas del casco. Ambas imágenes divididas por la línea de crujía (CL) muestran las formas del casco en la zona de popa, y proa respectivamente.

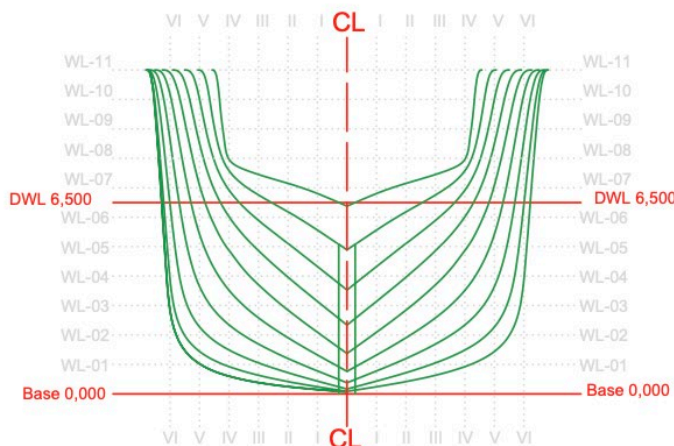
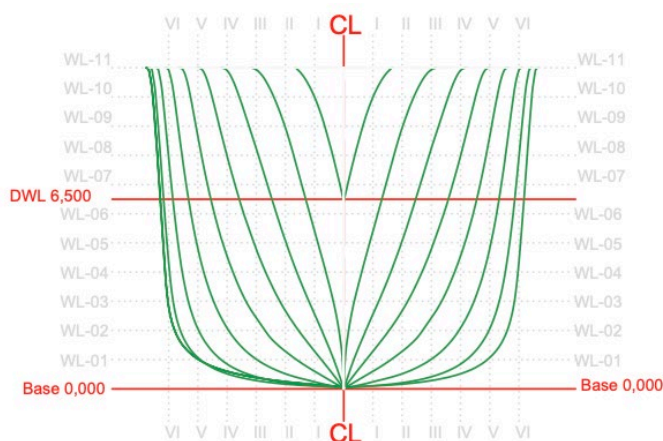
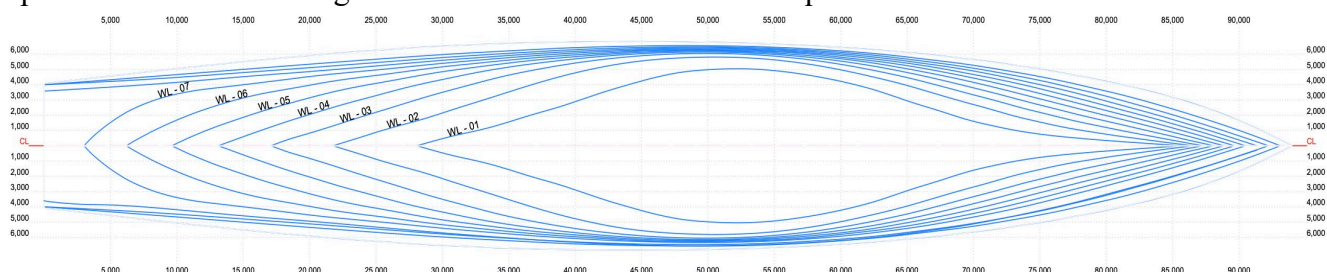


Figura 3-7.- Plano transversal Ppp**Figura 3-8 Plano transversal Ppr**

En la Figura 3-9 se observa la vista de la planta del plano de formas. Las líneas de agua en este caso representan de forma más gráfica lo afilado o no de nuestro buque.

**Figura 3-9.- Planta**

A partir de estos planos, es necesario desarrollar simultáneamente la cartilla de trazado que consiste en la representación numérica de los puntos de intersección entre los distintos planos que conforman el diseño: las cuadernas, las líneas de agua, el perfil longitudinal y los planos longitudinales. Esta cartilla de trazado, que puede consultarse en el Anexo V, sirve como referencia precisa para la construcción y verificación de las formas del casco.

A continuación, se representa un boceto completo del buque, que permite visualizar de manera integrada el diseño preliminar. Este dibujo reúne todos los elementos clave, como las formas del casco, las velas rígidas y los palos de fibra de carbono, ofreciendo una idea clara de cómo quedará el buque una vez finalizado. Este boceto sirve como una representación global que facilita la comprensión del diseño y su ajuste a los requisitos técnicos y funcionales establecidos.

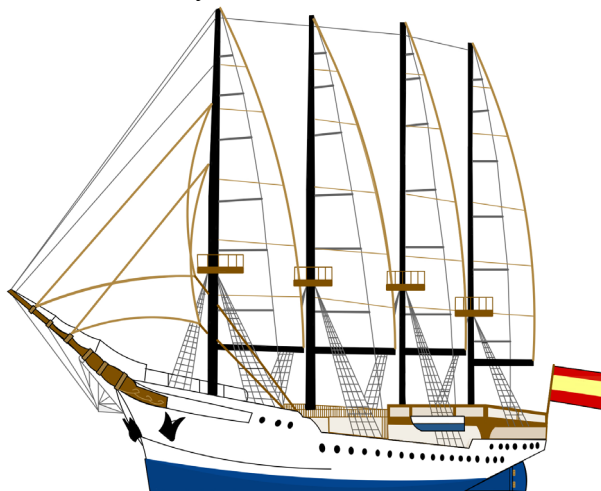


Figura 3-10.- Boceto
Elaboración propia (2025)

3.6 Planta de propulsión

El diseño conceptual de propulsión y generación eléctrica se centra en integrar tecnologías eficientes y fiables que garanticen un rendimiento óptimo en términos de potencia, autonomía y sostenibilidad. Este sistema combina un motor de propulsión CAT C280-8, una reductora marina MB270A y dos generadores marinos Caterpillar (modelos C9.3B), diseñados para cumplir con las normativas de emisiones IMO Tier II y Tier III. La disposición de estos componentes en la sala de máquinas prioriza la eficiencia energética, la redundancia operativa y la facilidad de mantenimiento, asegurando que el buque escuela esté equipado para enfrentar las demandas de la navegación y la formación de los Guardiamarinas.

3.6.1 Motor de propulsión

El motor de propulsión CAT C280-8 [37], representado en la Figura 3-11, tiene como función principal proporcionar potencia mecánica para la propulsión del buque y sus características principales se reflejan en la Tabla 3-14.

Característica	Valor
Potencia	1800 a 2700 kW
Velocidad	750 a 1000 rpm
Peso	10000 kg
Dimensiones	3,5 m x 1,5 m x 2 m

Tabla 3-14.- Características CAT C280-8



Figura 3-11.- Motor CAT C280-8

Se ubicará en la sala de máquinas, cerca del eje de la hélice y requiere espacio adicional para mantenimiento y ventilación (1-1,5 m alrededor). Sus ventajas son la alta fiabilidad y eficiencia, así como que cumple con normativas de emisiones IMO Tier II y Tier III lo que nos permite cumplir con el Anexo 6 del convenio MARPOL como se especifica en la Tabla 3-11.

Aspecto	Tier II	Tier III	Relación con MARPOL (Anexo VI)
Fecha de aplicación	2011	2016	Regla 13 del Anexo VI
Ámbito de aplicación	Global	Zonas ECA (Áreas de Control de Emisiones)	Tier II: Requisito mínimo global. Tier III: Requisito escrito en ECAs.
Límites de NOx	En función de la velocidad: Baja: 14,4 g/kWh Media: 9,8 g/kWh Alta: 7,7 g/kWh	En función de la velocidad: Baja: 3,4 g/kWh Media: 2,0 g/kWh Alta: 2,0 g/kWh	Tier II y Tier III establecen límites de emisiones de NOx
Reducción de NOx	Reducción del 15-20% respecto a Tier I	Reducción del 80% respecto a Tier II	Tier III es mucho más estricto que Tier II
Zonas ECA	No aplica	Aplica en Zonas ECA designadas	Las ECAs son áreas de controles más estrictos bajo MARPOL
Ejemplos de ECAs		Zona de América del Norte Mar Caribe de EE.UU.	Designadas por la OMI para proteger áreas sensibles
Cumplimiento en el diseño conceptual	Motor CAT C280-8 y generadores Caterpillar cumplen Tier II	Motor CAT C280-8 y generadores Caterpillar cumplen Tier III	Garantiza operación global y en ECAs sin restricciones

Tabla 3-15.- Comparación Tier II y III - Convenio MARPOL [37] [30] [38]

3.6.2 Reductora Marina

La función de la Reductora Marina MB270A [39] es reducir la velocidad del motor y transmitir la potencia al eje de la hélice, sus características principales están en la Tabla 3-11.

Característica	Valor
Capacidad	373 kW
Velocidad de entrada	2500 rpm (máx)
Peso	300-400 kg
Dimensiones	1 m x 0,6 m x 0,7 m

Tabla 3-16.- Características MB270A



Figura 3-12.- Reductora MB270A

Como ventajas destacan su diseño robusto y resistente a la corrosión y el sistema de inversión de marcha para maniobra. En cuanto a su disposición, irá conectada directamente al motor mediante un acoplamiento flexible y montada sobre una base rígida y nivelada para evitar vibraciones.

3.6.3 Generadores

Los dos generadores Caterpillar proporcionarán energía eléctrica para todos los sistemas del buque, estando sus características principales reflejadas en la Tabla 3-12.

Característica	Valor
Potencia	100-300 kVA
Velocidad	1500 rpm ó 1800 rpm
Peso	1000 kg – 2000 kg
Dimensiones	2-3 m x 1-1,5 m x 1,5-2 m

Tabla 3-17.- Características generadores C9.3B

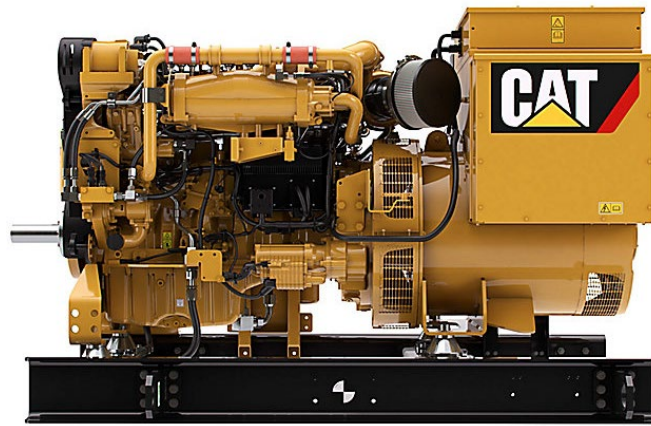


Figura 3-13.- Generadores C9.3B

Como ventajas principales destacan su alta fiabilidad y eficiencia, a la vez que la redundancia para garantizar el suministro eléctrico en caso de fallo de un generador. Se encontrarían ubicados en la sala de máquinas, separados del motor principal para facilitar el acceso y mantenimiento. Conectados al sistema eléctrico del buque mediante interruptores automáticos y paneles de control. Finalmente, siendo el espacio y el peso un aspecto muy relevante que afecta directamente a la estabilidad del buque el espacio final y su peso vienen especificados en la Tabla 3-13.

Espacio		Peso	
Longitud total	8,0 – 10 m	Motor	10000 kg
Ancho total	5,0 – 6 m	Reductora	300 – 400 kg
Altura total	2,5 – 3 m	Generadores	2000 – 4000 kg
		Peso total	12300 – 14400 kg

Tabla 3-18.- Espacio-Peso

3.6.4 Dimensionamiento de tanques y capacidades

Este paso es importante en el diseño de una planta propulsora, pues influirá en múltiples parámetros. Uno de ellos, la autonomía de nuestro buque en los momentos que por condiciones meteorológicas adversas no pueda navegar a vela. Para ello, se ha calculado el volumen de los tanques de combustible en función de la potencia nominal del motor de propulsión. Para este cálculo se ha empleado la Ecuación (3-35) [40].

$$Autonomía = \frac{\rho \cdot V_{comb} \cdot V_b}{P \cdot C_e} \quad (3-35)$$

Donde:

- ρ : densidad del combustible.
- V_{comb} : volumen del tanque de combustible.
- v : velocidad del barco.
- P : potencia nominal del motor.
- C_e : consumo específico de combustible.

El valor de autonomía lo vamos a establecer a 3100 MN siendo esta la distancia que separa los puertos de Santa Cruz de Tenerife en las Islas Canarias y Río de Janeiro, Brasil; ya que consideramos que va a ser capaz de satisfacer con ese valor todas las misiones requeridas. En la Figura 3-9 se puede ver la singladura mencionada desde las Islas Canarias hasta Brasil, recorriendo un total de 3100 MN en 30 días.

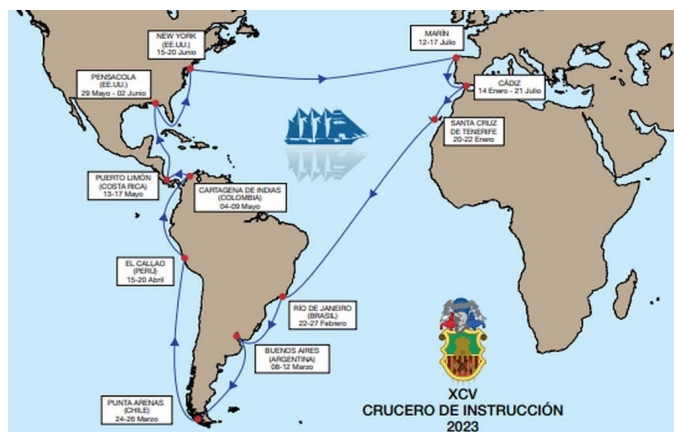


Figura 3-14.- Recorrido Santa Cruz de Tenerife - Río de Janeiro (Crucero XCV)

Una vez obtenido el consumo específico de combustible que es de $195 \text{ g/kW}\cdot\text{h}$, la potencia nominal del motor con un valor de 2700 kW y la densidad del diésel que es 850 Kg/m^3 . Despejamos el valor del volumen del tanque de combustible, por lo tanto, obtenemos la ecuación (3-36). Como tenemos un único motor, el volumen total será el volumen obtenido en la Ecuación (3-36).

$$V_{comb} = \frac{3100 \cdot 3600 \cdot 0,195}{850 \cdot 5,14} = 197 \text{ m}^3 \quad (3-36)$$

3.7 Presupuesto del proyecto

Es un componente fundamental en cualquier proyecto, especialmente en el ámbito naval. En la construcción de buques, se utiliza un cálculo de cifra de mérito que, en nuestro caso, al no tratarse de un buque destinado a actividades comerciales, no puede basarse en aspectos como el tipo de carga o el volumen de espacios asignados para ella. Por ello, optaremos por una evaluación económica basada en la exploración de la cifra de mérito. Este análisis incluye: la fabricación de aceros, los márgenes asociados a estos trabajos, el coste de los equipos y sistemas actuales, un conjunto de gastos variables y un beneficio industrial.

La distribución de costes se realiza tomando como referencia la estructura de grupos funcionales de sistemas utilizada por las marinas de la OTAN, junto con los costes asociados que se presentan. Dado que se trata de un presupuesto inicial en esta fase, los valores de los diferentes equipos y sistemas son aproximados (ligeramente superiores al coste real).

En la Tabla 3-19 se observa el presupuesto de construcción de nuestro barco. Todos los costes son costes de fabricantes basados en otros sistemas ya instalados en otros buques escuela similares. La tabla de costes detallada se encuentra en el Anexo VI.

Partida Presupuestaria	Valoración económica €
Grupo 100: estructura	8.449.500
Grupo 200: propulsión	580.000
Grupo 300: planta eléctrica	10.400.000
Grupo 400: mando y exploración	7.590.000
Grupo 500: sistemas auxiliares	20.600.000
Grupo 600: habitabilidad	16.000.000
Grupo 700: armas	100.000
Gastos variables	23.108.000
Beneficio Industrial	5.527.000
Coste de la construcción	92.354.500

Tabla 3-19.- Presupuesto de construcción

En la etapa de diseño conceptual, es necesario establecer un presupuesto preliminar basado en cifras redondas. Por ello, se ha definido un valor inicial de 92.354.500 € para este proyecto. Esta cantidad servirá como referencia durante las primeras fases, aunque deberá ajustarse de manera precisa al concluir la cuarta fase, antes de proceder a la contratación. Una vez fijado este presupuesto preliminar, se considera que la primera fase del proyecto de buques queda formalmente concluida.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Características de la plataforma

Tras los cálculos realizados en la fase de desarrollo, obtenemos los resultados mostrados en la para los distintos parámetros de nuestro buque en la Tabla 4-1.

Características Buque Escuela	Calculado	Obtenido
Loa (m)	116,500	
Lpp (m)	90,000	
B (m)	14,090	
T (m)	6,572	
P (m)	11,072	
Potencia (kW)	222,089	4215,81
Δ (t)	2514,079	3273,22
LS (t)	2275,240	
DW (t)	238,840	
Rt (N)	43174,470	
Av (m²)	3375,000	1850,538
LCG (m)	38,630	
Xcc (m)	-6,370	
KG (m)	6,310	
Autonomía (MN)	3100,000	
CE (m)	48,660	
Altura CE (m)	31,210	
Velocidad (kn)	10,000	

Tabla 4-1.- Características finales

4.1.1 Análisis de resultados: Comparativa con otros Buques Escuela similares

En la Tabla 4-2 se puede observar como nuestro Buque Escuela propuesto, se sitúa en un rango intermedio respecto a otros buques similares como son el Juan Sebastián Elcano, el BAP Unión o el ARA Libertad, sin embargo, optimizando su capacidad y eficiencia. Para validar la competitividad del diseño propuesto, se han comparado sus dimensiones y características principales como eslora, manga, calado, desplazamiento y superficie vélica entre otros.

Característica	Buque propuesto	JSE	Unión	ARA Libertad	Amerigo Vespucci	Gloria
Eslora (LOA)	116,50	113,10	115,75	103,70	101,00	76,80
Manga (B)	14,09	13,20	13,50	13,80	15,50	10,60
Calado (T)	6,572	7,00	6,50	6,60	7,30	5,70
Desplazamiento (Δ)	3273,22	3770,00	3200,00	3765,00	4100,00	1300,00
Velocidad (kn)	10,00	12,50	12,50	13,50	10,00	12,00
Autonomía (MN)	3100,00	10000,00	12000,00	12000,00	5430,00	6000,00
Superficie vélica (m ²)	2150,00	3153,00	3400,00	2650,00	2635,00	1300,00
Altura máxima de palos (m)	55,00	48,50	53,5	49,80	54,00	40,00

Tabla 4-2.- Análisis de resultados: comparativa

El buque propuesto tiene una eslora entre perpendiculares de 90 m lo que lo sitúa en un rango intermedio-alto entre los buques escuela modernos. Esto permite una buena relación entre la capacidad de carga y la maniobrabilidad. Con una manga de 14,09 metros, nuestro buque es ligeramente más ancho que el Juan Sebastián Elcano (13,20 m) y el ARA Libertad (13,80 m), lo que mejora la estabilidad transversal del mismo. El calado de 6,572 m es similar al de otros buques escuela, lo que permite operar en una amplia variedad de puertos y aguas costeras. En cuanto al puntal de 11,072 m es comparable al de otros barcos, lo que garantiza un espacio adecuado para la dotación y los sistemas de propulsión propuestos.

4.1.2 Impacto de los coeficientes de forma en la Resistencia al Avance y la Estabilidad

Los coeficientes de forma reflejados en la Tabla 4-2, son indicadores clave del rendimiento hidrodinámico y la estabilidad del buque. A continuación, se analiza cómo estos coeficientes afectan al diseño:

Coeficiente	Valor
Coeficiente de bloque (Cb)	0,30
Coeficiente prismático (Cp)	0,31
Coeficiente de la maestra (Cm)	0,94

Tabla 4-3.- Coeficientes de forma

Un Cb bajo (0,30) indica un casco más fino y alargado, lo que reduce la resistencia al avance y mejora la eficiencia hidrodinámica. Esto es especialmente importante en un buque escuela, donde la eficiencia energética es crucial. Por otra parte, su impacto en la estabilidad produce un centro de carena más bajo, lo que mejora la estabilidad inicial. Sin embargo, puede reducir la estabilidad a grandes ángulos de escora, por lo que es importante equilibrar este coeficiente con otros factores de diseño.

Al mismo tiempo, un Cp bajo (0,31) indica una distribución más uniforme del volumen a lo largo del casco, lo que reduce la resistencia por formación de olas y mejora la eficiencia en velocidades medias y altas. En cuanto a la estabilidad del buque, contribuye a una mejor distribución de la flotabilidad, lo que mejora la estabilidad longitudinal y reduce el cabeceo en condiciones de mar agitado.

Por último, un Cm alto (0,94) indica una sección media más llena, lo que puede aumentar la resistencia por fricción. Sin embargo, en un buque escuela, este coeficiente se compensa con un Cb bajo para mantener una resistencia total aceptable. El valor del Cm obtenido favorece una mayor estabilidad transversal, ya que aumenta el momento de inercia de la sección media. Esto es beneficioso para contrarrestar las fuerzas de escora generadas por el viento en las velas.

4.1.3 Innovación en velas rígidas y palos de carbono

Nuestro buque propuesto incorpora velas rígidas y palos de carbono, lo que representa una innovación significativa respecto a los buques escuela tradicionales. Entre las principales ventajas que encontramos en el modelo propuesto, cabe destacar:

- La eficiencia aerodinámica: las velas rígidas, basadas en perfiles NACA (0012, 6412, 2412), maximizan la sustentación y reducen la resistencia, lo que permite una navegación más eficiente.
- Reducción de peso: los palos de carbono son un 80% más ligeros que los de acero, lo que mejora la estabilidad y reduce el desplazamiento.
- Durabilidad y mantenimiento: la fibra de carbono es resistente a la corrosión y requiere menos mantenimiento, ideal para entornos marinos.
- Automatización: las velas rígidas pueden integrar sistemas de control electrónico para ajustar su orientación automáticamente, optimizando el rendimiento en diferentes condiciones de viento.

En comparación, el Juan Sebastián Elcano utiliza velas tradicionales de lona y palos de acero, lo que limita su eficiencia y aumenta los costes de mantenimiento.

4.1.4 Cumplimiento de normativas medioambientales

Nuestro diseño cumple con las normativas Tier II y Tier III del Convenio MARPOL, lo que garantiza un menor impacto ambiental. Esto es especialmente relevante en un buque escuela, que opera en áreas sensibles y realiza travesías largas. Las principales ventajas son:

- Reducción de emisiones: los motores CAT C280-8 y los generadores C9.3B cumplen con los límites de emisiones de NO_x y SO_x, alineándose con los objetivos de sostenibilidad de la Armada.
- Eficiencia energética: la propulsión mixta (vela-motor) reduce el consumo de combustible y aumenta la autonomía, lo que es crucial para misiones de larga duración.

En contraste, el Juan Sebastián Elcano, al ser un buque más antiguo, no cumple con estas normativas, lo que limita su operatividad en zonas de control de emisiones (ECA).

4.1.5 Estabilidad y maniobrabilidad

El diseño del buque optimiza la estabilidad mediante una distribución equilibrada de los pesos y un centro de gravedad bajo ($KG = 6.31$ m), lo que garantiza una excelente estabilidad inicial. Además, el centro de carena ($X_{cc} = -6.37$ m) está cercano al centro geométrico del buque, lo que contribuye a un comportamiento hidrostático equilibrado y reduce los momentos de escora en condiciones normales de navegación.

Respecto a la altura de los palos, los resultados iniciales obtenidos mediante las series sistemáticas sugieren alturas de 90 metros para el Palo Trinquete y el Palo Mayor 1, 76.5 metros para el Palo Mayor 2, y 67.5 metros para el Palo Mesana. Sin embargo, estas alturas están sobredimensionadas para la superficie vélica disponible y las necesidades operativas del buque. Por ello, se propone reducir las alturas a 55 metros para los tres primeros palos (de proa a popa) y a 45-50 metros para el Palo Mesana. Esta reducción no solo es suficiente para distribuir equilibradamente la superficie vélica, sino que también garantiza que el buque pueda pasar bajo los principales puentes que encuentra en sus rutas tradicionales, como:

- Puente de la Constitución en Cádiz (altura libre de 69 metros).
- Puente 25 de Abril en Lisboa.
- Golden Gate en San Francisco.

Con estas alturas ajustadas, el buque mantendrá un margen de seguridad de 2-3 metros al pasar bajo estos puentes, lo que asegura su operatividad en las rutas más frecuentadas por buques escuela. Además, la reducción de la altura de los palos contribuye a mejorar la estabilidad en condiciones de viento fuerte, ya que disminuye el brazo de palanca de las fuerzas aerodinámicas sobre las velas, reduciendo así los momentos de vuelco.

4.1.6 Potencia y autonomía

El buque propuesto cuenta con una potencia 4215,81 kW este valor ha sido estimado mediante la Ecuación (3-31) obtenida como regresión de la base de datos levantada con buques similares, lo que permite alcanzar una velocidad de hasta 15 nudos en condiciones adversas. Además, con una autonomía de 3100 MN, puede realizar travesías largas sin necesidad de reabastecimiento, como la ruta entre Santa Cruz de Tenerife y Río de Janeiro. En cambio, el Juan Sebastián Elcano tiene una autonomía de 10000 MN, pero su velocidad máxima es de 12,3 nudos, lo que limita su flexibilidad operativa. La Tabla 4-3 muestra una comparativa con los buques semejantes mencionados anteriormente para validar su competitividad.

Buque	Potencia (kW)	V _{máx} (kt)	Autonomía (MN)
Buque propuesto	4215,81	15,0	3100
JSE	2200,00	12,3	10000
ARA Libertad	2400,00	13,5	12000
BAP Unión	2600,00	12,5	12000
Amerigo Vespucci	1800,00	10,0	5430

Tabla 4-4.- Comparación de potencias

Por lo tanto, el buque propuesto tiene una potencia significativamente mayor (4215,81 kW) en comparación con el Juan Sebastián Elcano (2200 kW) y el ARA Libertad (2400 kW). Esto permite alcanzar su velocidad máxima de 15 nudos, superior a la de estos buques (12,3 y 13,5, respectivamente). Esta mayor potencia es especialmente útil en condiciones adversas, donde la velocidad puede ser crucial para evitar mal tiempo o realizar maniobras de emergencia. Sin embargo, considerando esta potencia obtenida ligeramente sobredimensionada y considerando el resto de resultados obtenidos y comparándolos a los de otros buques similares, el motor propuesto alcanza una potencial nominal máxima de 2700 kW ya que se ha considerado suficiente para nuestro buque.

Además, considerando la opción de una propulsión mixta mediante el diseño propuesto de propulsión e incorporación de velas rígidas, se pretende reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia energética. Esto es una ventaja significativa sobre los buques tradicionales, que dependen principalmente de motores diésel.

4.1.7 Análisis del Informe de Diseño Hidrostático

El informe de diseño hidrostático proporciona una visión detallada de las propiedades fundamentales del buque. Con una eslora de 100 metros de diseño y un calado de 6.5 metros, el desplazamiento alcanza las 3273.218 toneladas, un valor coherente con las expectativas del diseño. El coeficiente de bloque, que indica la relación entre el volumen desplazado y el paralelepípedo que lo contiene, es de 0.3509, lo que sugiere un casco relativamente fino, optimizado para minimizar la resistencia al avance. La altura metacéntrica transversal, clave para evaluar la estabilidad inicial, es de 6.055 metros, lo que confirma que el buque tiene una estabilidad adecuada para operar en diversas condiciones. Estos valores son consistentes con los cálculos realizados en la memoria, donde se obtuvo un coeficiente de bloque de 0.30 y una altura metacéntrica transversal similar. En conjunto, el diseño hidrostático cumple con los requisitos establecidos y refuerza la viabilidad del proyecto.

4.1.8 Análisis de los Cálculos de Resistencia

Los cálculos de resistencia, realizados mediante los métodos de la serie Delft y John Winters (KAPER), muestran cómo la resistencia total aumenta con la velocidad, alcanzando un máximo de 30.413 kN a 20 nudos según la serie Delft. La resistencia residual, que representa la contribución de la formación de olas, se vuelve significativa a velocidades superiores a 5 nudos, un comportamiento esperado en buques de este tipo. Estos resultados coinciden con los obtenidos en la memoria, donde se estimó una resistencia total de 43.174 kN a 10 nudos. La potencia efectiva requerida para superar esta resistencia es de 312.92 kW a 20 nudos, lo que está en línea con los cálculos previos, donde se proyectó una potencia máxima de 4215.81 kW. Estos datos confirman que el diseño del buque es eficiente en términos de resistencia y consumo energético, aspectos críticos para un buque escuela.

4.1.9 Análisis del Informe Hidrostático

El informe hidrostático detalla cómo varían las propiedades del buque en función del calado. A un calado de 6.5 metros, el desplazamiento es de 3273.218 toneladas, con un centro longitudinal de flotación (LCB) situado a 49.307 metros desde la popa. La altura metacéntrica longitudinal, que determina la estabilidad en el sentido longitudinal, es de 95.099 metros, un valor que indica una excelente estabilidad en este eje. Estos resultados son consistentes con los cálculos de la memoria, donde se obtuvo un LCB de 38.63 metros y una altura metacéntrica longitudinal similar. Además, el momento para cambiar el calado (MCT) es de 29.84 t·m/cm, lo que sugiere que el buque es sensible a los cambios de carga. Esta característica es especialmente relevante para un buque escuela, que debe adaptarse a diferentes configuraciones de peso y distribución de carga durante sus misiones.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Conclusiones

El diseño conceptual del buque escuela propuesto marca un hito en la evolución de la construcción naval, fusionando la tradición marinera con innovaciones tecnológicas que potencian la eficiencia, sostenibilidad y capacidad operativa. Las dimensiones principales (eslora de 90 m, manga de 14.09 m, calado de 6.572 m y puntal de 11.072 m) han sido optimizadas para maximizar el rendimiento en navegación a vela, mientras que la potencia de 4215.81 kW y la autonomía de 3100 MN aseguran un desempeño robusto en travesías largas y exigentes.

Una de las innovaciones más destacadas del diseño es la incorporación de velas rígidas y palos de fibra de carbono, que no solo mejoran la eficiencia aerodinámica, sino que también reducen el peso y los costes de mantenimiento. Estas tecnologías se alinean con las tendencias actuales de sostenibilidad y eficiencia energética, reforzadas por el cumplimiento de las normativas Tier II y III del Convenio MARPOL, que garantizan un impacto ambiental mínimo en un contexto global donde la reducción de emisiones es una prioridad.

En comparación con buques escuela emblemáticos como el Juan Sebastián Elcano, el ARA Libertad y el BAP Unión, el diseño propuesto destaca por su equilibrio entre tradición y modernidad. Mientras que el Juan Sebastián Elcano ofrece una autonomía de 10,000 MN, su velocidad máxima de 12.3 nudos limita su flexibilidad operativa. En contraste, el buque propuesto, con una velocidad de hasta 15 nudos y una autonomía de 3100 MN, está mejor adaptado para operar en condiciones adversas y realizar travesías largas sin necesidad de reabastecimiento frecuente.

5.2 Líneas futuras

El futuro de los buques escuela está marcado por la integración de tecnologías avanzadas y la adopción de prácticas más sostenibles. A continuación, se presentan algunas líneas futuras que podrían seguirse para mejorar aún más el diseño propuesto:

En primer lugar, la implementación de sistemas de automatización y control avanzados en los aparejos con velas rígidas permitiría optimizar su orientación en tiempo real, maximizando la eficiencia aerodinámica y reduciendo la dependencia del motor auxiliar. Ejemplos como el Sailing Yacht A, que utiliza sistemas electrónicos para movilizar sus velas rígidas, demuestran el potencial de esta tecnología.

En segundo lugar, la combinación de propulsión a vela con motores eléctricos y baterías de alta capacidad es una tendencia creciente. Buques como el Energy Observer, que emplea energía eólica, solar y de hidrógeno, ilustran cómo esta tecnología puede lograr una navegación completamente sostenible. Su integración en el diseño propuesto reduciría aún más el consumo de combustible y las emisiones.

En tercer lugar, el uso de materiales compuestos avanzados, como la fibra de carbono y resinas epoxi, no solo reduce el peso del buque, sino que también mejora su resistencia y durabilidad. Esta innovación es especialmente relevante en la construcción de palos y velas, donde la reducción de peso impacta directamente en la estabilidad y el rendimiento.

En cuarto lugar, los diseños modulares permiten adaptar el buque a diferentes misiones y condiciones operativas. Por ejemplo, módulos intercambiables para la formación de cadetes, misiones humanitarias o representación diplomática. Esta flexibilidad ya se ha implementado en buques como el BAP Unión, que combina funciones de buque escuela y hospital flotante.

En penúltimo lugar, la incorporación de sistemas de inteligencia artificial para la gestión de la navegación y el mantenimiento predictivo podría mejorar la eficiencia operativa y reducir costes a largo plazo. Algoritmos de IA para predecir condiciones meteorológicas y optimizar rutas ya se están explorando en buques comerciales.

Por último, la adopción de prácticas de economía circular, como el reciclaje de materiales y la reducción de residuos, es una tendencia creciente en la industria naval.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Sadurní, «Orígenes de la navegación,» National Geographic, 2024.
- [2] M. Mascort, «Así eran los barcos de los faraones del antiguo Egipto,» National Geographic, 2024.
- [3] Yachting, «<https://www.yachting.com/es>,» 2023. [En línea]. Available: https://www.yachting.com/es-es/news/history-of-sailingships?srsId=AfmBOooTrj8rT4HYWkml0-UGCrW_6YVva8tVh_LuA5tCAJPKhm_K3wwj . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [4] Armada de Chile, «<https://www.armada.cl>,» 2025. [En línea]. Available: https://www.armada.cl/armada/site/tax/port/all/taxport_30_32_1.html . [Último acceso: 3 marzo 2025].
- [5] Marina Militare, «<https://www.marina.difesa.it/Pagine/default.aspx>,» [En línea]. Available: <https://www.marina.difesa.it/noi-siamo-la-marina/pilastro-operativo/mezzi/forze-navali/Pagine/Vespucci.aspx> . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [6] Todo a babor, «<https://www.todoababor.es>,» [En línea]. Available: <https://www.todoababor.es/historia/buque-escuela-ruso-kruzenshtern/> . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [7] Marinha Portuguesa, «<https://www.marinha.pt>,» [En línea]. Available: https://www.marinha.pt/pt/os_meios/veleiros/Paginas/nrp-sagres.aspx . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [8] United States Coast Guard Academy, «<https://uscga.edu>,» [En línea]. Available: <https://uscga.edu/mission/eagle/about-eagle/> . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [9] M. d. Defensa, «[defensa.gob.es](https://www.defensa.gob.es),» [En línea]. Available: <https://www.defensa.gob.es/fuerzasarmadas/ar/> .
- [10] Ministerio de Defensa, «armada.defensa.gob.es,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/personalempleo/pr efLang-es/01oficiales> . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [11] Boletín Oficial del Estado, «Orden DEF/1453/2024, de 12 de diciembre, por la que se crea y regula la Comisión de Seguimiento de la Conmemoración del Centenario de la botadura y entrega a la Armada del buque-escuela «Juan Sebastián de Elcano»,» [En línea]. Available: https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2024-26702 . [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [12] Armada, «armada.defensa.gob.es,» [En línea]. Available: <https://armada.defensa.gob.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspannola/conocenosnoticias/ prefLang-es/00noticias--2017--03--NT035-90anos-JSElcano->

- [es?_selectedNodeID=2949095&_pageAction=selectItem&_pageNum=84¶mNo=000000.](#) [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [13] Armada, «Características del JSE,» 2024. [En línea]. Available: https://armada.defensa.gob.es/framework/skins/estaticos/imagenes/unidades/superficie/buques escuela/DOSSIER_XCV_CRUCERO_JSDE.pdf. [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [14] RAE, «Real Academia de la Lengua Española,» [En línea]. Available: <https://dpej.rae.es/lema/buque-escuela>. [Último acceso: 5 Marzo 2025].
- [15] Universidad de la Laguna, «<https://riull.ull.es>,» 2015. [En línea]. Available: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/1240/SISTEMAS+DE+PROPULSION+Y+CLASIFICACION+DE+BUQUES.pdf;jsessionid=4088E4140EAA344B39614EAB64A30524?sequence=1> [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [16] Agencia Estatal de Meteorología, «Aemet,» [En línea]. Available: https://www.aemet.es/documentos/es/conocermas/maritima/escalas_de_viento_y_oleaje.pdf. [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [17] ISSA, «International Sailing Schools Association,» [En línea]. Available: <https://issa.global>. [Último acceso: 20 Febrero 2025].
- [18] Campus Náutico, «Universidad de Cádiz,» [En línea]. Available: <https://campusnautico.uca.es/fundamentos-de-los-deportes-nauticos/navegacion/meteorologia/>. [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [19] Frydson Caicedo, G., & Jara Calderón, W. (1973). Diseño y Construcción de un velero Buque Escuela (Doctoral dissertation, ESPOL. FIMCM)., «Diseño y Construcción de un velero Buque Escuela,» 1973.
- [20] C. Reca Luque, «Reca Luque, C. (2020). Diseño y optimización de una vela rígida para propulsión de embarcaciones» Universidad de Almería, 2020.
- [21] Olivella Puig, J, «Olivella Puig, J. (2004). Teoría del buque. Flotabilidad y estabilidad. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.,» Universidad Politécnica de Cataluña, 2004.
- [22] Universidad de la Defensa, «Moovi Universidad de la Defensa,» [En línea]. Available: https://moovi.uvigo.gal/pluginfile.php/1693949/mod_resource/content/1/02_Geometria_carena.pdf. [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [23] Universidad de la Defensa, «Moovi Universidad de la Defensa,» [En línea]. Available: https://moovi.uvigo.gal/pluginfile.php/1693958/mod_resource/content/1/03_Estabilidad_transversal.pdf. [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [24] Universidad de la Defensa, «Moovi Universidad de la Defensa,» [En línea]. Available: https://moovi.uvigo.gal/pluginfile.php/1693964/mod_resource/content/1/04_Estabilidad_longitudinal_%28ESP%29.pdf. [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [25] Universidad de la Defensa, «Moovi Universidad de la Defensa,» [En línea]. Available: https://moovi.uvigo.gal/pluginfile.php/1693971/mod_resource/content/0/05_Estabilidad_averias_ESP.pdf. [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [26] Jaramillo Diaz, J. D., «Jaramillo Diaz, J. D., & Cardenas Bañol, H. A. (2015). Número de Reynolds.,» 2015.
- [27] Schäuuffelen, O., Chapman Great Sailing Ships of the World, Hearst Books., 2025.
- [28] International Naval Safety Association, «Naval Ship Code,» INSA.
- [29] Organización Marítima Internacional, «Convenio SOLAS,» OMI, 1974.
- [30] Organización Marítima Internacional, «Convencio MARPOL,» OMI, 1973.
- [31] Larsson, L. R., & Hoyte, C. , Principles of Naval Architecture Series-Ship Resistance and Flow (SNAME)., 2010.
- [32] Jose M^a González Álvarez-Campana, «Formas de cascos de embarcaciones rápidas,» Ministerio de Defensa, Cal de experiencias hidrodinámicas, El Pardo, 1991.
- [33] Papanikolaou, A., Ship design: methodologies of preliminary design, Springer, 2014.
- [34] Fabregas Claramunt, I., «Estudio métodos de predicción de resistencia al avance,» Universidad Politécnica de Cataluña, 2018.

- [35] Larreta Aldave, J. «La transición en el empleo del acero a los materiales compuestos en construcción naval.» 2023.
- [36] Modelismo Naval, «Modelismo Naval Metodología,» [En línea]. Available: <https://modelismoperianes.wordpress.com/2018/07/20/capitulo-34-el-centro-velico/> . [Último acceso: 9 Marzo 2025].
- [37] Caterpillar, «Caterpillar,» [En línea]. Available: https://www.cat.com/es_ES/products/new/power-systems/marine-power-systems/commercial-propulsion-engines/18393912.html . [Último acceso: 8 Febrero 2025].
- [38] Organización Marítima Internacional, «Convenio SOLAS,» OMI, 1914.
- [39] Centramar, «Reductora para trabajo intermedio y pesado Modelo MB270A MAX. 500 HP a 2500 RPM,» [En línea]. Available: <https://www.centramar.es/transmisiones-marinas/inversora-reductora-marina/reductora-para-trabajo-intermedio-y-pesado-modelo-mb270a-max-500-hp-a-2500-rpm/> . [Último acceso: 8 Febrero 2025].
- [40] Arbuties Herranz, G., & Caja Roca, G., «Proyecto de diseño preliminar de un yate de 40 metros de eslora,» Universidad Politécnica de Cataluña, 2015.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

El diseño conceptual de un Buque Escuela para la Armada no solo representa un desafío de ingeniería, sino que también conlleva relevantes implicaciones sociales, económicas y ambientales. Estas dimensiones son clave para evaluar la viabilidad del proyecto y su impacto en la formación de los futuros oficiales, la economía del sector naval y la sostenibilidad marítima.

El Buque Escuela desempeña un papel fundamental en la formación y capacitación de los futuros oficiales de la Armada, proporcionando un entorno práctico de aprendizaje donde se desarrollan habilidades esenciales en navegación, liderazgo y trabajo en equipo. Su diseño moderno permitirá integrar tecnologías avanzadas, optimizando la experiencia educativa y adaptándola a los desafíos operativos del siglo XXI. Además, el buque tendrá un impacto en la cooperación internacional, ya que este tipo de embarcaciones suelen participar en misiones diplomáticas, intercambios con academias navales extranjeras y eventos de proyección institucional. Esto fortalece la imagen de la Armada a nivel global y promueve la colaboración entre marinas de diferentes países. Por otro lado, la construcción y operación del buque generará empleo especializado en sectores como la ingeniería naval, la construcción de astilleros y la logística marítima, fomentando el desarrollo de la industria local y la especialización de la mano de obra.

Desde el punto de vista económico, la construcción de un Buque Escuela implica una inversión estratégica en la modernización de la flota. Si bien el desarrollo y la fabricación suponen un coste significativo inicial, su impacto a largo plazo en la preparación de los oficiales lo convierte en una inversión rentable. El empleo de tecnologías innovadoras, como velas rígidas y palos de carbono, permitirá reducir la dependencia de combustibles fósiles, disminuyendo los costes operativos en el tiempo. Asimismo, el proyecto puede impulsar la industria naval nacional, favoreciendo la contratación de empresas locales para el diseño, construcción y mantenimiento del buque, lo que repercute positivamente en la economía del sector.

Uno de los pilares fundamentales del diseño conceptual es su enfoque en la sostenibilidad ambiental. La implementación de velas rígidas y palos de carbono reduce la huella de carbono del buque, al aprovechar de manera más eficiente la propulsión eólica y minimizar el consumo de combustibles. Además, la aplicación de tecnologías de gestión de residuos y eficiencia energética contribuirá a la reducción del impacto ambiental en los ecosistemas marinos. La optimización de materiales y procesos constructivos también permitirá minimizar el desperdicio de recursos, alineándose con los objetivos de desarrollo sostenible. Por otro lado, el buque servirá como plataforma educativa para fomentar la conciencia ambiental entre los futuros oficiales, promoviendo prácticas de navegación responsables y la adopción de soluciones tecnológicas respetuosas con el medio ambiente.

El diseño conceptual del Buque Escuela propuesto en este TFG presenta un equilibrio entre innovación, funcionalidad y sostenibilidad. Sus implicaciones sociales fortalecen la formación naval y la cooperación internacional; sus beneficios económicos optimizan los recursos y potencian la industria naval; y su impacto ambiental positivo lo posiciona como un modelo de buque eficiente y ecológicamente responsable. Este enfoque integral garantiza que la embarcación cumpla con los requisitos operativos de la Armada, al tiempo que contribuye al desarrollo tecnológico, económico y sostenible del sector marítimo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El diseño de un Buque Escuela para la Armada no solo representa un reto de ingeniería, sino que también conlleva importantes reflexiones éticas y sociales. Más allá de ser una plataforma de formación, este tipo de embarcación se convierte en un entorno donde los futuros oficiales desarrollan habilidades esenciales para su carrera y adquieren valores fundamentales como la responsabilidad, el liderazgo y el compromiso con el servicio.

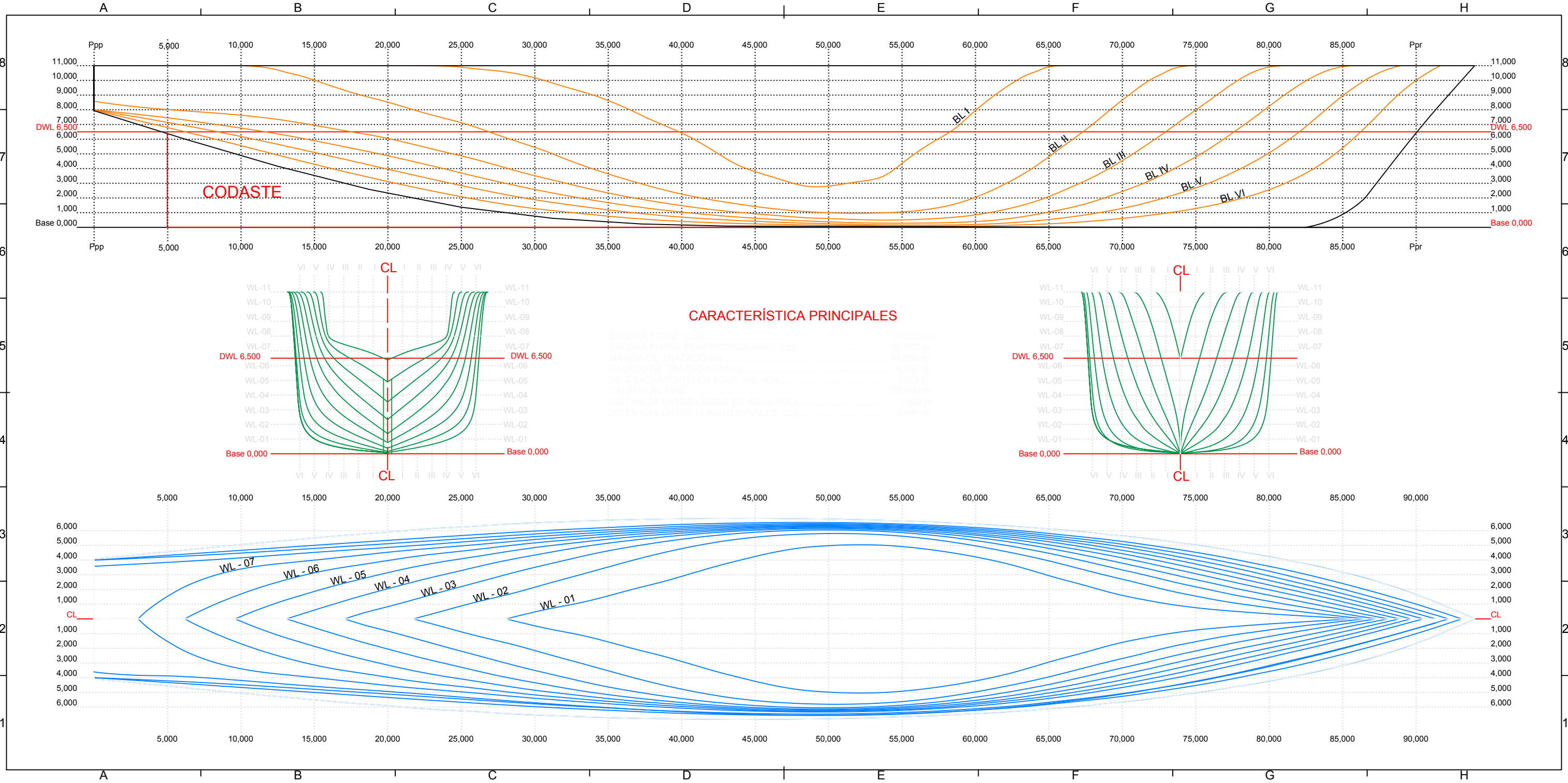
Vivir y formarse en un Buque Escuela supone un aprendizaje que va mucho más allá de lo técnico. En un entorno confinado y demandante, los alumnos aprenden a trabajar en equipo, a tomar decisiones en situaciones de tensión y a asumir responsabilidades de manera ética. La convivencia a bordo refuerza valores clave como el respeto, la disciplina y la resiliencia, que serán esenciales en su futuro desempeño como oficiales. El compromiso con la ética profesional y el respeto a los derechos humanos son aspectos fundamentales que deben estar presentes en su formación. Durante la travesía, se enfrentan a situaciones que ponen a prueba su carácter y su capacidad de liderazgo, por lo que es crucial que el diseño del buque favorezca un ambiente propicio para este desarrollo personal y profesional.

Las Fuerzas Armadas han avanzado en materia de igualdad e inclusión, y un Buque Escuela debe reflejar esta evolución. El diseño de la embarcación debe contemplar espacios equitativos a la vez que diferenciados tanto para damas como para caballeros de acuerdo a la proporción en la que se encuentran. Fomentar un entorno de aprendizaje equitativo no solo fortalece la cohesión dentro de la Armada, sino que también mejora la preparación de sus oficiales para afrontar desafíos en un mundo cada vez más globalizado.

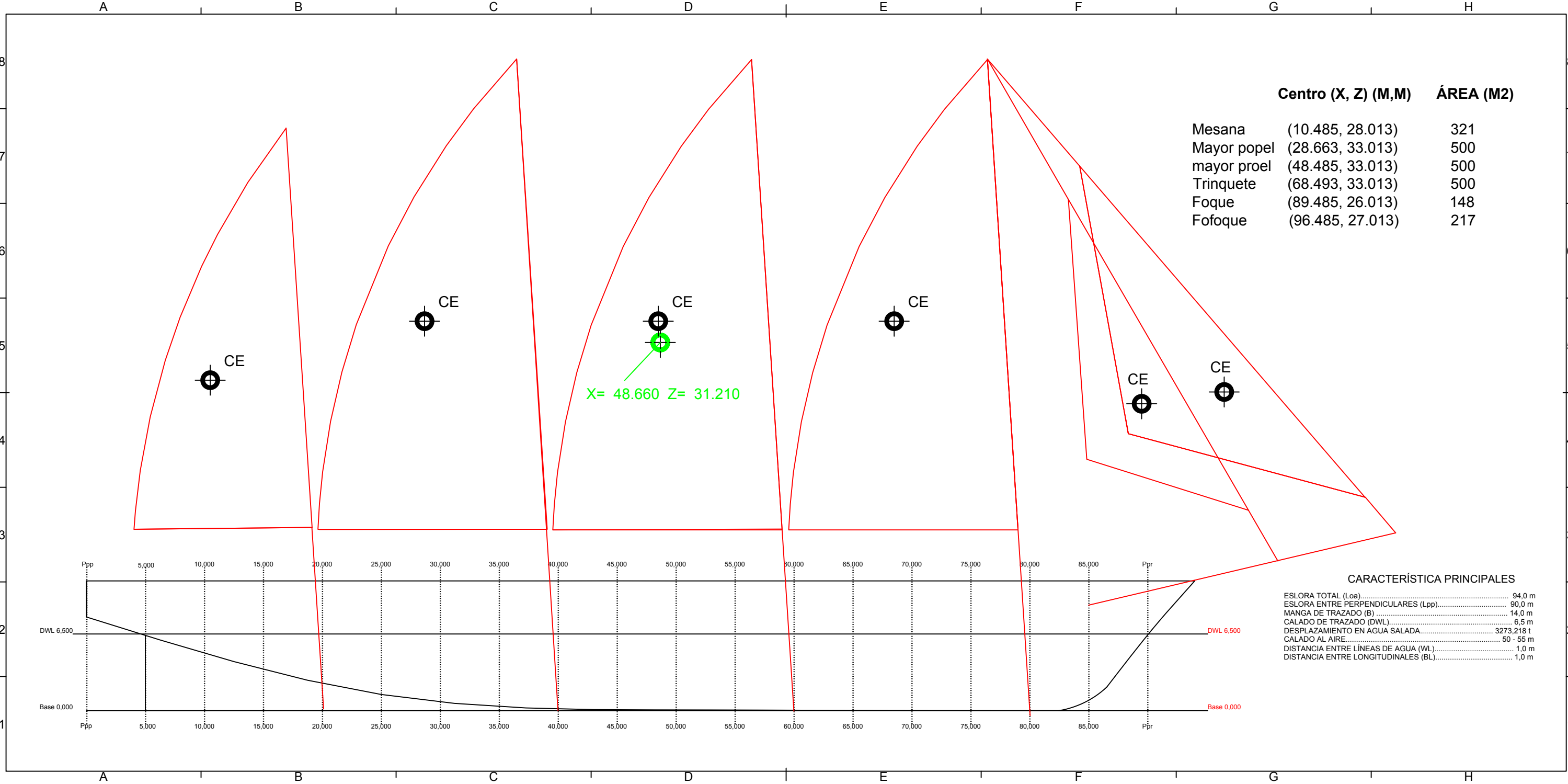
Además de su papel formativo, los Buques Escuela cumplen una función social importante. Participan en misiones diplomáticas, eventos internacionales y programas de cooperación, contribuyendo a fortalecer la imagen institucional de la Armada y estrechar lazos con otras naciones. Su diseño y operatividad deben estar alineados con principios de sostenibilidad y compromiso con la sociedad. Por otro lado, el bienestar de la dotación es un aspecto clave que no puede pasarse por alto. La vida en el mar puede ser exigente, por lo que es fundamental garantizar condiciones adecuadas a bordo, desde espacios cómodos hasta protocolos de seguridad efectivos.

El desarrollo de un Buque Escuela no es solo un desafío tecnológico, sino también una oportunidad para reforzar valores fundamentales en la formación de los futuros oficiales. Asegurar una formación ética, promover la inclusión, garantizar la seguridad y fomentar la responsabilidad social son elementos clave para que este proyecto no solo sirva a la Armada, sino que también tenga un impacto positivo en la sociedad.

ANEXO III: PLANO DE FORMAS



ANEXO IV: PLANO VÉLICO



ANEXO V: CARTILLA DE TRAZADO

Fom App to fore

Station :5,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
4,573 11,000	5	4,573	11
4,523 10,992	5	4,523	10,992
4,472 10,932	5	4,472	10,932
4,421 10,768	5	4,421	10,768
4,370 10,450	5	4,37	10,45
4,317 9,944	5	4,317	9,944
4,253 9,296	5	4,253	9,296
4,158 8,580	5	4,158	8,58
3,967 7,921	5	3,967	7,921
3,458 7,613	5	3,458	7,613
2,871 7,410	5	2,871	7,41
2,288 7,238	5	2,288	7,238
1,742 7,074	5	1,742	7,074
1,254 6,906	5	1,254	6,906
0,814 6,732	5	0,814	6,732
0,406 6,555	5	0,406	6,555
0,013 6,375	5	0,013	6,375

Station :10,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
5,051 11,001	10	5,051	11,001
4,973 10,991	10	4,973	10,991
4,894 10,925	10	4,894	10,925
4,813 10,745	10	4,813	10,745
4,727 10,396	10	4,727	10,396
4,632 9,841	10	4,632	9,841
4,515 9,139	10	4,515	9,139
4,349 8,379	10	4,349	8,379
4,074 7,690	10	4,074	7,69
3,629 7,189	10	3,629	7,189
3,090 6,811	10	3,09	6,811
2,526 6,484	10	2,526	6,484
1,973 6,174	10	1,973	6,174
1,451 5,860	10	1,451	5,86
0,956 5,541	10	0,956	5,541
0,479 5,217	10	0,479	5,217
0,010 4,888	10	0,01	4,888

Station :15,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
5,501 11,001	15	5,501	11,001
5,401 10,990	15	5,401	10,99
5,297 10,918	15	5,297	10,918
5,189 10,720	15	5,189	10,72

5,710	10,187	25	5,71	10,187
5,860	10,658	25	5,86	10,658
5,998	10,899	25	5,998	10,899
6,129	10,988	25	6,129	10,988
6,256	11,001	25	6,256	11,001

Station :30,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
6,514 11,001		30	6,514 11,001
6,390 10,986		30	6,39 10,986
6,263 10,887		30	6,263 10,887
6,128 10,617		30	6,128 10,617
5,981 10,090		30	5,981 10,09
5,817 9,256		30	5,817 9,256
5,631 8,207		30	5,631 8,207
5,416 7,074		30	5,416 7,074
5,166 5,989		30	5,166 5,989
4,872 5,055		30	4,872 5,055
4,512 4,266		30	4,512 4,266
4,057 3,585		30	4,057 3,585
3,478 2,978		30	3,478 2,978
2,753 2,414		30	2,753 2,414
1,907 1,880		30	1,907 1,88
0,977 1,366		30	0,977 1,366
0,001 0,863		30	0,001 0,863

Station :35,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
6,695 11,001		35	6,695 11,001
6,583 10,985		35	6,583 10,985
6,468 10,874		35	6,468 10,874
6,345 10,574		35	6,345 10,574
6,212 9,989		35	6,212 9,989
6,063 9,062		35	6,063 9,062
5,898 7,900		35	5,898 7,9
5,716 6,651		35	5,716 6,651
5,515 5,464		35	5,515 5,464
5,288 4,458		35	5,288 4,458
4,993 3,626		35	4,993 3,626
4,580 2,934		35	4,58 2,934
3,995 2,343		35	3,995 2,343
3,201 1,820		35	3,201 1,82
2,234 1,347		35	2,234 1,347
1,148 0,908		35	1,148 0,908
0,001 0,489		35	0,001 0,489

Station :40,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
6,798 11,001	40	6,798	11,001
6,705 10,983	40	6,705	10,983
6,608 10,862	40	6,608	10,862
6,504 10,533	40	6,504	10,533
6,390 9,891	40	6,39	9,891
6,264 8,875	40	6,264	8,875
6,126 7,607	40	6,126	7,607
5,980 6,249	40	5,98	6,249
5,830 4,970	40	5,83	4,97
5,667 3,900	40	5,667	3,9
5,433 3,037	40	5,433	3,037
5,057 2,344	40	5,057	2,344
4,465 1,782	40	4,465	1,782
3,607 1,317	40	3,607	1,317
2,530 0,924	40	2,53	0,924
1,303 0,581	40	1,303	0,581
0,000 0,264	40	0	0,264

Station :45,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
6,825 11,001	45	6,825	11,001
6,752 10,982	45	6,752	10,982
6,676 10,852	45	6,676	10,852
6,594 10,498	45	6,594	10,498
6,501 9,810	45	6,501	9,81
6,397 8,722	45	6,397	8,722
6,285 7,364	45	6,285	7,364
6,171 5,917	45	6,171	5,917
6,062 4,559	45	6,062	4,559
5,948 3,434	45	5,948	3,434
5,759 2,541	45	5,759	2,541
5,408 1,846	45	5,408	1,846
4,809 1,313	45	4,809	1,313
3,903 0,908	45	3,903	0,908
2,744 0,600	45	2,744	0,6
1,415 0,358	45	1,415	0,358
0,000 0,151	45	0	0,151

Station :50,000

Number of segments :1

Segment 1	x	y	z
6,778 11,001	50	6,778	11,001
6,722 10,981	50	6,722	10,981
6,663 10,846	50	6,663	10,846
6,597 10,478	50	6,597	10,478
6,520 9,762	50	6,52	9,762
6,431 8,632	50	6,431	8,632
	50	6,334	7,223

6,334	7,223	50	6,236	5,72
6,236	5,720	50	6,142	4,307
6,142	4,307	50	6,042	3,133
6,042	3,133	50	5,863	2,205
5,863	2,205	50	5,514	1,492
5,514	1,492	50	4,907	0,968
4,907	0,968	50	3,982	0,605
3,982	0,605	50	2,797	0,366
2,797	0,366	50	1,441	0,211
1,441	0,211	50	0	0,101
0,000	0,101			

Station :55,000

Number of segments :1	x	y	z
Segment 1		55	6,653
6,653	11,001	55	6,606
6,606	10,981	55	6,554
6,554	10,846	55	6,494
6,494	10,480	55	6,421
6,421	9,767	55	6,331
6,331	8,643	55	6,228
6,228	7,239	55	6,115
6,115	5,733	55	5,997
5,997	4,303	55	5,86
5,860	3,091	55	5,641
5,641	2,114	55	5,26
5,260	1,355	55	4,642
4,642	0,804	55	3,74
3,740	0,444	55	2,613
2,613	0,233	55	1,34
1,340	0,124	55	0
0,000	0,067		

Station :60,000

Number of segments :1	x	y	z
Segment 1		60	6,436
6,436	11,001	60	6,387
6,387	10,982	60	6,333
6,333	10,854	60	6,267
6,267	10,505	60	6,184
6,184	9,829	60	6,079
6,079	8,763	60	5,951
5,951	7,427	60	5,8
5,800	5,981	60	5,624
5,624	4,582	60	5,411
5,411	3,356	60	5,114
5,114	2,328	60	4,678
4,678	1,502	60	4,055
4,055	0,886	60	3,219
3,219	0,481	60	2,221

2,221	0,243	60	1,128	0,116
1,128	0,116	60	0	0,042
0,000	0,042			

Station :65,000

Number of segments :1	x	y	z
Segment 1		65	0
0,000	0,025	65	0,877
0,877	0,208	65	1,751
1,751	0,434	65	2,581
2,581	0,766	65	3,32
3,320	1,263	65	3,927
3,927	1,970	65	4,407
4,407	2,869	65	4,779
4,779	3,934	65	5,072
5,072	5,141	65	5,312
5,312	6,457	65	5,51
5,510	7,780	65	5,672
5,672	8,986	65	5,801
5,801	9,944	65	5,902
5,902	10,553	65	5,981
5,981	10,867	65	6,046
6,046	10,984	65	6,103
6,103	11,001		

Station :70,000

Number of segments :1	x	y	z
Segment 1		70	5,634
5,634	11,001	70	5,563
5,563	10,986	70	5,484
5,484	10,886	70	5,389
5,389	10,618	70	5,269
5,269	10,103	70	5,117
5,117	9,295	70	4,928
4,928	8,269	70	4,696
4,696	7,121	70	4,416
4,416	5,938	70	4,082
4,082	4,787	70	3,681
3,681	3,709	70	3,206
3,206	2,742	70	2,653
2,653	1,930	70	2,034
2,034	1,312	70	1,368
1,368	0,827	70	0,681
0,681	0,415	70	0
0,000	0,014		

Station :75,000

Number of segments :1	x	y	z
Segment 1		75	5,008
5,008	11,001	75	4,925

4,925	10,987	75	4,832	10,906
4,832	10,906	75	4,723	10,693
4,723	10,693	75	4,59	10,287
4,590	10,287	75	4,424	9,654
4,424	9,654	75	4,221	8,84
4,221	8,840	75	3,979	7,901
3,979	7,901	75	3,695	6,883
3,695	6,883	75	3,366	5,82
3,366	5,820	75	2,989	4,758
2,989	4,758	75	2,567	3,749
2,567	3,749	75	2,101	2,839
2,101	2,839	75	1,593	2,057
1,593	2,057	75	1,06	1,361
1,060	1,361	75	0,523	0,694
0,523	0,694	75	0	0,006
0,000	0,006			

Station :80,000

Number of segments :1

	x	y	z
Segment 1		80	0
0,000	0,002	80	0,359
0,359	1,040	80	0,755
0,755	1,997	80	0,977
0,977	2,508	80	1,163
1,163	2,922	80	1,557
1,557	3,864	80	1,927
1,927	4,859	80	2,27
2,270	5,883	80	2,586
2,586	6,895	80	2,877
2,877	7,845	80	3,144
3,144	8,688	80	3,34
3,340	9,283	80	3,382
3,382	9,413	80	3,582
3,582	10,008	80	3,751
3,751	10,461	80	3,892
3,892	10,756	80	4,009
4,009	10,917	80	4,111
4,111	10,983	80	4,206
4,206	11,000		

Station :85,000

Number of segments :1

	x	y	z
Segment 1		85	3,169
3,169	11,000	85	3,06
3,060	10,964	85	2,946
2,946	10,895	85	2,818
2,818	10,764	85	2,672
2,672	10,548	85	2,504
2,504	10,230	85	2,314
2,314	9,802	85	2,107

2,107	9,258	85	1,887	8,588
1,887	8,588	85	1,659	7,786
1,659	7,786	85	1,407	6,871
1,407	6,871	85	1,14	5,904
1,140	5,904	85	0,861	4,908
0,861	4,908	85	0,573	3,848
0,573	3,848	85	0,303	2,75
0,303	2,750	85	0,112	1,642
0,112	1,642	85	0,092	1,484
0,092	1,484	85	0	0
0,000	0,000			

Station :90,000

Number of segments :1

	x	y	z
Segment 1		90	11
1,649	11,000	90	10,906
1,550	10,906	90	10,788
1,443	10,788	90	10,631
1,329	10,631	90	10,419
1,203	10,419	90	10,139
1,063	10,139	90	9,779
0,912	9,779	90	9,334
0,755	9,334	90	8,804
0,595	8,804	90	8,787
0,590	8,787	90	8,187
0,426	8,187	90	7,508
0,254	7,508	90	6,763
0,077	6,763	90	6,405
0,000	6,405		

ANEXO VI: PRESUPUESTO

PARTIDA PRESUPUESTARIA	VALORACIÓN ECONÓMICA				
Grupo 100: estructura	8.449.500	€/Tn	Tn	€	
Acero del casco	6.045.000	6.500	930	6.045.000	
Superestructuras	1.800.000	12.000	150	1.800.000	
Soldadura (10% acero del casco)	604.500	6.500	93	604.500	8.449.500
Grupo 200: propulsión	580.000	Unidad	Valor u. €	Valor en €	
Motor diésel	500.000	1	500.000	500.000	
Reductora	80.000	1	80.000	80.000	
Grupo 300: planta eléctrica	10.400.000				
Sistema de distribución	10.000.000	1	10.000.000	10.000.000	
Diésel Generadores	400.000	2	200.000	400.000	
Grupo 400: mando y exploración	7.590.000				
Navegación	250.000	1	250.000	250.000	
Velas	1.650.000	6	275.000	1.650.000	
Palos	5.000.000	4	1.250.000	5.000.000	
Margen	690.000	1	690.000	690.000	
Grupo 500: sistemas auxiliares	20.600.000				
Equipos auxiliares	10.000.000	1	10.000.000	10.000.000	
Servicios del buque	10.000.000	1	10.000.000	10.000.000	
Embarcación SAR	600.000	2	300.000	600.000	
Grupo 600: habitabilidad	16.000.000				
Equipamiento de habitabilidad	8.000.000	1	8.000.000	8.000.000	
Módulo de habitabilidad	8.000.000	1	8.000.000	8.000.000	
Grupo 700: armas	100.000				
Browning 12,7 mm	60.000	2	30.000	60.000	
MG-1 7,62 mm	40.000	2	20.000	40.000	55.270.000
Gastos varibales	23.108.000	Coef	CC	Valor en €	
Estudios especiales y ensayos	11.054.000	0,20	55.270.000	11.054.000	
Ingeniería, Clasificación	11.054.000	0,20	55.270.000	11.054.000	
Representación	1.000.000	1.000.000	Gastos Gobierno		23.108.000
Beneficio Industrial	5.527.000		Coef	CC	
10% del coste de la construcción	5.527.000		0,25	22.108.000	5.527.000
				Coste buque	92.354.500

ANEXO VII: INFORME HIDROSTÁTICO

Informe de diseño hidrostático

Buque Escuela

Diseñador	AF Mustafá López		
Creado por	AF Mustafá López		
Comentario	TFG 2025		
Nombre de archivo	Modelo definitivo.fbm		
Longitud de diseño	100,000 m	Ubicación de sección central	50,000 m
Longitud del modelo de flotabilidad	94,000 m	Densidad del agua	1,0250
Diseño del bao	14,000 m	Grosor medio del casco	0,0000 m
Máximo bao	13,668 m	Coefficiente del apéndice	1,0000
Calado de diseño	6,500 m		

Volume properties		Propiedades de flotación	
Volumen moldeado	3193,383 m ³	Longitud de línea de flotación	85,455 m
Volumen total desplazado	3193,383 m ³	Haz en línea de flotación	12,607 m
Desplazamiento	3273,218 t	Ángulo de entrada	14,9 Girar 1 grado en sentido horario.
Coefficiente de bloque	0,3509	Área de plano de agua	746,03 m ²
Coefficiente prismático	0,4420	Coefficiente de flotación	0,5329
Coefficiente prismático vertical	0,6585	Centro de flotación del plano de aguas	45,941 m
Superficie húmeda	1309,63 m ²	Momento de inercia transversal	6811,097 m ⁴
Centro longitudinal de flotación	49,307 m	Momento de inercia longitudinal	291163,841 m ⁴
Centro longitudinal de flotación	-0,811 %		
Centro vertical de flotación	3,922 m		

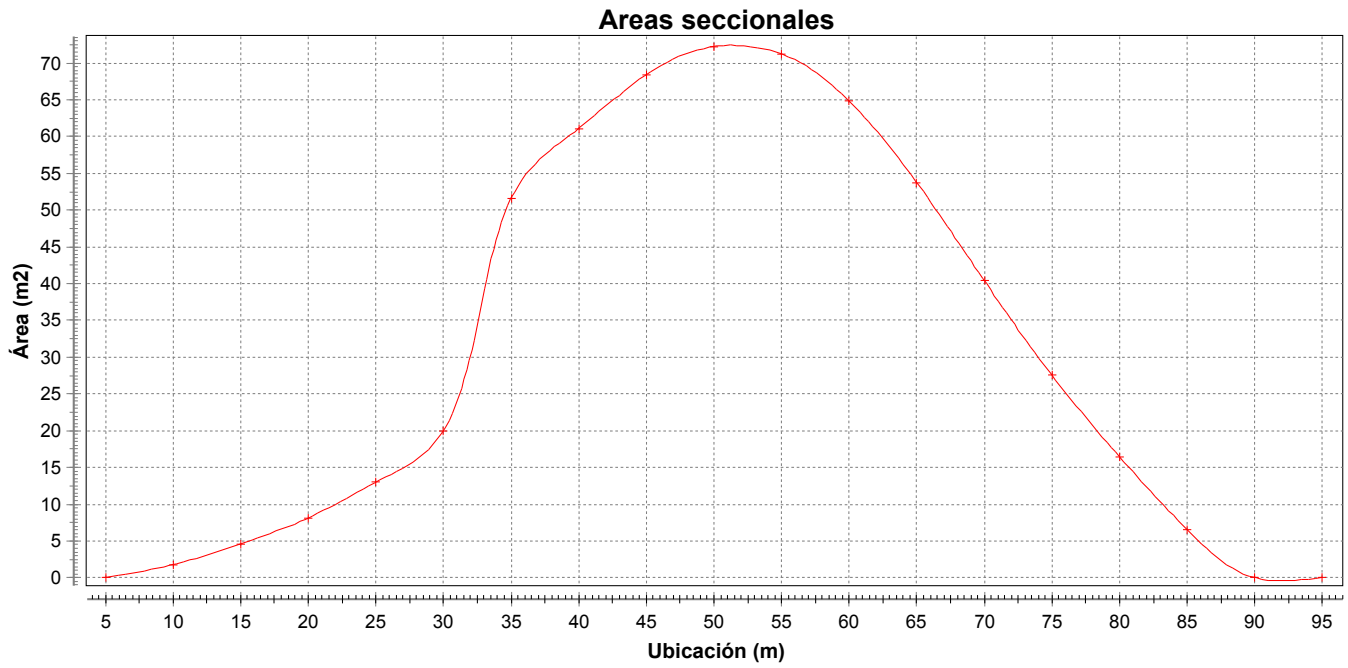
Propiedades de crujía		Estabilidad inicial	
Sección del área de crujía	72,25 m ²	Altura metacentrica transversal	6,055 m
Coefficiente de crujía	0,7940	Altura metacentrica longitudinal	95,099 m

Plano lateral	
Área lateral	248,27 m ²
Centro longitudinal de resistencia lateral	66,925 m
Centro vertical de resistencia lateral	2,848 m

Las siguientes propiedades de capa se calculan para ambos lados del barco

Ubicación	Área	Espesor	Peso	CGL (Centro Gravedad Longitudinal)	CGT (Centro Gravedad Transversal)	CGV (Centro Gravedad Vertical)
	m ²	m	t	m	m	m
Capa 0	2256,86	0,000	0,000	47,066	0,000 (CL)	5,396

Areas seccionales									
Ubicación	Área	Ubicación	Área	Ubicación	Área	Ubicación	Área	Ubicación	Área
m	m ²	m	m ²	m	m ²	m	m ²	m	m ²
5,000	0,02	25,000	13,01	45,000	68,43	65,000	53,73	85,000	6,53
10,000	1,79	30,000	19,99	50,000	72,25	70,000	40,39	90,000	0,00
15,000	4,62	35,000	51,58	55,000	71,25	75,000	27,53	95,000	0,00
20,000	8,15	40,000	61,12	60,000	64,84	80,000	16,46		



NOTA 1: El calado (y todas las demás alturas verticales) se mide desde la base $Z=0,000$

NOTA 2: Todos los coeficientes calculados en función de la longitud del proyecto, calado y bao.

ANEXO VIII: HIDROSTÁTICAS

Hidrostáticas

Densidad del agua : 1,0250

Ajustar: 0,000 m

Calado	Mostrar FW	Displ.	LCB	VCB	TCB	KMt	KMI	MCT	TpCm
m	t	t	m	m	m	m	m	t*m/cm	t/cm
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00	0,000
0,500	46,598	47,763	55,245	0,339	0,000	12,441	316,546	1,51	1,867
1,000	164,731	168,849	54,172	0,648	0,000	9,758	201,495	3,39	2,964
1,500	328,102	336,305	53,410	0,952	0,000	8,087	159,355	5,33	3,735
2,000	524,655	537,772	52,821	1,253	0,000	7,045	136,742	7,29	4,332
2,500	747,306	765,989	52,338	1,551	0,000	6,378	122,680	9,28	4,820
3,000	992,321	1017,129	51,904	1,848	0,000	5,978	113,174	11,32	5,244
3,500	1256,774	1288,194	51,505	2,144	0,000	5,731	106,359	13,42	5,616
4,000	1538,874	1577,346	51,130	2,439	0,000	5,624	101,580	15,64	5,966
4,500	1837,373	1883,307	50,770	2,733	0,000	5,601	98,314	18,00	6,301
5,000	2152,046	2205,847	50,415	3,029	0,000	5,646	96,051	20,52	6,627
5,500	2482,935	2545,008	50,056	3,325	0,000	5,748	94,874	23,30	6,960
6,000	2829,715	2900,457	49,689	3,623	0,000	5,885	94,576	26,38	7,297
6,500	3193,383	3273,218	49,307	3,922	0,000	6,055	95,099	29,84	7,647

NOTA 1: El calado (y todas las demás alturas verticales) se mide desde la base Z=0,000

NOTA 2: Todos los coeficientes calculados en función de la longitud del proyecto, calado y bao.

Nomenclatura

Calado	<i>Calado moldeado medido desde el inicio</i>
Mostrar FW	<i>Desplazamiento de agua dulce</i>
Displ.	<i>Desplazamiento</i>
LCB	<i>Centro longitudinal de flotación, medido desde la popa perpendicular a X = 0.0</i>
VCB	<i>Centro vertical de flotación</i>
TCB	<i>Centro transsversal de flotación</i>
KMt	<i>Altura metacentrica transversal</i>
KMI	<i>Altura metacentrica longitudinal</i>
MCT	<i>Momento de cambiar una unidad</i>
TpCm	<i>Peso para cambiar la inmersión una unidad</i>

ANEXO IX: INFORME DE RESISTENCIA

Cálculos de resistencia.

Delft Series ('98).

Cantidad de puntos en cada lomo Delft Series ('98)						
Velocidad	Velocidad	Número de Froude	Resistencia a la fricción	Resistencia residual	Resistencia total	Potencia efectiva
kn	m/sec		kN	kN	kN	kW
0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
1,00	0,51	0,022	0,118	0,000	0,118	0,06
2,00	1,03	0,043	0,424	0,000	0,424	0,44
3,00	1,54	0,065	0,896	0,000	0,896	1,38
4,00	2,06	0,086	1,525	0,000	1,525	3,14
5,00	2,57	0,108	2,306	0,286	2,592	6,67
6,00	3,09	0,130	3,233	1,746	4,980	15,37
7,00	3,60	0,151	4,305	3,132	7,436	26,78
8,00	4,12	0,173	5,517	3,410	8,926	36,74
9,00	4,63	0,195	6,867	3,687	10,555	48,87
10,00	5,14	0,216	8,354	3,836	12,191	62,71
11,00	5,66	0,238	9,976	3,943	13,919	78,77
12,00	6,17	0,259	11,731	6,109	17,840	110,13
13,00	6,69	0,281	13,617	10,908	24,526	164,02
14,00	7,20	0,303	15,634	14,679	30,313	218,32
15,00	7,72	0,324	17,780	11,368	29,148	224,92
16,00	8,23	0,346	20,054	8,056	28,110	231,38
17,00	8,75	0,368	22,455	0,000	22,455	196,39
18,00	9,26	0,389	24,983	0,000	24,983	231,34
19,00	9,77	0,411	27,636	0,000	27,636	270,13
20,00	10,29	0,432	30,413	0,000	30,413	312,92

John Winters (KAPER).

Cantidad de puntos en cada lomo John Winters (KAPER)					
Velocidad	Velocidad	Número de Froude	Resistencia a la fricción	Resistencia residual	Resistencia total
kn	m/sec		kN	kN	kN
0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
1,00	0,514	0,022	0,112	0,000	0,112
2,00	1,029	0,043	0,401	0,000	0,401
3,00	1,543	0,065	0,849	0,000	0,849
4,00	2,058	0,086	1,447	0,000	1,447
5,00	2,572	0,108	2,190	0,000	2,190
6,00	3,087	0,130	3,073	0,000	3,073
7,00	3,601	0,151	4,094	0,000	4,094
8,00	4,116	0,173	5,249	0,000	5,249
9,00	4,630	0,195	6,536	0,000	6,536
10,00	5,144	0,216	7,955	0,000	7,955
11,00	5,659	0,238	9,502	0,000	9,502
12,00	6,173	0,259	11,176	0,000	11,176
13,00	6,688	0,281	12,977	0,000	12,977
14,00	7,202	0,303	14,903	0,000	14,903
15,00	7,717	0,324	16,952	0,000	16,952
16,00	8,231	0,346	19,124	0,000	19,124
17,00	8,746	0,368	21,418	0,000	21,418
18,00	9,260	0,389	23,833	0,000	23,833
19,00	9,774	0,411	26,368	0,000	26,368