



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Rediseño de la planta propulsora de la plataforma RODMAN 66
para la implementación de combustibles marinos alternativos.*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Alfonso Menéndez de Luearca Moreno

DIRECTORES: Carlos Pérez Collazo

Pedro Carrasco Pena

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Rediseño de la planta propulsora de la plataforma RODMAN 66
para la implementación de combustibles marinos alternativos.*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

El sector económico-industrial se desplaza alineado con el vector energético, en busca de la neutralidad climática, donde el hidrógeno renovable está llamado a ser una solución eficiente y sostenible en el proceso de descarbonización. En este trabajo se va a estudiar las alternativas que ofrecen los combustibles marinos alternativos en el sector marítimo, con la finalidad de implementar una planta propulsora en una plataforma marina como son las lanchas de instrucción RODMAN 66. El objetivo que se espera alcanzar es la adaptación total de las lanchas de instrucción a una propulsión basada en el hidrógeno, buscando el máximo aprovechamiento energético de dicho elemento. Para ello, se llevará a cabo un estudio de las alternativas que nos ofrece el hidrógeno como combustible, analizando cual será la más idónea entre el hidrógeno gas, el amoníaco y el metanol verde. Así, con la alternativa escogida como base, se diseñará una planta propulsora en base a la plataforma expuesta, optimizando mediante software especializado como Autodesk Inventor que determinará la disposición más adecuada considerando la dificultad que conlleva el uso de un nuevo combustible en términos de su manejo y almacenamiento. Finalmente, tras el análisis y desarrollo se concluye con una posible implementación en las unidades de la flota, remarcando la importancia de fomentar el desarrollo gradual de los combustibles alternativos como materia prima en el sector industrial.

PALABRAS CLAVE

Hidrógeno, Aprovechamiento energético, Combustible, Planta propulsora, Materia prima.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis dos tutores Carlos y Pedro, por su orientación y apoyo en el desarrollo del trabajo. Agradecerles el tiempo dedicado y la paciencia ante las numerosas veces que se les ha requerido.

A mi familia, por la educación y apoyo que he recibido y me han permitido llegar a donde estoy. Por el apoyo recibido en momentos de mayor dificultad durante mis cinco años de formación. Especialmente quiero reconocer a mi padre por su ejemplo y apoyo absoluto.

Por último, agradecer a todo el personal docente de la Escuela Naval Militar por su participación, dedicación y profesionalidad en mi formación durante los cinco años de escuela. Y por supuesto, a mis queridos compañeros de la promoción 424-154.

A todos vosotros, gracias.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
Índice de Figuras	4
Índice de Tablas	6
1 Introducción y objetivos	7
1.1 Motivación del trabajo	7
1.2 Objetivos	8
1.3 Estructura del trabajo	8
2 Estado del arte	10
2.1 Hacia una economía basada en el hidrógeno	10
2.2 La propulsión marítima y su desarrollo histórico	10
2.2.1 Sistemas de remo y vela	11
2.2.2 La máquina de vapor	11
2.2.3 Motor de combustión interna	12
2.2.4 La turbina de gas	13
2.2.5 La propulsión eléctrica	14
2.2.6 La propulsión nuclear	14
2.2.7 Motores térmicos de hidrógeno	15
2.3 Hidrógeno verde	16
2.3.1 La química del hidrógeno	16
2.3.2 Obtención del hidrógeno	17
2.3.2.1 Electrólisis	18
2.4 El Hidrógeno como vector energético	19
2.4.1 Hidrógeno gas	19
2.4.2 Amoníaco	20
2.4.2.1 Métodos de obtención	20
2.4.2.2 Síntesis en función de energías renovables o alternativas	20
2.4.2.3 Ventajas e inconvenientes y conclusiones del amoníaco como combustible	21
2.4.3 Metanol verde	22
2.4.3.1 Empleo y características del metanol verde	22
2.4.3.2 Viabilidad del metanol verde	23
2.4.4 Comparación y conclusiones	24
3 Plataforma y herramientas de diseño	26
3.1 RODMAN 66	26

3.1.1 Características técnicas	26
3.1.2 Almacenamiento	27
3.1.2.1 Combustible	28
3.2 Cálculo de volumen total de metanol necesario	28
3.3 Análisis de condiciones	29
3.4 Normativa de emisiones OMI	34
3.4.1 Análisis de emisiones	35
3.4.1.1 Motores dual-fuel, relación de presión en la inyección – emisiones	35
3.4.1.2 Motores dual-fuel, relación ratio de inyección - emisiones	36
3.5 Conclusión y elección de diseño	38
3.6 Análisis comparativo de la estabilidad en la combustión diesel-metanol en un motor dual	39
3.6.1 Determinación de la variabilidad ciclo a ciclo	39
3.6.2 Desarrollo experimental	41
3.6.3 Resultados	42
3.7 Tanques suplementarios para el almacenaje de combustible	43
3.7.1 Techo fijo	43
3.7.2 Techo flotante	43
3.8 Consideraciones para el almacenamiento de metanol	44
3.8.1 Sistema de detección de incendios y contraincendios RODMAN 66	44
3.8.2 Ventilación RODMAN 66	44
3.8.3 Código aplicable	44
3.9 Características constructivas	46
3.9.1 Estudio de la estructura	46
3.10 Software	47
3.10.1 AutoCAD-Autodesk Inventor	47
3.10.2 SolidWorks	47
3.10.3 ProfiCAD	47
4 Diseño y modelado de tanques	48
4.1 Introducción	48
4.1.1 Composición de aceros	48
4.2 Diseño de tanques	49
4.2.1 Diseño y análisis de esfuerzos de soporte	51
4.2.2 Diseño boca de toma de combustible	53
4.2.3 Diseño aireación de tanques	53
4.2.4 Ensamblaje del diseño final	54
4.3 Sistema contra incendios	54

4.3.1 Medidas a tomar en caso de vertido accidental	55
4.3.2 Medidas en trasvase del producto	55
4.4 Esquema general de combustible	55
4.5 Modularidad del sistema de almacenamiento	56
5 Estudio económico	60
5.1 Presupuesto fabricación depósitos acero inoxidable AISI-316	60
6 Conclusiones y líneas futuras	65
6.1 Conclusiones	65
6.2 Líneas futuras	66
7 Bibliografía	67
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	70
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	71
Anexo III: Planos rodman 66	72
Anexo IV: Protocolo de pruebas rodman 66	79
Anexo V: Catálogo C18	80
Anexo VI: Planos	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Motor de combustión de hidrógeno diseñado por Mahle [3].	7
Figura 2-1 Embarcaciones de remos y velas [4].	11
Figura 2-2 La máquina de vapor [6].	12
Figura 2-3 Motor de combustión interna [7].	12
Figura 2-4 Motor y ciclo Otto general [8].	13
Figura 2-5 Turbina de gas - LM6000 [9].	13
Figura 2-6 Submarino nuclear americano haciendo escala en Corea del Sur [14].	14
Figura 2-7 Motor propulsado por hidrógeno diseñado por Airbus [16].	15
Figura 2-8 Densidad energética volumétrica y gravimétrica y sistema de almacenamiento [11].	16
Figura 2-9 Fuentes de producción de hidrógeno (Hidrógeno 18, 2022) [19].	17
Figura 2-10 Proceso de la electrólisis del agua [19].	18
Figura 2-11 disposición final de los depósitos [21].	19
Figura 2-12 Métodos de producción de amoníaco [22].	21
Figura 2-13 Comparativa de combustibles marinos, fósiles, biológicos y renovables [22].	24
Figura 3-1 RODMAN 66 [27].	26
Figura 3-2 Disposición general interiores [27].	28
Figura 3-3 Relación de almacenamiento de combustible en función del ratio de inyección.	31
Figura 3-4 Volumen total de combustible expresado en litros.	31
Figura 3-5 Energía obtenida para condiciones actuales de almacenamiento según ratio de inyección.	33
Figura 3-6 Comparación gráfica de autonomía para condiciones actuales de almacenamiento.	34
Figura 3-7 Límites de emisiones de NO _x establecidos por el convenio MARPOL [22].	34
Figura 3-8 Concentración de emisiones en función de presión de inyección [34].	36
Figura 3-9 Efectos de DMDF en emisiones con variación de carga de combustible [34]	37
Figura 3-10 Principio de operación motor dual-fuel [35].	39
Figura 3-11 Diagrama del montaje experimental [36].	41
Figura 3-12 Resultados de la densidad de probabilidad de la presión media efectiva indicada para co-combustión de diesel y metanol/etanol para cantidades de 20% (a), 30% (b), 40% (c) y 50% (d) [36].	42
Figura 3-13 Tanques de techo flotante [31].	44
Figura 3-14 American Petroleum Institute [29].	45
Figura 3-15 Planos compartimentación de tanques RODMAN 66 (Anexo III).	46
Figura 3-16 Logo software Autodesk Inventor [38].	47
Figura 3-17 Logo software SolidWorks [39].	47
Figura 3-18 Logo software ProfiCAD [40].	47
Figura 4-1 Organización y vista de compartimentación.	49

Figura 4-2 Dimensiones calculadas para depósitos acero inoxidable AISI-316.	49
Figura 4-3 Perspectiva modelado depósito acero AISI-304.	50
Figura 4-4 Vista seccionada del compartimento de diseño (Anexo III).	50
Figura 4-5 Diseño soporte depósito AISI-316.	51
Figura 4-6 Restricción y carga aplicada sobre el soporte.	51
Figura 4-7 Máxima tensión de Von Mises soporte.	52
Figura 4-8 Coeficiente seguridad soporte.	52
Figura 4-9 Diseño boca de toma y tapón enroscado.	53
Figura 4-10 Posición atmosférico y entrada T. Fuel [27].	53
Figura 4-11 Perspectiva ensamblaje depósito final.	54
Figura 4-12 Esquema planta de combustible elaborado con ProfiCAD.	55
Figura 4-13 Compartimentación de la lancha de instrucción.	56
Figura 4-14 Perspectiva distribución depósitos metanol.	57
Figura 4-15 Perspectiva depósitos.	57
Figura 4-16 Propiedades generales del depósito.	58
Figura 4-17 Vista en perspectiva depósito babor.	58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Necesidades de materias primas para producir una tonelada de e-metanol [26].	23
Tabla 2 Capacidad de producción de la planta del Proyecto MefCO ₂ [24].	23
Tabla 3 Características motores principales RODMAN 66 [27].	27
Tabla 4 Comparación de densidades diésel y metanol.	28
Tabla 5 Energía y autonomía obtenida según relación de combustible, para condiciones actuales.	33
Tabla 6 Factores de emisiones para combustión de metanol en motores marinos [33].	35
Tabla 7 Comparativa de propiedades entre diesel y metanol [34].	36
Tabla 8 Resumen condiciones según ratio de inyección.	38
Tabla 9 Ratio de inyección en la combustión para 500 millas de autonomía.	38
Tabla 10 Requerimientos según normativas para tanques de fondo plano (tomada de [29]).	45
Tabla 11 Partida 1 - Oficina técnica.	60
Tabla 12 Partida 2 - Materiales.	61
Tabla 13 Partida 3 - Instrumentación.	62
Tabla 14 Partida 4 – Fabricación y montaje.	63
Tabla 15 Partida 5 - Pruebas.	63
Tabla 16 Partida 6 - Homologación y control de plataforma.	64
Tabla 17 Presupuesto final.	64

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación del trabajo

Los estudios de prospectiva energética muestran que en la primera mitad del siglo XXI los combustibles gaseosos ocupan un puesto significativo en la canasta energética internacional [1]. Tal y como se puede observar, el gas natural toma un papel importante en su transición al hidrógeno, una mezcla de gases con el metano como predominante, indicativo de que las mezclas de estos combustibles tendrán diversas aplicaciones.

De ciertas aplicaciones energéticas del gas natural, se ha visto que mejora las condiciones de operación en los sistemas de combustión, esto se debe a que la adición del hidrógeno modifica la estructura de la llama y su efecto cinético. El metano, gas producido por la descomposición o digestión de la materia orgánica, tiene una baja velocidad de reacción, la cual es aumentada cuando este es mezclado con hidrógeno, mejorando así la ignición y la estabilidad de llama [2].

El hidrógeno como elemento ofrece unas capacidades que vienen definidas según su uso y modo de empleo. En términos de energía, el hidrógeno es un vector energético, es decir, almacena energía para posteriormente entregarla a células de combustible y generar electricidad y calor, o puede ser quemado para operar un motor de combustión [3]. En definitiva, el combustible de hidrógeno es un combustible empleado en motores internos para propulsión o y dispositivos electrónicos (Figura 1-1).



Figura 1-1. Motor de combustión de hidrógeno diseñado por Mahle [3].

En términos de emisiones contaminantes, tras su combustión el hidrógeno genera vapor de agua como único subproducto, lo que la hace una alternativa limpia y renovable al no emitir dióxido de carbono ni otras sustancias contaminantes, obtenible a partir de fuentes renovables como son la eólica o la solar lo que la considera una fuente de energía sostenible.

Refiriéndonos a su aplicación, este elemento es capaz proporcionar la fuerza motriz para embarcaciones, automóviles y aeronaves o a través de celdas de combustible capaces de alimentar un motor eléctrico. Un fin, con un nivel de seguridad, en referencia a explosiones accidentales, semejante al de la gasolina. Concretando el sector marítimo, el transporte está dominado por los motores de gasóleo, esto puede llevar a considerar las pilas de combustible como una opción atractiva, sin embargo, los elevados consumos de las embarcaciones dificultan el uso de esta tecnología. Es por ello por lo que la descarbonización de este sector busca otros combustibles más adecuados, como por ejemplo el amoníaco, el e-metanol y el hidrógeno gaseoso.

El diseño de una planta de propulsión basada en combustibles alternativos busca dar lugar a una fuente de energía sostenible capaz de dar operatividad a una plataforma con un manejo sencillo y conocido, con el objetivo de ser este un proyecto extrapolable a plataformas de mayores dimensiones.

1.2 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de una alternativa eficiente al uso de combustibles convencionales en los motores de combustión, buscando el diseño de una planta de propulsión basada en combustibles alternativos y su futura implementación. Dicho enfoque, conlleva una adaptación a una plataforma real y operativa, siguiendo de manera estricta las características de las que dispone, como son los volúmenes de tanques, las limitaciones de espacio, etc. Para ello se debe evaluar las alternativas ofrecidas del hidrógeno seleccionando la más adecuada para la combustión.

Con relación al objetivo principal, se seguirán los siguientes hitos cronológicamente:

1. Análisis de las capacidades de diferentes combustibles alternativos y sus diversas formas de aplicación comparando las ventajas y desventajas de cada uno.
2. Estudio de las características técnicas de las lanchas RODMAN 66 y la posibilidad de adaptación de la cámara de máquinas.
3. Estudiar la viabilidad de la implementación de la planta de propulsión en base a la alternativa escogida anteriormente y la plataforma a diseñar.
4. Diseño del sistema de propulsión, tanques de almacenamiento y suministro que cumpla con los requisitos de seguridad, fiabilidad y eficiencia.

1.3 Estructura del trabajo

Para llevar a cabo los objetivos descritos en la sección anterior, el resto del presente trabajo se estructura de la siguiente forma.

En primer lugar, en el estado del arte se discutirá la evolución de la propulsión marina a lo largo de la historia, el problema que suponen los recursos finitos, el desarrollo constante de la mano de las alternativas innovadoras y el papel del hidrógeno en este contexto.

La primera parte del estudio se centrará en analizar el valor del hidrógeno, es decir, el proceso desde su obtención hasta su consumo, analizando sus características y ventajas frente a los tradicionales combustibles fósiles empleados en el mundo marítimo. El objetivo es determinar la fuente renovable óptima para la situación de estudio, entre el metanol verde, el hidrógeno o el amoníaco.

La segunda parte de estudio se basa en el diseño experimental de la planta propulsora en base a la alternativa adecuada. Se describe el proceso de diseño y modelado, incluyendo las herramientas empleadas, la simulación y la optimización.

Finalmente, los resultados, conclusiones y líneas futuras, donde se hará un balance de los resultados obtenidos comparándolos con los objetivos iniciales del trabajo. Análisis crítico y objetivo del cumplimiento de estos objetivos, así como las líneas futuras de investigación.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Hacia una economía basada en el hidrógeno

Nos encontramos ante el inicio de un nuevo ciclo, donde la industria energética, de la mano de otras áreas de la economía, busca el reemplazo de la producción de los grandes complejos industriales. Dada la naturaleza global del cambio climático, se abre la preocupación por la búsqueda de medidas urgentes de mitigación para este problema. El presente trabajo resalta la trayectoria de acción para aplacar este problema, poniendo el foco de atención en el sector de transporte.

Las destructivas consecuencias de la contaminación ambiental en el clima traen consigo una preocupación por parte de los países consumidores y con ello, un deseo de disminuir la dependencia de ciertas fuentes de energía. Este concepto ha sido la fuerza motriz de un nuevo pensamiento, un incentivo de encontrar alternativas energéticas menos contaminantes. Entre dichas alternativas a considerar es inevitable destacar el uso del hidrógeno para la generación de electricidad aplicable a instalaciones, consumos o incluso automoción con su respectivo almacenamiento por celdas de combustible.

La generación de tal elemento actualmente es a partir de gas natural y metanol en su mayor medida, sin embargo, su obtención prescindiendo de combustibles fósiles en el proceso también es posible a través de fuentes renovables como la eólica, la geotérmica, la fotovoltaica y la hidráulica con las que se produce electricidad para ser empleada en la electrolisis con el fin de separar el hidrógeno y el oxígeno del agua [1]. La imposición de la nueva energía deja la incertidumbre del tiempo que tomará dicha transformación, la cual depende del comportamiento del consumidor y de la regulaciones vigentes por parte de los gobiernos e instituciones de cara a las emisiones contaminantes.

2.2 La propulsión marítima y su desarrollo histórico

En el ámbito naval la propulsión adopta la definición de trasladar una embarcación de determinado punto a otro sobre la superficie del agua superando las fuerzas que se oponen a este movimiento, como el rozamiento del agua sobre la obra viva y el rozamiento del aire sobre la obra muerta. La evolución histórica de la propulsión en sus diversos ámbitos es el reflejo de la constante búsqueda del ser humano por mejorar sus condiciones de desplazamiento. Actualmente la tecnología evoluciona exponencialmente buscando la propulsión eléctrica o híbrida experimentando con nuevas formas de energías limpias.

2.2.1 Sistemas de remo y vela

Los sistemas de propulsión naval tal y como se conocen hoy en día se iniciaron con la propulsión a remo, donde la energía de propulsión era la mera fuerza del hombre; sistemas caracterizados por sus limitaciones en velocidad y alcance a lo que se añade el esfuerzo físico de los navegantes. Más adelante se adicionan incipientes aparejos de velas como nuevo sistema de propulsión con el objetivo de aprovechar la fuerza del viento (Figura 2-1). El uso de la vela ofrece una mayor velocidad y alcance en comparación con su antecesor. Sin embargo, se ve limitada por las condiciones meteorológicas de manera directa, lo que implicó una mejora y desarrollo en los diseños y técnicas de navegación.

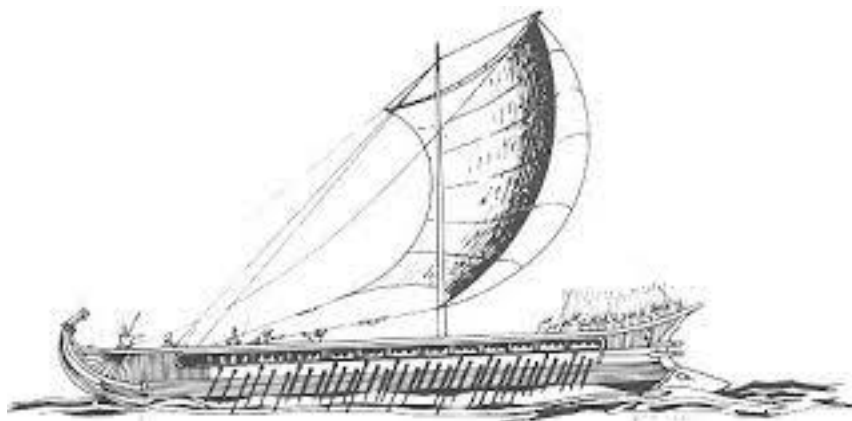


Figura 2-1 Embarcaciones de remos y velas [4].

El sistema de remo y vela tanto de forma combinada como independiente fue la empleada hasta los inicios del siglo XIX en la batalla de Trafalgar donde se vio que la tecnología de aparejos a vela había alcanzado su madurez [4]. Naves enfrentadas, grandes navíos de línea con complejos sistemas de aparejo y arboladuras de hasta cuatro palos; navíos que sustentaban el poder de los crecientes imperios coloniales.

2.2.2 La máquina de vapor

la base de la revolución industrial; la máquina de vapor fue la que, desde finales del siglo XVIII hasta mediados del XIX, catapultó el desarrollo económico de los principales países de la Europa Occidental y Estados Unidos. Durante la segunda mitad del siglo XVIII, James Watt consolidó e hizo de la máquina de vapor una invención con un uso práctico añadiendo un condensador abierto externo que permitía cerrar el ciclo abierto del vapor [5].

La máquina de vapor es un motor de combustión externa el cual transforma energía térmica, obtenida del agua, en energía mecánica. Este ciclo se lleva a cabo en dos etapas diferenciadas: la primera consiste en la generación de vapor de agua a través de una caldera cerrada herméticamente, este genera la expansión del volumen de un cilindro – pistón. El movimiento lineal del pistón es transformado en un movimiento de rotación mediante un mecanismo biela-manivela. Alcanzado el final de la carrera, el émbolo retorna a su posición de origen expulsando el vapor de agua gracias a la energía cinética de un volante de inercia. La segunda etapa se fundamenta en el control del vapor a presión mediante una serie de válvulas de entrada y salida, regulando así la renovación de la carga [6].

Durante los años sucesores, la máquina de vapor sufre mejoras y desarrollo por diversos científicos como John Stevens, Robert Fulton o Sadi Carnot, cuando en 1824 presenta su investigación sobre el segundo principio de la termodinámica, consolidando así el ciclo de vapor (Figura 2-2) facilitando el desarrollo de las plantas de propulsión a vapor en los barcos dando lugar a la era del vapor en la propulsión naval.

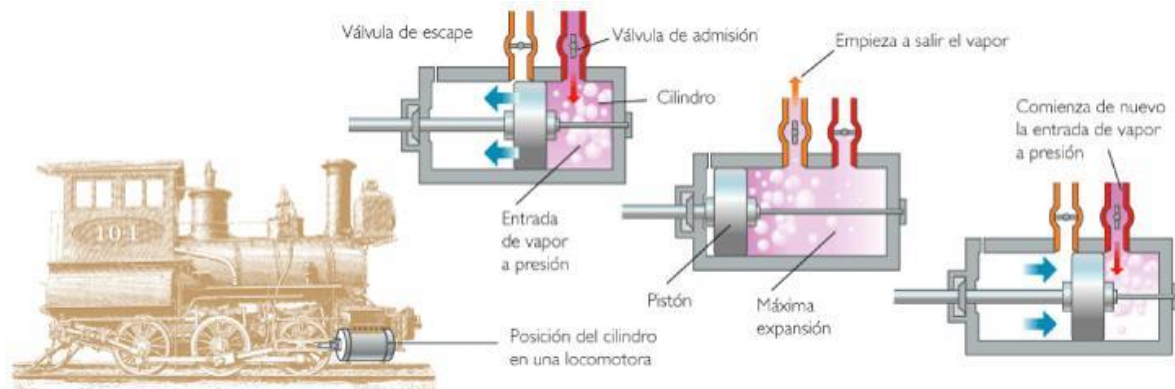


Figura 2-2 La máquina de vapor [6].

2.2.3 Motor de combustión interna

De las mejoras técnicas de la máquina de vapor a lo largo del siglo XVIII nace la propulsión con motores térmicos de combustión interna (Figura 2-3). El primer motor de estas cualidades se inventó en 1860 por el científico belga Jen Joseph Étienne Lenoir quien elaboró un motor de combustión interna semejante a un motor de vapor de doble efecto con cilindro horizontal [7].

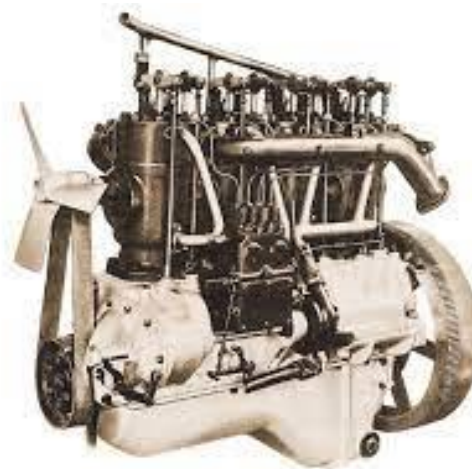


Figura 2-3 Motor de combustión interna [7].

Hacia 1867, el ingeniero Alemán Nikolaus August Otto, desarrolló un motor de combustión que superaba notablemente al de Lenoir, gracias al aprovechamiento del movimiento de un pistón libre para generar trabajo, sin embargo, se seguía considerando un motor atmosférico ya que carecía de compresión previa de la mezcla. El ingeniero continuó su camino de investigación, hasta lograr en 1876 fabricar el primer motor de cuatro tiempos de la historia (Figura 2-4). Dicho motor admitía en una carrera la carga de aire y gas de carbón para luego en otra carrera comprimirla y tras una explosión tenía lugar la expansión [8].

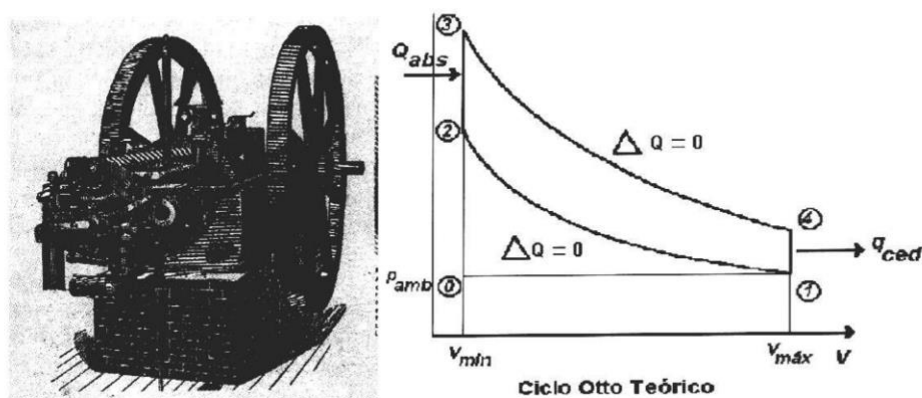


Figura 2-4 Motor y ciclo Otto general [8].

Del motor de combustión interna se presentó una variante creada por el ingeniero alemán Rudolf Diesel. Conocido por su nombre, el motor Diesel consistía en utilizar el calor del aire comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro lo que permitía duplicar la eficiencia de los motores de aquella época [8]. Con el desarrollo posterior del Diesel y la gasolina como combustibles, los motores de combustión interna predominaron como medio de propulsión para vehículos y maquinaria. Con el paso del tiempo el desarrollo tecnológico impuso estos motores haciéndolos más eficientes extendiendo su rango de aplicación hasta la propulsión aérea y marítima.

2.2.4 La turbina de gas

La historia y progreso de las turbinas de gas ha estado subordinado al del motor, especialmente al referirnos a la cuestión metalúrgica. En 1928 la casa Brown Boveri fabricó una turbina de gas manteniendo los fundamentos de Holzwarth, el cual desarrolló una turbina que funcionaba en ciclo de volumen constante y con una alta refrigeración por agua. Tras ser instalada la turbina en una fábrica de acero alemana, como se muestra en la Figura 2-5, y comprobarse sus buenos resultados, se fabricó una segunda de 5000 CV de potencia [9].

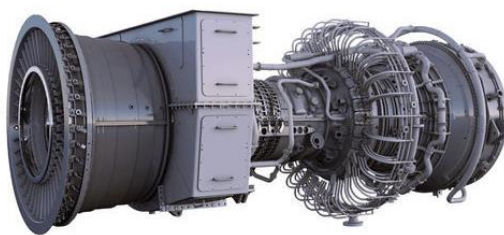


Figura 2-5 Turbina de gas - LM6000 [9].

En la actualidad se pueden encontrar diversos motores en la familia de turbinas de gas. La máquina se compone de una admisión en torno al aire, el compresor, una zona de combustión, turbina y tobera respectivamente. El aire ya comprimido se calienta como resultado de la quema de combustible, expandiéndose en dirección de la turbina donde el aceleramiento genera la propulsión [10].

2.2.5 La propulsión eléctrica

El uso de la propulsión eléctrica es anterior al de su homólogo de combustión interna. Por increíble que pueda parecer, fue en el siglo XIX cuando el norteamericano Thomas Davenport construyó el que se conoce como el primer vehículo eléctrico de la historia, siendo este un prototipo de miniatura solamente capaz de desplazarse en círculos. Davenport fue sucedido por los avances en el campo de la electricidad con invenciones como la locomotora eléctrica de Robert Davidson, la batería de plomo-ácido de Gaston Planté o el primer vehículo práctico alimentado con baterías del británico Thomas Parker. No fue hasta la innovación industrial del ingenioso inventor americano Thomas Edison que las previsiones de los vehículos eléctricos se dispararan gracias a la batería hierro-níquel. Sin embargo, los pocos fabricantes no podían competir con el resto de los coches cuyo precio era hasta tres veces menor, provocando su casi desaparición [11].

El fundamento de la propulsión eléctrica está basado en convertir la energía eléctrica en movimiento mecánico mediante el uso de motores eléctricos. Dichos motores trabajan mediante la interacción de los campos magnéticos y eléctricos donde su eficiencia y fiabilidad han ido mejorando significativamente con el transcurso de los años, lo que ha extendido su empleo y aplicación.

La actualidad histórica de los vehículos eléctricos se ve marcada por la recesión económica mundial, los programas de reducción de emisiones, los problemas que conllevan los combustibles fósiles y la contaminación atmosférica. Siendo el objetivo lograr las cero emisiones contaminantes, empresas como la firma californiana de Tesla Motors han elaborado un buen producto viable y rentable [12].

2.2.6 La propulsión nuclear

La propulsión nuclear marina nace alrededor de los años 40, siendo el primer submarino nuclear operativo el USS Nautilus, botado en 1955. Este primer submarino condujo el desarrollo de la clase Skate y un portaviones propulsado por ocho reactores. En 1962 la armada americana disponía de 26 submarinos nucleares operativos y 30 en construcción [13]. En la Figura 2-6 se muestra una plataforma nuclear avanzada de la Armada Estadounidense recalando en puerto Coreano.



Figura 2-6 Submarino nuclear americano haciendo escala en Corea del Sur [14].

Los reactores navales se caracterizan por ser del tipo reactor de agua presurizada o refrigerado por metal líquido, esto los diferencia de los reactores comerciales en tener alta densidad de potencia en un pequeño volumen, funcionando con uranio baja o altamente enriquecido (lo que varía su necesidad de recarga) [14]. La fisión del material nuclear en el reactor libera una enorme cantidad de energía empleada en calentar agua y producir vapor. Este vapor es utilizado para mover las turbinas encargadas de generar la electricidad de la plataforma [15].

2.2.7 Motores térmicos de hidrógeno

El hidrógeno se coloca como la tecnología objeto de investigación y desarrollo desde la segunda mitad del siglo XX. Sin embargo, pese a tener la capacidad de sustituir la gasolina en los motores de inyección, este método no se ha implantado en el día a día [16]. Esto se debe a que, a pesar de ser un elemento abundante en nuestro planeta, no se encuentra de forma aislada sino en compuestos lo que implica técnicas de separación para adquirirlo. La Figura 2-7 representa el modelo diseñado por la empresa Airbus de un motor propulsado por hidrógeno. Su objetivo, la implementación de un motor eléctrico de hidrógeno de 1,2 MW en las alas de un A380 [32].

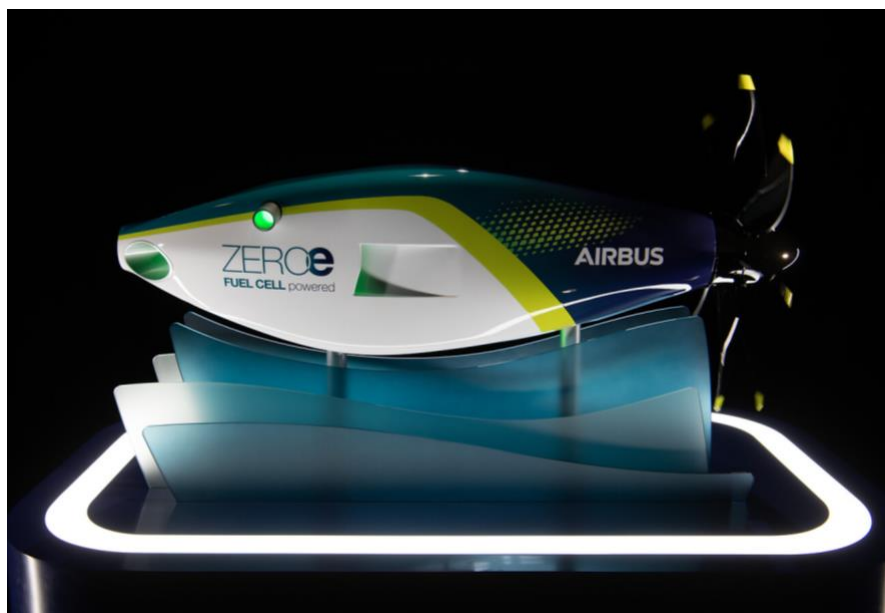


Figura 2-7 Motor propulsado por hidrógeno diseñado por Airbus [16].

El proceso de la propulsión con hidrógeno se produce mediante la reacción química del hidrógeno y el oxígeno en una celda de combustible, generando así electricidad. Esto se conoce como la pila de combustible, dispositivos electroquímicos que convierten la energía contenida en un combustible directamente en electricidad, sin necesidad de combustión previa. Lo que las diferencia de las baterías es su capacidad de mantener el suministro constante de electricidad mientras exista aporte de combustible.

La pila de combustible transforma directamente la energía contenida en un combustible en electricidad, a través de un proceso isoterma que aprovecha la entalpía libre interna del combustible a temperatura de operación. El elemento fundamental de la pila de combustible es una celda electroquímica compuesta por un ánodo y un cátodo y un electrolito que se ocupa de ponerlos en contacto. En el ánodo se lleva a cabo la reacción de oxidación, donde se liberan electrones incapaces de atravesar el electrolito, por lo que se ven obligados a pasar un circuito externo. Por otro lado, los iones resultantes de la oxidación se desplazan a través del electrolito para alcanzar el cátodo, donde tienen lugar la reacción de reducción [17].

2.3 Hidrógeno verde

Actualmente la economía depende directamente de los combustibles fósiles. Esto implica dos inconvenientes a considerar, el primero, que los recursos son finitos y el segundo, que su uso depende de la distribución geográfica la cual está concentrada en determinados territorios, lo que genera una gran fluctuación de precios. Como se observa en la Figura 2-8 los combustibles fósiles ocupan los puestos con mayor densidad energética neta por volumen, situando el metanol líquido en el centro de la comparativa.

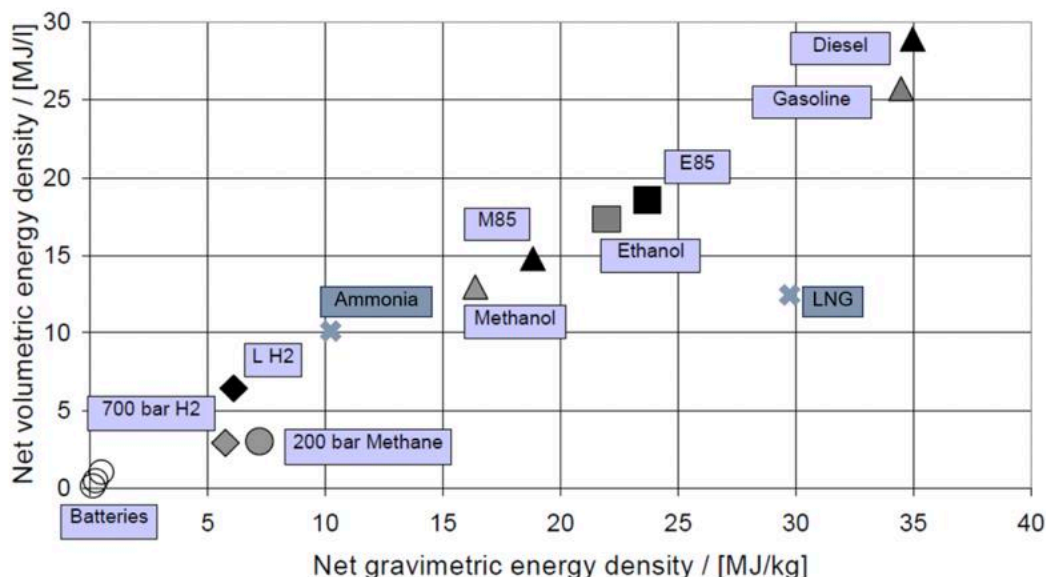


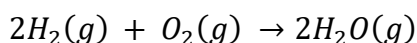
Figura 2-8 Densidad energética volumétrica y gravimétrica y sistema de almacenamiento [11].

2.3.1 La química del hidrógeno

El hidrógeno es un elemento ubicado en el primer puesto de la tabla periódica, lo que lo convierte en el elemento más liviano del universo, siendo su masa atómica 1,00797 g/mol. Este elemento es considerado un no metal, aun no siendo ni metal ni no metal estrictamente. Sin embargo, su comportamiento es el de un metal cuando es sometido a compresión y densidades altas. Tiene tres isótopos: el protio, el deuterio y el tritio siendo el protio el más común en la naturaleza, encontrándose en una proporción del 99,8%. Tiene una densidad de 0,071 Kg/m³ en condiciones normales y es un gas inodoro, incoloro e insípido [18].

La molécula diatómica H₂ es el estado libre del hidrógeno, sin embargo, no es posible encontrarlo de forma libre en la corteza terrestre. La manera en la que nos encontramos con este elemento es compuesta con otros elementos como en estado disociado en el agua o en disolventes orgánicos. En definitiva, es un elemento capaz de formar compuestos en estado combinado con casi todos los elementos, en especial con los compuestos orgánicos.

Como hemos visto, considerando la ligereza del hidrógeno, este se eleva en la atmósfera lo que hace muy difícil encontrarlo en su forma pura. En dicha situación, como puede ser una llama de gas de hidrógeno puro, al entrar en contacto con el aire, el hidrógeno reacciona con el oxígeno formando agua y liberando calor [19].



2.3.2 Obtención del hidrógeno

Es por todo lo visto, que a pesar de ser el elemento más abundante del universo el hidrógeno no es una fuente de energía primaria debido a que no se encuentra aislado. Para obtenerlo es indispensable realizar un proceso que consuma una cierta cantidad de energía, lo que lo hace un vector energético, la Figura 2-9 expone las principales fuentes de producción de dicho elemento.

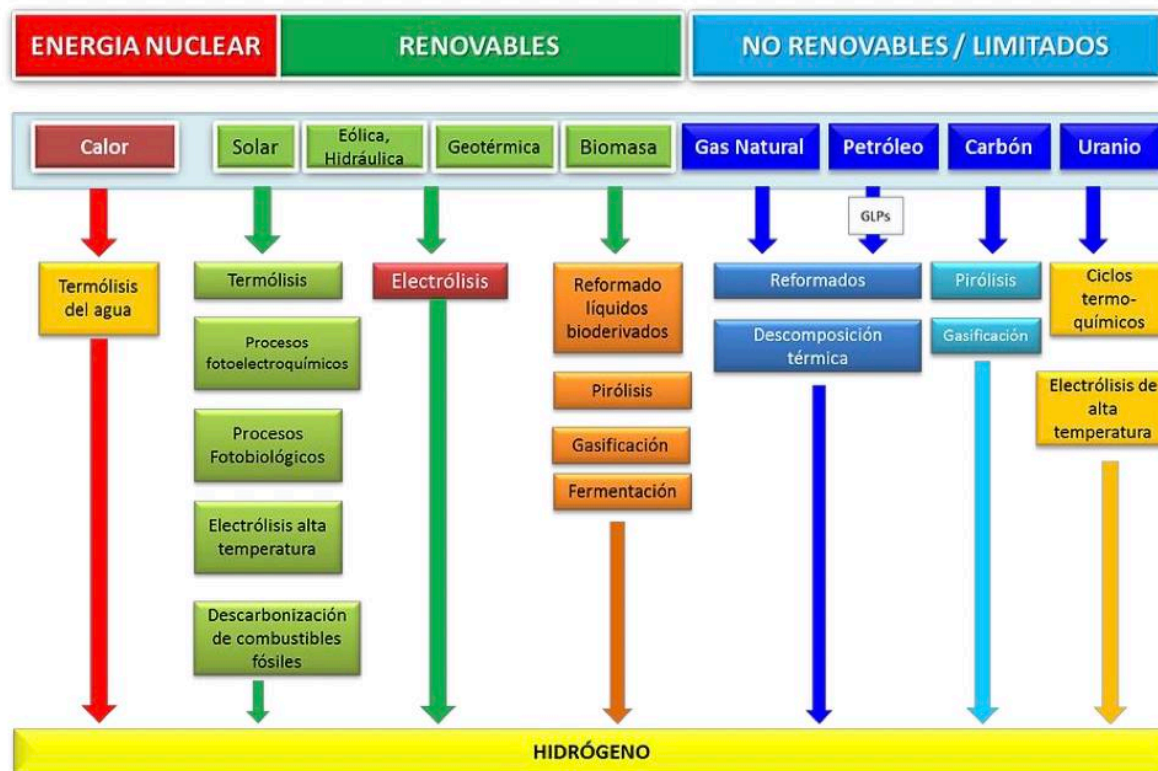


Figura 2-9 Fuentes de producción de hidrógeno (Hidrógeno 18, 2022) [19].

Según la materia prima a partir de la que obtenemos el hidrógeno, y de las emisiones de dióxido de carbono en su proceso de producción podemos clasificar el hidrógeno en los siguientes tipos:

Hidrógeno verde: Aquel generado por energía renovable, con el agua como materia prima mediante electrólisis. En este grupo también consideramos aquel obtenido a través de reformado de biogás y la conservación bioquímica de la biomasa cuando se cumplen los requisitos requeridos. Este grupo representa tan solo el 2% de la producción del hidrógeno actual.

Hidrógeno azul: Es aquel obtenido a partir de gas natural, metano o gases licuados del petróleo a través de métodos de reformado, en los que se le aplican procesos de captura del carbono para reducir las emisiones en grandes cantidades.

Hidrógeno gris: Producido mediante el mismo proceso que el hidrógeno azul prescindiendo de las técnicas de reducción de emisiones.

Hidrógeno negro: Este último grupo, es obtenido a partir del carbón la electricidad o la energía nuclear y representa el 23% de la producción global.

Debido a que el trabajo enfoca su objetivo en una alternativa medioambiental a los combustibles fósiles, el estudio se centrará en el hidrógeno verde, excluyendo también el hidrógeno azul por la necesidad de recursos limitados y finitos para su producción.

Es fundamental comprender, considerando la producción eléctrica a nivel global, que la manera rentable de obtener hidrógeno verde es aprovechando la energía renovable en exceso no consumida, es decir, aprovechar la energía limpia derivada del exceso de producción actual en disociar hidrógeno. Esta energía, generada y no demandada, es vendida a la red de energía a un precio despreciable. La solución está en emplear esos restos de energía y enviarlos a parques electrolizadores para producir hidrógeno.

2.3.2.1 Electrólisis

Tomando el agua como materia prima en el proceso de extracción de hidrógeno, consideramos la electrólisis como el principal método para su obtención. Se trata de una reacción de reducción – oxidación (RED-OX) endotérmica, es decir, necesitada de energía para producirse que separa el agua en hidrógeno y el oxígeno.

El proceso consiste en poner el reactivo, agua, en un recipiente con dos electrodos, a poder ser, de grafito puro que se introducen para quedar en contacto con el reactivo. El proceso se lleva a cabo en un medio alcalino con el objetivo de incrementar la conductividad eléctrica ya que la reacción consiste en el movimiento de los electrones de oxidación de los elementos. Es necesaria una diferencia de potencial para poder iniciar la reacción. La aportación de energía debe sobrepasar la energía de activación para dar lugar a los productos separados: hidrógeno y oxígeno en estado gaseoso.

Como es observado en la Figura 2-10, el voltaje proporcionado para llevar a cabo una reacción no espontánea hace de los electrodos un ánodo y un cátodo, siendo por ello que el $H^+(aq)$ se ve atraído por el polo negativo de donde adquiere los electrones que necesita para reaccionar. Por otro lado, el oxígeno cede los electrones al polo positivo. Estos electrones se desplazan gracias a la diferencia de potencial y llegan al cátodo donde el hidrógeno los emplea para reaccionar, separando así los elementos.

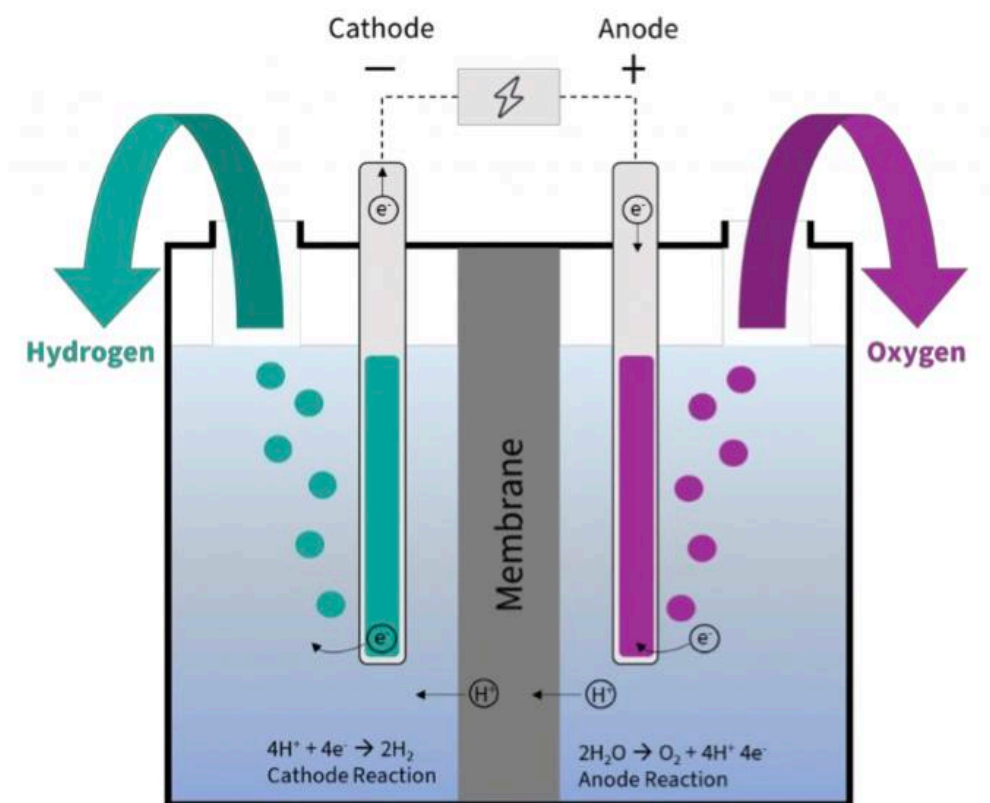


Figura 2-10 Proceso de la electrólisis del agua [19].

2.4 El Hidrógeno como vector energético

La aplicación principal del hidrógeno se fundamenta en la pila de combustible. Como se ha definido anteriormente, la pila de combustible consiste en la conversión directa de la energía química del elemento en electricidad. Las pilas se pueden clasificar según su aplicación en tres tipos diferentes: estacionarias, portátiles o de transporte. Las estacionarias se caracterizan por ser la generación distribuida y centralizada de energía su principal función, mientras que las de transporte se emplean para suministrar energía a los vehículos y las portátiles a los dispositivos electrónicos.

La segunda aplicación del hidrógeno es su combustión directa de la misma manera que un motor alternativo o una turbina. Este modo de empleo conlleva una pérdida de eficiencia comparado con la pila al no ser un proceso directo. Sin embargo, es posible de emplear con mezclas de otros combustibles al proporcionar una gran estabilidad de llama dando uso a ciertas mezclas que no son eficientes individualmente [18].

2.4.1 Hidrógeno gas

Llegados al punto de análisis de las alternativas que nos ofrece este elemento, siendo la manipulación del hidrógeno en estado gaseoso la primera. Como se ha sinterizado anteriormente el hidrógeno a presión atmosférica no es una opción factible, donde comparando densidades vemos que un litro de gasolina equivale a 3000 litros de H_2 (medio coche de almacenamiento) para un mismo nivel de energía.

Es evidente pensar, que la solución a este problema de densidad es reducir el volumen del elemento del mismo modo que se hace con otros gases: comprimirse a altas presiones (de 350 a 700 bar) gracias a la evolución del empleo de nuevos materiales como fibras de carbono con polímeros o aluminio. Con estos niveles de presión obtenemos equivalencias energéticas aproximadas de 1 litro de gasolina a siete o 3,8 litros de hidrógeno respectivamente.

En segundo lugar, la baja densidad de energía volumétrica del hidrógeno lo hace un gas complicado de manipular lo que se traduce en su complejidad a la hora de transportarlo. Para el caso de estaciones de servicio de repostaje, nos encontramos con la necesidad de tuberías especiales para la distribución. Los medios actuales de manejo de gas natural o metano no cumplen los requisitos para el empleo del hidrógeno y su traslado de forma líquida, como con los derivados del petróleo, implicaría alcanzar temperaturas de $-235^{\circ}C$, algo energéticamente inasumible. Es por ello, que el hidrógeno ha de consumirse en el mismo punto del que se produce [20].

Relacionando el almacenamiento de hidrógeno para la plataforma de estudio, buscando un mismo nivel de operatividad en términos de potencia, autonomía y fiabilidad, obtenemos una compartimentación nueva de las lanchas RODMAN 66 (Figura 2-11), donde el servo y los espacios superiores a los diésels generadores han de ser reacondicionado para dar cabida a los depósitos [21].

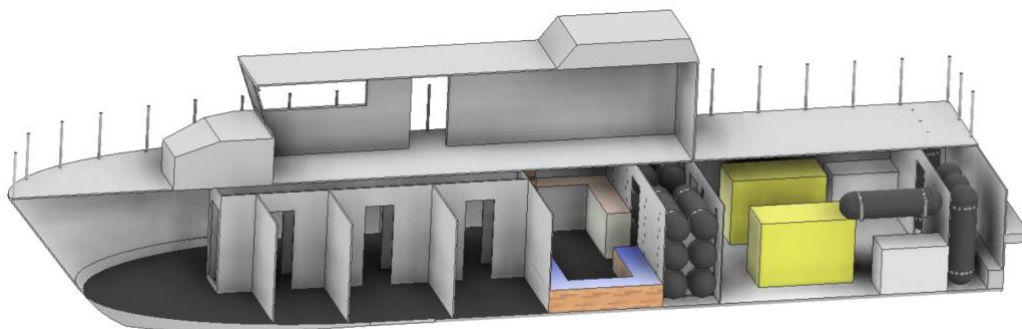


Figura 2-11 disposición final de los depósitos [21].

Tras el análisis de resultados, se concluye con unos valores óptimos en referencia al peso, coste y ubicación de los tanques de hidrógeno diseñados. Sin embargo, no se alcanza una autonomía semejante a la propulsión ya prestada por las lanchas de instrucción, siendo de 700 km de los motores marinos Diesel CATERPILLAR C18 frente a 210 km de los depósitos de fibra de carbono-epoxi al 60% [21]. En este aspecto, se llega a la conclusión que el uso de hidrógeno gas no es una alternativa viable en términos de eficiencia y operatividad en la plataforma.

2.4.2 *Amoníaco*

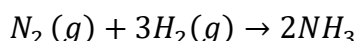
Continuando con la búsqueda de combustibles alternativos, el amoníaco se presenta como una solución energética con dos grandes ventajas: la primera, es que es una manera estable de almacenar H_2 y quemarlo reduciendo emisiones y, en segundo lugar, lo podemos obtener de manera respetuosa con el medio ambiente a partir de energías renovables. Es por ello, considerarlo como una opción viable para la propulsión marina ya que la reducida densidad energética que proporcionan las baterías actuales hace de la propulsión integral eléctrica una quimera [22].

2.4.2.1 *Métodos de obtención*

Actualmente la obtención de este compuesto se realiza mediante tres procesos distintos, ciclo Haber-Bosch, el cual es el productor del 90% del amoníaco en la actualidad, síntesis Termoquímica y síntesis en estado sólido (proceso electroquímico que emplea nitrógeno, agua y electricidad para obtener amoníaco).

El ciclo Haber-Bosch está basado en la reacción entre los elementos hidrógeno y nitrógeno en un catalizador específico (de óxidos de hierro, aluminio y potasio). El tiempo ha acompañado a la evolución de este método, mejorando las plantas de producción y añadiendo cambios en las presiones de trabajo, temperaturas y catalizadores.

La fuente de hidrógeno y nitrógeno empleadas tradicionalmente para la elaboración del amoníaco ha sido el metano CH_4 reformado mediante vapor. Actualmente se estudia la introducción de nuevas materias proveedoras de estos elementos, como la síntesis basada en H_2 , la cual se diferencia por obtenerse de forma verde.



El funcionamiento del ciclo consiste en comprimir el gas sintético, formado por hidrógeno y nitrógeno, hasta presiones superiores a los 220 bares y posteriormente introducirlo en un catalizador, donde solamente una parte del gas se transformará en amoníaco. Esto se debe al equilibrio termodinámico en la reacción de formación y para compensarlo se recircula el gas sintético sobrante por el sistema, formando un ciclo que busca mayor eficiencia [22].

2.4.2.2 *Síntesis en función de energías renovables o alternativas*

A raíz del elevado coste de las tecnologías actuales, se busca una alternativa real y viable que permita implantar este compuesto como combustible dominante en la propulsión marina respetando el medio ambiente y reduciendo costes. Dichas fuentes de energía albergan la energía solar, eólica, hidroeléctrica, nuclear y OTEC (energía térmica marina). La producción consiste en emplear electricidad de estas fuentes carentes de emisiones para alimentar un electrolizador que produzca hidrógeno a partir del agua y, por otro lado, un separador de aire donde obtener el nitrógeno. Al tener ambos elementos podemos formar el gas sintético y a continuación introducir el ciclo Haber-Bosch y seguir el proceso explicado anteriormente. A continuación, la Figura 2-12 expone los métodos de producción de este compuesto.

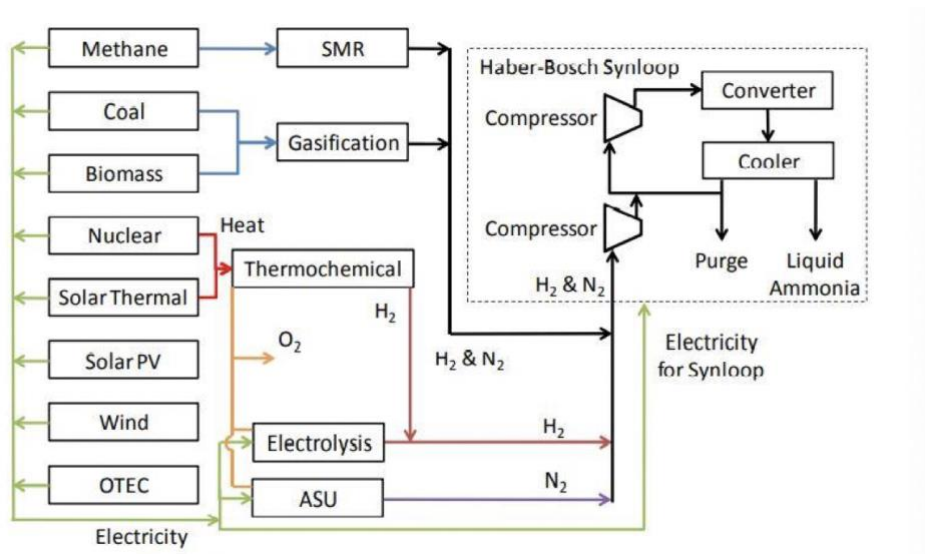


Figura 2-12 Métodos de producción de amoníaco [22].

2.4.2.3 Ventajas e inconvenientes y conclusiones del amoníaco como combustible

Para analizar la eficacia del amoníaco como combustible es necesario comprender el proceso desde la primera etapa, en primer lugar, es una forma estable de almacenamiento de hidrógeno con una densidad energética volumétrica mucho mayor, lo cual era el principal inconveniente del hidrógeno gas. En cuanto al almacenamiento, el hidrógeno ha de mantenerse a -256°C si está licuado y a 700 bares de presión si hablamos de su estado gaseoso dándonos una autonomía nimia para nuestro buque, problemática que no aparece al operar con NH_3 , el cual es mucho más sencillo en términos de operación y almacenamiento (-33°C a presión atmosférica o 9 bares a 20°C) [22].

Como principales ventajas del amoníaco, destacamos:

- El Amoníaco carece de azufre ni carbono molecular, es por tanto un combustible libre de carbono y emisiones de efecto invernadero.
- En comparativa con el resto de los combustibles limpios bajo estudio, el amoníaco presenta un coste menor al del hidrógeno. Esto se demuestra con una mayor eficiencia en los motores debido a que admite una relación de compresión mayor y del menor espacio de almacenamiento requerido.
- Los métodos de producción y almacenamiento se componen por tecnologías eficientes, probadas y con infraestructuras existentes. Esto permite un mayor control y conocimiento de los riesgos que este combustible conlleva.
- La densidad del amoníaco es menor a la del aire, esto permite que se disipe rápidamente en caso de fuga dando seguridad respecto a otras sustancias. Su detección es fácil gracias a su fuerte olor acre. A esto, hay que añadir que su alta temperatura de ignición es muy elevada lo que otorga seguridad en términos de inflamabilidad.
- Por último, su almacenamiento y transporte en condiciones criogénicas tiene un coste menor que otras sustancias y no causa daños en los metales de los tanques de almacenamiento como el hidrógeno.

Como desventajas, hay que destacar:

- Sustancia tóxica. Requiere de medidas preventivas y de contención para la protección de personas, infraestructuras y medio ambiente.
- El amoníaco tiene una densidad energética volumétrica menor a la del gasoil marino convencional, esto implica que para una misma autonomía deseada se necesitará un volumen

de amoníaco casi tres veces mayor. Bajo nivel calorífico y una velocidad de llama mala, lo que se traduce en una energía de combustión reducida.

- Su elevada temperatura de autoignición plantea dificultades en su uso en motores de combustión interna.
- Compuesto corrosivo para el cobre y aleaciones, níquel y otros metales mayoritariamente plásticos.

En vistas a lo expuesto, con el amoníaco buscamos un reacondicionamiento de los motores actuales para un consumo dual (gasoil-amoníaco) donde haya un aporte de amoníaco a través de la admisión de aire en los motores de combustión interna. El objetivo es acompañar la evolución con una nueva generación de motores duales diseñados específicamente para el uso de este tipo de combustible [22].

2.4.3 Metanol verde

Como tercera y última alternativa analizamos el metanol verde, un componente químico con buenas propiedades para la transmisión de energía. El metanol verde es un combustible sintético producido a partir de hidrógeno limpio y carbono de origen no fósil obtenido de la atmósfera o a partir de biomasa. Las atribuciones de este elemento han llevado a considerar este componente una opción para la descarbonización de Europa [24].

Actualmente la producción principal de este componente es a partir de los combustibles fósiles y en los últimos años se ha doblado su producción, principalmente por la expansión de China. De dicha cantidad, alrededor del 30% ha sido empleada como combustible. La predicción de producción del metanol es de crecimiento, llegando a las 120 Mt en el próximo año y las 500 Mt para 2050 anualmente, datos estimados por la Agencia Internacional de Energías renovables. Es importante resaltar que de esas 500 Mt producidas en 2050 se estima que la mitad será metanol verde y 135 biometanol.

Gracias a su prestación en forma de líquido ligero a temperatura ambiental es un compuesto sencillo de transportar y almacenar. Como se ha definido, actualmente la inmensa mayoría es producida a partir de gas natural. La alternativa del metanol verde, proveniente de fuentes de energías limpias, tiene como objetivo dar un fuerte impulso a este compuesto haciéndolo una alternativa real y prometedora a la hora de disminuir la huella de carbono en el transporte marítimo [25].

De la misma forma que el hidrógeno, el metanol es clasificado en función del grado de sostenibilidad en su proceso de producción. El metanol verde es producido exclusivamente con fuentes de energía renovables y cerciorándose que no se emiten al exterior gases nocivos al medio ambiente. Derivados de este concepto tenemos en primer lugar el biometanol, producido a partir de la gasificación de fuentes sostenibles de biomasa y en segundo lugar el e-metanol, producido a partir de hidrógeno obtenido con electricidad renovable (hidrógeno verde) y de la captura de CO₂.

2.4.3.1 Empleo y características del metanol verde

El atractivo a la industria marítima del metanol verde radica en sus ventajas económicas. Al ser un líquido a temperatura ambiente, este compuesto tiene un menor coste de almacenamiento y transporte en comparación con el hidrógeno gas o el amoníaco, y posee al mismo tiempo la huella de carbono más baja de todos los combustibles líquidos. El metanol, es empleable tanto en motores de combustión interna como en alimentación a pilas de combustible [25].

El metanol verde se obtiene mediante la captura de CO_{2eq} y su posterior combinación con hidrógeno limpio. Para la obtención de hidrógeno, se aplica una corriente eléctrica que rompe la molécula de agua separando el oxígeno del hidrógeno (electrólisis). Es importante mantener la electricidad necesaria para este proceso como energía renovable para obtener metanol verde completamente sostenible, no contaminante. La adhesión del CO_{2eq} con el hidrógeno verde es biometanol verde.

La segunda forma de obtener metanol verde, con un nivel menor en carbono es el mismo, pero obteniendo de un origen fósil el CO_{2eq}. El balance de dióxido de carbono se vuelve neutro al ser mezclado

con el hidrógeno verde (considerado así bajo en carbono). La Tabla 1 muestra las cantidades necesarias para obtener una tonelada de metanol verde.

CO_{2eq}	Hidrógeno verde renovable	Electricidad renovable
1,38 t	0,19 t	10/11 MWh

Tabla 1 Necesidades de materias primas para producir una tonelada de e-metanol [26].

2.4.3.2 Viabilidad del metanol verde

Este combustible tiene una mayor seguridad que otros de capacidades similares, puede ser almacenado en tanques comunes y prescindir de refrigeración ni elevadas presiones, cuenta también con un menor coste de conversión que sus homólogos alternativos. Es gracias a estas características que el metanol se sitúa como una opción prometedora a ser uno de los principales combustibles que guiarán la transición energética.

Es necesario una reducción del precio de la electricidad y una mayor eficiencia de los electrolizadores para conseguir un aumento en el uso del e-metanol. Estas premisas son necesarias para hacer de este combustible una opción competente. Por otro lado, la producción y el abastecimiento de este compuesto también han de mejorar en el proceso. Las necesidades de dióxido de carbono capturado y de hidrógeno limpio provenientes de fuentes renovables son muy elevadas, siendo muy pocos los productores de este compuesto hoy en día [24].

Una de las mayores plantas de producción es la planta piloto alemana perteneciente al proyecto MefCO₂. La Tabla 2 muestra la capacidad de síntesis que tiene esta planta.

Capacidad de producción

Captura de CO_{2eq}	1,5 toneladas al día
Hidrógeno verde	100 m ³ cada hora
Metanol verde	1 tonelada al día

Tabla 2 Capacidad de producción de la planta del Proyecto MefCO₂ [24].

La capacidad de producción actual de este compuesto es: biomasa, gas residual industrial o la captura directa de CO₂ (DAC). En primer lugar, el proceso DAC es pionero y no maduro siendo los costes de esta tecnología muy elevados haciendo difícil la rentabilidad de su instalación, descartamos por tanto esta opción. Por lo tanto, las dos opciones de alimentaciones son: a partir de biomasa o gas residual industrial.

La síntesis de metanol a través de biomasa se trata de un proceso similar a su obtención a partir de aceite residual y carbón. Debido a las reacciones endotérmicas de gasificación, se genera CO₂. Estas materias primas, además, producen también una mezcla syngas con una baja relación hidrógeno – dióxido de carbono. Para el ajuste de esta relación, una parte del CO se convierte en hidrógeno con agua, lo que crea CO₂ en exceso, ventilado a la atmósfera [26]. La eficiencia del carbono como materia prima ronda el 50%, lo que se traduce en que solo la mitad del carbono de las materias primas acaba transformándose en metanol, el resto se desecha.

El último proceso consiste en la producción a partir de corriente residual proveniente de la industria, empleando el dióxido de carbono de diversas fuentes industriales como plantas térmicas o fábricas. Esta tecnología se asemeja a la producción del compuesto a partir de syngas por lo que es una tecnología madura. Un catalizador tradicional es modificado para adaptarse a la generación de grandes cantidades de agua en el proceso de síntesis del metanol. Catalizadores ordinarios disponibles comercialmente.

El método de producción de e-metanol que mejor se adapta a la región gallega y que va a aportar de forma significativa a la economía circular es empleando el dióxido de carbono procedente de otras industrias. Las razones de esta conclusión se resumen en que la biomasa como materia prima escasea a escala industrial y fomenta el encarecimiento de bienes básicos. Situaciones que no tienen lugar cuando hablamos de CO₂ procedente de residuos industriales. Las regiones del norte de España se sitúan en los puestos más altos de generación de CO₂ debido al gran número de industrias que necesitan de una elevada cantidad de energía. Esto se traduce en el interés por parte de las industrias en incluir procesos de captura de emisiones para ser empleadas posteriormente en una planta de metanol [26].

2.4.4 Comparación y conclusiones

En función de lo analizado y la clasificación mostrada en la Figura 2-13, comparamos las tres alternativas presentadas: metanol, amoníaco e hidrógeno. Resumiendo, las ventajas e inconvenientes de la siguiente manera:

Energy source		Fossil (without CCS)					Bio	Renewable ⁽³⁾		
	Fuel	HFO + scrubber	Low sulphur fuels	LNG	Methanol	LPG	HVO [Advanced biodiesel]	Ammonia	Hydrogen	Fully-electric
High priority parameters										
•	Energy density									
•	Technological maturity									
•	Local emissions									
•	GHG emissions									
•	Energy cost									
•	Capital cost	Converter								
		Storage								
•	Bunkering availability									
Commercial readiness ⁽¹⁾										

Figura 2-13 Comparativa de combustibles marinos, fósiles, biológicos y renovables [22].

- **Hidrógeno:** su principal ventaja radica es su balance neto de emisiones, siendo este nulo o cercano a cero al ser producido por energías renovables. Las razones que dirigen al descarte de esta alternativa son las grandes desventajas que conllevan la falta de infraestructuras para bunkering, el alto coste de producción, almacenamiento, empleo y fundamentalmente su baja autonomía derivada de su poca densidad energética, como se ha demostrado en el caso específico de las lanchas de instrucción. Esto, sumado a la inestabilidad e inflamabilidad elevada que hacen necesario sistemas especiales de extinción imposibilitan el uso de este combustible en embarcaciones mar adentro.
- **Amoníaco:** este compuesto tiene la capacidad de considerarse un vector energético fundamental en la transición a renovables que presenciamos hoy en día. El amoníaco es un transportador de hidrógeno con una mayor densidad energética y estabilidad química. Si es producido de manera sostenible empleando energías renovables, como se ha detallado anteriormente, hablamos de un combustible libre de emisiones de carbono y azufre haciéndolo un combustible eficaz para navegaciones oceánicas y no solo costeras como el hidrógeno. Los

inconvenientes que presenta este compuesto, destacar su elevada toxicidad que implica una seguridad complementaria que afecta directamente en el coste y en la manipulación y almacenamiento del combustible, y haciendo referencia a la planta propulsora de las lanchas de instrucción, su elevada temperatura de ignición hace necesario la presencia de una combustión forzada, lo que afectaría al diseño integral de los motores actuales.

- **Metanol:** presenta una buena evolución energética y permite la conversión de unidades ya existentes a consumo por un coste rentable. Considerando su producción a partir de residuo industrial, su única desventaja radica en el precio (similar al del gasoil marino).

3 PLATAFORMA Y HERRAMIENTAS DE DISEÑO

3.1 RODMAN 66

3.1.1 Características técnicas

El modelo que va a ser sometido a estudio es la lancha de instrucción del grupo RODMAN, compañía pionera en su sector con más de 46 años de bagaje de actividad, concretamente, el modelo RODMAN 66 (Figura 3-1). Es una embarcación fabricada en PRFV (Poliéster Reforzado en Fibra de Vidrio) de propulsión diesel y casco en V.

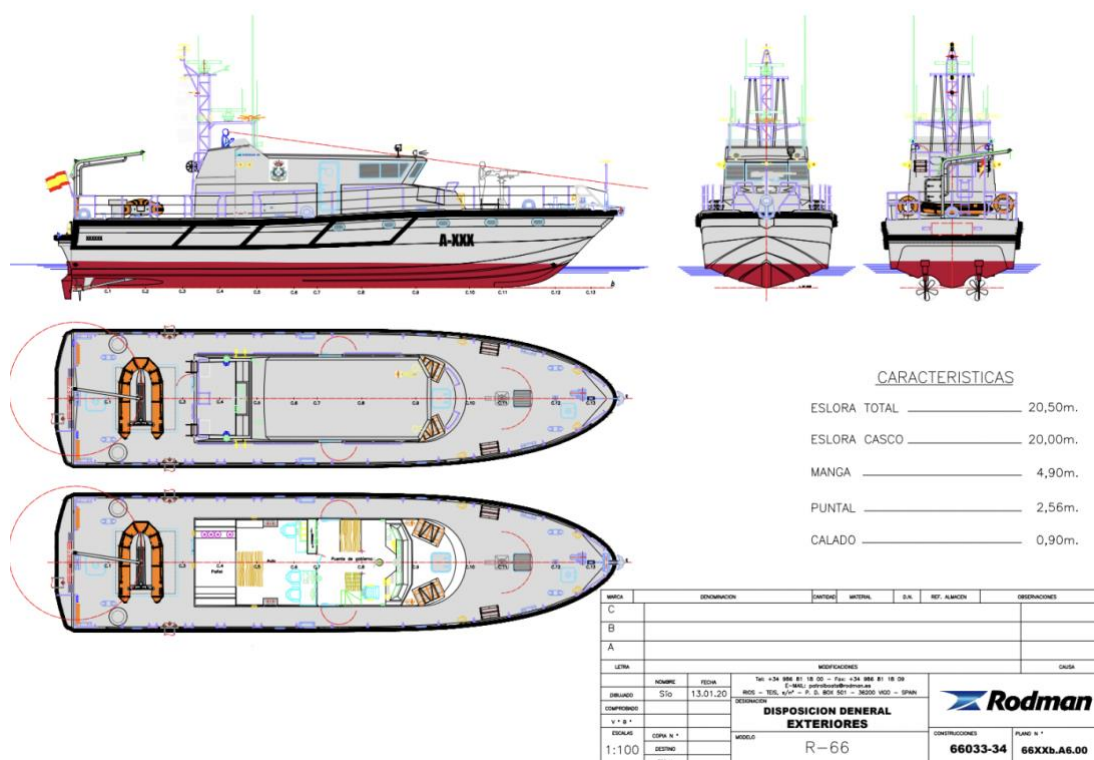


Figura 3-1 RODMAN 66 [27].

La cámara de máquinas se caracteriza por ser estanca e insonorizada. Los sistemas de control de los motores principales se encuentran en el puente de gobierno y en puente alto. Los indicadores y alarmas de los motores contarán con salida digital individual en el puente de gobierno, en el puesto correspondiente al mecánico [27]. El local de máquinas y el puente de gobierno contarán con indicadores y alarmas ópticos y acústicos.

El piso de la cámara se compone de planchas de aluminio grabado, un material ligero y antideslizante y debido a su tamaño, es desmontable con un solo hombre. Fijados mediante tornillos de acero inoxidable de cabeza avellanada. Tienen registros de acceso a las válvulas, bombas y otros equipos que precisan de atención [27].

Esta embarcación cuenta con un sistema de propulsión formada por dos ejes de 70 mm de diámetro engranados a dos motores marinos diesel CATERPILLAR C18 a través de reductores-inversores hidráulicos de la marca ZF 550 A con una reducción de 1,971:1. El motor, de alta potencia, sobrealimentado y refrigerado por agua de mar, que por medio del intercooler refrigera al mismo tiempo el agua dulce del circuito de circulación y aceite, cuenta con una potencia máxima de 746 KW para servicio continuo a 2300 rpm, aproximadamente. La Tabla 3 resume las características técnicas principales de los motores de las Lancha de Instrucción.

Nº de Cilindros	6 en línea
Rating C	4000 horas/año
Diámetro de los cilindros	145 mm
Carrera del pistón	183 mm
Cilindrada	18 litros
Sistema de admisión de aire	Turboalimentado y postenfriado
Sistema de refrigeración	Por agua dulce, con intercambiador
Sistema de arranque	Eléctrico
Sistema de inyección	Electrónica
Sentido de giro	Standard SAE (Contrario a las agujas del reloj)
Emisiones	IMO II

Tabla 3 Características motores principales RODMAN 66 [27].

3.1.2 Almacenamiento

En cuando al almacenamiento, los tanques de combustible se sitúan entre el comedor y la cámara de combustible, compartimento aislado entre mamparos estancos. Los tanques situados a babor y estribor cuentan con una capacidad de entre 5000L a 7000L, (según el modelo escogido). El anclaje de los tanques se realiza con fuertes soportes de acero inoxidable unidos al mamparo y a los refuerzos y mamparos antibalance y cuentan con registros de acceso atmosférico, sonda, indicador de nivel y sistema de purga de agua en la parte inferior de los depósitos.

3.1.2.1 Combustible

Consideramos un modelo de 6000 L de capacidad total de combustible. Estos tanques, situados en el local correspondiente (Figura 3-2), disponen de un tapón de relleno en cubierta y van provistos de atmosférico, sonda e intercomunicación.

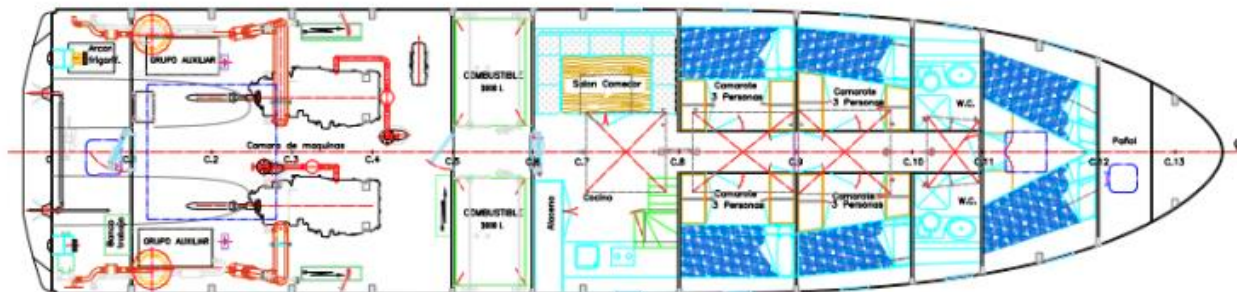


Figura 3-2 Disposición general interiores [27].

Los tanques son de aluminio instalados con alarma y filtros separadores de agua en combustible. Disponen de válvulas en la entrada y en la salida para asegurar que no se desceben los motores cuando se limpia el filtro y un “by-pass” en caso de emergencia. Resaltar, la alimentación de combustible a los motores se realiza directamente desde los tanques a las bombas de alimentación de cada motor.

3.2 Cálculo de volumen total de metanol necesario

De la especificación técnica de las lanchas de instrucción conocemos su capacidad de combustible; 6000 L y su autonomía a una velocidad económica de 15,6 nudos; 545,8 millas ([Anexo V: Catálogo C18](#)). El objetivo es mantener esta disposición sustituyendo el diésel empleado por metanol verde y con esta premisa calcular que volumen de tanque es necesario ampliar en base a las características de la plataforma. Para ello, estudiando las posibilidades que ofrece este compuesto (Tabla 4) deducimos el volumen total que será necesario añadir a la estructura existente.

	Densidad energética gravimétrica (MJ/kg)	Densidad energética volumétrica (MJ/l)	Densidad energética volumétrica (kWh/l)
Diésel	45	35,86	10,7
Metanol verde	20	15,6	4,33

Tabla 4 Comparación de densidades diésel y metanol.

Se busca una autonomía de 500 millas navegando alrededor de 15 nudos, empleando un 50% de diésel y un 50% de metanol, manteniendo un solo tanque de 3000 L de diésel mientras que el otro será adaptado al almacenamiento de metanol añadiendo los tanques necesarios para conseguir 250 millas de autonomía con este compuesto.

Partiendo de la densidad volumétrica y el consumo de los motores CATERPILLAR C18 a 1600 rpm tenemos un consumo total de 171,5 L/h, de los cuales 84,8 corresponden al motor de babor y 86,7 al de estribor ([Anexo V: Catálogo C18](#)). Considerando el mayor consumos de ambos, obtenemos:

$$2 \times 86,7 \frac{l}{h} \times 35,86 \frac{MJ}{l} = 6218,124 \frac{MJ}{h} \quad (1)$$

El resultado obtenido es la energía consumida por los motores cada hora. Ahora calculamos la cantidad de energía necesaria para obtener una autonomía de 250 millas náuticas; lo equivalente a 463 km. El consumo viene expresado en litros a la hora, por lo que el resultado se obtiene en Mega julios hora. Si consideramos que navegar 250 millas a 15 nudos supone un tiempo estimado de 16,6 horas obtenemos:

$$6.218,124 \frac{MJ}{h} \times \frac{250 MN}{15 kts} = 103.635,4 MJ \quad (2)$$

Traducimos la energía consumida por ambos motores Caterpillar C18 para una autonomía deseada aproximada de 250 millas y dividimos entre la densidad energética del metanol verde para obtener la masa total de metanol necesaria a almacenar.

$$\frac{103.635,4 MJ}{20 MJ/kg} = 5181,7 kg \quad (3)$$

Teniendo en cuenta la densidad del metanol; 791,8 kg/m³ dividimos la masa total de compuesto entre su densidad, dando lugar a la cantidad de metanol a almacenar.

$$\frac{5181,7 kg}{0,7918 kg/l} = 6544,203 litros \quad (4)$$

Como podemos observar la masa necesaria de metanol para obtener 250 millas de autonomía es aproximadamente dos veces superior a la necesaria con diesel. Sin embargo, de esos 6544,203 litros disponemos de un tanque de almacenamiento de diesel reacondicionado para metanol. Es decir, será necesario añadir un almacenaje de 3500 litros aproximadamente.

3.3 Análisis de condiciones

Para la elección adecuada de diseño, analizamos el ratio de inyección de combustible en función de la autonomía, emisiones de CO₂ y variación de la topología de las lanchas de instrucción. Es necesario evaluar el redimiendo de un motor dual-fuel para las condiciones reales de las lanchas de instrucción, para después determinar que ratio de inyección será el apropiado teniendo en cuenta una ampliación en la disposición actual de almacenamiento. El análisis ha de realizarse siempre con la constante de no variar el diseño del motor existente, esto quiere decir que la combustión será provocada por la compresión de diesel por lo que ambos combustibles deben consumirse a la misma velocidad, en diferentes cantidades.

En primer lugar, calculamos el almacenamiento necesario para diferentes volúmenes de combustible. Para la correcta realización de los cálculos seguimos el mismo procedimiento efectuado en el apartado anterior (Cálculo de volumen total de metanol necesario), donde se muestra paso a paso los pasos para el cálculo de metanol necesario con un relación de combustible del 50% diesel – 50% metanol. Analizaremos una disposición de la siguiente manera:

Volumen 40/60

- 40% de diesel = 200 millas
- 60% de metanol = 300 millas
- Energía necesaria:
 - $6.218,124 \frac{MJ}{h} \times \frac{300 MN}{15 kts} = 124.362,48 MJ$
- Masa de metanol necesaria:
 - $\frac{124.362,48 MJ}{20 \frac{MJ}{kg}} = 6218.124 kg$
- Cantidad que almacenar:
 - $\frac{6218.124 kg}{0,7918 kg/l} = \mathbf{7.853,149 \text{ litros metanol}}$
- Realizamos los mismos cálculos referentes al diesel (densidad energética 45 MJ/kg y densidad 850 kg/m3), obteniendo:
 - **2.167,5 litros diesel**

Volumen 30/70

- 30% de diesel = 150 millas
- 70% de metanol = 350 millas
- Energía necesaria:
 - $6.218,124 \frac{MJ}{h} \times \frac{350 MN}{15 kts} = 145.089,56 MJ$
- Masa de metanol necesaria:
 - $\frac{145.089,56 MJ}{20 \frac{MJ}{kg}} = 7254,478 kg$
- Cantidad que almacenar:
 - $\frac{7254,478 kg}{0,7918 kg/l} = \mathbf{9.162,008 \text{ litros metanol}}$
- Realizamos los mismos cálculos referentes al diesel (densidad energética 45 MJ/kg y densidad 850 kg/m3), obteniendo:
 - **1.625,65 litros diesel**

Volumen 20/80

- 20% diesel = 100 millas
- 80% metanol = 400 millas
- Energía necesaria:
 - $6.218,124 \frac{MJ}{h} \times \frac{400 MN}{15 kts} = 165.816,64 MJ$
- Masa de metanol necesaria:
 - $\frac{165.816,64 MJ}{20 MJ/kg} = 8290,832 kg$
- Cantidad que almacenar:
 - $\frac{8290,832 kg}{0,7918 kg/l} = \mathbf{10.470,866 \text{ litros metanol}}$
- Realizamos los mismos cálculos referentes al diesel (densidad energética 45 MJ/kg y densidad 850 kg/m3), obteniendo:
 - **1.083,76 litros diesel**

Traducimos a continuación los resultados obtenidos en las siguientes gráficas (Figura 3-3 y Figura 3-4):

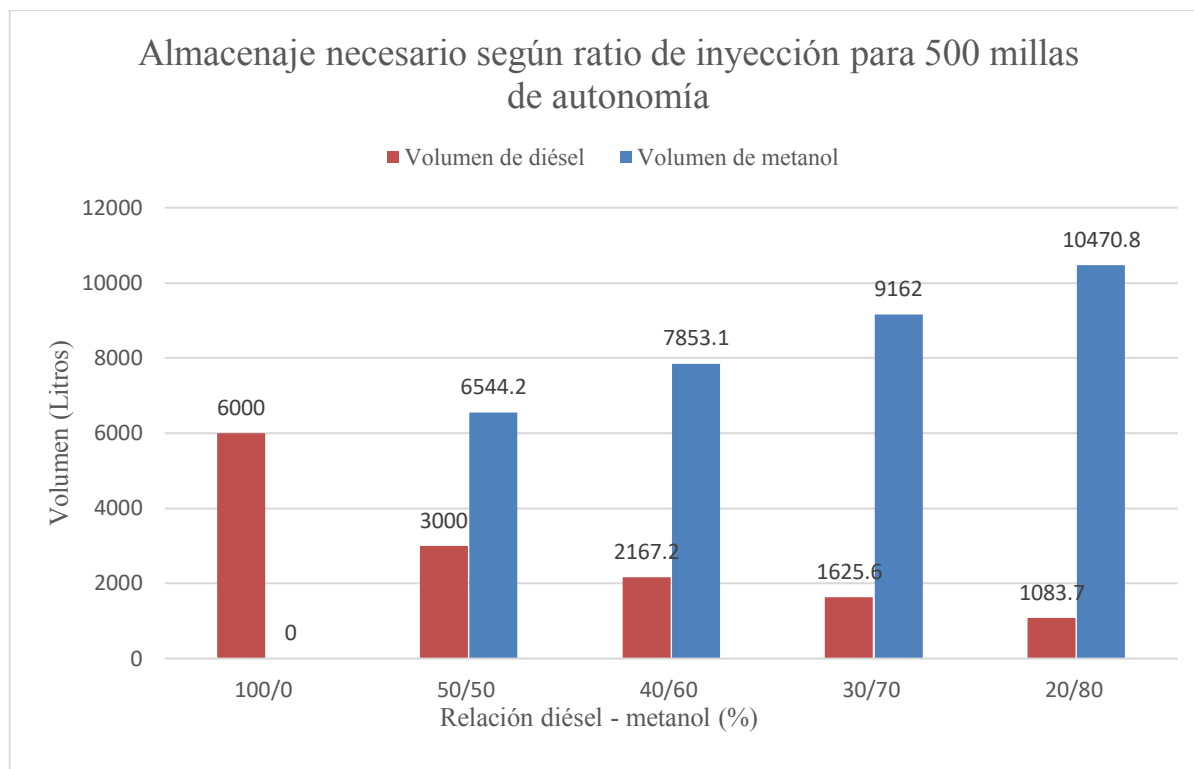


Figura 3-3 Relación de almacenamiento de combustible en función del ratio de inyección.

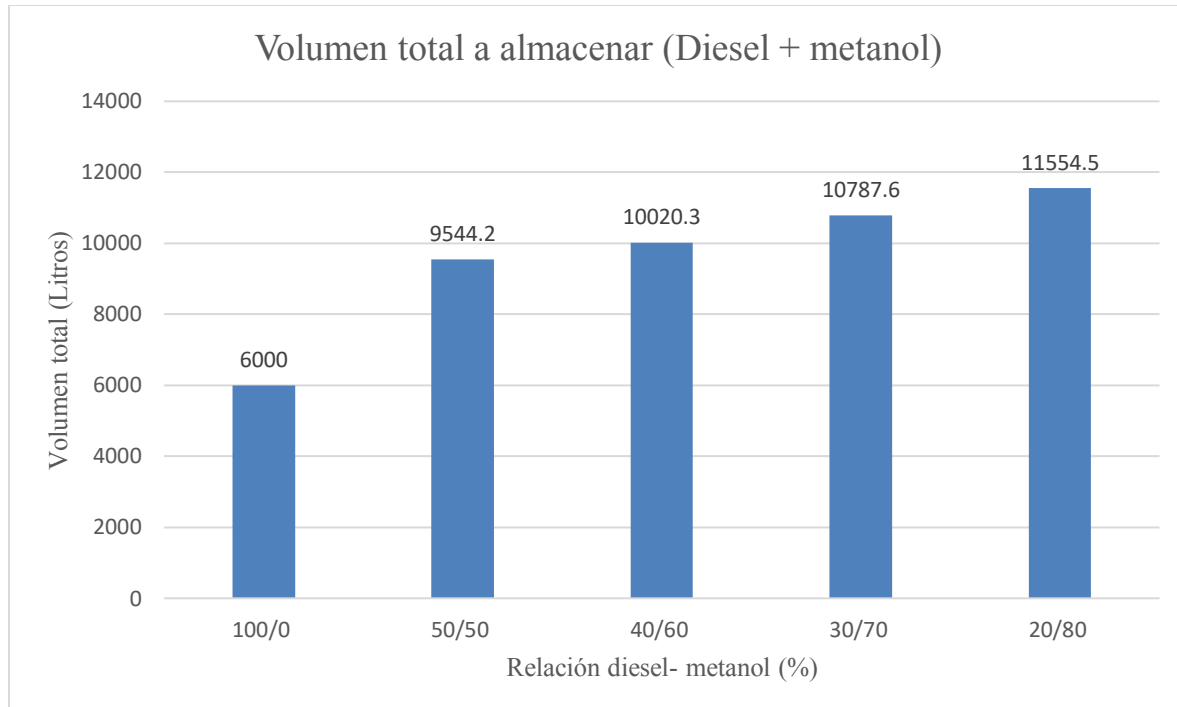


Figura 3-4 Volumen total de combustible expresado en litros.

En segundo lugar, analizamos la autonomía que llegamos a obtener considerando los mismos ratios de inyección anteriores, pero sin una variación estructural de buque, es decir para un almacenamiento máximo de 6000 Litros. Este cálculo tiene como objetivo comparar la eficiencia de los diferentes ratios de inyección.

1. Caso para ratio de 50/50 (Metanol):

Consideramos la mitad de la capacidad actual de la lancha para almacenamiento. Para obtener la masa de metanol necesaria en estas condiciones multiplicamos por su densidad.

$$3000 \text{ l} \times 0,7918 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 2375,4 \text{ kg} \quad (5)$$

En segundo lugar, la energía necesaria en mega julios se obtiene del producto de la masa y la densidad energética del compuesto:

$$2375,4 \text{ kg} \times 20 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 47508 \text{ MJ} \quad (6)$$

Al conocer la energía total necesaria según el consumo de los motores Carterpillar C18, podemos saber la distancia navegable a 15 nudos con una limitación de 3000 L de almacenamiento, lo que hemos traducido en 47508 MJ.

$$\frac{47508 \text{ MJ}}{6218,124 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}} \times 15 \text{ kts} = \mathbf{114,6 \text{ MN}} \quad (7)$$

2. Caso para ratio de 50/50 (Diesel):

Consideramos la segunda mitad de la capacidad de la lancha. Para obtener la masa de metanol necesaria en estas condiciones multiplicamos por su densidad.

$$3000 \text{ l} \times 0,850 \frac{\text{kg}}{\text{l}} = 2550 \text{ kg} \quad (8)$$

En segundo lugar, la energía necesaria en mega julios se obtiene del producto de la masa y la densidad energética del compuesto:

$$2550 \text{ kg} \times 45 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} = 114750 \text{ MJ} \quad (9)$$

De la misma manera que antes, conociendo la energía total necesaria según el consumo de los motores Carterpillar C18, podemos saber la distancia navegable a 15 nudos.

$$\frac{114750 \text{ MJ}}{6218,124 \frac{\text{MJ}}{\text{h}}} \times 15 \text{ kts} = \mathbf{276,811 \text{ MN}} \quad (10)$$

Realizamos los cálculos para los demás ratios de inyección obteniendo:

V (%) diesel/metanol	Energía diesel (MJ)	Energía metanol (MJ)	Energía total (MJ)	Autonomía (MN)
100/0	229500	0	229500	500
50/50	114750	47508	162258	391
40/60	91800	57010	148810	359
30/70	68850	66511	135361	326
20/80	45900	76013	121913	294

Tabla 5 Energía y autonomía obtenida según relación de combustible, para condiciones actuales.

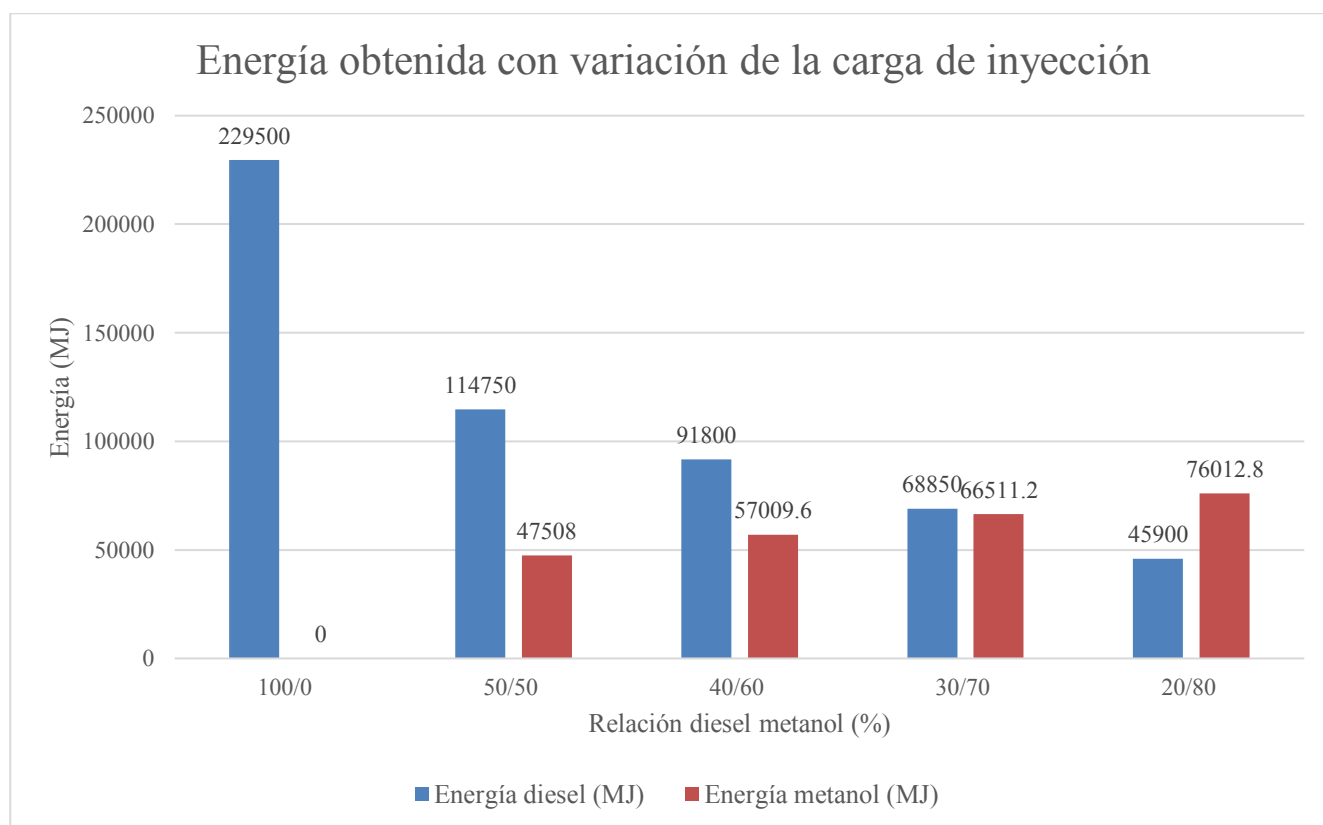


Figura 3-5 Energía obtenida para condiciones actuales de almacenamiento según ratio de inyección.

La Figura 3-5 refleja la energía dada por diferentes cargas de combustible, de diesel y metanol respectivamente. Dicha energía, proviene de la carga de almacenamiento real de las lanchas de instrucción, esto nos da perspectiva para ver la eficiencia de ambos combustibles. La información mostrada es extrapolada a la condición de funcionamiento de los motores Caterpillar C18 de las LLII, con el objetivo de conocer la autonomía real que dicha energía nos proporciona. Resultados representados a continuación en la Figura 3-6:

Autonomía total (MN) según relación diesel-metanol.

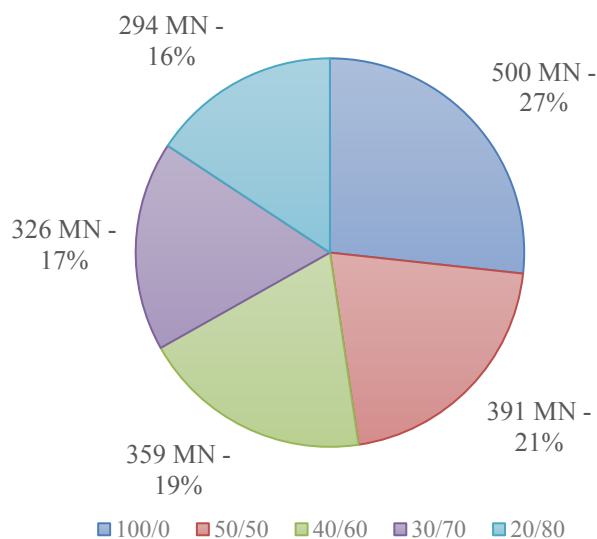


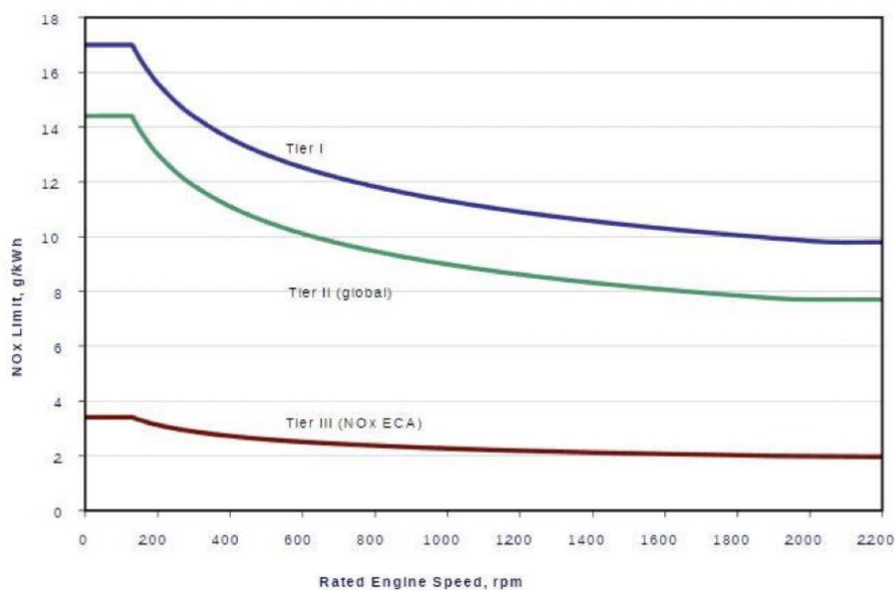
Figura 3-6 Comparación gráfica de autonomía para condiciones actuales de almacenamiento.

3.4 Normativa de emisiones OMI

“La OMI (Organización Marítima Internacional) es el organismo especializado de las Naciones Unidas responsable de la seguridad y protección de la navegación y de prevenir la contaminación del mar por los buques” [23].

Es la organización responsable de implantar normativas ambientales específicas que afectan al 99% del tonelaje de la flota global, estas normativas son recogidas en el convenio MARPOL 78/97. En referencia al amoníaco, el convenio busca reducir los límites admisibles de las emisiones de óxidos de azufre y nitrógeno (SO_x y NO_x), implementando un método de reconocimientos y certificaciones para todo buque de arqueo bruto igual o superior a 44 GT.

La OMI establece una clasificación de los óxidos de nitrógeno o NO_x que puede generar un buque y los diferencia en tres categorías (Figura 3-7), siendo la tercera solo aplicable a zonas ECA.

Figura 3-7 Límites de emisiones de NO_x establecidos por el convenio MARPOL [22].

3.4.1 *Análisis de emisiones*

Las emisiones de dióxido de carbono de la combustión de metanol se basan en la contención de carbón por MJ de combustible. El contenido de carbón varía ligeramente en función de la pureza del combustible, sin embargo, esto pasa por un control de pureza en su producción.

Al hablar de CO₂ proveniente de bio-metanol, lo consideramos climáticamente neutral y por tanto no como una gas de efecto invernadero (GHG). Esto se debe al asumir que el CO₂ emitido de combustibles basados en biomasa es eliminado de la atmósfera una vez que nueva biomasa crece para sustituir a aquella empleada para combustible. Las emisiones de CH₄ y N₂O provenientes de metanol son consideradas nulas.

Wärtsilä, la empresa líder global en tecnologías en el mercado marino y de energía, ha llevado a prueba las emisiones de NO_x del metanol contra aquellas de fuelóleo pesado (de sus siglas en inglés HFO) en dos modelos de motor, la Tabla 6 muestra los resultados obtenidos de estas pruebas de emisiones. De los que se asume que las emisiones de NO_x durante la combustión son reducidas alrededor de un 60% cuando se trabaja con metanol en comparativa con fuelóleo pesado. Para el caso del diesel, se obtiene una conclusión similar siendo la reducción de estas emisiones un 30%.

Compuesto	Emisiones (g/MJ metanol)
CO ₂	69
CH ₄	0
N ₂ O	0
NO _x	0.4
SO _x	0

Tabla 6 Factores de emisiones para combustión de metanol en motores marinos [33].

Los análisis de Wärtsilä también indican que la eficiencia de los motores es la misma o superior al tratar con metanol. Su experiencia afirma un aumento del orden del 1-2% en motores de metanol, sin embargo, no han llevado a cabo ensayos para documentar dichos resultados. Es por ello, que la eficiencia de los motores marinos se asume la misma al emplear metanol como combustible.

3.4.1.1 *Motores dual-fuel, relación de presión en la inyección – emisiones*

Un estudio llevado a cabo por la universidad de Tianjin, China, muestra los efectos de la inyección a presión y emisiones de un motor diésel alimentado por doble combustible, diesel/metanol [34]. En el modo diesel/methanol dual-fuel (DMDF), el metanol es inyectado a través de la admisión del cilindro, formando así una mezcla aire/metanol previa a la combustión, para posteriormente ser iniciada por la inyección directa de diesel en la cámara de combustión (Tabla 7). El objetivo de este estudio es estudiar el efecto de la presión de la inyección en la eficiencia y emisiones del motor. Los resultados muestran que la duración de la combustión es menor en el modo DMDF y que genera menores tasas de emisión de NO y CO₂ que el modo diesel. Con una subida de presión en la inyección de diesel, las emisiones de CO y HC decrecen, sin embargo, las de CO₂ y NO₂ incrementan ligeramente.

Properties	Diesel	Methanol
Density at 20 °C (kg/m ³)	830	790
Low heating values(MJ/kg)	42.5	19.7
Content of C (%)	86	38
Content of H (%)	13	12
Content of O (%)	–	50
Sulfur (mg/kg)	350	0
Autoignition temperature (°C)	≈250	450
Latent heat of evaporation (kJ/kg)	250	1110
Cetane number	≥49	3–5
Burning range (%)	1.4–7.6	5.5–26
Kinematic viscosity at 20 °C (mm ² /s)	3.0–8.0	–

Tabla 7 Comparativa de propiedades entre diesel y metanol [34].

La Figura 3-8 muestra la concentración de CO₂ para ambos modelos de motor según el aumento de presión en la inyección de combustible. El gráfico muestra el ratio relativo de CO₂, CO/CO₂* el cual representa el ratio de concentración de CO₂ del modo DMDF con respecto al modo diesel. Se ve que la concentración de CO₂ en el modo de doble combustible aumenta proporcionalmente con el aumento de presión en la inyección, pero manteniéndose menor al modo diesel. Esto se debe a que para mismos niveles caloríficos de combustibles se consumen completamente durante la combustión, el metanol genera menos CO₂.

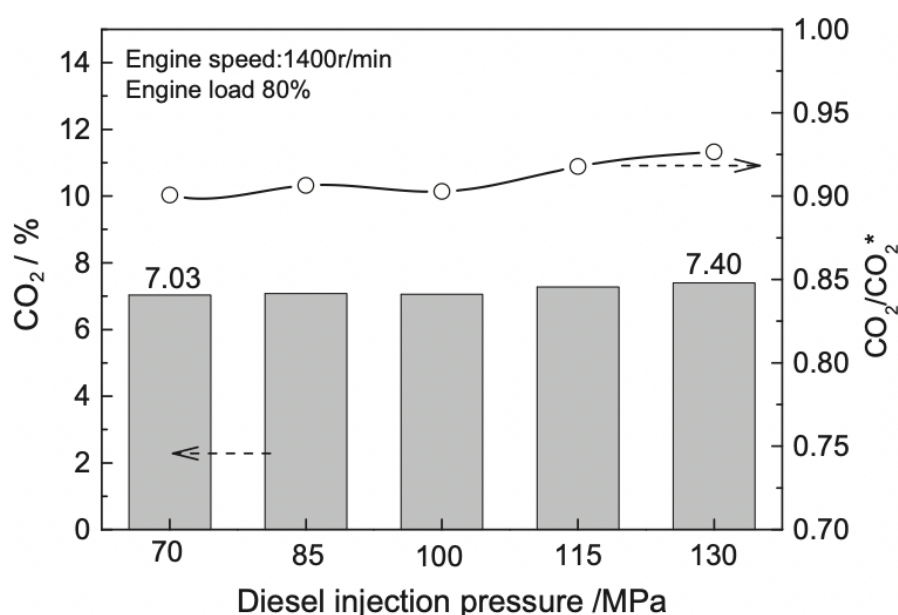


Figura 3-8 Concentración de emisiones en función de presión de inyección [34].

3.4.1.2 Motores dual-fuel, relación ratio de inyección - emisiones

De un segundo estudio de la universidad de Tianjin, se estudia la reducción de emisiones de un motor alimentado por fuel pesado con un motor dual-fuel diesel/metanol (Figura 3-9). En el experimento la cantidad inyectada de metanol es variada de acuerdo con la potencia entregada por el motor mientras que la cantidad de diesel permanece constante en regímenes distintos.

Los resultados reflejan que en bajas y medias cargas hay una disminución en las emisiones en modo DMDF, pero un ligero aumento en altas concentraciones. Un fenómeno importante observado es que la masa y el número de partículas decrece significativamente en bajas y medias cargas, debido en el aumento de combustible quemado en el modo premezclado y una reducción en la cantidad de diesel

empleado, mientras que aumenta cuando el motor en condición de alta carga, debido a la combustión espontánea de metanol y la reducción de oxígeno para diesel en el cilindro. También se observa que la temperatura de admisión de aire decrece con el aumento de metanol en inyección, y el número y masa de concentración de emisiones decrece con la disminución de dicha temperatura.

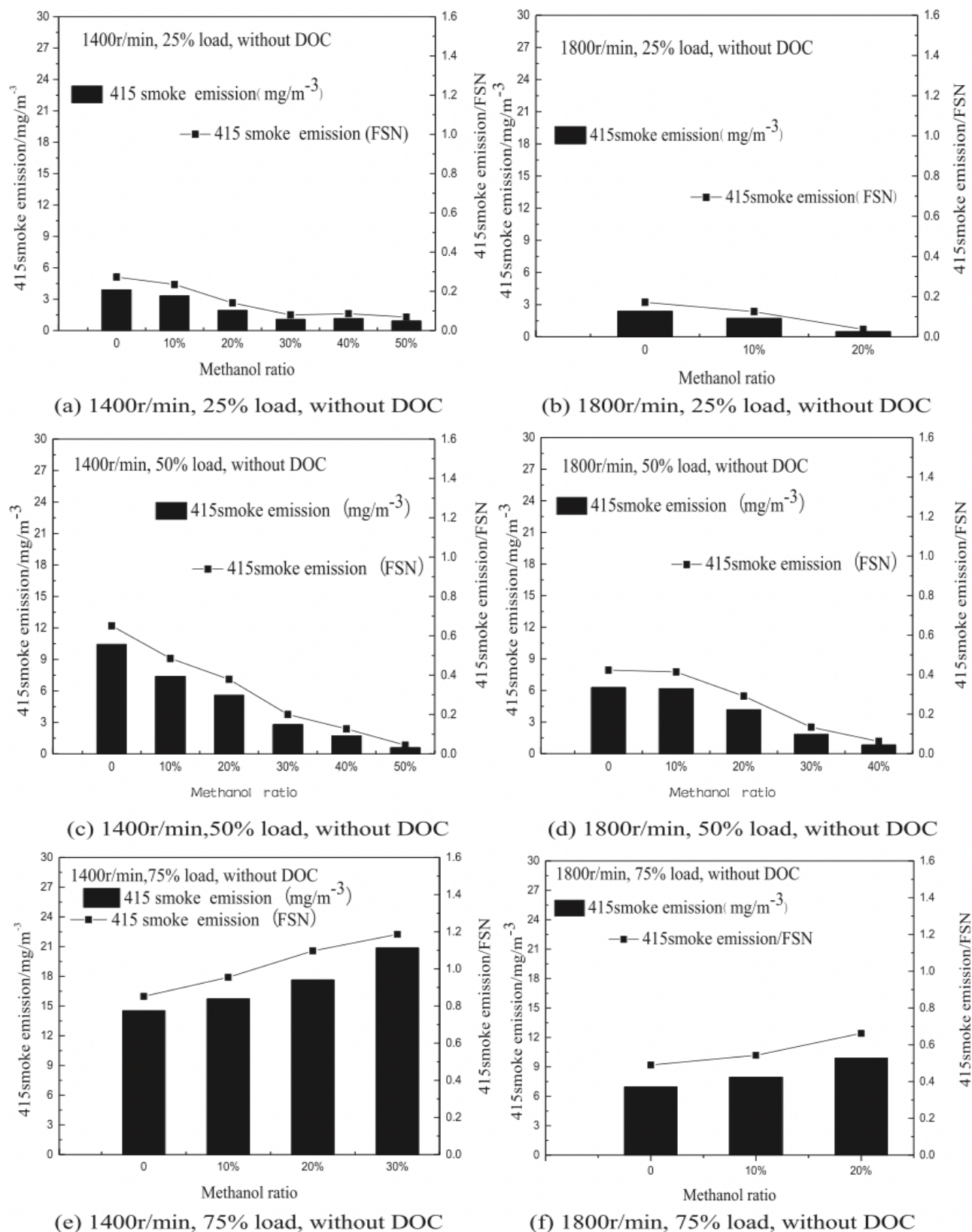


Figura 3-9 Efectos de DMDF en emisiones con variación de carga de combustible [34]

3.5 Conclusión y elección de diseño

Tras el análisis realizado, evaluando la eficiencia en función de distintas cargas de combustible, considerando las condiciones de carga, alojamiento y operatividad de las LLII, el diseño buscará alojar una planta de propulsión basada en la inyección proporcional de ambos combustibles. Los datos de dichas condiciones para la disposición actual de las LLII se reflejan a continuación en la Tabla 8:

V_D/V_M	100/0	50/50	40/60	30/70	20/80
NM	500	391	359	326	294
V_{Diesel}	6000	3000	2400	1800	1200
V_{Metanol}	0	3000	3600	4200	4800
Partículas (mg/m^3)	11	2	4	5	3

Tabla 8 Resumen condiciones según ratio de inyección.

El objetivo es el de mantener el mismo nivel de operatividad que el ya existente en la plataforma de trabajo. Buscamos una relación de inyección de 1:2,18 (Tabla 9) con la finalidad de no modificar el motor, consumiendo ambos combustibles a la misma velocidad, lo que implica el rediseño de la planta actual con el fin de albergar 3545 litros de metanol en la plataforma para buscar la misma autonomía proporcionada por las lanchas de instrucción. Teniendo en cuenta la disponibilidad ya existente, el diseño se basaría en 3000 litros de diesel y 6545 litros de metanol.

Ratio D/M	1:0	1:2,18	1:3,62	1:5,63	1:9,65
NM	500	500	500	500	500
V_{Diesel}	6000	3000	2167	1626	1084
V_{Metanol}	0	6545	7853	9162	10471

Tabla 9 Ratio de inyección en la combustión para 500 millas de autonomía.

Características de diseño:

- Almacenamiento de diesel: 300 L
- Almacenamiento de metanol: 6545 L
- Autonomía: 500 millas náuticas
- Relación de inyección: 2,18 gramos de metanol por cada gramo de diesel.
- Volumen de aire de combustión: $43,8 \text{ m}^3/\text{min}$
- Relación de compresión 16, 3:1

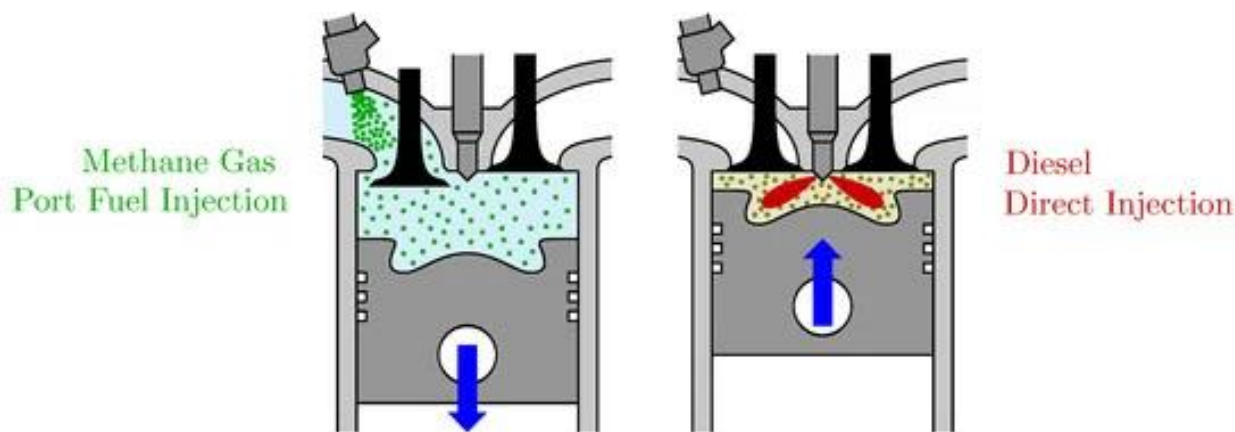


Figura 3-10 Principio de operación motor dual-fuel [35].

Como se puede observar en Figura 3-10, el metanol es inyectado en la cámara de combustión a través del circuito de admisión de aire, para posteriormente ser iniciado por la compresión de una pequeña carga de diesel inyectada directamente en la cámara de combustión.

3.6 Análisis comparativo de la estabilidad en la combustión diesel-metanol en un motor dual

El siguiente apartado evalúa la co-combustión de diesel con alcohol carburante en un motor de encendido por compresión como uno de los procesos de fomentar el uso de combustibles alternativos en estos motores. Esta sección presenta examinaciones experimentales de en motores de encendido por compresión en un sistema dual, en donde la combustión se lleva a cabo para diesel y metanol con energía contenida en porcentajes de 20%, 30%, 40% y 50%. El estudio incluye el análisis del proceso de combustión y el análisis de la variación ciclo-ciclo de los 200 ciclos del motor [36]. Se muestra que la presencia y su aumento de metanol para la combustión con diesel causa un retardo en el encendido y aumenta la salida de calor y los valores de presión en la combustión. Según los cambios en parámetros como el coeficiente de variación de la presión media efectiva indicada (COV_{IMEP}) y la función densidad de probabilidad de la presión media efectiva indicada ($f(IMEP)$) se puede afirmar que para el mayor porcentaje de alcohol carburante (50%) la co-combustión de diesel con metanol muestra un mayor estabilidad.

3.6.1 Determinación de la variabilidad ciclo a ciclo

Durante la observación del curso del indicador de presiones en el funcionamiento sucesivo del motor, es fácil notar diferencias en los valores de presión máxima y la presión media efectiva indicada en los ciclos posteriores. Esta variabilidad del ciclo es una característica indeseable de la combustión en motores de combustión interna ya que conducen a una menor eficiencia y a mayores emisiones, así como a limitaciones de potencia de salida [37]. Las causas de la variación de presión media efectiva se deben a la variación de condiciones en el cilindro de un ciclo de combustión a otro, bajo condiciones de funcionamiento idénticas.

La mitigación de los efectos de la variabilidad del ciclo puede reducir el consumo de combustible y minimizar la emisiones de compuestos nocivos en motores de combustión interna. Además, la limitación de la variabilidad del ciclo permite una mejor optimización del motor, es decir, es posible alcanzar una eficiencia cercana a las condiciones óptimas. Los principales fuentes de la no repetibilidad de los ciclos del motor incluyen:

- Procesos de flujo producidos en el cilindro del motor.
- Variabilidad de la relación aire-combustible en ciclos individuales
- Composición desigual de la mezcla combustible en el cilindro debido a una mezcla incompleta de aire, combustible y gas residual.

La evaluación del nivel de irrepetibilidad de la presión máxima y de la media indicada presión efectiva del ciclo térmico que se produce en el cilindro del motor de combustión interna puede estudiarse mediante el análisis de centenares ciclos consecutivos del motor. El conjunto de presiones máximas obtenidas se puede dividir en clases, a partir del intervalo que contiene el menor de los valores de máxima presión y por otro lado el valor máximo de máxima presión en un conjunto de ciclos. Mediante este intervalo se obtiene el valor medio de la presión máxima, definida como:

$$\overline{P_{max}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{max i} \quad (11)$$

Donde N es el número de ciclos y $P_{max i}$ es la presión máxima en ciclos individuales.

Al ser la variabilidad de los ciclos de trabajo uno de los criterios más utilizados para la evaluación del correcto funcionamiento de los motores de combustión, se adopta el coeficiente de no repetibilidad de la presión máxima COV_{PP} como medida de no repetibilidad.

$$COV_{PP} = \frac{\sigma_{Pmax}}{\overline{P_{max}}} \times 100\% \quad (12)$$

Se define la desviación estándar de la presión máxima como:

$$\sigma_{Pmax} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{max i} - \overline{P_{max}})^2} \quad (13)$$

Donde $\overline{P_{max}}$ es el valor medio de presión máxima de N ciclos con $P_{max i}$.

La presión media efectiva indicada es evaluada según los cambios recogidos de la presión del cilindro y representa uno de los indicios que caracteriza la operación de motores de combustión en términos de las oportunidades de asegurar una elevado nivel de operación. Presión media efectiva a un ciclo individual:

$$IMEP_i = \frac{1}{V_d} \int_0^{720} p dV \quad (14)$$

El valor medio de la presión media efectiva se define como:

$$\overline{IMEP} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N IMEP_i \quad (15)$$

La no repetibilidad de la presión media efectiva se determina de la misma manera q la del valor máximo de presión:

$$COV_{IMEP} = \frac{\sigma_{IMEP}}{\overline{IMEP}} \times 100\% \quad (16)$$

Siendo su desviación estándar:

$$\sigma_{IMEP} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (IMEP_i - \overline{IMEP})^2} \quad (17)$$

Por último, la función de densidad de probabilidad permite expresar la probabilidad de obtener un valor concreto de los parámetros analizados. Esta función se usa como un indicador de estabilidad de operación en los motores de combustión interna. Esta función, tiene el perfil de una distribución normal (distribución gaussiana), donde la función de densidad es simétrica respecto al valor medio de la distribución.

$$f(IMEP) = \frac{1}{\sigma_{IMEP}\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{-(IMEP_i - \overline{IMEP})^2}{2\sigma_{IMEP}^2}\right) \quad (18)$$

3.6.2 Desarrollo experimental

El proceso de co-combustión de diesel con metanol emplea como escenario de prueba el motor mono cilíndrico de cuatro tiempos 1CA90 de construcción polaca. Este motor es una unidad estacionaria con dos válvulas y una disposición vertical de cilindros. El motor opera en un régimen rotacional constante de 1500 rpm e inyección constante con un ángulo de 17°, apreciable en la Figura 3-11. Al motor original, con inyección directa de diesel al cilindro, se le equipa con una instalación adicional de aporte de combustible, de metanol, en el colector de admisión. El prototipo experimental, siendo su principal componente el motor, es equipado con los medios de medida y control necesarios para proporcionar los parámetros de trabajo del motor. Entre estos indicadores se incluye grabación digital y análisis de la variación de presión en la cámara de combustión.

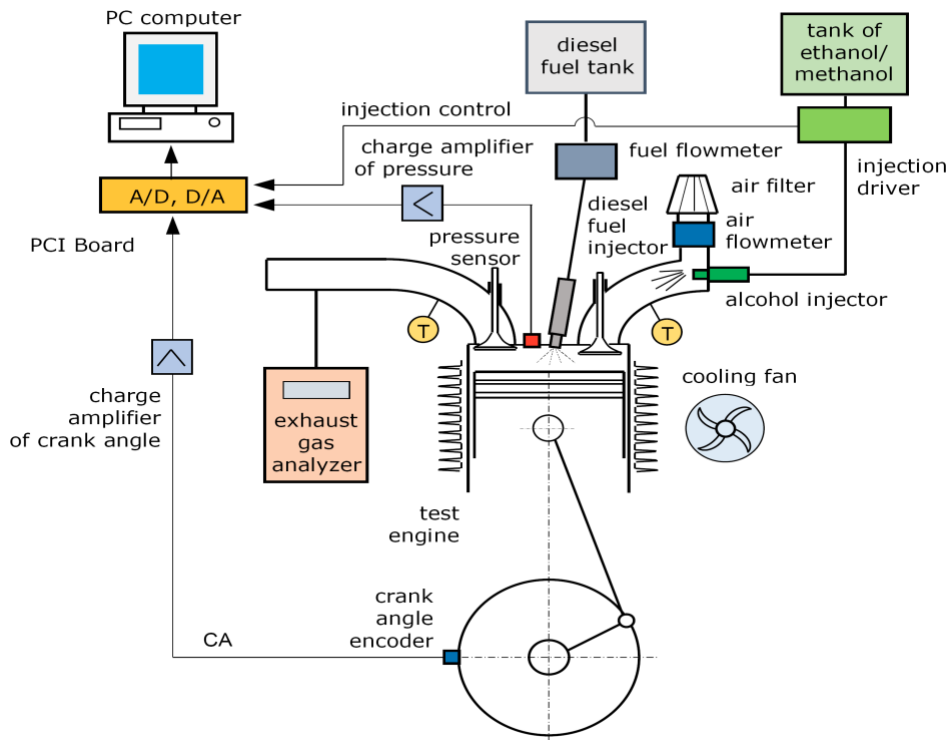


Figura 3-11 Diagrama del montaje experimental [36].

El montaje experimental se compone de:

- Motor de encendido por compresión 1CA90.
- Sistema digital de análisis de datos (traductor de presión, amplificador de carga, módulo de adquisición de datos).
- Analizador de gases de escape.
- Termómetro con resolución de 0.1°C.

3.6.3 Resultados

El estudio se basa en la medida de presión en el cilindro del motor en comparativa según el ángulo del cigüeñal. Las medidas comienzan con un referencia del motor operando con diesel como único combustible. Los perfiles de presión obtenidos sirven para determinar la tasa de calor expulsado y con ello evaluar el rendimiento del motor.

La presencia y aumento de metanol en la combustión compartida con el diesel provoca un retardo en la ignición, esto se debe a un valor mayor de calor latente de vaporización del alcohol comparado con el diesel. A su vez, este retardo provoca un aumento de calor expulsado y en los valores máximos de presión en combustión. En definitiva, este retardo se traduce a un mayor consumo de combustible en la combustión previa a la mezcla (fase cinética), la cual junto con la combustión de diesel en una mezcla más rica me metanol y aire, lleva a un aumento en la presión máxima de combustión y en calor expulsado.

La Figura 3-12 muestra la densidad de probabilidad de la presión media efectiva en motores convencionales según el ratio de inyección de metanol y etanol, en cantidades desde veinte hasta cincuenta por ciento.

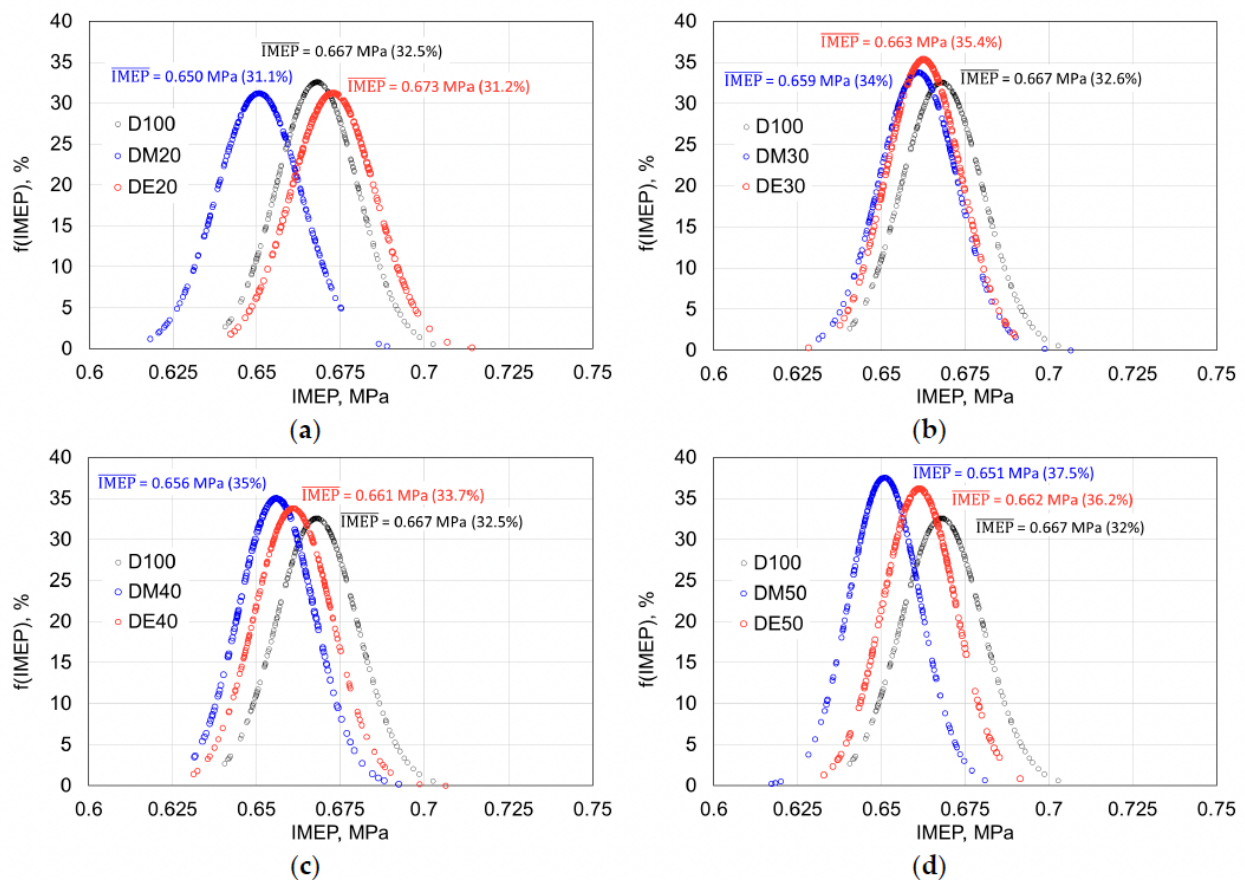


Figura 3-12 Resultados de la densidad de probabilidad de la presión media efectiva indicada para co-combustión de diesel y metanol/etanol para cantidades de 20% (a), 30% (b), 40% (c) y 50% (d) [36].

El estudio incluye el análisis del proceso de combustión y el análisis de no repetitividad de 200 ciclos del motor. El análisis de los resultados [36] obtenidos lleva a las siguientes conclusiones:

- La presencia y aumento de la proporción de metanol empleado para la co-combustión con diésel provoca un aumento en el retardo de encendido por compresión y aumenta la tasa de liberación de calor y el valor máximo de presión de combustión.
- Para altos porcentajes de energía de más del 30%, el metanol, en comparación con el alcohol etílico, resultó ser un combustible que va acompañado de una mayor tasa de combustión de carga, lo que contribuye a la intensificación del proceso.
- El análisis del funcionamiento de un motor de combustible dual basado en el valor del coeficiente de variación de la presión efectiva media indicada (COV_{IMEP}) durante 200 ciclos de operación revela una mejora en la estabilidad de su funcionamiento con un aumento del porcentaje de alcohol. En su mayor proporción de alcohol (50%), el metanol demuestra ser un mejor combustible que el etanol.
- Basado en la función de la densidad de probabilidad de la presión efectiva media indicada ($f(IMEP)$) preparado para 200 ciclos de funcionamiento del motor, se puede concluir que el aumento en el porcentaje de metanol empleado conduce a una mayor estabilidad de operación en motores duales. Para una cuota del 50 % de combustible alcohólico, el valor más elevado de $f(IMEP)$, que demuestra una mejor estabilidad del motor, se caracterizó por metanol y fue igual al 37,5%.
- Con el aumento en el ratio de inyección de metanol empleado en la co-combustión con diésel, la dependencia de la presión media efectiva indicada de la presión de combustión máxima disminuye.

3.7 Tanques suplementarios para el almacenaje de combustible

El metanol ha de ser almacenado en un lugar especial, protegido de cualquier fuente de calor e inflamación. En esta ubicación, los sistemas eléctricos han de estar completamente cerrados y a prueba de explosión. El recipiente de almacenaje ha de estar herméticamente sellado para evitar la absorción de humedad, sin embargo, el sellado del tanque debe de dejar espacio para permitir la expansión térmica con el objetivo de evitar posibles roturas del recipiente por la expansión causada por los cambios de temperatura.

De entre los diferentes tipos de tanques empleados como depósitos para contener una reserva de un determinado producto para su posterior uso, buscamos uno del tipo cilíndrico horizontal ya que generalmente son empleados para volúmenes bajos por posibles problemas de fallas de corte y flexión. Dentro de este tipo se albergan tres subgrupos; de techo fijo, de techo flotante y sin techo. De entre los posibles a la aplicación en una plataforma marina definimos los dos primeros:

3.7.1 Techo fijo

Caracterizados por una parte superior sólida que se une directamente a la carcasa. Son empleados para la contención de productos no volátiles o con un reducido nivel de inflamabilidad. Estos depósitos generan una cámara de aire a medida que se reduce la columna de fluido, lo que facilita la evaporización del fluido, lo que lo hace altamente peligroso.

3.7.2 Techo flotante

Los tanques de este tipo son empleados para albergar productos volátiles como el alcohol y combustibles en términos generales (Figura 3-13). Diseñado para disminuir o anular la cámara de aire entre el espejo del fluido y el techo, aparte de aportar un medio aislante para la superficie del fluido. Otra característica del tanque es la de reducir la velocidad de transferencia de calor al fluido almacenado en periodos de elevada temperatura ambiental, evitando la contaminación del ambiente al reducir la formación de gases por evaporización.

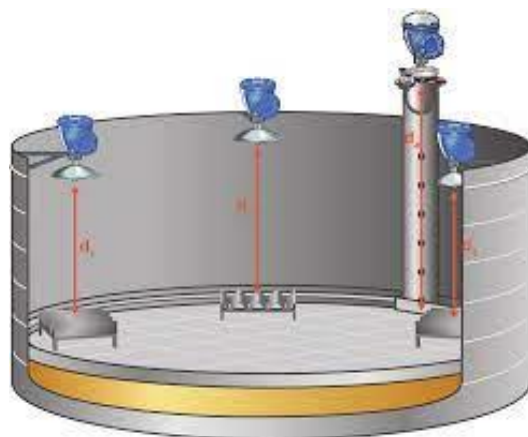


Figura 3-13 Tanques de techo flotante [31].

3.8 Consideraciones para el almacenamiento de metanol

El metanol ha de ser almacenado en recipientes de acero al carbón, rodeado de un dique y con un adecuado sistema de extinción de incendios de polvo seco o en su defecto dióxido de carbono. Se selecciona el acero inoxidable, material componente de los actuales tanques de las Lanchas de instrucción, por su resistencia a presiones elevadas.

Por lo tanto, el almacenamiento de este compuesto está sujeto a las mismas disposiciones que el gasóleo. En términos generales, el compuesto es almacenado en tanques exteriores con techos flotantes y tanques menores flotantes con deflectores internos [28]. Debido a común almacenaje con otros combustibles o disolventes, las tuberías y válvulas que entren en contacto con el metanol deberán ser etiquetadas sistemáticamente indicando el sentido del flujo del combustible.

3.8.1 Sistema de detección de incendios y contraincendios RODMAN 66

La protección contra posibles incendios, que encontramos en la plataforma, pensada para el comportamiento del gasóleo, es suficiente para los tanques de metanol, siempre que se consideren precauciones para la detección de fugas, peligros tóxicos y disponibilidad de espuma de supresión de fuego compatible con este alcohol.

Existe un sistema fijo de detección que actúa en la cámara de máquinas y tanques de combustible. Sobre ella actúan dos detectores de humo remotos y otro de temperatura situados en cada motor y tanques de combustible. El sistema calcula las cantidades de CO₂ necesarias para inundar el compartimento y extinguir el incendio [27].

3.8.2 Ventilación RODMAN 66

La cámara de máquinas cuenta con un sistema de ventilación y extracción a través de dos unidades que garantizan la renovación de aire interno. Los mecanismos de entrada y salida de aire cuentan con un sistema de cierre rápido, con el objetivo de hacer estanqueidad en la cámara en caso de incendio. Por otro lado, las salidas de ventilación están instaladas en el exterior y con un altura lo más elevada posible, disponiendo de un sistema de antievaporización para eliminar residuos en máquinas y garantizar una eficiente disipación del calor producido [27].

3.8.3 Código aplicable

El diseño y cálculo de tanques de almacenamiento se fundamenta según el Instituto Americano del Petróleo (Figura 3-14). Esta institución materializa la normativa en dos publicaciones: en primer lugar, la “STANDAR A.P.I 650” para depósitos a presión atmosférica y, en segundo lugar, la “STANDAR A.P.I 620” para aquellos tanques con presiones internas similares a 1 kg/cm² [29].



Figura 3-14 American Petroleum Institute [29].

La primera de las normativas mencionadas cubre el almacenamiento de fluidos líquidos construidos de acero con fondo soportado por una superficie de arena, grava o asfalto, fabricados para soportar una presiones internas que no superen el peso del techo por unidad de área con una temperatura de trabajo no superior a 93 °C. Esta normativa también considera el diseño y cálculo de los distintos elementos constructivos del tanque [29]. De cara a los materiales de fabricación, sugiere secuencias en la elección del depósito, recomienda métodos de soldadura, pruebas e incluso lineamientos en su operación. La Tabla 10 recoge los requisitos según dicha normativa.

	A.P.I. 650			A.P.I. 620			A.N.S.I.	
	Básico	Apéndice A	Apéndice F	Básico	Apéndice R	Apéndice Q	896,1	AWWA
Presión Interna Máxima	Atm.	Atm.	0,17 kg/cm2	1 kg/cm2	1 kg/cm2	1 kg/cm2	Atm.	Atm.
Temperatura Mínima	NS	(-)28,8°C	NS	(-)45,5°C	(-)54,4°C	(-)167°C	(-)28,8°C	(-)48,3°C
Temperatura Máxima	93,3°C	93,3°C	93,3°C	93,3°C	(-)40°C	93,3°C	204°C	RT
Espesor Máximo del Cuerpo	44,4 cm.	12,7 cm.	44,4 mm.	NS	NS	NS	NS	50,8 mm.
Espesor Mínimo del Cuerpo								
D < 15,2 m.	4,76 mm.			4,76 mm.			4,76 mm.	
15,2 m. < D < 36,5 m.	6,35 mm.			6,35 mm.			6,36 mm.	
36,5 m. < D < 60,9 m.	7,93 mm.			7,93 mm.			7,93 mm.	
D > 60,9 m.	9,52 mm.			9,52 mm.				9,52 mm.
Espesor Mínimo del Techo	4,76 mm.			NS			4,76 mm.	4,76 mm.
Espesor Máximo del Techo	6,35 mm. + CA			NS			6,35 mm.	NS
Angulo Mínimo de Coronamiento								
D < 15,2 m.	50,8 mm. x 50,8 mm. x 4,76 mm.			NS		63,5 mm. x 63,5 mm. x 6,35 mm.		NS
15,2 m. < D < 36,5 m.	50,8 mm. x 50,8 mm. x 6,35 mm.			NS		63,5 mm. x 63,5 mm. x 7,93 mm.		NS
D > 60,9 m.	76,2 mm. x 76,2 mm. x 9,52 mm.			NS		76,2 mm. x 76,2 mm. x 9,52 mm.		NS

Tabla 10 Requerimientos según normativas para tanques de fondo plano (tomada de [29]).

NS = Sin especificación. CA = Corrosión permisible. RT = Temperatura Ambiente

- La temperatura puede ser elevada hasta 260 °C cuando se cumplen ciertas especificaciones del material y requerimientos de diseño.
- Este espesor aplica para tanques con diámetros menores a 6,096 m.
- Este espesor aplica para tanques con diámetros entre 6,096 m. y 36,57 m.
- El espesor mínimo de cualquier placa es de 4,76 mm + corrosión.
- Para espesores mayores de 50,8 mm. Se deben cumplir algunos requerimientos especiales.
- para techos cónicos, el espesor de placa puede ser calibre No.7

3.9 Características constructivas

3.9.1 Estudio de la estructura

Los tanques de combustible han de ser parte de la estructura del barco y han de estar situados a una distancia prudente de los lugares de máquinas. Es común encontrar la instalación de dos tanques, como en nuestro caso, simétricos respecto a crujía (Figura 3-15), considerando que el máximo volumen permitido para cada tanque son 2500 m³.

Los tanques serán ubicados de forma que ningún posible vertido pueda ocasionar un peligro de derrame sobre superficies con alta temperatura o equipos eléctricos. En el caso de no poder conseguir su emplazamiento ideal, los tanques deberán estar protegidos de dichos vertidos o fugas mediante protecciones, barreras o rebosaderos apropiados. Según está establecido por la sociedad de clasificación (ABS) [30], el fondo del depósito no debe estar expuesto de manera que en la situación de contacto directo con fuego produzca un incendio en la cámara de máquinas.

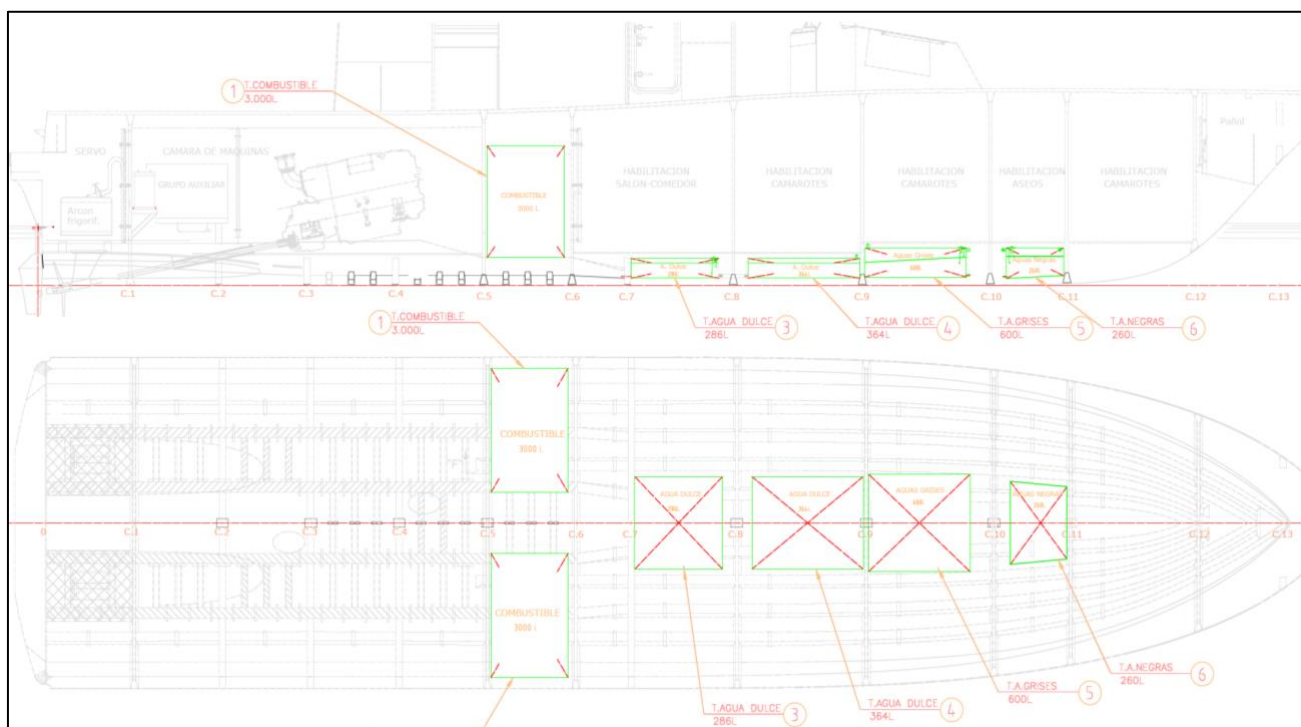


Figura 3-15 Planos compartimentación de tanques RODMAN 66 (Anexo III).

El casco de la embarcación se presenta seccionado en cuatro compartimentos separados por cuatro mamparos transversales estancos. La camareta se encuentra contigua al pañol de proa, siendo su acceso a través de una escalera en la popa del interior del puente de gobierno, en el costado de estribor. Esta sección se subdivide en cinco compartimentos no estancos que componen en su conjunto la zona de habitabilidad de la dotación.

De cara al diseño óptimo, cálculo y construcción de los tanques de almacenamiento es fundamental la elección del material adecuado dentro de la inmensa variedad de aceros que nos encontramos en el mercado. El acero utilizado, por tanto, de acuerdo con la norma europea EN 10025, acero al carbono o inoxidable bajo demanda de gran resistencia mecánica y capacidad de deformación, el cual permite la absorción de golpes y vibraciones [31].

3.10 Software

3.10.1 AutoCAD-Autodesk Inventor

Mediante el empleo de este software (Figura 3-16) se llevará a cabo el diseño conforme a las dimensiones y características desarrolladas para el prototipo diseñado de acuerdo con sus propiedades, materiales y especificaciones. Se calcula el peso del prototipo con el objetivo de evaluar su efecto en la estabilidad del barco. Se realiza simulación mediante elementos finitos del prototipo en las condiciones de presión más desfavorables para el mismo, considerando los coeficientes de seguridad correspondientes.



Figura 3-16 Logo software Autodesk Inventor [38].

3.10.2 SolidWorks

Software CAD (Figura 3-17) para modelado mecánico en 2D y 3D, este programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos técnicos como la respectiva información para su producción. Su funcionamiento se basa en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD, permitiendo construir virtualmente una pieza y proporcionar al usuario todas las extracciones realizadas automáticamente.



Figura 3-17 Logo software SolidWorks [39].

3.10.3 ProfiCAD

Programa de simulación diseñado para dibujar diagramas eléctricos y electrónico (Figura 3-18), diagramas de circuitos de control, esquemas y también empleado para el diseño de diagramas hidráulicos neumáticos y más tipos de diagramas técnicos. Especialmente útil en diseño y desarrollo de nuevos circuitos de almacenamiento, ya que ofrece la prueba de diferentes diseños y parámetros previos a su puesta en práctica.



Figura 3-18 Logo software ProfiCAD [40].

4 DISEÑO Y MODELADO DE TANQUES

4.1 Introducción

Se lleva a cabo el diseño modelado y análisis de los depósitos de metanol empleando el material más idóneo entre la variedad de aceros. El diseño se someterá a un análisis de esfuerzos para determinar su seguridad y resistencia para las condiciones de operación. Factores como la resistencia mecánica, la rigidez, la durabilidad se tendrán en consideración para garantizar que el diseño es adecuado para su uso en la aplicación de almacenamiento de metanol.

4.1.1 Composición de aceros

Atendiendo a las atribuciones de corrosión y compatibilidad del producto, la calidad del acero inoxidable y los acabados de las soldaduras podrán variar. Las calidades por excelencia son:

- AISI-304
- AISI-316

Desde un punto de vista químico, estos aceros difieren en la composición de cromo y níquel. En cuanto a sus características, el AISI304 con su contenido de cromo (18%) – níquel (8%) y bajo contenido de carbono, es el acero más versátil y comúnmente empleado. Resistente a la corrosión, oxidación y durabilidad.

En segundo lugar, el AISI316 es un acero inoxidable austenítico al cromo (16%) – níquel (10%) y resistente al calor con una mayor resistencia a la corrosión que otros aceros similares al ser expuesto a corrosivos químicos. Este acero tiene mayor resistencia al ataque químico que el 304, debido a la presencia de molibdeno en su composición.

Ambos materiales cumplen con los requisitos 3A y FDA. Decisivamente, el acero inoxidable AISI316 más elevado en precio, sin embargo, presta mejores condiciones que el acero inoxidable 304 lo que lo hace el más idóneo para la fabricación de una solución de metanol en tanques marinos.

4.1.2 Dimensionamiento del tanque

Para poder comenzar con el cálculo y diseño, se parte de la información técnica deseada. El objetivo es almacenar un fluido en un depósito para una plataforma marina, en tanques herméticos situados en un lugar fresco y seco, y en una zona bien ventilada alejada de fuentes de calor y posibles fuentes de ignición. Esta sustancia, el metanol anhídrido es no corrosivo a la mayoría de los metales en condiciones ambientales. Los tanques deseados, de construcción soldada, generalmente dan un resultado satisfactorio. Conjuntamente, los datos que limitan su dimensionamiento son los intrínsecos del compartimento (Figura 4-1):

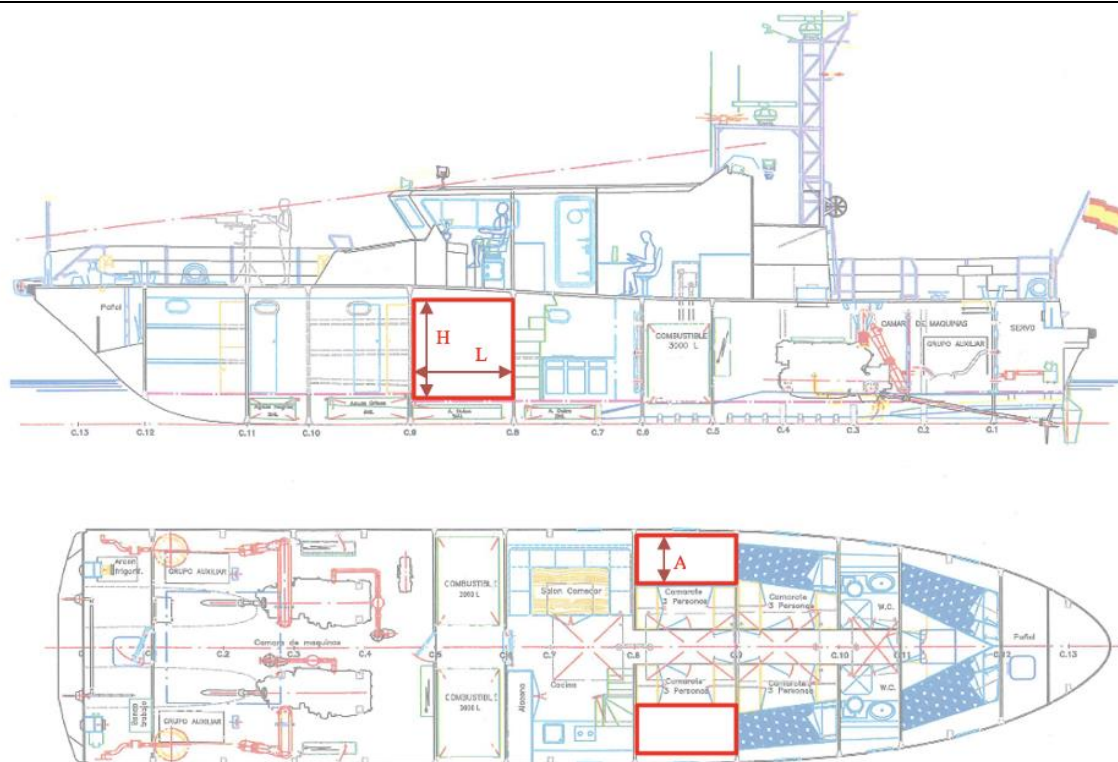


Figura 4-1 Organización y vista de compartimentación.

- Altura compartimento (H): 2 m
- Largo compartimento (L): 2 m
- Ancho (A): 0,84 m

4.2 Diseño de tanques

El diseño mediante el software Autodesk Inventor implica la creación de un modelo 3D del tanque, con una descripción al detalle de sus parámetros geométrico y materiales. El objetivo es el diseño de un tanque para su posterior construcción *insitu*, por lo que el diseño constará de planchas de acero inoxidable AISI – 316 de 5 mm de espesor (Figura 4-2).

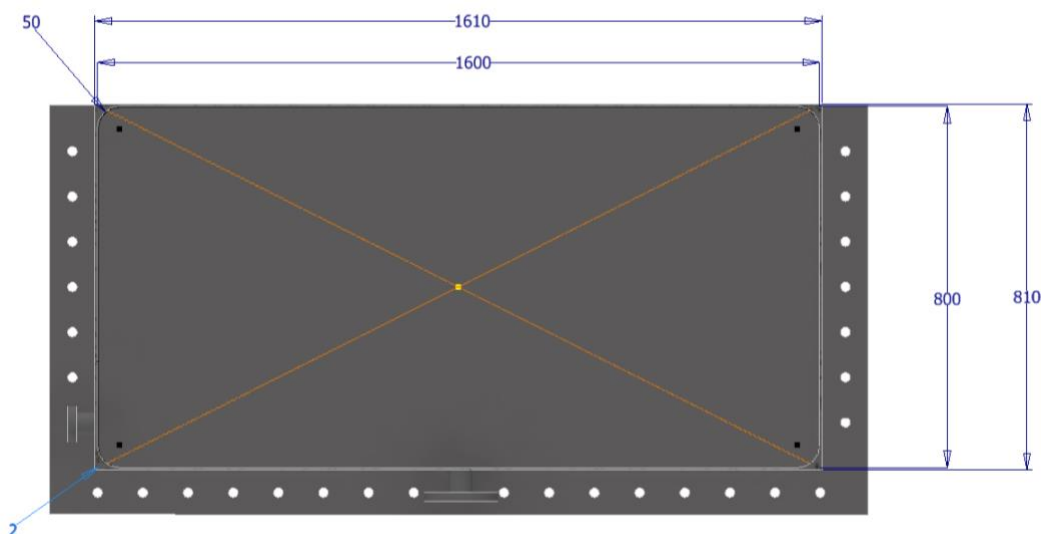


Figura 4-2 Dimensiones calculadas para depósitos acero inoxidable AISI-316.

El software de trabajo ofrece herramientas de análisis para especificar las características y propiedades del material, como la resistencia a la tracción, la densidad, el límite elástico, el esfuerzo máximo admisible, así como definir las condiciones de carga y presión, imprescindibles para el análisis de tolerancias. La Figura 4-3 muestra la perspectiva del tanque acero AISI-316.

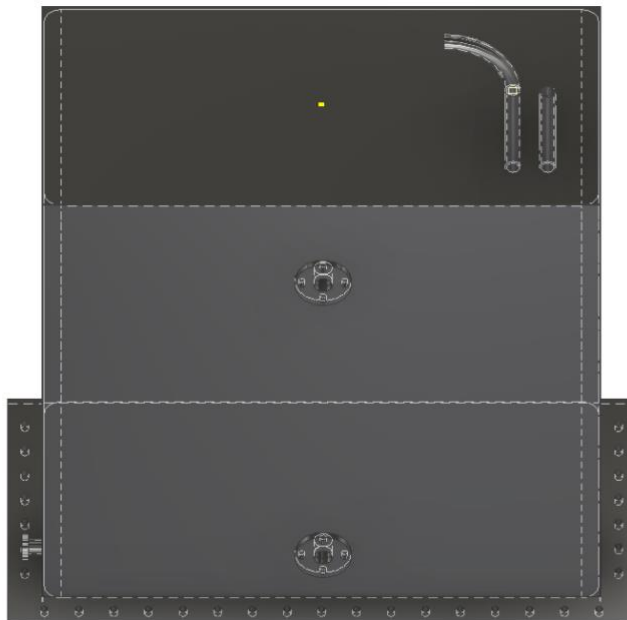


Figura 4-3 Perspectiva modelado depósito acero AISI-304.

El diseño inicial del depósito se ajusta al espacio definido por el compartimento de alojamiento de las lanchas de instrucción, entre las cuadernas 8 y 9 (Figura 4-4). Dicho compartimento consta de una longitud transversal de 2 metros, una altura de 2 metros y un ancho de 1,18 metros, del cual se emplearán tan solo de 0,84 metros para no modificar su topología más de lo imprescindible.

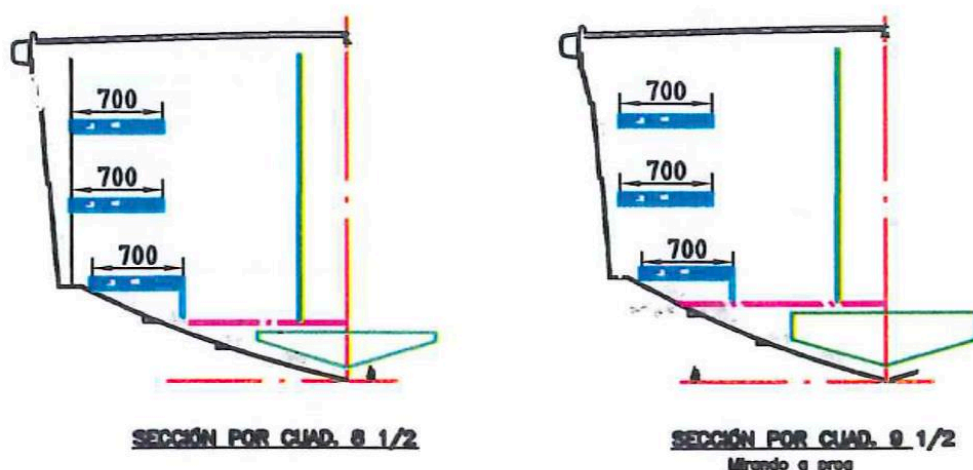


Figura 4-4 Vista seccionada del compartimento de diseño (Anexo III).

La identificación de la superficie de contorno deseada es necesaria para el proceso de diseño del tanque, dicha superficie es la que determina el volumen neto del tanque, $2,04 \text{ m}^3$. El engrosado generado en base al contorno garantiza el volumen deseado manteniendo las características generales del tanque.

4.2.1 Diseño y análisis de esfuerzos de soporte

Conociendo la forma de la cubierta que sustenta el tanque (Figura 4-5), se lleva a cabo el diseño de la estructura de sustentación del tanque. Diseñada en función de la caída del casco hacia crujía, este soporte se someterá al análisis de esfuerzos y deformaciones para la simulación de las condiciones de trabajo.

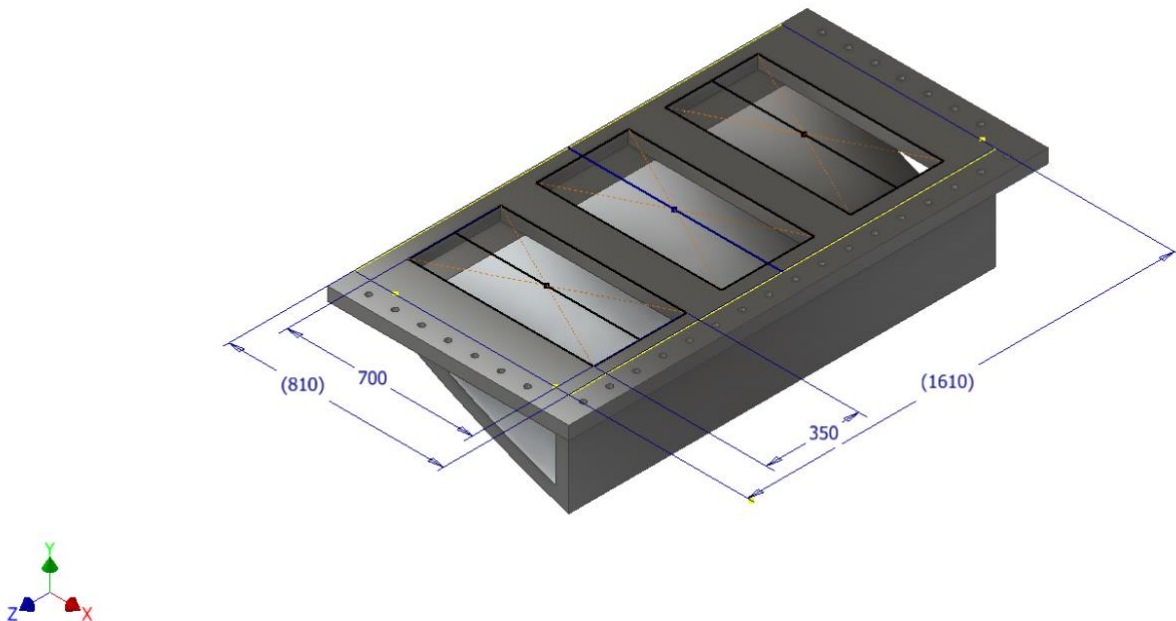


Figura 4-5 Diseño soporte depósito AISI-316.

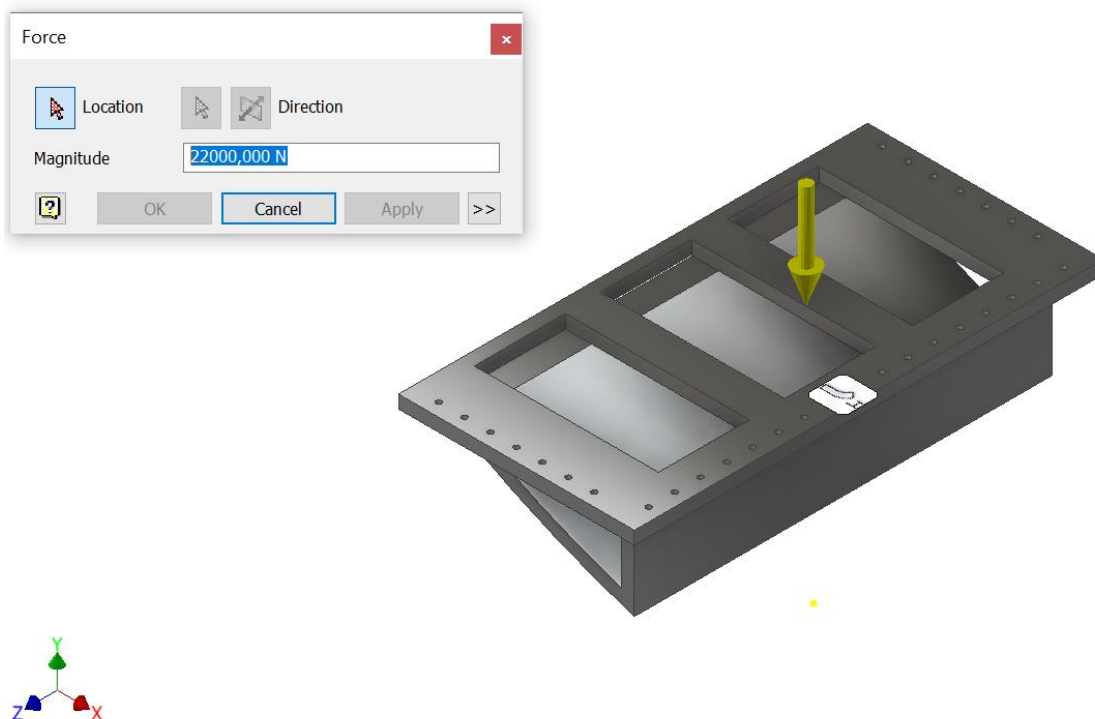


Figura 4-6 Restricción y carga aplicada sobre el soporte.

La operación de análisis se fundamenta en designar la carga a la cual se someterá el soporte por el peso del tanque. Posteriormente se lleva a cabo el análisis de tensiones, empleando la simulación y análisis ofrecidos por el software con el objetivo de evaluar la deformación de la estructura bajo distintas condiciones de presión. El resultado de este análisis nos ofrece la información referente a la seguridad y durabilidad del diseño, con el fin de garantizar integridad estructural y confianza del depósito.

Se realiza el análisis de tensiones con una malla local del soporte de 2 cm buscando mayor precisión en las paredes del soporte ya que serán sometidos a los mayores esfuerzos. La carga total por considerar será de 22000 N sobre la superficie de la estructura, la cual hace referencia a la masa intrínseca del tanque (610 kg) y el peso del volumen que suponen 2 m³ de metanol (1580 kg). Una vez definida la malla, se procede a la simulación de esfuerzos donde entre otras obtenemos la tensión de Von Mises y el coeficiente de seguridad (Figura 4-7 y Figura 4-8).

Nodes:110058
Elements:64451
Type: Von Mises Stress
Unit: MPa
08/03/2024, 11:21:32

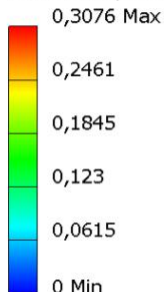
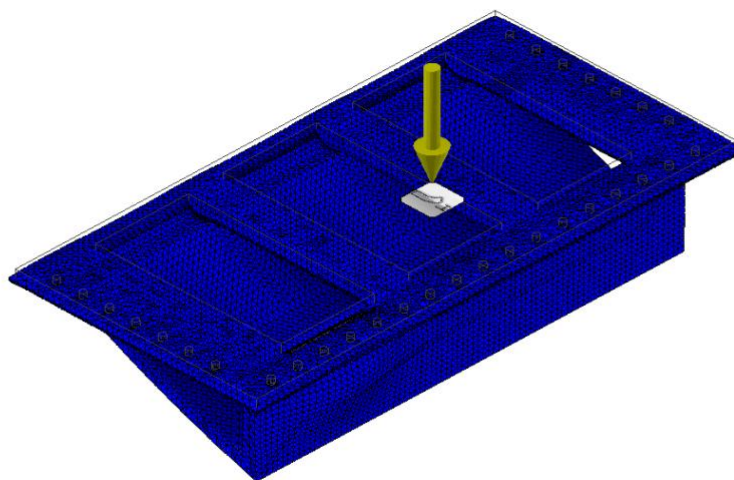


Figura 4-7 Máxima tensión de Von Mises soporte.

Nodes:110058
Elements:64451
Type: Safety Factor
Unit: ul
08/03/2024, 11:22:22

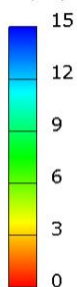
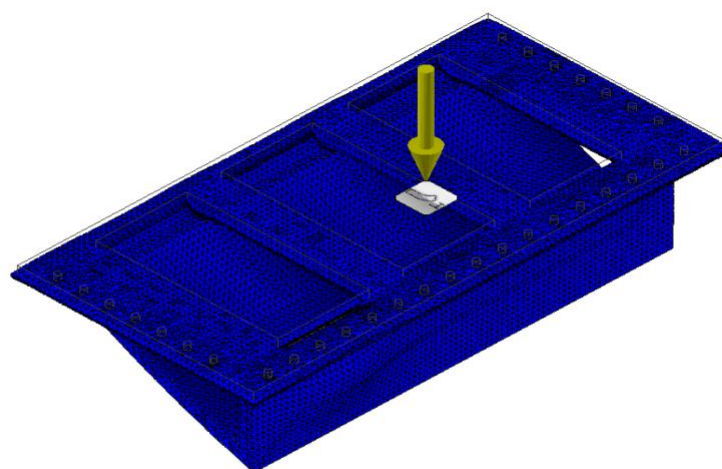


Figura 4-8 Coeficiente seguridad soporte.

4.2.2 Diseño boca de toma de combustible

La toma de combustibles se realizará por gravedad, de acuerdo con el diseño definido, los tanques de combustible dispondrán de un tapón enrasado de relleno en cubierta el cual irá acoplado al tanque a través de una brida de acero (Figura 4-9) e irán provistos de atmosférico y sonda.

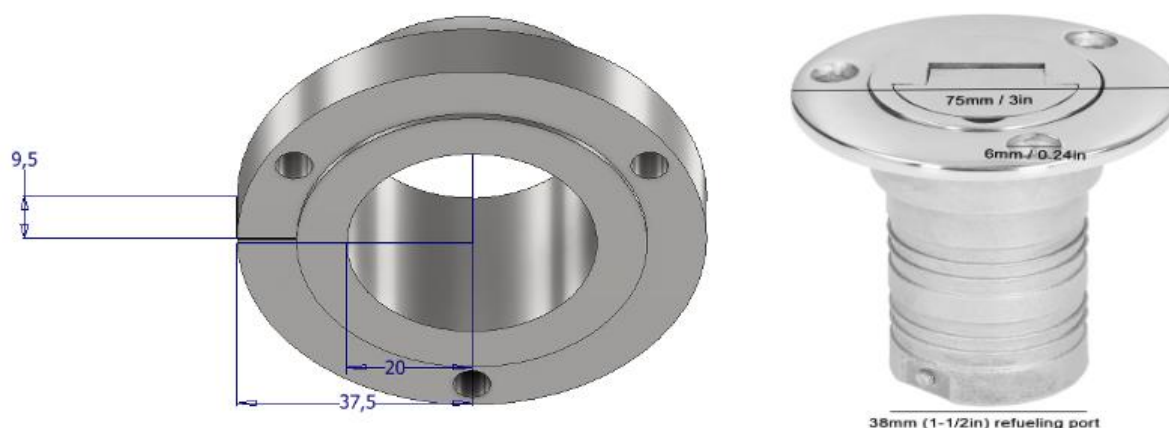


Figura 4-9 Diseño boca de toma y tapón enroscado.

4.2.3 Diseño aireación de tanques

Se diseña el venteo con forma de cuello de cisne según el Real decreto 804/2014 19 septiembre, el cual establece el régimen jurídico y las normas de seguridad y prevención de la contaminación de los buques de recreo que transportan hasta doce pasajeros. Con referencia a la aireación de tanques, los tubos han de ser de construcción eficaz y contar con medios permanentes de cierres estanco, como válvulas de antirretorno, eximiendo aquellas donde el extremo abierto queda protegido por la estructura circundante, evitando así la entrada de agua (Figura 4-10).

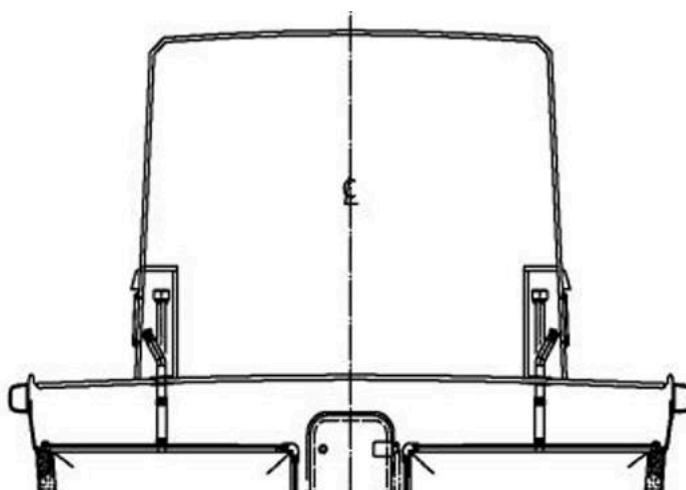


Figura 4-10 Posición atmosférico y entrada T. Fuel [27].

Las salidas de los tubos de venteo del tanque se instalarán tan lejos del costado como sea posible, coincidiendo la posición de estas con la proa del puente de gobierno (Mamparos 8 y 9), atendiendo a las alturas mínimas de las aireaciones dictadas por el Real decreto.

4.2.4 Ensamblaje del diseño final

Una vez realizado tanto el modelado del tanque como el de la estructura de sustentación, entrada de combustible y salida, se procede al ensamblaje de todos estos elementos. Finalmente, el ensamblaje queda como presenta la Figura 4-11:



Figura 4-11 Perspectiva ensamblaje depósito final.

4.3 Sistema contra incendios

El vapor emanado de este compuesto se caracteriza por ser altamente inflamable pudiendo formar mezclas explosivas de gas y aire. Si se produce combustión incompleta, puede haber liberación de gases tóxicos. Estos vapores tienen una densidad mayor que el aire y se propagan por el suelo, haciendo posible una ignición a distancia. Los residuos líquidos, por otro lado, pueden ser causa de un incendio o explosión por su filtrado.

Es por las razones expuestas que se hacen necesarios unos medios de prevención y extinción. Espuma antialcohol, agua pulverizada/nebulizada, polvo seco, dióxido de carbono o incluso arena o tierra.

La plataforma cuenta con dos extintores de polvo seco situados en la cámara de máquinas y otros dos en la cocina, uno de CO₂ y otro de polvo seco, ambos aptos para el ataque a la ignición del metanol y situados en el compartimento contiguo al de los tanques. Así mismo, el sistema de extinción fijo que actúa en la cámara de máquinas y compartimentos de tanques es extensible a la compartimentación de alojamiento introduciendo detectores de humo por cada tanque de combustible.

4.3.1 Medidas a tomar en caso de vertido accidental

Evitar inhalación de vapor y el contacto con piel y ojos. Eliminar fuentes de ignición y evitar chispas. Evacuar al personal no necesario y tomar medidas contra descargas estáticas.

En términos de protección personal, usar guantes de, chaqueta y pantalón de caucho de nitrilo. Botas de seguridad hasta la rodilla, aparato de respiración autónomo para evitar inhalaciones. Emplear gafas de protección facial y tomar medidas contra descargas de electricidad estática.

4.3.2 Medidas en trasvase del producto

La temperatura de almacenamiento ha de ser la de ambiente. Durante su llenado, manipulación o descarga, evitar posibles salpicaduras. Si se emplean bombas de desplazamiento positivo, han de estar dotadas de válvulas de seguridad. El producto tiene riesgo de acumulación electrostática, por lo que se usará la toma de tierra en su llenado y se reducirá la velocidad en la línea durante el bobeo para prevenir la formación de cargas electrostáticas.

4.4 Esquema general de combustible

Los tanques, contruidos en acero, contarán con filtros separadores de agua en combustible, con alarma de nivel de agua. A su vez, contarán con válvulas en la entrada y en la salida para garantizar no descebar los motores al limpiar los filtros. Las válvulas podrán ser accionadas desde cubierta o puente para su cierre a distancia en caso de emergencia a través de un mando de control.

La alimentación de combustible a los motores se efectuará de manera directa desde los tanques a las bombas de alimentación de cada motor (Figura 4-12). La consola de puente dispondrá también de un indicador de nivel de combustible de mismo diseño del ya existente en las actuales lanchas de instrucción.

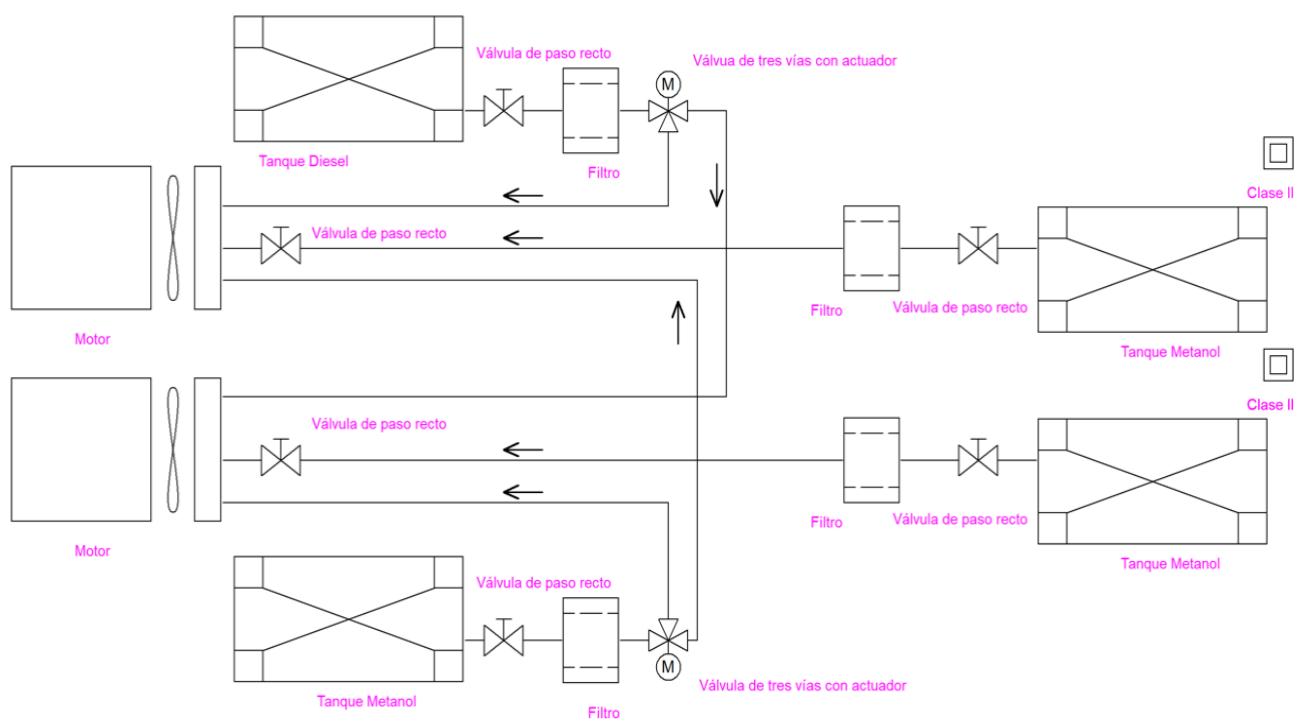


Figura 4-12 Esquema planta de combustible elaborado con ProfiCAD.

Las tuberías serán instaladas en lugares con fácil acceso y debidamente protegidas. En su instalación se busca el mínimo de curvas y accesorios posibles, ancladas adecuadamente evitando vibraciones. El tamaño de estas vendrá determinado acorde con las conexiones del equipo y el espesor será el adecuado para resistir la aspiración y descarga de las bombas a las que se conectan.

Las juntas se realizarán con una alineación apropiada entre las partes conectadas, evitando esfuerzos o deformaciones. Tuberías de flexibles podrán ser empleadas, pero no aquellas de acero galvanizado o acero limpio. Todas las tuberías se someterán a prueba para garantizar su estanqueidad a una presión de por lo menos 1,5 veces la presión de trabajo.

4.5 Modularidad del sistema de almacenamiento

El casco de la embarcación se presenta subdividido en 4 compartimentos separados por 4 mamparos transversales estancos. La camareta se encuentra contigua al pañol de proa, siendo su acceso a través de una escalera en la popa del interior del puente de gobierno, en el costado de estribor. Esta sección se subdivide en cinco compartimentos no estancos que componen en su conjunto la zona de habitabilidad de la dotación.

Teniendo en consideración la topología de la plataforma, así como el tonelaje y sus dimensiones, se elabora un diseño básico con las dimensiones definidas mediante el programa Autodesk Inventor. Para el diseño se divide en compartimentos de acuerdo con los planos de la plataforma. El siguiente modelo (Figura 4-13) servirá para adaptar los depósitos modulares de metanol en la plataforma, quedando de la siguiente manera.

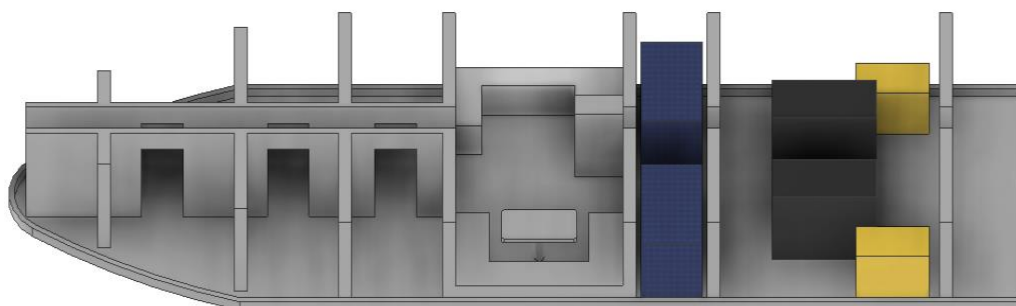


Figura 4-13 Compartimentación de la lancha de instrucción.

Los compartimentos de popa, distribuidos simétricamente con respecto a la crujía, se componen de tres literas cada uno con sus correspondientes armarios, portillos de luz y ventilación y puertas de cierre. Estos compartimentos son los que sufren el rediseño de la nueva planta de propulsión al albergar en el lugar de las literas los dos tanques de almacenamiento de metanol verde (Figura 4-14). El nuevo escenario reacondiciona la habitabilidad de las lanchas de instrucción disminuyendo su disponibilidad a 10 personas.

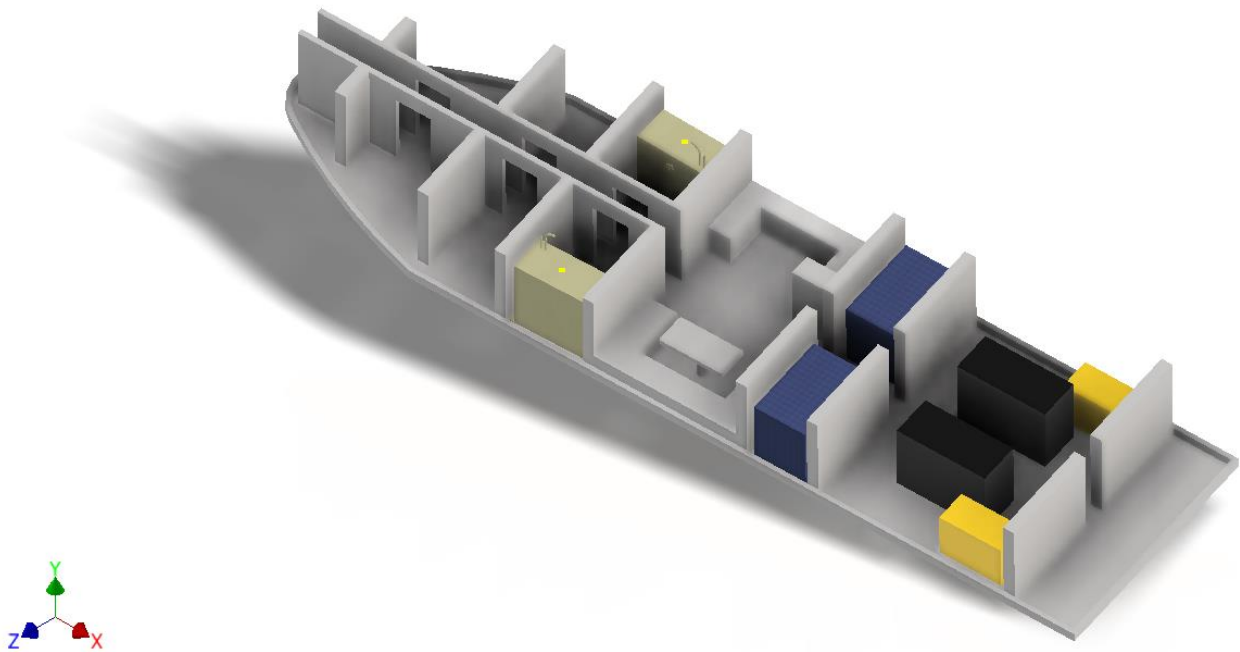


Figura 4-14 Perspectiva distribución depósitos metanol.

Debajo del pasillo central se albergan los tanques de agua dulce con capacidad para 500 litros, así como conductos, bombas y tuberías que redireccionan las descargas (Figura 4-15).

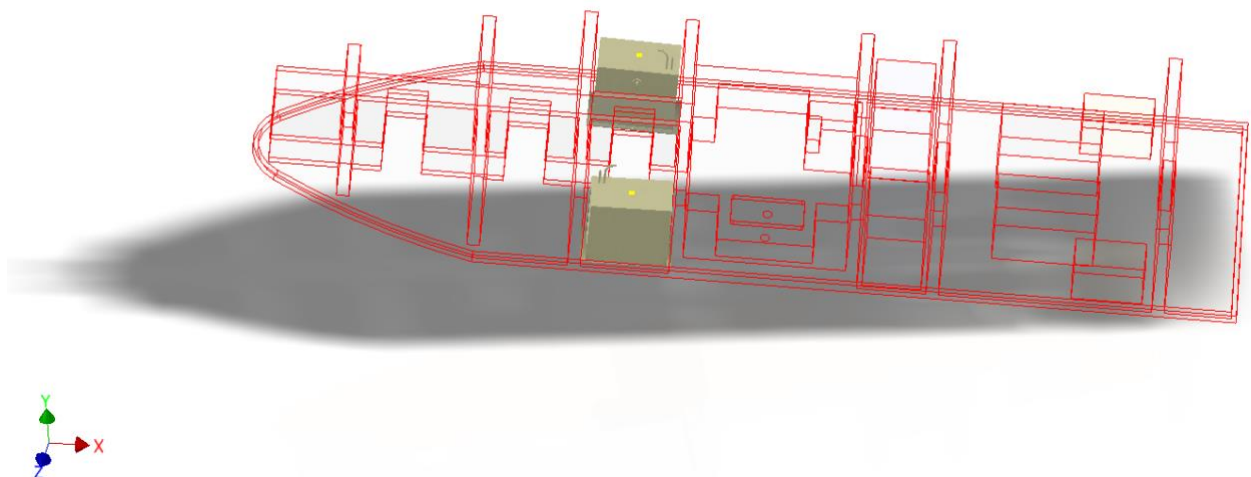


Figura 4-15 Perspectiva depósitos.

Una vez obtenida la disposición final de los depósitos se procede a calcular el peso del depósito y su estructura de sustentación con el fin de conocer una estimación de la adición de peso que supondrá a la plataforma. La Figura 4-16 refleja las propiedades constructivas de los depósitos ofrecidas por el software Autodesk Inventor.

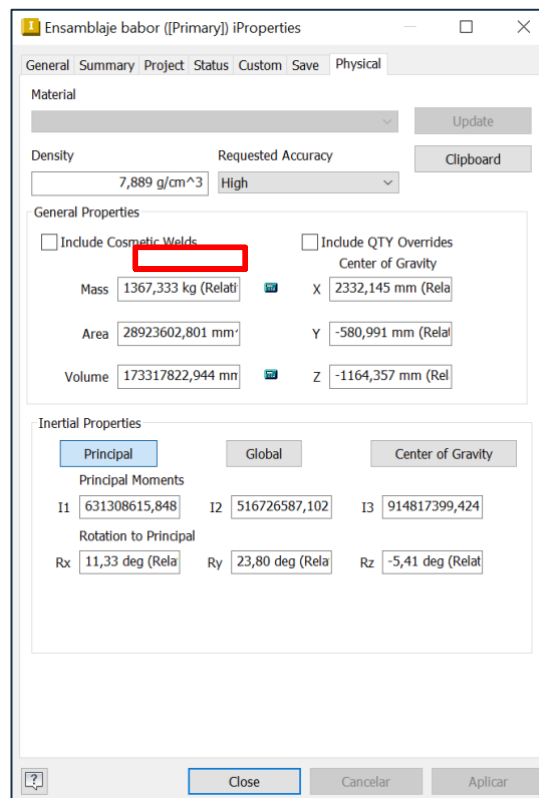


Figura 4-16 Propiedades generales del depósito.

Habiendo calculado el peso de cada depósito, incluyendo el volumen total del tanque en condiciones de máxima carga de combustible, se obtiene el peso resultante de colocar dos tanques en las lanchas de instrucción. Además, el software ofrece otras propiedades como el área, el volumen que ocupa el tanque y el centro de gravedad del diseño.

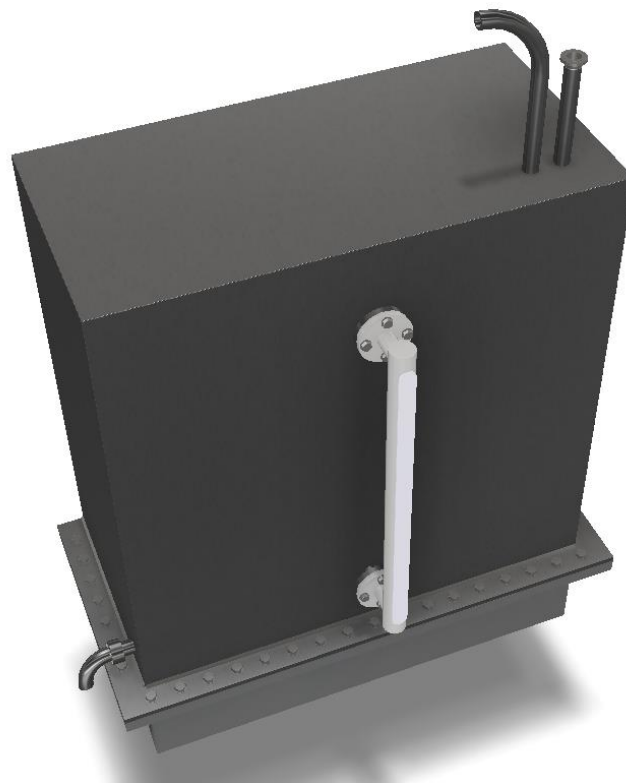


Figura 4-17 Vista en perspectiva depósito babor.

Como ha sido descrito en el capítulo de diseño, los tapones de relleno están situados en la cubierta en ambos lados del puente de gobierno con su indicativo correspondiente. De la misma manera, la salida de gases está localizada en ambos lados del puente, protegida junto con los topones de relleno y con 90° para evitar entradas de agua (Figura 4-17).

5 ESTUDIO ECONÓMICO

5.1 Presupuesto fabricación depósitos acero inoxidable AISI-316

Para el estudio económico se ha desarrollado un presupuesto estimado, teniendo en cuenta un valor dado de producto aproximado en euros por unidad y euros por hora de trabajo en mano de obra. El presupuesto para la fabricación de los tanques de acero inoxidable AISI-316 se han seccionado de la siguiente manera: Oficina técnica (Tabla 11), materiales (Tabla 12), instrumentación (Tabla 13), fabricación y montaje (Tabla 14), pruebas (Tabla 15), y homologación (Tabla 16).

En primer lugar, el presupuesto referente a la oficina técnica considera las horas empleadas en el diseño del depósito y su implementación en la plataforma como puede ser la parte de cálculo y diseño técnico. A este coste se le añade la emisión del proyecto, la que comprende la copia para el colegio de ingenieros, el propio visado y su aprobación del colegio de ingenieros y la emisión de la documentación técnica necesaria para el marcado CE al tratarse de un producto comercializable en la UE.

PARTIDA 1		Oficina técnica	
Descripción	Cantidad	P. Unitario	Total
Diseño	40	45,00	1.800,00 €
Emisión proyecto	1	450,00	450,00 €
Copia Colegio de Ingenieros	1	100,00	100,00 €
Visado Colegio Ingenieros	1	250,00	250,00 €
Marcado CE	1	2.000,00	2.000,00 €
TOTAL			4.600,00 €

Tabla 11 Partida 1 - Oficina técnica.

Habiendo sido expuestos los presupuestos referentes a la oficina técnica, los siguientes presupuestos corresponden a los materiales necesarios para la fabricación e implementación en la plataforma de los dos depósitos de acero inoxidable. Hay que destacar que los precios se estiman de acuerdo con la estandarización del material en función del precio de la tonelada de acero inoxidable.

La partida de materiales, el cordón de soldadura para la fabricación in situ de los depósitos, engloba el precio del número estimado de electrodos necesarios del tipo AWS E316-16 y las varillas de aporte tig acero inoxidable ER316L Si.

PARTIDA 2		Materiales	
Descripción	Cantidad	P. Unitario	Total
Chapa de acero de 5 mm (2000 x 1000 mm)	12	172,80	2.073,60 €
Chapa de acero de 10 mm (2000 x 1000 mm)	2	288,00	578,00 €
Cordón de soldadura (4 m – perímetro depósito)	1	1.200,00	1.200,00 €
Tubería 2 m AISI 316 - 43 x 2 mm	20	62,00	1.240,00 €
Codos conectores de depósitos	6	20,00	120,00 €
TOTAL			5.211,60 €

Tabla 12 Partida 2 - Materiales.

La instrumentación de proyecto se encuentra fundamentalmente dentro del suministro de los equipos principales. Otros suministros con entidad son valorados de acuerdo con ofertas. A continuación, se muestra los suministros indicando la estimación del coste del suministro tomando como referencia otros proyectos en mercado.

PARTIDA 3		Instrumentación	
Descripción	Cantidad	P. Unitario	Total
Válvula de seguridad	2	2.000,00 €	4.000,00 €
Válvula control de caudal paso recto	2	2.000,00 €	4.000,00 €
Válvula control de caudal de tres vías	2	2.000,00 €	4.000,00 €
Bomba y grupo distribuidor	2	5.000,00 €	10.000,00 €

PARTIDA 3		Instrumentación	
Descripción	Cantidad	P. Unitario	Total
Sonda de nivel de combustible	2	420,00 €	840,00 €
Termómetro	2	50,00 €	100,00 €
Manómetro	2	50,00 €	100,00 €
Tapón alimentación 1/2" AISI-316	2	60,00 €	120,00 €
Brida AISI-316L 1/2"	6	6,00 €	36,00 €
Perno ISO 4017 - M22 x 55	64	2,00 €	128,00 €
Perno ISO 4017 - M18 x 50	16	2,00 €	32,00 €
Perno ISO 4017 - M6 x 35	12	2,00 €	24,00 €
Arandela ISO 7089 22	64	1,00 €	64,00 €
Arandela ISO 7089 18	16	1,00 €	16,00 €
Arandela ISO 7089 6	12	1,00 €	12,00 €
Filtro Epman AN6	2	35,00 €	70,00 €
TOTAL			23.542,00 €

Tabla 13 Partida 3 - Instrumentación.

Estipulado el importe de los materiales e instrumentos que requiere el proyecto, es necesario establecer el presupuesto referente al personal requerido en el proceso de fabricación y montaje de los depósitos. Se establece, por ello, una cuarta partida que engloba el transporte de materiales, el tubero para el ajuste y alineación de los depósitos antes de ser soldados, el trabajo correspondiente al soldador, el cual vendrá definido por la longitud y espesor del cordón de soldadura en los depósitos y la mano de obra expresada en horas de trabajo referentes al montaje de estos y la instalación de los indicadores necesarios en el puente de gobierno.

PARTIDA 4		Fabricación y montaje	
Transporte	1	450,00	450,00 €
Tubero (3 h/depósito)	9	100,00	900,00 €
Soldador (h)	45	120,00	5.400,00 €
Montaje (h)	240	45,00	10.800,00 €
Instalación en puente de gobierno (h)	18	45,00	810,00 €
TOTAL			18.360,00 €

Tabla 14 Partida 4 – Fabricación y montaje.

Finalmente, se establece una quinta partida dedicada al coste de los ensayos y pruebas a los que ha de someterse el diseño del depósito para su correcto homologación. En primer lugar, los ensayos no destructivos constarán de radiografía digital de las soldaduras, donde se sustituye la película radiográfica por un captador que realiza la impresión de una imagen digitalizada, y un ensayo de líquidos penetrantes y de partículas magnéticas en el interior los depósitos. Con la realización del ensayo de estanqueidad se obtiene un certificado de inspección oficial con todas las garantías.

En términos de resistencia las tuberías se someten a ensayos de resistencia y estanqueidad, donde la tubería de impulsión se somete a una presión de 1,5 veces la máxima de trabajo durante un periodo de 60 minutos.

PARTIDA 5		Pruebas	
Descripción	Cantidad	P. Unitario	Total
Radiografía digital	22	170,00	3.740,00 €
Pruebas de fugas, líquidos penetrantes y partículas magnéticas	2	180,00	360,00€
Pruebas de presión 2 bar (60 min por equipo)	2	60,00	120,00 €
Resistencia y estanqueidad tubería de impulsión (60 min)	2	45,00	90,00 €
TOTAL			4.310,00 €

Tabla 15 Partida 5 - Pruebas.

Por último, la homologación obligatoria hace necesario la obtención del certificado ATEX al ser el diseño un espacio confinado que alberga un combustible inflamable.

PARTIDA 6		Homologación y control de plataforma	
Descripción	Cantidad	P. Unitario	Total
Certificación ATEX	1	2.500,00	2.500,00 €
Control de calidad	2	45,00	90,00 €
TOTAL			2.590,00 €

Tabla 16 Partida 6 - Homologación y control de plataforma.

El importe estimado final referente a los depósitos de acero inoxidable es el siguiente (Tabla 17):

PRESUPUESTO FINAL	
SUBTOTAL	58.613,600 €
CONTINGENCIA (7 %)	4.102,952 €
BENEFICIO INDUSTRIAL (25%)	15.679,140 €
IVA (21%)	16.463,095€
TOTAL	94.858,787 €

Tabla 17 Presupuesto final.

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En esta sección, se exponen las conclusiones derivadas de este trabajo de acuerdo con los objetivos establecidos, analizando su grado de cumplimiento. Por último, se presentarán las posibles futuras líneas de investigación y desarrollo en el campo de combustibles marinos alternativos, proponiendo aquellos campos que no han sido desarrollados en profundidad en este trabajo.

6.1 Conclusiones

Tras el proceso de evaluación de las propiedades de diversos combustibles alternativos, hidrógeno, amoníaco y metanol, y haber evaluado criterios en referencia a la efectividad, rendimiento, sostenibilidad e impacto económico; se concluye que el metanol es el combustible alternativo más idóneo para una posible implementación en las plataformas RODMAN 66.

Mediante el análisis crítico, se hace evidente la disponibilidad del metanol, siendo el combustible más viable de entre las opciones existentes en la actualidad. Esto se debe a factores como la seguridad, capacidad de suministro, durabilidad, rendimiento, adaptabilidad de equipos ya existentes y las emisiones contaminantes de dichos combustibles. El único inconveniente se presenta en un coste similar al del gasoil marino, relativamente superior al hidrógeno gas o el amoníaco.

Tras la decisión de la alternativa más conveniente, el trabajo marca como objetivo y cumple satisfactoriamente el determinar las diversas condiciones de trabajo según el ratio de inyección, variando el volumen de almacenaje de ambos combustibles diésel-metanol hasta concluir con la proporción más acertada en términos de rendimiento, capacidad de almacenaje y sostenibilidad económica. Esto es determinante para adaptar la planta de propulsión y el diseño de los tanques en función del volumen necesario.

En base al objetivo principal del trabajo, estudiar una alternativa eficiente para los motores de combustión y diseñar la respectiva modificación en la planta de almacenamiento, se ha logrado satisfactoriamente identificar el metanol como combustible alternativo más prometedor entre aquellos en desarrollo y estudiar su viabilidad en una plataforma de uso cotidiano de pequeño tonelaje como son las lanchas de instrucción.

Consecuentemente, se han cumplido cronológicamente los hitos establecidos en relación con el objetivo principal. El estudio de la plataforma a rediseñar, el estudio de viabilidad en base a la elección del metanol como segundo combustible y el diseño de los tanques de almacenamiento según la normativa vigente y las condiciones y requisitos de seguridad, fiabilidad y eficiencia de la plataforma

6.2 Líneas futuras

Durante el transcurso de elaboración del trabajo, han surgido diversos sectores de investigación y desarrollo, los cuales no han sido profundizados en este proyecto. Es por ello por lo que a continuación se exponen sus posibles líneas de investigación con el objetivo de dar base al futuro desarrollo en este campo:

- Análisis de viabilidad de la implementación de motores dual-fuel basados en metanol-diésel en unidades de la flota, considerando las posibles modificaciones requeridas en la planta de propulsión, así como la infraestructura necesaria para el almacenamiento del nuevo combustible.
Extrapolar este sistema de propulsión a plataformas de mayor tonelaje hace necesario estudiar la posible vía segura de distribución y manipulación del metanol, así como el proveedor de dicho combustible e ingeniería.
- Analizar exhaustivamente la reducción de la firma acústica en los buques de la flota, originada por diferentes combustibles alternativos, con el fin de optimizar las condiciones de operación de las plataformas de nuestras Fuerzas Armadas.
- Estudiar el impacto en la eficiencia del motor que tiene la presión de inyección del metanol en la cámara de combustión, teniendo lugar la inyección de este en la admisión del cilindro. Así como las consecuencias de la reducción de temperatura en la admisión al mezclar el aire con metanol u otros combustibles alternativos.
- Estudio detallado en el empleo de alternativas de energía renovable, como pueden ser sistemas de almacenamiento de energía basados en batería, fuentes de energía eólica y solar con el objetivo de diversificar y complementar el suministro energético.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. R. Solano, «Hacia una economía basada en el hidrógeno», presentado en Anales de La Universidad Metropolitana, Universidad Metropolitana, 2004, pp. 165-180.
- [2] J. M. García Posada, A. Amell Arrieta, y H. J. Burbano Martínez, «Análisis comparativo de las propiedades de combustión de las mezclas metano-hidrógeno con respecto al metano», 2006.
- [3] A. J. Cano Romero, «Análisis del impacto del diseño geométrico en un sistema de encendido por precámara para motores de encendido provocado de nueva generación», 2018.
- [4] F. A. E. Insfrán, «Historia del Derecho Marítimo».
- [5] K. V. R. Molano y A. F. G. Martínez, «MAQUINA DE VAPOR».
- [6] R. R. Amengual Matas, «Análisis de la evolución histórica de las máquinas térmicas durante el periodo 1826-1914 a través de las patentes españolas de la época», 2004.
- [7] R. D. A. A. José y M. D. Marta, *Motores de combustión interna*. Editorial UNED, 2015.
- [8] J. H. Mora Guzmán y J. R. Agudelo Santamaría, «Historia de los motores de combustión interna», 2002.
- [9] C. Sánchez Tarifa, «Elementos del Cálculo de Turbinas de Gas 1ª Parte.», *Ingeniería Aeronáutica*, pp. 15-28, 1952.
- [10] D. E. Gutiérrez Camargo, «Estrategia metodológica para el desarrollo de la comprensión del funcionamiento de motores de turbina de gas en estudiantes de un instituto de educación tecnológica», 2023.
- [11] á. González prieto, i. González prieto, m. J. Durán Martínez, y j. J. Aciego gallardo, *Accionamientos eléctricos. Fundamentos, control y aplicaciones*. Ediciones Paraninfo, SA, 2022.
- [12] «Historia del vehículo eléctrico - Electromovilidad.» Accedido: 18 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://electromovilidad.net/historia-del-vehiculo-electrico/>
- [13] J. A. Conesa, «Energía nuclear: fundamentos, reactores, residuos», 2011.
- [14] J. lore. lucas, «el cambio de escenario geoestratégico con el submarino de propulsión nuclear iraní», *Revista general de marina*, p. 857, 2012.
- [15] «Propulsión nuclear marina». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.quimica.es/enciclopedia/Propulsión_nuclear_marina.html
- [16] J. Gombau Rodríguez, «Estudio técnico-económico del hidrógeno como fuente de energía para el transporte por carretera», 2023.

- [17] A. Mayandía Aguirre, «Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico», 2009.
- [18] P. Porto Mato, «Descarbonización del sector del transporte en España con el hidrógeno verde», 2021.
- [19] J. Gombau Rodríguez, «Estudio técnico-económico del hidrógeno como fuente de energía para el transporte por carretera», 2023.
- [20] «El hidrógeno como combustible. pros y contras de su manipulación.» Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.pirelli.com/global/es-es/road/automoviles/hidro-geno-como-combustible-pros-y-contras-54733/>
- [21] I. Méndez Díaz, M. Á. Álvarez Feijoo, y C. Pérez Collazo, «Aplicación de depósitos modulares de almacenamiento de hidrógeno para propulsión de motores térmicos», 2023.
- [22] J. M. Álvarez Reyes, «Análisis de implementación de amoníaco como combustible para la propulsión de buques mercantes», 2022.
- [23] «Introducción a la OMI». [En línea]. Disponible en: <https://www.imo.org/es/About/Paginas/Default.aspx>
- [24] K. Enríquez Álvarez, «La economía del metanol verde como combustible. Desarrollo actual e impacto medioambiental», 2022.
- [25] Iberdrola, «Metanol verde: el combustible que puede acelerar la transición energética del transporte marítimo.» Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/conocenos/nuestra-actividad/hidrogeno-verde/metanol-verde>
- [26] G. Hernández Esteban, «Diseño de una planta para la producción de metanol verde en Asturias», 2023.
- [27] RODMAN, «Especificación técnica - Lanchas de Instrucción para la Escuela Naval Militar.» 2 de diciembre de 2019.
- [28] Methanol Institute, «Manual de manipulación segura del metanol». enero de 2013. [En línea]. Disponible en: https://www.methanol.org/wp-content/uploads/2016/06/Methanol-Safe-Handling-Manual-Final_Spanish.pdf
- [29] M. Hoste Martorell, «Diseño de una terminal de almacenamiento de líquidos a granel», Barcelona, 2014.
- [30] H. Rivera, «Sistema de Alimentación de Combustible de un Buque». 15 de junio de 2013.
- [31] Lapesa «Depósitos atmosféricos para almacenamiento de combustibles tradicionales». 2021.
- [32] G. García, «Airbus pone en marcha un motor eléctrico de hidrógeno de 1,2 MW que pronto estará en las alas de un A380», *Hidrógeno Verde*, ABC, 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.hibridosyelectricos.com/aviones/airbus-pone-en-marcha-motor-electrico-hidrogeno-12-mw-pronto-estara-en-alas-a380_72630_102.html
- [33] I. M. O. IMO, «Methanol as marine fuel: Environmental benefits, technology readiness, and economic feasibility». 20 de enero de 2016.
- [34] J. Liu, A. Yao, y C. Yao, «Effects of diesel injection pressure on the performance and emissions of a HD common-rail diesel engine fueled with diesel/methanol dual fuel», *Fuel*, vol. 140, pp. 192-200, 2015.
- [35] F. J. Zurbriggen, «Combustion control of a natural gas-diesel engine-feedback control and adaptation», 2016.
- [36] A. Jamrozik, W. Tutak, R. Gnatowska, y Ł. Nowak, «Comparative analysis of the combustion

stability of diesel-methanol and diesel-ethanol in a dual fuel engine», *Energies*, vol. 12, n.º 6, p. 971, 2019.

- [37] P. Kyrtatos, C. Brückner, y K. Boulouchos, «Cycle-to-cycle variations in diesel engines», *Applied Energy*, vol. 171, pp. 120-132, 2016.
- [38] A. Inventor y A. I. Tooling, «Autodesk®», 2002.
- [39] D. Systemes, «Solidworks. 2019», *Dessault Systemes: Vélizy-Villacoublay, France*, 2011.
- [40] A. J. Lasheras Ruíz, «Aprendizaje basado en proyecto de instalación fotovoltaica mediante economía circular», 2018.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

La integración del metanol como alternativa eficiente en el panorama energético conlleva implicaciones sociales significativas. Primordialmente, su uso como combustible alternativo reduce drásticamente la dependencia de combustibles fósiles, lo que resulta en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes atmosféricos. Esta reducción mejora la calidad del aire y mitiga los impactos negativos en la salud humana. Además, la adopción de esta tecnología podría fomentar la creación de empleos en la industria de energías limpias, lo que supondría un efecto positivo en la economía y, por ende, en la sociedad.

En términos económicos e industriales el empleo del metanol ofrece nuevas oportunidades de negocio para las empresas dedicadas a la producción y distribución de componentes de metanol y sistemas de propulsión de motores térmicos. Asimismo, el uso del metanol como combustible alternativo podría contribuir a la reducción de los costes de combustible, especialmente en el sector del transporte marítimo. No obstante, la implementación de esta tecnología también conlleva riesgos, como la necesidad de inversiones en infraestructuras para la adopción de esta tecnología.

Desde una perspectiva ambiental el metanol como combustible presenta considerables ventajas, ya que es un combustible limpio que no produce emisiones. El metanol producido a partir de fuentes renovables puede reducir la huella de carbono de las empresas y contribuir a la mitigación del cambio climático. Sin embargo, se deben considerar los riesgos asociados con su almacenamiento y manejo, como posibles fugas o vertidos, que podrían tener impactos negativos en el medio ambiente.

Po último, es fundamental abordar los posibles riesgos para la salud y seguridad asociados con el uso de este combustible. Se requiere una atención especial a su manipulación y almacenamiento, dada su inflamabilidad y explosividad, haciendo necesario la obtención del certificado ATEX. Asimismo, es crucial garantizar que los depósitos modulares de almacenamiento de metanol cumplan con los estándares nacionales e internacionales de seguridad establecidos por las normativas, para garantizar la seguridad de su funcionamiento y la protección del personal involucrado.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El proceso de rediseño de la planta de combustible y de los tanques de almacenamiento de metanol para su implementación en la propulsión de una lancha de instrucción es un proceso técnico que se centra en desarrollar soluciones eficientes y seguras para el manejo y transporte de este combustible. Siendo fundamental considerar la seguridad y el impacto ambiental en el diseño de estos depósitos, no se requiere de una reflexión ética y social en este proceso.

En primer lugar, la reflexión ética y social implica evaluar las implicaciones morales y sociales de una acción o decisión específica. En el contexto del rediseño de la estructura de combustible de una plataforma y el diseño de tanques de almacenamiento de metanol para su uso en la propulsión de una embarcación, no se está tomando una decisión que afecte directamente a la sociedad o a la moralidad. Este es un proceso técnico destinado a garantizar la eficiencia y seguridad en el uso del metanol como combustible.

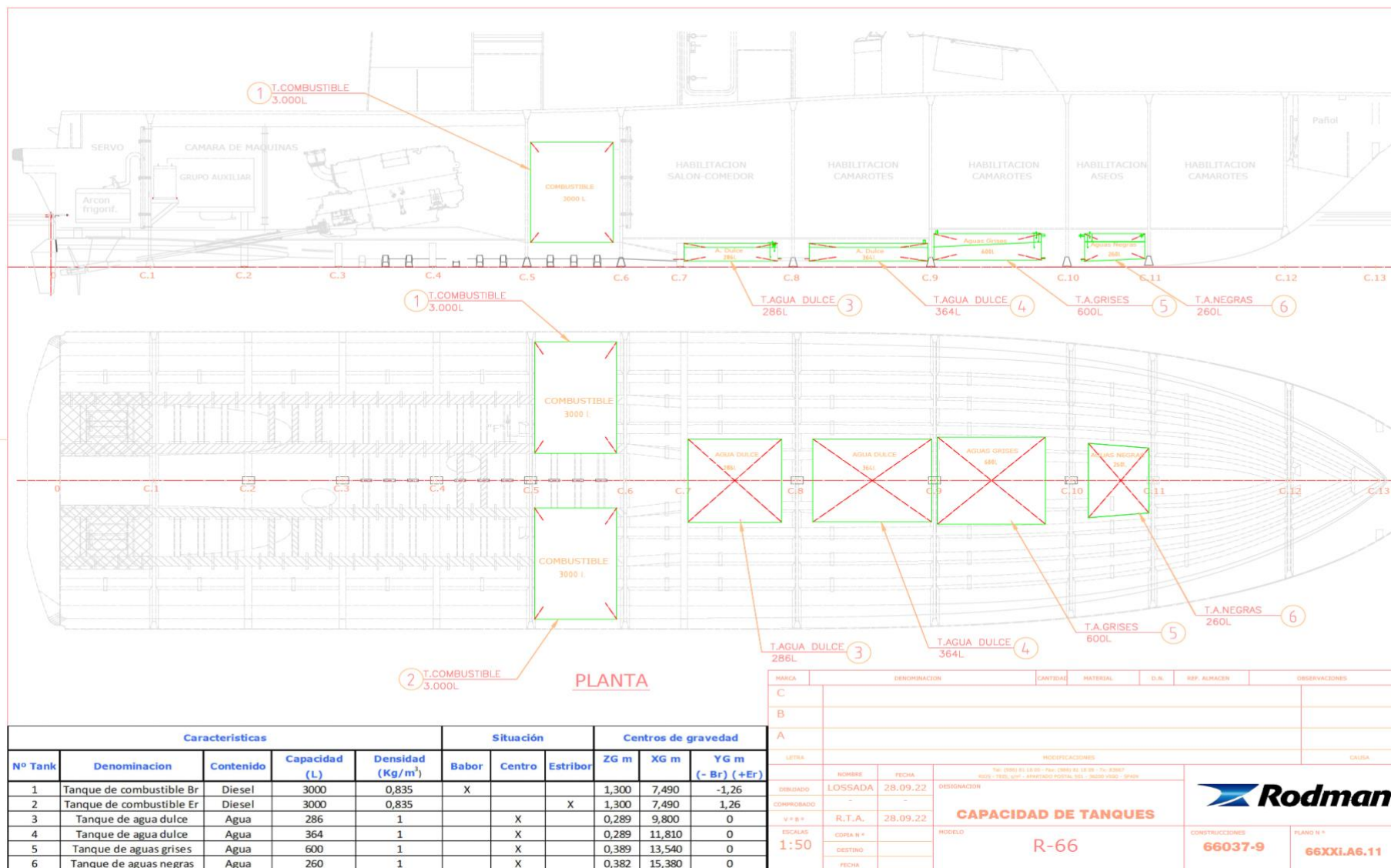
Es importante tener en cuenta que el diseño de estos depósitos está sujeto a las estrictas normas y regulaciones técnicas que garantizan la seguridad y la eficiencia en su uso. Estas normativas son establecidas por organismos especializados en el campo de la ingeniería y la seguridad, y se aplican rigurosamente para garantizar estándares óptimos de funcionamiento y protección.

ANEXO III: PLANOS RODMAN 66

En el presente anexo se incluyen diversos planos del buque y de su planta de almacenamiento, necesarios para la realización de este proyecto. Planos generados y proporcionados por la empresa Rodman Polyships. Los planos anexados son los siguientes:

- Capacidad de tanques
- Disposición general exteriores
- Disposición general interiores
- Disposición cámara de máquinas
- Disposición general de línea de ejes y timones
- Disposición general tanques de combustible

REDISEÑO DE LA PLANTA PROPULSORA DE LA PLATAFORMA RODMAN 66 PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE COMBUSTIBLES MARINOS ALTERNATIVOS

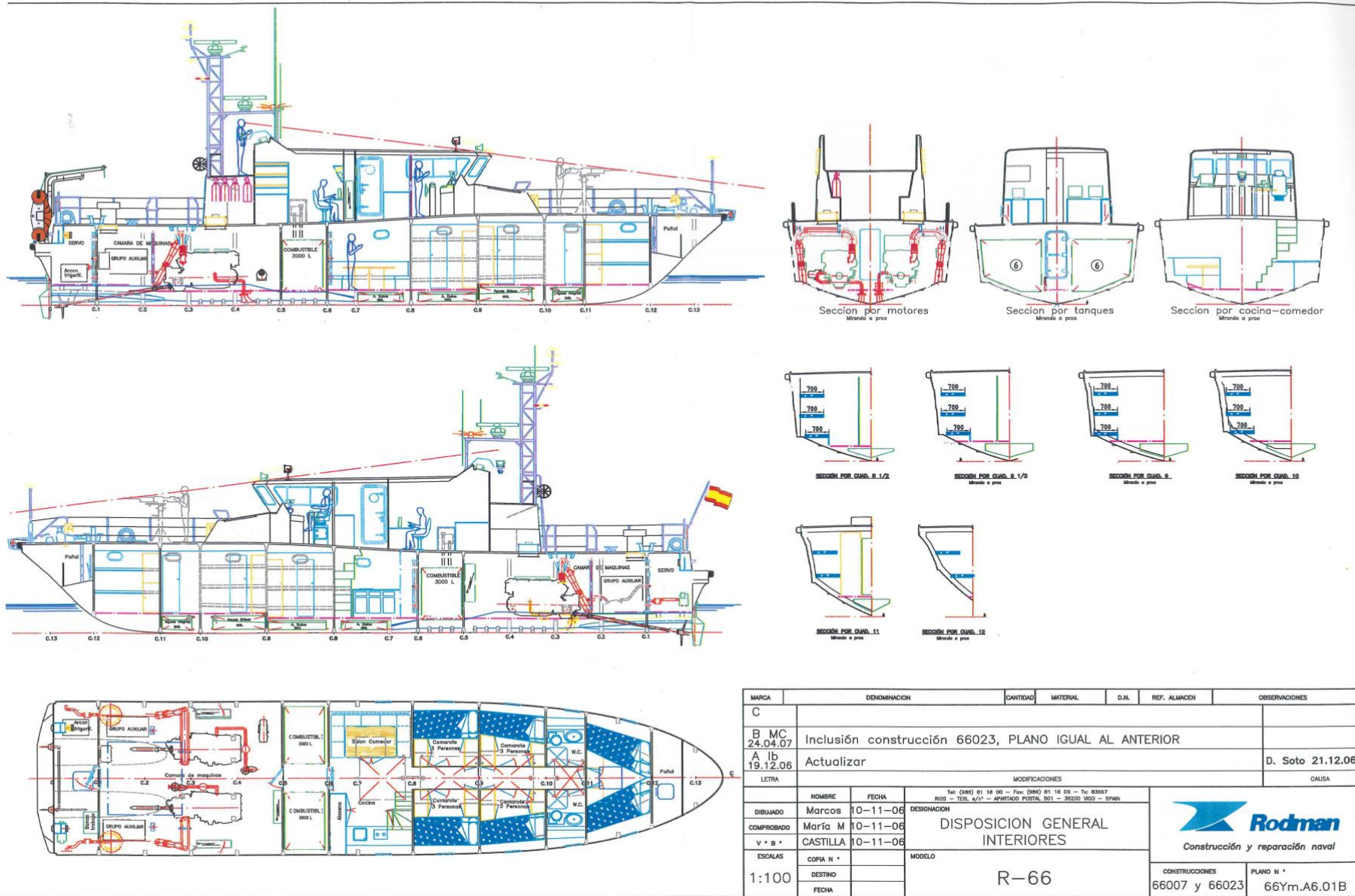




CALADO _____ 0,90m.

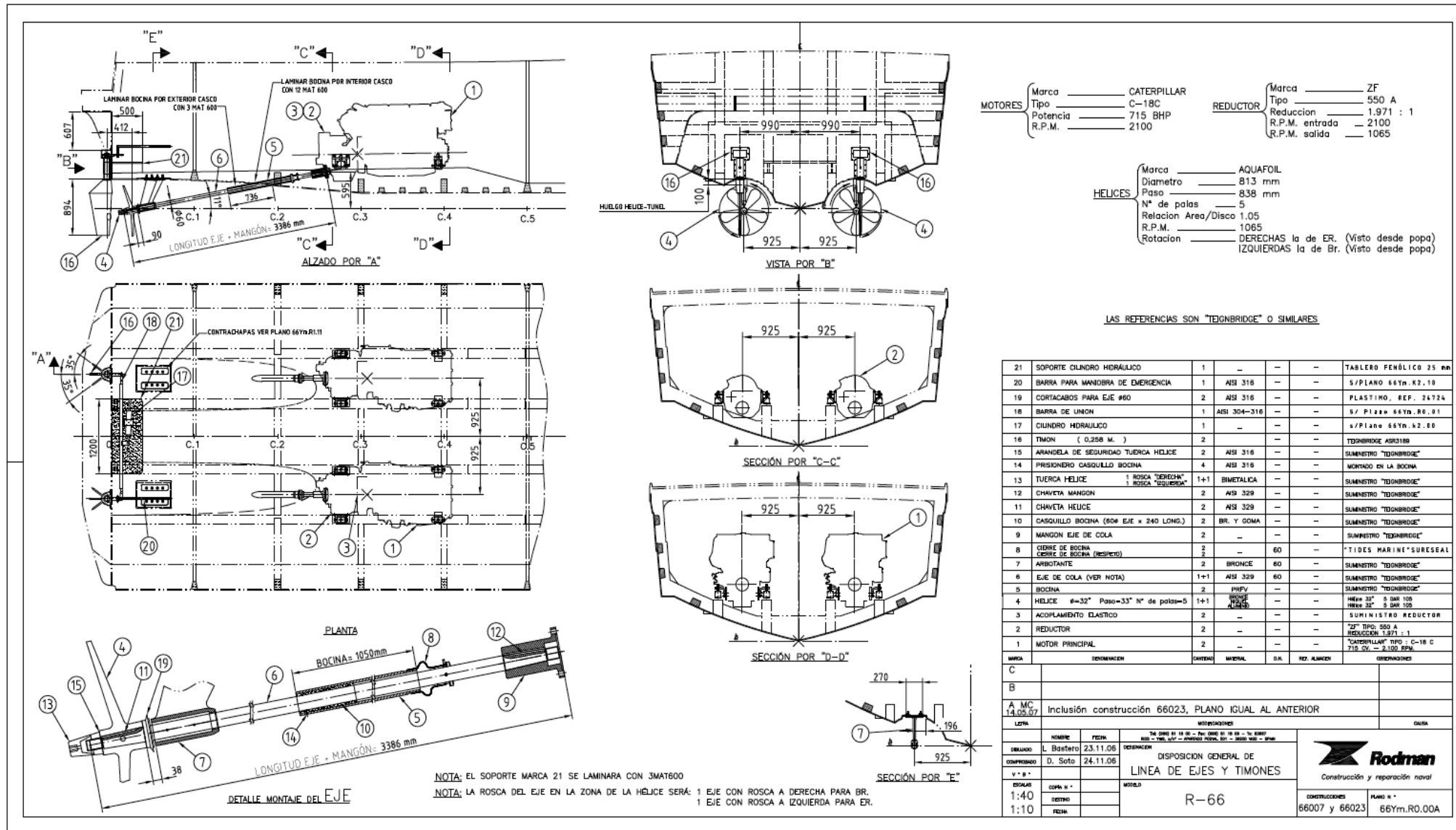


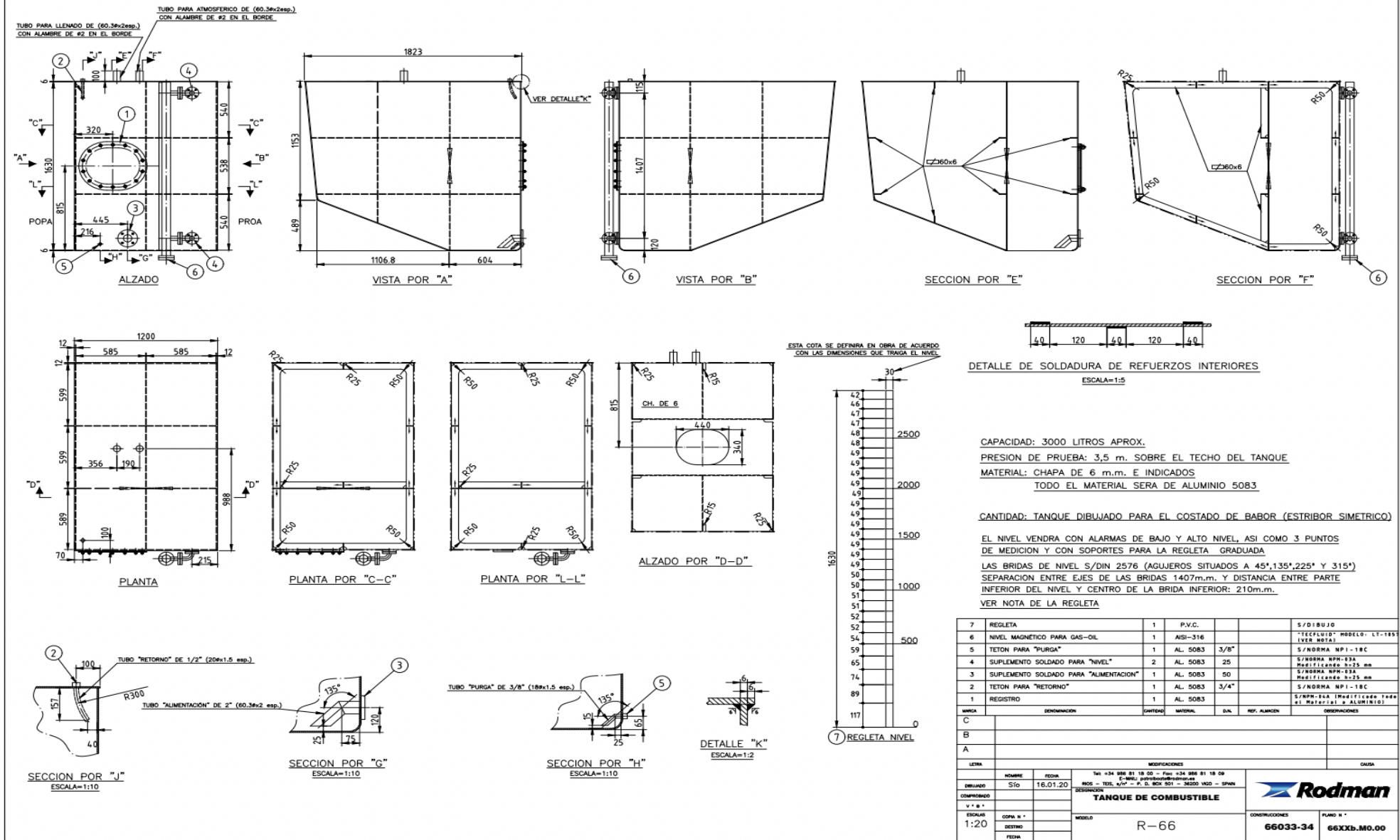
Rodman
Construcción y reparación naval



MARCA	DENOMINACION	CANTIDAD	MATERIAL	D.H.	REF. ALMACEN	OBSERVACIONES
C						
B MC 24.04.07	Inclusión construcción 66023, PLANO IGUAL AL ANTERIOR					
A lb 19.12.06	Actualizar					D. Soto 21.12.06
LETRA	MODIFICACIONES					CAUSA
	NOMBRE	FECHA	Tel: (985) 81 18 00 - Fax: (985) 81 18 08 - Tlx: 83667 R100 - TEL. 24/24 - APARTADO POSTAL 501 - 36200 VIGO - SPAIN			
DIBUJADO	Marcos	10-11-06	DESIGNACION			
COMPROBADO	María M	10-11-06	DISPOSICION GENERAL INTERIORES			
V * B *	CASTILLA	10-11-06	MODELO			
ESCALAS	COPIA N *		R-66			
1:100	DESTINO		CONSTRUCCIONES			PLANO N *
	FECHA		66007 y 66023			66Ym.A6.01B

REDISEÑO DE LA PLANTA PROPULSORA DE LA PLATAFORMA RODMAN 66 PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE COMBUSTIBLES MARINOS ALTERNATIVOS





ANEXO IV: PROTOCOLO DE PRUEBAS RODMAN 66

	<p align="center">PROTOCOLO DE PRUEBAS Proyecto: 66023</p>	<p>Archivo: 66023 PROTOCOLO DE PRUEBAS_V1.DOC Páginas: Página 31 de 47 Realizado por: David Soto Fecha: 08-06-07</p>
---	--	---

CRITERIOS DE ACEPTACIÓN O RECHAZO :

EQUIPO	Nº DE IDENTIFICACION
Motor propulsor BR: Caterpillar C18	C1J00874
Motor propulsor ER: Caterpillar C18	C1J00875
Reductor BR: ZF 550A	20094685
Reductor ER: ZF 550A	20094686

				Presión	T°	Presión					
				Aceite	Agua	Aceite					
		rpm	%carga	Motor	Motor	Trans	Consumo	Vel	Consumo	Autonomía	
				Kpa	°C	Kpa	Litros/horas	nudos	Litros/hora	Horas	Millas
800	BR	906	32	494	70	2352	21,7	9	44,7	134	1208,1
	ER	906	34	480	72	2384	23				
1200	BR	1200	49	500	78	2352	41,1	11,2	83,9	72	801,0
	ER	1200	50	420	79	2400	42,8				
1400	BR	1400	55	504	82	2368	61,4	13	124,9	48	624,5
	ER	1400	57	524	83	2416	63,5				
1500	BR	1500	54	516	83	2368	72,3	14,1	147,7	41	572,8
	ER	1500	55	504	83	2432	75,4				
1600	BR	1600	56	520	83	2368	84,8	15,6	171,5	35	545,8
	ER	1600	58	516	83	2432	86,7				
1800	BR	1800	70	512	83	2384	109	18,8	221	27	510,4
	ER	1800	72	516	84	2432	112				
2000	BR	2000	83	524	84	2368	136	22,1	277	22	478,7
	ER	2000	87	512	84	2448	141				
FULL	BR	2135	94	524	84	2384	173	24,8	347	17	428,8
FULL	ER	2159	95	528	85	2448	174				

10 de diciembre de 2007

Firma Astillero	Firma Armador	Firma Lloyd's Register (Vigo)
-----------------	---------------	-------------------------------

ANEXO V: CATÁLOGO C18

EMISIONES (VALORES GARANTIZADOS)

rpm	2100	2100	2100	2100	2100
% carga	100	75	50	25	10
Potencia motor kWm	470,0	352,5	235,0	117,5	47,0
NOx (mg/Nm ³)	1.336,1	905,4	747,9	1.601,7	1.944,4
CO (mg/Nm ³)	355,6	345,0	397,2	1.205,6	2.250,3
HC (mg/Nm ³)	31,8	53,8	85,3	107,1	250,8
Partículas(mg/Nm ³)	48,3	63,0	100,4	243,8	261,4
% O ₂ en escape	10,50	12,00	14,00	15,20	16,90

CONDICIONES DE TRABAJO

Datos a 2100 rpm y 470 kWm

Calor absorbido en agua de refrigeración 160 kW

Calor residual en el escape 314 kW

Calor radiado..... 124 kW

Consumo de combustible..... 131 l/h

Consumo específico de combustible 233,8 g/kWmh

DATOS DE POTENCIA-PAR-CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Velocidad rpm	Potencia kw	Par Nm	Consumo específico g/kWh	Consumo combustible l/h
2100	470	2137	233,8	131,0
2000	470	2244	229,9	128,8
1900	470	2362	224,5	125,8
1800	470	2493	218,9	122,6
1700	465	2611	214,5	118,8
1600	455	2714	212,5	115,2
1500	441	2807	211,4	111,1
1400	422	2879	210,7	106,0
1300	387	2842	210,3	97,0
1200	309	2457	211,3	77,8
1100	258	2243	214,4	66,0

CATERPILLAR®

C18 ACERT™ MARINE PROPULSION

533 kW
(715 bhp)



Image may not reflect
actual engine

SPECIFICATIONS

I-6, 4-Stroke-Cycle-Diesel

Displacement.....	18.1 L (1106 in³)
Rated Engine Speed	2100
Bore.....	145 mm (5.7 in.)
Stroke	183 mm (7.2 in.)
Aspiration	Turbocharged-Aftercooled
Governor	Electronic
Cooling System.....	Keel-Cooled/ Heat-Exchanger Cooled
Weight, Net Dry (approx.)	
Keel-Cooled.....	1539 kg (3394 lb)
Heat Exchanger-Cooled.....	1673 kg (3688 lb)
Refill Capacity	
Cooling System	45.8 L (12.1 gal)
Lube Oil System	64 L (16.9 gal)
Oil Change Interval	500 hours
Caterpillar Diesel Engine Oil 10W30 or 15W40	
Rotation (from flywheel end).....	Counterclockwise
Flywheel and flywheel housing.....	SAE No. 1 and SAE No. 0
Flywheel Teeth	
SAE No. 1.....	113
SAE No. 0.....	136
Maximum Exhaust	
Backpressure	6.7 kPa (26.9 in. water)

STANDARD EQUIPMENT

Air Inlet System

Corrosion-resistant sea water aftercooler, air cleaner/fumes disposal (closed system), jacket water cooled turbocharger, turbocharger inlet OD straight connection

Control System

Electronic governing (A4), programmable low idle, electronic diagnostics and fault logging, fuel/air ratio control, electronic throttle position sensor

Cooling System

Thermostat and housing, block heater (1500W, 120V AC current), gear-driven jacket water pump, self priming, gear-driven sea water pump with bronze impeller, titanium plate type heat exchanger or separate circuit keel cooling

Exhaust System

Watercooled exhaust manifold and turbocharger, round-flanged outlet

Flywheel and Flywheel Housings

Standard SAE No. 1 flywheel and flywheel housing, 113 teeth, SAE standard rotation; optional SAE No. 0 flywheel and flywheel housing, 136 teeth, SAE standard rotation

Fuel System

Fuel filter, RH service on port, LH service on starboard; fuel transfer pump; fuel priming pump; flexible fuel lines

Instrumentation

Electric service meter, instrument panel (24V), start/stop switch, emergency stop button, maintenance due light, diagnostic light, warning light, maintenance clear switch, start motor magnetic switch, 15 and 3A breakers

Lube System

Crankcase breather; oil cooler; spin-on oil filter, RH service on port, LH service on starboard; center sump deep oil pan; oil filler; dipstick, RH service on port, LH service on starboard; gear-driven oil pump

Mounting System

Adjustable front support

Power Take-Offs

Hydraulic pump drive, SAE A, 11 tooth spline, 46 ft-lbs max torque, counterclockwise as viewed from front of the engine looking into the drive and turns 1.41 x engine speed, 292 mm crankshaft pulley, 15.88 mm width

General

Vibration damper; lifting eyes, RH or LH service options; literature; variable engine wiring; upper rear-facing customer wiring connector and service tool connections

ISO Certification

Factory-designed systems built at Caterpillar ISO 9001:2000 certified facilities.

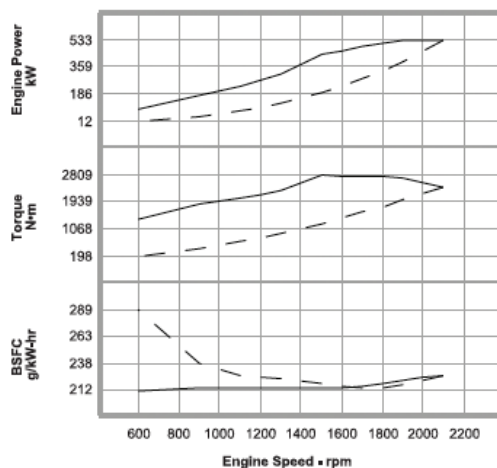


C18 ACERT™ MARINE PROPULSION

533 kW (715 bhp)

PERFORMANCE CURVES

Turbocharged-Aftercooled

C Rating — 533 kW (715 bhp) @ 2100 rpm
DM9568-00


Metric

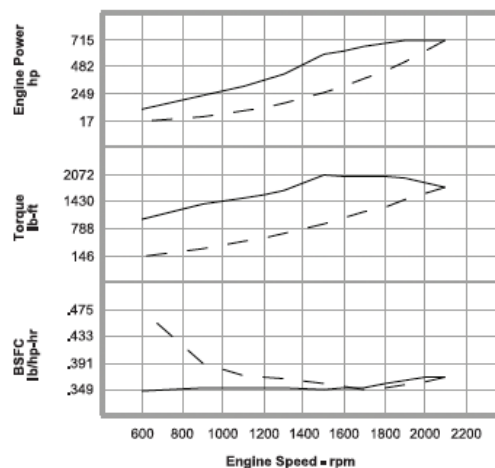
Maximum Power
Prop Demand

533 kW

Performance Data

	Engine Speed rpm	Engine Power kW	Engine Torque N·m	BSFC g/kW-hr	Fuel Rate L/hr
Maximum Power Data	2100	533,0	2424	223,9	142,3
	2000	533,0	2545	222,7	141,5
	1900	533,0	2679	220,1	139,8
	1800	515,1	2733	216,9	133,2
	1700	488,9	2746	213,8	124,6
	1600	462,2	2759	212,4	117,0
	1500	441,3	2809	212,1	111,6
	1300	316,5	2325	212,4	80,1
	1200	273,5	2176	212,8	69,4
	900	173,4	1840	212,7	44,0
	600	84,4	1343	210,3	21,2
Prop Demand Data	2100	533,0	2424	223,9	142,3
	2000	460,4	2198	219,4	120,4
	1900	394,8	1984	215,4	101,4
	1800	335,7	1781	212,5	85,0
	1700	282,8	1588	212,0	71,5
	1600	235,7	1407	214,5	60,3
	1500	194,2	1237	217,2	50,3
	1300	126,4	929	221,5	33,4
	1200	99,5	791	223,1	26,4
	900	42,0	445	237,5	11,9
	600	12,4	198	288,9	4,3

Cubic prop demand curve with 3,0 exponent for displacement hulls only.



English

Maximum Power
Prop Demand

715 hp

Performance Data

	Engine Speed rpm	Engine Power hp	Engine Torque lb-ft	BSFC lb/hp-hr	Fuel Rate gph
Maximum Power Data	2100	714,8	1788	,368	37,6
	2000	714,8	1877	,366	37,4
	1900	714,8	1976	,362	36,9
	1800	690,8	2016	,357	35,2
	1700	655,6	2025	,351	32,9
	1600	619,8	2035	,349	30,9
	1500	591,8	2072	,349	29,5
	1300	424,4	1715	,349	21,2
	1200	366,8	1605	,350	18,3
	900	232,5	1357	,350	11,6
	600	113,2	990	,346	5,6
Prop Demand Data	2100	714,8	1788	,368	37,6
	2000	617,4	1621	,361	31,8
	1900	529,4	1463	,354	26,8
	1800	450,2	1314	,349	22,5
	1700	379,2	1171	,349	18,9
	1600	316,1	1038	,353	15,9
	1500	260,4	912	,357	13,3
	1300	169,5	685	,364	8,8
	1200	133,4	583	,367	7,0
	900	56,3	328	,390	3,1
	600	16,6	146	,475	1,1

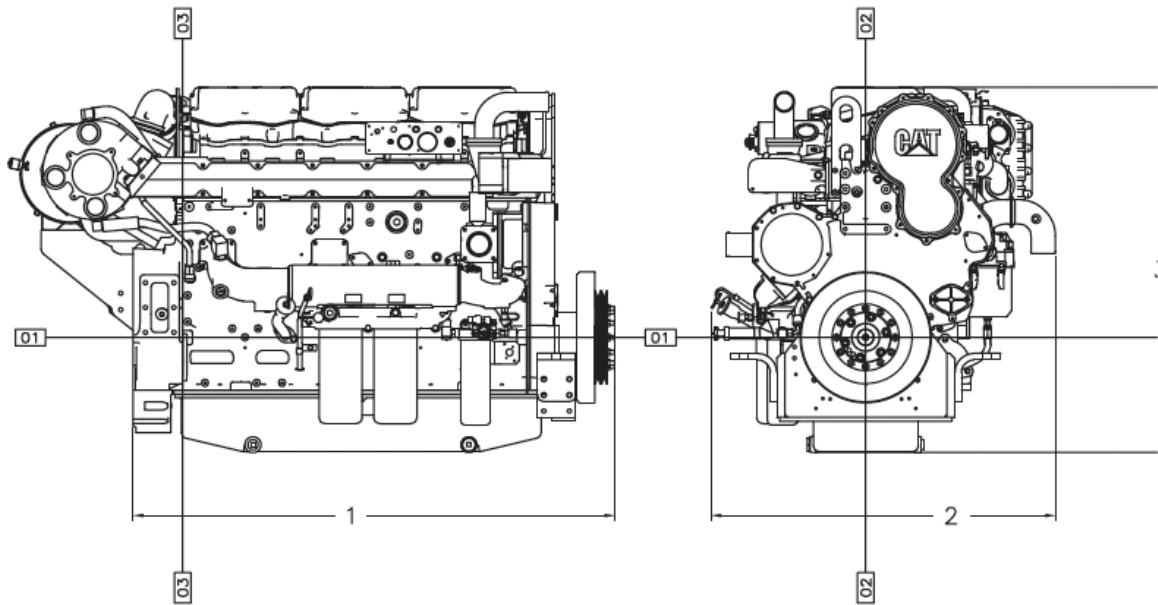
Power produced at the flywheel will be within standard tolerances up to 50°C (122°F) combustion air temperature measured at the air cleaner inlet, and fuel temperature up to 52°C (125°F) measured at the fuel filter base. Power rated in accordance with NMMA procedure as crankshaft power. Reduce crankshaft power by 3% for propeller shaft power.



C18 ACERT™ MARINE PROPULSION

533 bkW (715 bhp)

ENGINE DIMENSIONS



C18 ACERT Engine Dimensions (approx.)		
Length to Flywheel Housing Heat-Exchanger Cooled Keel-Cooled	1504.8 mm	59.24 in.
	1504.8 mm	59.24 in.
Width Heat-Exchanger Cooled Keel-Cooled	1077.2 mm	42.41 in.
	1077.2 mm	42.41 in.
Height Heat-Exchanger Cooled Keel-Cooled	1143.9 mm	45.04 in.
	1143.9 mm	45.04 in.
Weight (dry) Heat-Exchanger Cooled Keel-Cooled	1673 kg	3688 lb
	1539 kg	3394 lb

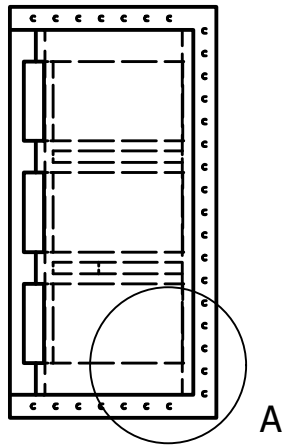
Note: Do not use for installation design. See general dimension drawings for detail (Drawing #315-3171).

ANEXO VI: PLANOS

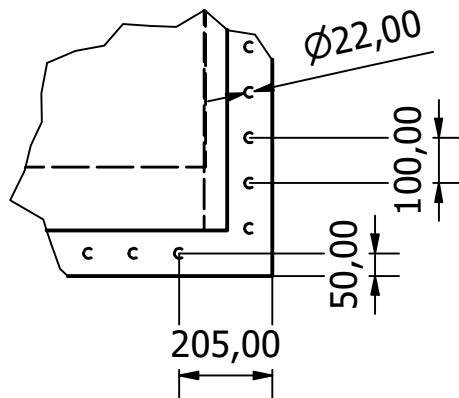
En el presente anexo se incluyen diversos planos de las piezas que conforman el diseño del depósito, así como un explosionado del diseño. Planos elaborados por el software de diseño Autodesk Inventor. Los planos anexados son los siguientes:

- Estructura de sustentación
- Depósito de metanol de babor
- Boca de alimentación del depósito
- Brida de unión salida combustible a motores
- Vista explosionada

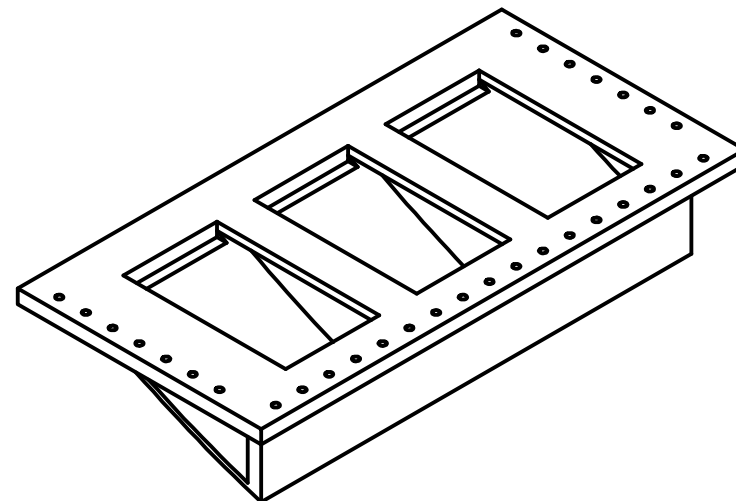
TOP (0,03 : 1)



A (0,06 : 1)



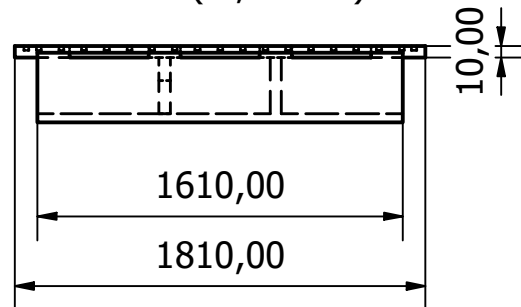
ISO (1 : 20)



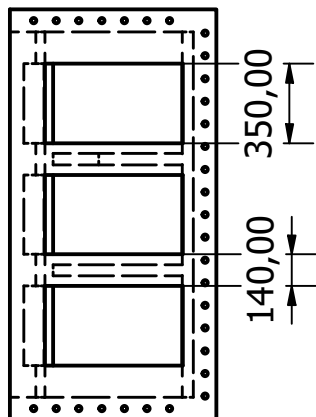
FRONT (0,03 : 1)



RIGHT (0,03 : 1)

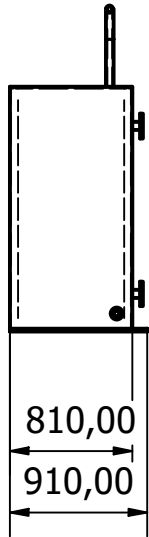


BOTTOM (0,03 : 1)

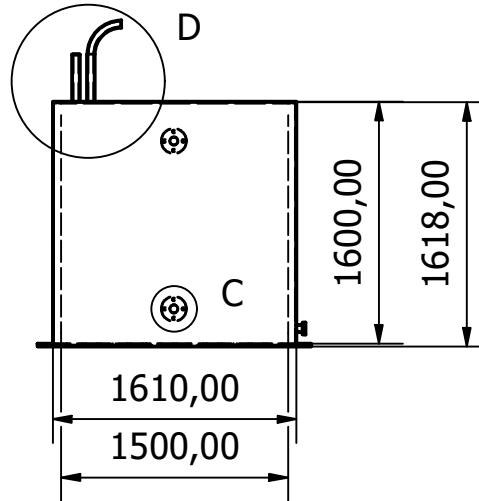
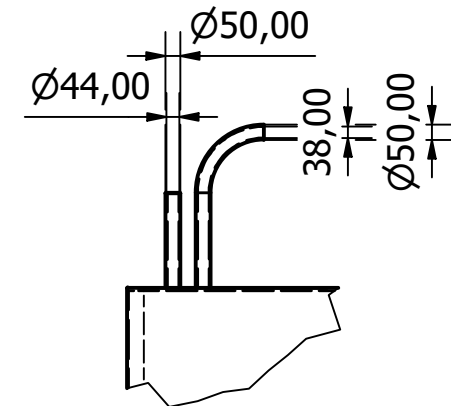


Designed by Alfonso Menéndez	Gº/Nº 4/36	Approved by CUD-ENM	Units mm	Date 20/03/2024	Sheet 1
			Soporte		
			Estructura de sustentación	Format A4	Scale 0,03:1

FRONT (0,02 : 1)

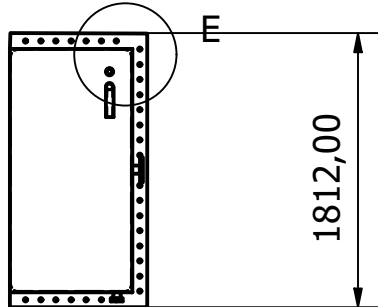
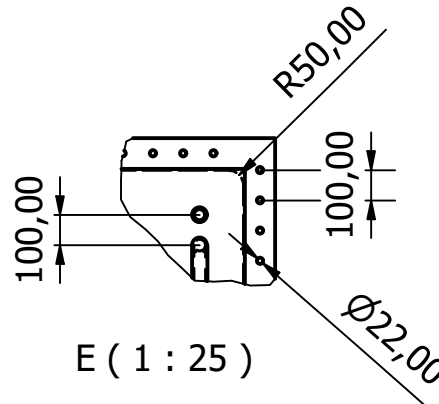


RIGHT (0,02 : 1)



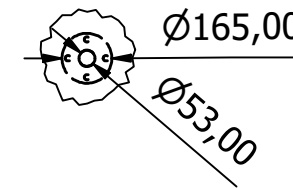
D (1 : 25)

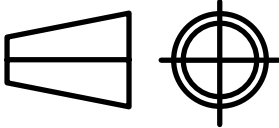
BOTTOM (0,02 : 1)

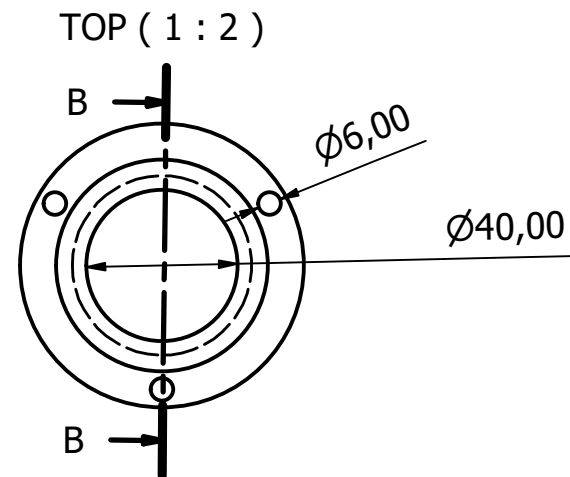


E (1 : 25)

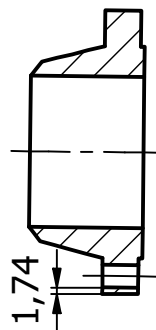
C (1 : 25)



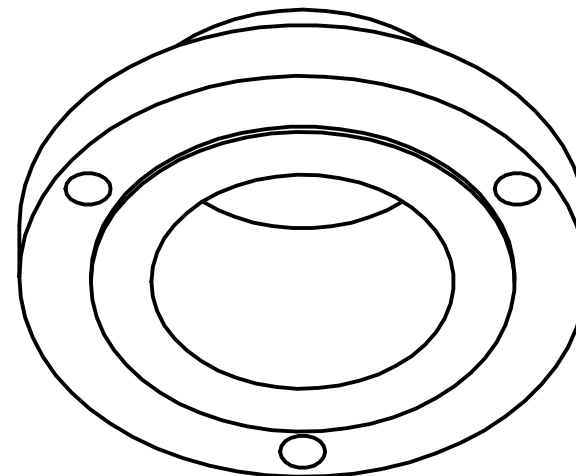
Designed by Alfonso Menéndez	Gº/Nº 4/36	Approved by CUD-ENM	Units mm	Date 20/03/2024	Sheet 2
			Diseño depósito		
			Depósito Babor		Format A4 Scale 0,02:1



B-B (1 : 2)



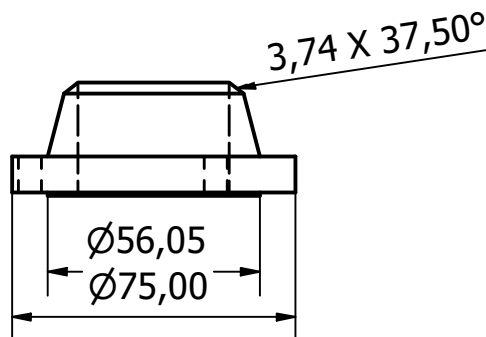
ISO (1 : 1)



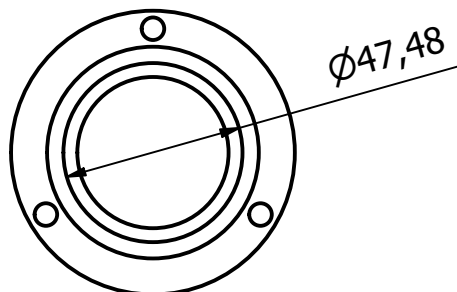
FRONT (1 : 2)



RIGHT (1 : 2)

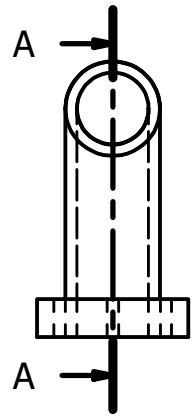


BOTTOM (1 : 2)

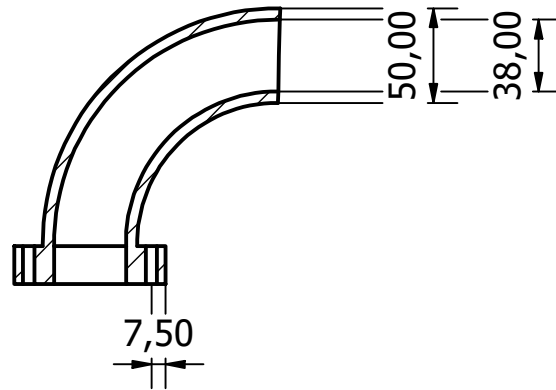


Designed by Alfonso Menéndez	Gº/Nº 4/36	Approved by CUD-ENM	Units mm	Date 20/03/2024	Sheet 3
			Boca alimentación		
			Unión tapón	Format A4	Scale 1:2

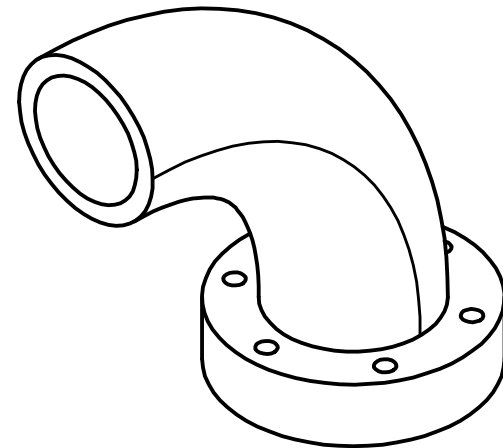
TOP (1 : 4)



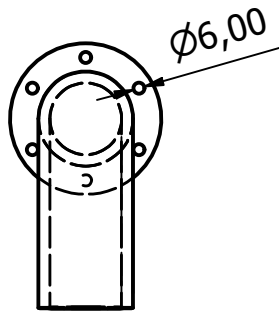
A-A (1 : 4)



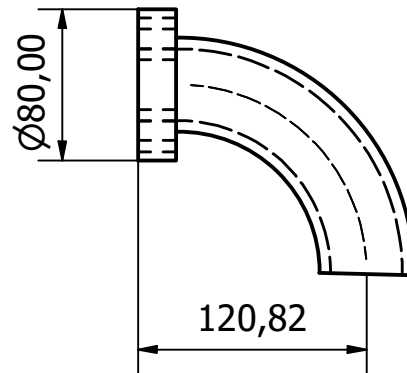
ISO (1 : 2)



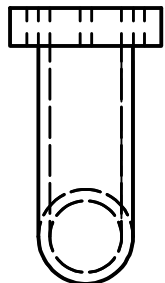
FRONT (1 : 4)



RIGHT (1 : 4)

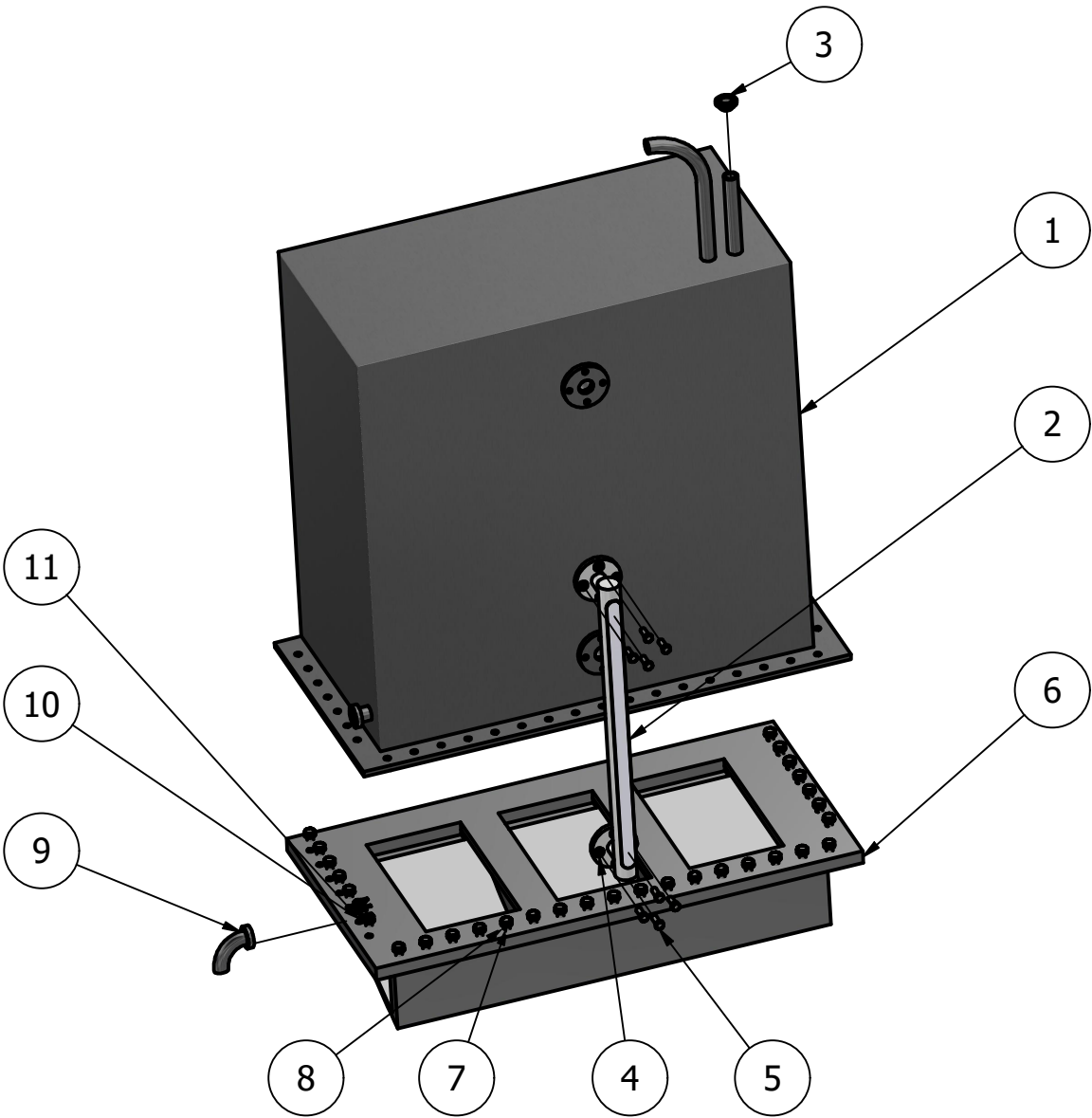


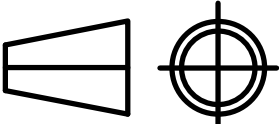
BOTTOM (1 : 4)



Designed by Alfonso Menéndez	Gº/Nº 4/36	Approved by CUD-ENM	Units mm	Date 20/03/2024	Sheet 4
			Unión boca alimentación		
			Brida alimentación	Format A4	Scale 1:4

PARTS LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER
1	1	Depósito Babor
2	1	Regleta nivel
3	1	Unión tapón
4	8	ISO 7089 - 18
5	8	ISO 4017 - M18 x 50
6	1	Estructura de sustentación
7	32	ISO 7089 - 22
8	32	ISO 4017 - M22 x 55
9	1	Brida alimentación
10	6	ISO 7089 - 6
11	6	BS EN ISO 4017 - M6 x 35



Designed by Alfonso Menéndez	Gº/Nº 4/36	Approved by CUD-ENM	Units mm	Date 21/03/2024	Sheet 5
			Vista explosionada		
			Ensamblaje babor	format A4	Scale 0,04:1