



UNIVERSIDADE DA CORUÑA



ESCOLA TÉCNICA SUPERIOR DE
NÁUTICA E MÁQUINAS

TRABAJO DE FIN DE GRADO

“ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE AMONÍACO COMO COMBUSTIBLE PARA LA PROPULSIÓN DE BUQUES MERCANTES”

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

MENCIÓN EN ENERGÍA Y PROPULSIÓN

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y
MÁQUINAS

SEPTIEMBRE – 2022

AUTOR: JOSÉ MARÍA ÁLVAREZ REYES

DIRECTOR: FELICIANO FRAGUELA DÍAZ



TRABAJO DE FIN DE GRADO

“TÍTULO: ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE AMONÍACO COMO COMBUSTIBLE PARA LA PROPULSIÓN DE BUQUES MERCANTES”

GRADO EN TECNOLOGÍAS MARINAS

MENCIÓN EN ENERGÍA Y PROPULSIÓN

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA Y
MÁQUINAS**

SEPTIEMBRE – 2022

AUTOR:

DIRECTOR:

Fdo.: José María Álvarez Reyes

Fdo.: Feliciano Fraguela Díaz

RESUMEN

En la actualidad, las restricciones impuestas por la Organización Marítima Internacional (OMI) sobre las emisiones producidas por los buques mercantes, especialmente en determinadas zonas como las ECA (Emission Control Areas), son cada vez más estrictas. El amoníaco o NH_3 se perfila como una alternativa viable a los combustibles fósiles en un futuro próximo, permitiendo proyectar una descarbonización del transporte marítimo gracias a la posibilidad de ser producido de forma renovable, no contener azufre en su composición y permitir una combustión más limpia, si se controla adecuadamente.

Muchas grandes empresas del sector naval, sean navieras, astilleros o compañías dedicadas a la propulsión marina, ya se encuentran actualmente trabajando en este tipo de tecnología para adelantarse a las mencionadas normativas sobre emisiones de la OMI, planteando distintas estrategias para abordar las necesidades del uso de esta sustancia como combustible. Además, existen ya numerosas publicaciones científicas que resaltan la importancia de esta sustancia como combustible de transición y proporcionan las claves para entender su proceso de combustión, las diferentes aproximaciones a su uso en motores de combustión interna y el camino que está siguiendo esta tecnología.

En el presente documento se busca analizar las características de esta sustancia como combustible, sus ventajas e inconvenientes y sus antecedentes históricos, además de las iniciativas en desarrollo hoy en día o las alternativas al motor de combustión interna tradicional, como la pila de combustible. Por último, se plantea la adaptación de un equipo propulsor diésel existente al consumo de amoníaco junto con la instalación de un sistema de almacenamiento y suministro de combustible, pensado como un estudio de caso que evidencie la viabilidad de la propulsión mediante motores de NH_3 .

RESUMO

Na actualidade, as restriccións impostas pola Organización Marítima Internacional (OMI) sobre as emisións producidas polos buques mercantes, especialmente en determinadas zonas coma as ECA (Emission Control Areas), son cada vez máis estritas. O amoníaco ou NH_3 perfílase coma unha alternativa viable aos combustibles fósiles nun futuro próximo, permitindo proxectar unha descarbonización do transporte marítimo grazas á posibilidade de ser producido de forma renovable, non conter xofre na súa composición e permitir unha combustión máis limpa, de controlarse da forma axeitada.

Moitas grandes empresas do sector naval, sexan navieiras, estaleiros ou compañías dedicadas á propulsión mariña, xa se encontran actualmente traballando neste tipo de tecnoloxía para adiantarse ás mencionadas normativas sobre emisións da OMI, planteando distintas estratexias para abordar as necesidades do uso desta substancia como combustible. Ademais, existen xa numerosas publicacións científicas que resaltan a importancia desta substancia como combustible de transición e proporcionan as claves para entender o seu proceso de combustión, as diferentes aproximacións ao seu uso en motores de combustión interna e o camiño que está a seguir esta tecnoloxía.

No presente documento procúrase analizar as características desta sustancia como combustible, as súas vantaxes e inconvenientes e os seus antecedentes históricos, ademais das iniciativas en desenvolvemento hoxe en día ou as alternativas ao motor de combustión interna tradicional, coma a pila de combustible. Por último, plantéase a adaptación dun equipo propulsor diésel existente ao consumo de amoníaco xunto ca instalación dun sistema de almacenamento e subministración de combustible, pensado como un estudo de caso que evidencie a viabilidade da propulsión mediante motores de NH_3 .

ABSTRACT

Nowadays, the restrictions imposed by the International Maritime Organization (IMO) over the emissions produced by merchant ships, especially in certain areas such as the ECAs (Emission Control Areas), are increasingly strict. Ammonia or NH_3 is emerging as a viable alternative to fossil fuels in the near future, making possible to project a decarbonization of maritime transport thanks to the possibility of it being produced in a renewable way, not containing sulfur in its composition and allowing cleaner combustion, if it is properly controlled.

Many large companies in the naval sector, whether shipping ones, shipyards or corporations dedicated to marine propulsion, are currently working on this type of technology to anticipate the aforementioned IMO regulations on emissions, proposing different strategies to address the needs of the use of this substance as fuel. In addition, there are already numerous scientific publications that highlight the importance of this substance as a transition fuel and provide the keys to understand its combustion process, the different approaches to its use in internal combustion engines and the path that this technology is following.

This document seeks to analyze the characteristics of this substance as a fuel, its advantages and disadvantages and its historical background, as well as the initiatives under development today or the alternatives to the traditional internal combustion engine, such as the fuel cell. Finally, the adaptation of existing diesel propulsion equipment to ammonia consumption is proposed together with the installation of a fuel storage and supply system, conceived as a case study that demonstrates the viability of propulsion using NH_3 engines.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	6
1. OBJETO.....	9
2. MEMORIA	10
2.1. INTRODUCCIÓN	10
2.1.1. Estado del arte.....	10
2.1.2. Normativa de emisiones OMI.....	11
2.1.2.1. Estándares de emisiones	12
2.2 PARTICULARIDADES DEL AMONÍACO COMO COMBUSTIBLE.....	14
2.2.1. Métodos de obtención	14
2.2.1.1. Ciclo Haber-Bosch.....	14
2.2.1.2. Clasificación del NH₃ en función de su método de producción.....	17
2.2.2. Ventajas e inconvenientes del amoníaco como combustible	18
2.2.3. Comparación con otros combustibles	21
2.2.4. Combustión del amoníaco	24
2.2.4.1. Alta temperatura de ignición.....	25
2.2.4.2. Cinética química lenta	26
2.2.4.3. Baja velocidad de llama	26
2.2.5. Comparativa entre High-Pressure injection Dual-Fuel (HPDF) y Low-Pressure injection Dual Fuel (LPDF).....	27
2.2.5.1. HPDF	27
2.2.5.2. LPDF	30
2.2.5.3. Conclusión del debate HPDF – LPDF.....	31
2.2.6. Combustión de amoníaco + hidrógeno	32
2.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE AMONÍACO COMO COMBUSTIBLE ..	34

2.3.1. Flota de autobuses a amoníaco.....	34
2.3.1.1. Proceso Gazamo	35
2.3.1.2. Reabastecimiento	37
2.3.1.3. Resultados obtenidos	38
2.3.2. Pruebas para el U.S. Army	39
2.4. PROYECTOS EN DESARROLLO EN LA ACTUALIDAD	42
2.4.1. Avances de Wärtsilä Marine Power y sus socios.....	42
2.4.2. Progresos de MAN Energy Solutions	44
2.5. PILA DE AMONÍACO	47
2.6. RETROFIT DE UN MOTOR EXISTENTE AL CONSUMO DE AMONÍACO	49
2.6.1. Tipo de motor a utilizar	49
2.6.2. Modificaciones que realizar para el consumo de NH₃	52
2.6.2.1. Sistema de almacenamiento y suministro de combustible	52
2.6.2.2. Sistema de inyección	56
2.6.2.3. Sistema de sobrealimentación/aire de barrido.....	58
2.6.2.4. Sistema de refrigeración.....	60
2.6.2.5. Sistema de escape	61
2.6.2.6. Sistema de regulación y control	61
2.6.2.7. Observaciones acerca de los materiales a emplear/reemplazar	63
2.6.2.8. Relación final de modificaciones a implementar	64
2.6.3. Resultados esperados.....	65
2.6.4. Análisis desde el punto de vista económico.....	66
3. CONCLUSIONES.....	67
BIBLIOGRAFÍA	68
DEFINICIONES Y ABREVIATURAS	71
ÍNDICE DE TABLAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS..... 75

1. OBJETO

En el presente Trabajo de Fin de Grado se pretende estudiar la situación pasada, actual y futura del amoníaco como combustible y plantear, desde el ámbito técnico y económico, la posible transformación de un motor de combustión interna existente para la utilización dual de este combustible.

La posibilidad de que el amoníaco sea un combustible marino futuro o, al menos, de transición, surge por dos motivos principales: La normativa de emisiones de la IMO (Organización Marítima Internacional u OMI) en cuanto a motores marinos, especialmente en lo tocante al dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x), y la oportunidad de producir dicho combustible de forma “verde”, es decir, mediante energías renovables, agua y aire en un proceso con un balance neto de emisiones cero, que apenas aumenta al quemar el amoníaco en un motor de combustión interna. Si a esto le sumamos su mayor densidad energética frente al hidrógeno líquido, otra de las alternativas en boga actualmente, podemos entender la importancia del amoníaco y el porqué de este trabajo fin de grado.

Además, se busca su comparación con otros combustibles marinos, ya sean de uso común o alternativos, y perfilar por qué esta sustancia se presenta como una opción perfectamente viable para propulsar a la flota mercante en un futuro próximo.

Para ello, se han utilizado fuentes y bibliografía consistentes en informes de organismos oficiales, artículos científicos de revistas y otras publicaciones, y comunicados de prensa de empresas del sector y distintos entes públicos. Sin embargo, destaca la carencia bibliográfica sobre la adaptación real de propulsores marinos a esta tecnología, en gran medida por el secretismo que mantienen al respecto las empresas que llevan a cabo los avances e investigaciones en este ámbito.

Como último objetivo, el autor busca sentar las líneas de trabajo o modificaciones que se requerirían en un proyecto de estas características, así como transmitir lo aprendido a futuras empresas, navieras o armadores que pretendan llevar a cabo un retrofit en un motor similar al modelo propuesto.

2. MEMORIA

2.1. INTRODUCCIÓN

2.1.1. Estado del arte

Hoy en día, la energía en sus diversas formas es indispensable para la vida humana, y esta tendencia no hace sino aumentar. Tradicionalmente, esta se ha obtenido mediante la combustión de sustancias fósiles como el carbón o los hidrocarburos, pero ante el gran volumen de población mundial y las necesidades energéticas de la misma las emisiones nocivas para el planeta y su atmósfera crecen exponencialmente, ya sean derivadas del transporte, la generación de energía eléctrica o procesos industriales.

Actualmente vivimos el declive de los combustibles fósiles convencionales, y comenzamos a vislumbrar una transición energética total hacia fuentes limpias y renovables. El amoníaco, por razones que detallaremos a continuación, puede jugar una función clave en dicho proceso, sentando las bases de una nueva era en el transporte marítimo.

El sector naval está buscando y probando combustibles alternativos a los habituales, como podrían ser los biocombustibles, el hidrógeno o el amoníaco, ya sea mediante su combustión en motores o a través de pilas y catalizadores. Esta investigación surge principalmente por las restricciones impuestas por la OMI (Organización Marítima Internacional) en cuanto a emisiones de CO₂, NO_x y SO_x, y zonas especiales o ECA (Emission Control Areas), sumado a la necesidad de mantener (o incluso aumentar) el volumen de tráfico marítimo existente, independientemente de dichas restricciones.

El amoníaco o NH₃ presenta dos grandes ventajas: Es una forma estable de almacenar hidrógeno y quemarlo con unas emisiones reducidas, y además se puede producir de forma respetuosa con el medio ambiente a partir de energías renovables, agua y aire. Por tanto, parece lógico que sea la opción más viable de cara a la propulsión marina, ya que está claro que la baja densidad energética de las baterías actuales convierte la propulsión 100% eléctrica en una quimera. La evolución de esta tecnología podría pasar primero por el “retrofit” o reacondicionado de motores actuales para el consumo dual (gasoil – amoníaco), seguidos por una nueva generación de motores duales diseñados

directamente para el uso de este combustible, y dando paso después a las pilas propiamente dichas. (Kurien & Mittal, 2021)

2.1.2. Normativa de emisiones OMI

La OMI u Organización Marítima Internacional (IMO, por sus siglas en inglés) es un organismo de las Naciones Unidas responsable de la seguridad de la navegación y la prevención de la contaminación por parte de los buques.

Más del 80% del transporte mundial de mercancías se produce a través de los buques mercantes, y este volumen de tráfico no hace sino aumentar. Por ello, la OMI implanta determinadas normativas ambientales que afectan al 99% del tonelaje de la flota mundial, y las recoge en el Convenio MARPOL 78/97, concretamente en el Anexo VI: Reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques.

Este Anexo, que data de 2005, busca principalmente reducir los límites admisibles de emisiones de óxidos de nitrógeno y óxidos de azufre (NO_x y SO_x), estableciendo para ello un sistema de reconocimientos y certificaciones iniciales y periódicas para todo buque de arqueo bruto igual o superior a 400 GT (gross tons), torres de perforación o plataformas marítimas. También establece medios de control para detectar transgresiones e incumplimientos de la normativa vigente, y zonas de especial protección, las ECAs (Emission Control Areas).

En cuanto a las emisiones nocivas que regula, se agrupan en cuatro categorías: Sustancias que agotan la capa de ozono, óxidos de nitrógeno (NO_x), óxidos de azufre (SO_x) y compuestos orgánicos volátiles (COV o VOC, por sus siglas en inglés). Para paliar sus efectos, además de las restricciones pertinentes, busca implantar nuevas tecnologías como Scrubbers (depuradores de SO_x), SCRs (Selective Catalytic Reduction, para NO_x), inyección de agua en la cámara de combustión o el objeto de este trabajo, los nuevos combustibles y/o biocombustibles.

Además, en cuanto a los gases de efecto invernadero (principalmente en lo tocante al CO_2), se adoptan oficialmente en 2018 dos medidas para reducir las emisiones al menos en un 40% de la actualidad a 2030 comparado con los niveles de 2008, y seguir hasta el 70% en 2050. Dichas medidas son:

- EEDI (Índice de eficiencia de proyecto): Es la medida técnica más importante y busca extender el uso de maquinaria y equipos más eficientes energéticamente hablando. Requiere un nivel de eficiencia energética mínimo por milla, expresado por ejemplo en capacidad (toneladas emitidas por milla navegada), variable en función del tipo y tamaño del buque, y el nivel de reducción de emisiones se irá ajustando cada cinco años para mantener el ritmo de los avances tecnológicos existentes.

- SEEMP (Plan de gestión de la eficiencia energética del buque): Esta medida operativa permite mejorar la eficiencia energética de un buque de manera rentable, proporcionando una metodología para que las empresas puedan seguir y monitorizar a lo largo del tiempo la eficiencia de sus flotas. Para ello usan herramientas como el EEOI (Indicador operacional de la eficiencia energética).

2.1.2.1. Estándares de emisiones

Constituyen la espina dorsal de las restricciones mencionadas anteriormente. Surgen debido a que el transporte marítimo genera casi el 3% de las emisiones mundiales de CO₂ (cabe destacar que anualmente se emiten en torno a mil millones de toneladas de esta sustancia, cifra que va en aumento), y gran parte de las de óxidos de azufre y nitrógeno, entre otros elementos.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno o NO_x que puede emitir un buque, la OMI establece una clasificación para los buques y sus motores en tres categorías o “Tiers”: I, II y III, siendo la última solo aplicable a las zonas ECA, ya que fuera de ellas estos buques pueden operar según los estándares del Tier II. Podemos observar estas clasificaciones en las Figuras 2.1.2.1.1. y 2.1.2.1.2., a continuación.

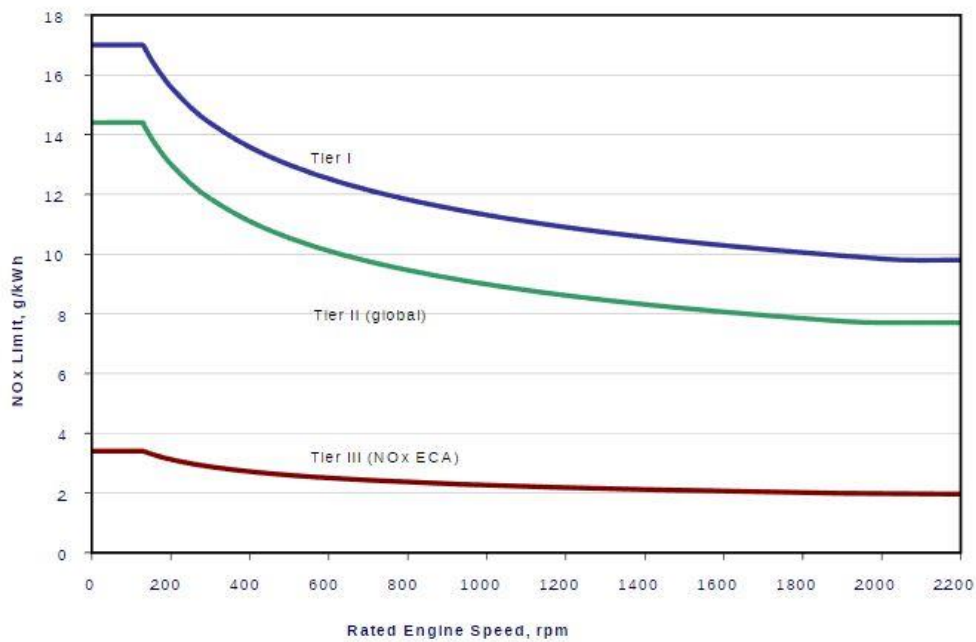


Fig. 2.1.2.1.1: Límites de emisión de NO_x establecidos por el Anexo VI (DieselNet, 2022)

Respecto a los óxidos de azufre, se establecen distintos límites en lo tocante a emisiones, y objetivos a futuro empezando por una reducción a emisiones con un 0,5% de SO_x para 2025, y 0% en las anteriormente mencionadas ECAs.

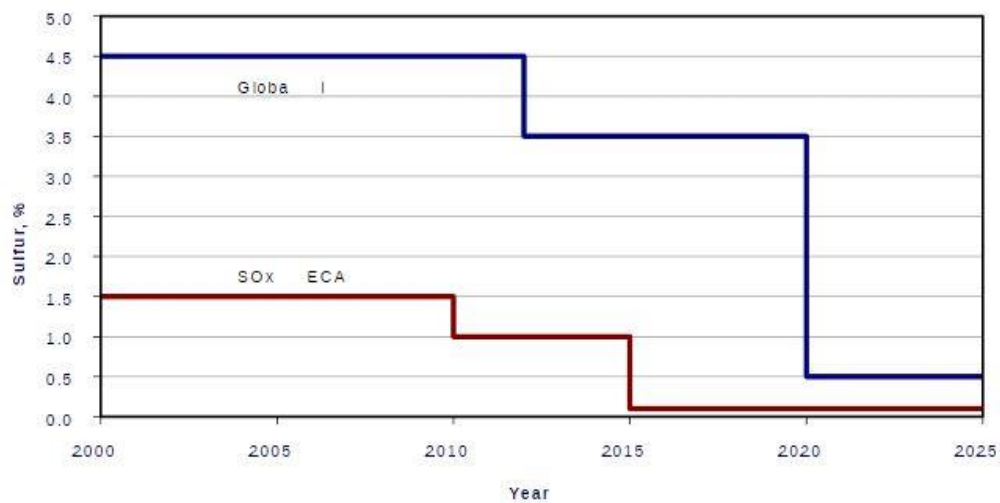


Fig. 2.1.2.1.2: Límites de emisión de SO_x establecidos por el Anexo VI (DieselNet, 2022)

2.2 PARTICULARIDADES DEL AMONÍACO COMO COMBUSTIBLE

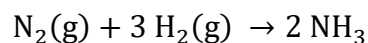
2.2.1. Métodos de obtención

El amoníaco se puede sintetizar mayormente mediante tres procesos distintos: Ciclo Haber-Bosch, síntesis termoquímica (reducción de Al_2O_3 con nitrógeno y carbono en una reacción endotérmica), y síntesis en estado sólido (proceso electroquímico para producir amoníaco mediante nitrógeno, agua y electricidad). El 90% del que se produce en el mundo se obtiene mediante el ciclo Haber-Bosch mencionado anteriormente, relegando los otros dos procesos a aplicaciones de laboratorio y experimentales, encaminados a una reducción del coste de producción y una mejora de eficiencia en estos procesos. (Bartels, 2008)

2.2.1.1. Ciclo Haber-Bosch

Ideado por Fritz Haber y Carl Bosch en 1913, este ciclo se basa en la reacción entre hidrógeno y nitrógeno en un catalizador específico, tradicionalmente de óxidos de hierro, potasio y aluminio. A lo largo de los años se han ido mejorando las plantas de producción, introduciendo cambios en cuanto a los catalizadores, presiones y temperaturas de la instalación.

La química inherente al proceso se mantiene constante pese a dichas mejoras, normalmente a temperaturas alrededor de 400 – 600°C y presiones entre 200 y 400 bar (Thomas & Parks, 2006), siguiendo la fórmula a continuación:



(2.2.1.1.1)

Tradicionalmente se han usado como fuente de hidrógeno y nitrógeno dos sustancias, con sus correspondientes procesos previos: metano (CH_4) reformado mediante vapor, y carbón gasificado, pero en la actualidad se investigan nuevas materias proveedoras de estas sustancias, o la aplicación de energías y recursos renovables. En este último ámbito, podríamos destacar la síntesis basada en hidrógeno (cuya única diferencia es que este se obtiene de forma verde), y las que utilizan energía eólica y energía térmica marina.

El ciclo consiste en, una vez que se ha obtenido el denominado gas sintético (formado por nitrógeno e hidrógeno), comprimirlo hasta una presión superior a 220 bar (dependiendo de la planta) e introducirlo en el catalizador, donde sólo una parte del gas se transformará en amoníaco. Esto es así debido al equilibrio termodinámico en la reacción de formación, y para paliarlo se recirculará el gas sintético restante por el sistema, formando un bucle o flujo cíclico. Podemos observar una esquematización simple del proceso en la Figura 2.2.1.1.1.

La mezcla resultante pasa a un enfriador o “cooler”, donde se enfría y el amoníaco condensado se purga, mientras que el gas sintético vuelve al ciclo y las impurezas tales como argón, metano u otras sustancias son venteadas, como se muestra en la Figura 2.2.1.1.1. mencionada anteriormente.

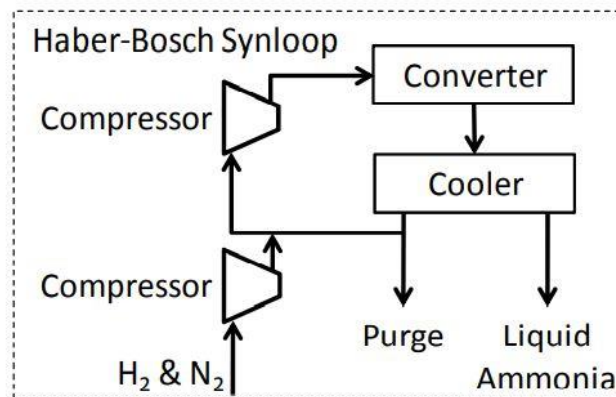


Fig. 2.2.1.1.1: Ciclo Haber-Bosch básico (Bartels, 2008)

2.2.1.1.1. Síntesis basada en combustibles fósiles

La más utilizada en la actualidad, debido a la gran cantidad de esta fuente de energía disponible y a la existencia de muchas plantas convencionales para procesarla. Como destacábamos anteriormente, se obtiene amoníaco a partir de metano reformado y carbón gasificado, y un ciclo Haber-Bosch convencional. Sin embargo, sus grandes desventajas radican en el uso de fuentes de energía no renovables, costes elevados y emisiones nocivas de CO_2 , CO y compuestos de nitrógeno, azufre y otras sustancias a lo largo del proceso.

La problemática ambiental que supondría sintetizar el volumen suficiente de amoníaco para propulsar buques mercantes mediante este método hace que sea inviable plantear una transición energética si mantenemos la forma de producción actual. Además, los costes son elevados en comparación con los hidrocarburos convencionales utilizados en propulsión marina, costando 497,55 \$ por tonelada si se produce a partir de metano o gas natural, y 366,96 \$ por tonelada a partir de carbón (en dólares de 2007, equivalentes en la actualidad a 709,01 \$ y 522,92 \$, respectivamente). Sumado a esto, el coste de construcción y puesta en marcha de una planta de estas características oscila entre 400 y 1000 millones de dólares (Bartels, 2008).

2.2.1.1.2. Síntesis basada en energías renovables o alternativas

La mayoría de estas tecnologías todavía son demasiado costosas o están en fase experimental, pero poco a poco van avanzando hacia una implantación real. Plantean una alternativa viable que permitiría implantar el amoníaco como combustible mayoritario para la propulsión marina, de forma respetuosa con el medio ambiente y con costes reducidos.

Estas fuentes de energía alternativas incluyen la energía solar, la eólica, nuclear, hidroeléctrica, undimotriz y OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion, o energía térmica marina). El método de producción consiste, básicamente, en utilizar electricidad proveniente de estas fuentes prácticamente carentes de emisiones para alimentar un electrolizador que genere hidrógeno a partir del agua, y un separador de aire para obtener el nitrógeno. Una vez se obtienen ambos elementos y se forma con ellos el gas sintético, se puede introducir en un ciclo Haber-Bosch para producir amoníaco común, procesos reflejados en la Figura 2.2.1.1.2.1.

La electrólisis mencionada anteriormente se consigue haciendo pasar una corriente eléctrica entre dos electrodos, separando el agua en sus dos elementos: oxígeno en el ánodo e hidrógeno en el cátodo. La mayoría de estos dispositivos son del tipo alcalino, usando una solución de hidróxido de potasio en el agua para favorecer la conductividad, aunque también existen los electrolizadores PEM (Proton Exchange Membrane), más eficientes al no necesitar una solución electrolítica.

La separación del aire para obtener nitrógeno se realiza mediante un ASU (Air Separator Unit), que utiliza un ciclo de filtrado, compresión, enfriamiento y expansión para separar los distintos elementos presentes en la mezcla.

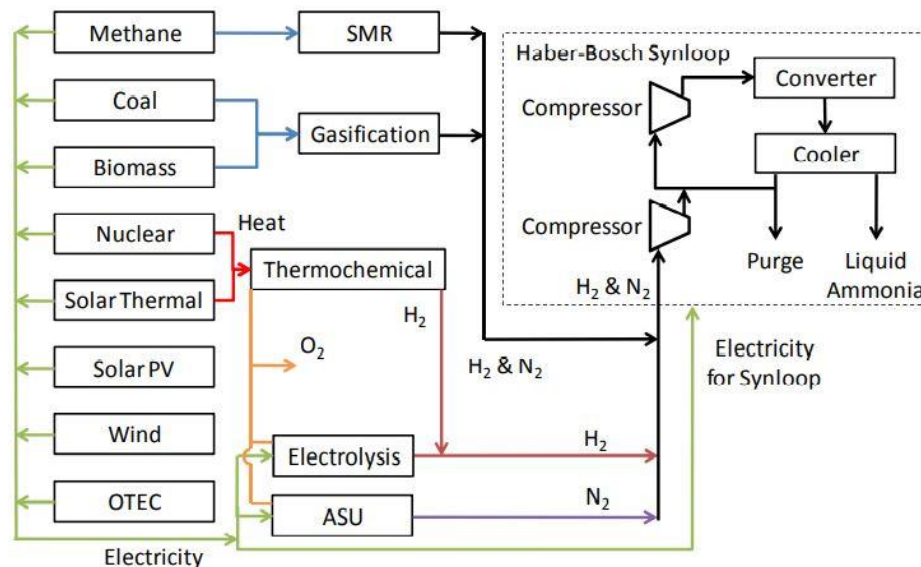


Fig. 2.2.1.1.2.1: Distintos métodos de producción de amoníaco. (Bartels, 2008)

2.2.1.2. Clasificación del NH₃ en función de su método de producción

Siguiendo las líneas del apartado anterior, esta sustancia se puede dividir, en función de su procedencia, en (Brinks, 2022):

- Amoníaco marrón: producido a partir de materias fósiles, su utilización como combustible resuelve la problemática de ciertas emisiones de los motores, pero es tremendamente contaminante en su proceso de síntesis.
- Amoníaco azul: se sintetiza con la misma materia prima que el marrón, pero en el proceso de producción se utilizan tecnologías de captación de carbono para reducir la huella ambiental del proceso. Si bien no es una tecnología limpia, sí que supone un avance respecto a la producción tradicional ya que genera un 85% menos de emisiones de CO₂ que la del amoníaco marrón.
- Amoníaco verde: producido, como ya se detallaba en el apartado anterior, a partir de hidrógeno renovable generado a partir de la electrólisis del agua y nitrógeno obtenido mediante la disociación del aire, en un conjunto de procesos

que utiliza energía eléctrica procedente de fuentes renovables, lo que lo convierte en un combustible neutro en carbono.

2.2.2. Ventajas e inconvenientes del amoníaco como combustible

Para analizar y entender los beneficios del uso del amoníaco, y sus riesgos, debemos primero conocer algunas de sus características, recogidas en la Figura 2.2.2.1. La primera y más importante es que es una forma estable de almacenar hidrógeno, que constituye casi un 18% en masa del amoníaco, pero sin todos los peligros que este entraña y con una densidad energética volumétrica superior. Además, se sabe que el almacenaje de hidrógeno debe realizarse a -256°C si es en estado líquido, y a unos 700 bar en estado gaseoso y se pretende tener una cantidad mínimamente significativa que dé autonomía a nuestro buque, problemática que no surge con el NH_3 , mucho más sencillo en cuanto a su almacenamiento y operación (-33°C a presión atmosférica, 9 bar a 20°C). (Chai, Bao, Pengfei, Tang, & Zhou, 2021)

Esta idea del amoníaco como un “hydrogen-carrier” o portador de hidrógeno es precisamente la que motiva este Trabajo de Fin de Grado, y toda la investigación que grandes empresas están llevando a cabo en este ámbito. Además de ser más estable, el amoníaco tiene un 50% más de densidad de energía por unidad de volumen que el hidrógeno líquido.

Hydrogen Content					
H ₂ weight fraction	17.65	wt. %	H ₂ volume density	0.105	kg/liter
Solid Phase					
Melting point	-78	°C	Latent heat of fusion (1 atm at triple point)	-337.37	kJ/kg
Liquid Phase					
Vapor pressure (21°C)	8.88	bar	Liquid density (1atm @ boiling point)	682	kg/m ³
Boiling point (@ 1.0 atm)	-33.5	°C	Liquid/gas equivalent (1 atm and 15°C)	947	vol/vol
Latent heat of vaporization (1 atm @ boiling point)	1371.2	kJ/kg			
Critical temperature	132.4	°C	Critical pressure	112.8	bar
Gas Phase					
Gas density (1 atm at boiling point)	0.86	kg/m ³	Gas density (1 atm at 15°C)	.73	kg/m ³
Compressibility (Z) (1 atm at 15°C)	.9929		Specific gravity (air=1) (1 atm at 20°C)	.597	
Specific volume 1 atm at 20°C)	1.411	m ³ /kg	Viscosity	.000098	Poise
Heat capacity at constant pressure (Cp) (1 atm at 15°C)	.037	kJ/(mol.K)	Heat capacity at constant pressure (Cv) (1 atm at 15°C)	.028	kJ/(mol.K)
Critical Density:	0.24	g/ml	Entropy, Gas @ 25°C., 1 atm. :	45.97	cal/mol°C
Thermal conductivity	22.19	mW/(mK)			
Misc					
Water solubility (1 atm at 0°C)	862	vol/vol	Autoignition temperature	630	°C
Lower flammable limit in air	15%	by volume	Upper flammable limit in air	28%	by volume
Molecular Weight:	17.03				

Fig. 2.2.2.1: Propiedades del amoníaco (Thomas & Parks, 2006)

Como ventajas, podríamos entonces destacar (Chai, Bao, Pengfei, Tang, & Zhou, 2021):

- El NH₃ no contiene azufre ni carbono en su composición molecular, por lo que elimina el problema de emisiones nocivas de SO_x y CO_x. Por tanto, es un combustible libre de carbono y emisiones de efecto invernadero, característica que se puede acentuar si se obtiene esta sustancia mediante energías renovables, en un proceso libre de contaminantes.
- Dentro de los combustibles limpios que se investigan para el futuro, el amoníaco muestra costes más reducidos que el hidrógeno por distintos motivos que se detallarán a continuación. El NH₃ permite una mayor eficiencia en los motores por las superiores relaciones de compresión que admite (gracias a su octanaje elevado) y requiere de menos espacio para su almacenamiento que el hidrógeno (alrededor de un 30% menos de volumen para la misma autonomía, siendo así 10 veces más barato en cuanto a almacenamiento y 47 veces más barato en lo tocante a su transporte (Dias, Pochet, Contino, & Jeanmart, 2020)). Además, implica una mayor facilidad de utilización en motores debido a sus cualidades

fisicoquímicas, y ya existen infraestructura y tecnologías suficientes para garantizar la viabilidad de este combustible.

- Su producción y almacenamiento se constituyen por tecnologías maduras y ampliamente probadas desde hace décadas, y ya existen ciertas infraestructuras al respecto. Además, esta familiaridad permite que los procesos, medidas y riesgos inherentes a este combustible se conozcan y controlen, convirtiendo al amoníaco en una tecnología con un coste de desarrollo relativamente bajo.
- Mayor seguridad respecto a otras sustancias, ya que su densidad más baja que la del aire permite que se disipe rápidamente en caso de fuga, además de que su olor penetrante y acre permite detectarlo, aunque haya muy poca concentración. A esto se le suma que sus límites de inflamabilidad muy ajustados y alta temperatura de autoignición (características que precisamente limitan su combustión en motores) hacen que sea fácil y seguro de transportar y almacenar. De hecho, su poca inflamabilidad en condiciones de almacenamiento hace que sea más seguro que el hidrógeno en grandes cantidades. Destaca, especialmente, que no es una sustancia altamente explosiva como el H_2 .
- Su transporte y almacenamiento en condiciones criogénicas son más baratos y sencillos que en otras sustancias. Además, no causa fragilización en los metales de los tanques de almacenamiento, como en el caso del hidrógeno (el denominado hydrogen embrittlement o HE).

Como desventajas, entre otras vamos a destacar (Chai, Bao, Pengfei, Tang, & Zhou, 2021):

- Es una sustancia altamente tóxica, por lo que se deben tomar medidas preventivas y de contención para proteger a las personas, instalaciones y al medio ambiente. En contacto con el ser humano, puede provocar deshidratación, quemaduras severas, congelación, daños oculares y/o pulmonares, fallo respiratorio o la muerte.
- Su densidad energética por unidad de volumen es menor a la del gasoil marino convencional (MGO), por lo que para obtener la misma autonomía con el mismo contenido de energía se necesitaría un volumen casi 3 veces superior, en caso de

estar el NH_3 refrigerado. Tiene un bajo valor calorífico y una velocidad laminar de llama pésima que sugieren que la energía liberada en la combustión de esta sustancia es poca y de baja calidad.

- Posee una temperatura de autoignición alta, la ya comentada baja velocidad de llama y un alto calor de vaporización, lo que sumado a unos límites de inflamabilidad bastante ajustados plantea ciertas dificultades en cuanto a su uso en motores de combustión interna. Además, también se corre el riesgo de generar emisiones de NH_3 (debido a su cinética química lenta, que puede evitar que arda todo el amoníaco contenido en el cilindro si la mezcla es demasiado rica) y especialmente de NO_x (si la mezcla es demasiado pobre), lo que nos deja con unas limitaciones bastante restrictivas en cuanto a su utilización en MCIs.
- Es corrosivo para el cobre y sus aleaciones, el níquel, otros metales y la mayoría de los plásticos, por lo que esos materiales deben ser sustituidos en un motor de amoníaco por otros que no sufran los efectos de esta sustancia.

2.2.3. Comparación con otros combustibles

Ryste (2019) establece, en la tabla recogida en la Figura 2.2.3.1, como parámetros prioritarios para comparar los distintos combustibles marinos la densidad energética, la madurez tecnológica, las emisiones locales, las emisiones de gases de efecto invernadero, el coste energético, el coste capital, la disponibilidad de bunker o reabastecimiento y la disponibilidad comercial. Como parámetros secundarios, destaca la inflamabilidad, toxicidad, regulaciones y pautas, y la capacidad global de producción y sus localizaciones.

Energy source		Fossil (without CCS)					Bio	Renewable ⁽³⁾		
		Fuel	HFO + scrubber	Low sulphur fuels	LNG	Methanol	LPG	HVO (Advanced biodiesel)	Ammonia	Hydrogen
High priority parameters										
•	Energy density		●	●	●	●	●	●	●	●
•	Technological maturity	●	●	●	●	●	●	●	●	●
•	Local emissions	●	●	●	●	●	●	●	●	●
•	GHG emissions	●	●	● ⁽²⁾	●	●	●	●	●	●
•	Energy cost	●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁴⁾
•	Capital cost	Converter	●	●	●	●	●	●	●	●
		Storage	●	●	●	●	●	●	●	●
•	Bunkering availability	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Commercial readiness ⁽¹⁾		●	●	●	●	●	●	●	●	● ⁽⁵⁾

Fig. 2.2.3.1: Comparativa de combustibles marinos fósiles, biológicos y renovables (Ryste, 2019)

Si nos paramos a analizar cómo rinde el amoníaco en estos aspectos, observaremos que satisface la mayoría de ellos, siendo los negativos prácticamente solventables mediante investigación e inversión. En base a esta clasificación, establecida en la Fig. 2.2.3.1., compararemos el uso de fuel oil pesado (HFO) con scrubber o torre de lavado, combustible bajo en azufre (VLSFO), gas natural licuado (LNG), metanol, gas licuado de petróleo (LPG), biodiesel avanzado (HVO o Hydrotreated Vegetable Oil), amoníaco e hidrógeno. Las ventajas y desventajas de los más importantes se podrían resumir de la siguiente forma:

- HFO + Scrubber: Siendo el fuel oil un combustible conocido y ampliamente utilizado, se desempeña bien en la mayoría de los parámetros antes mencionados, destacando su densidad energética y la disponibilidad de esta sustancia en prácticamente cualquier puerto del mundo. El Scrubber o torre de lavado compensa parcialmente el mal rendimiento ambiental de este combustible, a un coste menor que los combustibles bajos en azufre o VLSFO. Por todo ello, el uso de HFO tiene ya fecha de caducidad, debiendo ser reemplazado por fuentes de energía alternativa.
- HVO: Sustituye perfectamente al fuel oil sin ser derivado del petróleo, pero presenta varios problemas derivados de su alto coste, la poca capacidad de producción, almacenamiento y bunkering, y las emisiones de óxidos de

nitrógeno y partículas sólidas que genera en su combustión. Por ello, se presenta como una alternativa poco probable al HFO convencional.

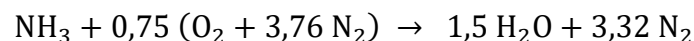
- LPG y LNG: Su bajo coste energético y capital permiten que sean económicamente competitivos como combustible marino, estando además el LNG ya ampliamente extendido a nivel global. En el caso del LPG, apenas probado en buques mercantes, surgen dos problemáticas: la falta de infraestructuras de bunkering, y su bajo rendimiento ambiental, ya que es tan contaminante como su contraparte, el gas natural licuado.
- Metanol: Presenta un buen desempeño energético y permite la conversión o retrofit de unidades existentes a su consumo sin un coste elevado. Sin embargo, su precio (similar al del gasoil marino o MGO) y la contaminación que genera al ser producido a partir de combustibles fósiles son dos desventajas de este combustible.
- Hidrógeno: su mayor ventaja es que permite ser un combustible con un balance neto de emisiones igual o cercano a cero, al ser producido mediante renovables. Si, en cambio, se produce a base de fuentes de energía fósiles, nos encontramos ante la misma problemática que en el resto de los casos. Además, tiene grandes desventajas como la ausencia de infraestructuras para bunkering, un alto coste de producción, almacenamiento y utilización, baja autonomía derivada de su poca densidad energética (eliminando, por tanto, la posibilidad de su uso en unidades mar adentro), inestabilidad y una inflamabilidad elevada que requiere sistemas de seguridad y extinción especiales.
- Amoníaco: tiene la capacidad de ser un vector energético clave en la transición a renovables que vivimos en la actualidad. Es, en esencia, un transportador o “carrier” de hidrógeno con mucha más densidad energética y estabilidad química. Si se produce de forma sostenible mediante energías renovables, como se detallaba en apartados anteriores, permite ser un combustible libre de emisiones de carbono y azufre, apto para la navegación oceánica y no solo la costera, a diferencia del hidrógeno. Como desventajas, podríamos destacar su todavía alto precio y su elevada toxicidad, sumado a las limitaciones de su uso en motores (mencionadas en el apartado 2.2.2).

Así, vemos que, ante la necesidad de una transición a energías alternativas y renovables, el amoníaco es la opción más viable ambientalmente, aunque conlleve un gran esfuerzo económico e industrial inicial.

2.2.4. Combustión del amoníaco

Esta sustancia elimina la problemática de las emisiones relacionadas con el azufre y el carbono, al no tenerlos en su composición ni generarlos en la reacción de combustión. Sin embargo, presenta ciertos detalles que diferencian la suya de una combustión corriente de hidrocarburos, y que deben ser tenidos en cuenta a la hora de diseñar un motor de combustión de interna (MCI o ICE, Internal Combustion Engine) capaz de operar con este elemento.

Observemos la combustión ideal o estequiométrica del amoníaco, que se produce según la siguiente expresión:



(2.2.4.1.)

Sin embargo, sabemos que esta reacción en la que se quema el amoníaco completamente con un 100% de aire es imposible en la realidad: todo combustible necesita un exceso de aire para poder reaccionar. A causa de este exceso, en este tipo de motores se generan emisiones de NO_x por la oxidación parcial del amoníaco, provocada por la cinética química lenta, o poca reactividad, de esta sustancia. Además, como su temperatura de ignición es muy elevada, una porción del combustible no reacciona y es expulsado sin quemar por el escape. Por tanto, estas son las dos líneas que deben ser tenidas en cuenta en lo tocante a emisiones.

En relación con la alta temperatura de ignición que mencionábamos, esta dificulta el encendido tanto en motores de ciclo Otto como en máquinas de tipo Diesel, además de provocar una baja temperatura de combustión, un avance de llama demasiado lento y, por tanto, una reducción de potencia respecto a un equipo de características similares operando con combustible fósil.

Todos estos inconvenientes del uso de amoníaco en MCI's pueden ser solventados mediante distintas soluciones técnicas, que los palían en cierta medida. Cabe destacar que la potencia desarrollada por una máquina de NH_3 nunca será igual al de una de similares características que funcione con combustibles fósiles, debido a la densidad energética muy inferior del amoníaco. Aun así, con estas soluciones y otros avances tecnológicos es posible crear equipos funcionales, fiables, rentables y, sobre todo, respetuosos con el medio ambiente, que es su finalidad principal. A continuación, se detallan tres de los grandes problemas de este combustible y las soluciones más probables para los mismos. (Erdemir & Dincer, 2020).

2.2.4.1. Alta temperatura de ignición

Para remediar esta problemática, una opción consiste en mezclarlo con otro combustible que arda a menor temperatura, calentando la cámara de combustión y acelerando la reacción. En cierto modo, este sistema funciona como la preinyección presente en algunos motores marinos convencionales y, aunque en la mayoría de los casos se plantea con combustibles fósiles, lo ideal sería utilizar hidrógeno producido de forma verde para generar esta llama piloto que caliente el cilindro.

Esta medida presenta varias ventajas, permitiendo inyectar el amoníaco en estado gaseoso mezclado con el aire de admisión y necesitando así pocas modificaciones en los motores existentes para adaptarlos a esta tecnología. Especial importancia merece el sistema de control de la inyección (ya sea directa o indirecta), que debe hacer una mezcla aire-combustible-amoníaco muy precisa para evitar problemas como el deslizamiento o "slip" del NH_3 (paso de combustible sin quemar hacia el escape) y maximizar el rendimiento y potencia del equipo.

Pese a lo prometedor de esta tecnología, está demostrado que las mezclas de amoníaco con combustibles reducen la potencia que se puede desarrollar respecto a una máquina similar funcionando con diésel convencional, siendo la máxima posible alcanzada mediante la mezcla $\text{NH}_3 + \text{H}_2$. Otro aspecto para tener en cuenta es la disminución de las temperaturas de escape en estos motores, ya que, si se utiliza combustible fósil para producir la llama piloto, puede llevar a problemas de precipitación de sustancias como ácido sulfúrico que deterioren el sistema de escape. Además, si se usan estas mezclas

con hidrocarburos sí que habría ciertas emisiones de derivados del carbono, nitrógeno y azufre, por lo que seguiría siendo una máquina en cierto modo contaminante.

Una opción para incrementar el rendimiento y la potencia de estos equipos es una sobrealimentación superior a los valores habituales, ya que al presentar el amoníaco un alto octanaje (en torno a 110 – 130 octanos) podemos aumentar ampliamente la presión de aire de admisión y también la relación de compresión sin riesgos para el motor. Otra medida recomendable sería precalentar el amoníaco antes de inyectarlo al flujo de admisión, mejorando la combustión. (Erdemir & Dincer, 2020).

2.2.4.2. Cinética química lenta

La cinética química es la rama de la fisicoquímica que estudia la velocidad de las reacciones químicas y cómo ocurren las mismas, analizando cómo los reactivos se convierten en productos y el tiempo que tardan en hacerlo (Pearsal & Garabedian, 1968).

El amoníaco, precisamente por la alta temperatura de ignición y la poca velocidad de llama, se quema a un ritmo considerablemente más lento que los combustibles convencionales. Esto provoca el “slip” o deslizamiento mencionado anteriormente, es decir, la salida de amoníaco sin quemar por el escape del equipo.

Las mezclas de amoníaco con combustibles promotores de la llama que se detallaban anteriormente ayudan a paliar este problema, aumentando temperatura y presión y permitiendo una mejor reacción de combustión. (Pearsal & Garabedian, 1968)

2.2.4.3. Baja velocidad de llama

Es una de las grandes desventajas del NH_3 y limita el diseño de los motores de combustión interna que lo consumen, ya que al no permitir una rápida distribución de las temperaturas en el cilindro reduce la máxima potencia alcanzable. Además, esta problemática se ve acentuada debido a sus límites de inflamabilidad muy ajustados. En comparación con otros combustibles gaseosos como metano, propano e hidrógeno, Chai, Bao, Pengfei, Tang y Zhou (2021) recogen en una tabla (Figura 2.2.4.3.1) que el amoníaco presenta la menor velocidad laminar de llama de todos ellos.

Fuel	NH ₃	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈
Calorific value (MJ/kg)	18.6	120	50	46.4
Maximum laminar burning velocity (m/s)	0.07	2.91	0.37	0.43
Flammability limit (Equivalence ratio)	0.63–1.4	0.10–7.1	0.50–1.7	0.51–2.5

Fig. 2.2.4.3.1: Comparación entre combustibles gaseosos. (Chai, Bao, Pengfei, Tang, & Zhou, 2021)

Este inconveniente se puede remediar parcialmente gracias a las mezclas de combustibles, pero solo hasta cierto umbral. Aun así, teniendo en cuenta la reducción de emisiones que presenta el uso de esta tecnología en conjunto, se considera que esta desventaja queda ampliamente compensada.

Cabe destacar, también, que la sincronización del motor debe ser ajustada de forma conveniente y precisa, y la concentración de la mezcla controlada exactamente para aprovechar al máximo el potencial del amoníaco como combustible.

2.2.5. Comparativa entre High-Pressure injection Dual-Fuel (HPDF) y Low-Pressure injection Dual Fuel (LPDF)

Estas dos tecnologías se perfilan como las alternativas para poder consumir amoníaco en un motor de combustión interna en la actualidad, adaptando motores existentes o diseñando equipos similares a los que se utilizan ahora. Concretamente, los estudios realizados sobre este tema han utilizado como prototipo motores Diésel de 4 tiempos, pero, en esencia, esta tecnología es escalable a los grandes motores lentos de 2 tiempos. Como combustible piloto se utiliza diésel, aspecto a mejorar en futuras iteraciones para evolucionar hacia el uso de energías alternativas y/o renovables. (Li, y otros, 2022).

2.2.5.1. HPDF

Veamos las especificaciones del motor prototipo diseñado y probado el estudio mencionado anteriormente:

<i>PARÁMETRO</i>	<i>VALOR</i>
<i>Diámetro del cilindro (mm)</i>	95
<i>Carrera (mm)</i>	102
<i>Relación de compresión</i>	17,5
<i>Presión media indicada (MPa)</i>	1,2
<i>Inyección de diésel (º de cigüeñal a punto muerto superior)</i>	-8
<i>Duración de la inyección de diésel (º de cigüeñal)</i>	1,8
<i>Inyección de amoníaco (º de cigüeñal a punto muerto superior)</i>	-5
<i>Duración de la inyección de amoníaco (º de cigüeñal)</i>	15
<i>Exceso de aire</i>	1,7
<i>Presión de admisión (bar)</i>	1,3
<i>Temperatura de admisión (ºC)</i>	595
<i>Velocidad de giro del motor (rpm)</i>	1000
<i>Proporción energética del diésel en la mezcla (%)</i>	10 – 3

Tabla 2.2.5.1.1: Parámetros del motor HPDF utilizado (Li, y otros, 2022)(Tabla de elaboración propia).

Con la arquitectura HPDF en un motor se plantea la inyección de ambos combustibles en la cámara de combustión, directamente mediante uno o más inyectores ubicados en la culata de este. Li et al. (2022) proponen el uso de un único inyector por cilindro, con ocho orificios de 0,127mm para el diésel y ocho orificios de 0,22mm para el amoníaco en estado líquido, probando patrones de inyección de 0 y 22, 5º entre los flujos atomizados de ambas sustancias, tal y como se muestra en la Figura 2.2.5.1.2.

Se observa así que es posible utilizar tan solo un 3% de combustible piloto, quemando un 97% de amoníaco, energéticamente hablando. Esto permite una reducción significativa de las emisiones de CO_x, PM y SO_x, que recordemos eran la mayor problemática de estos motores duales.

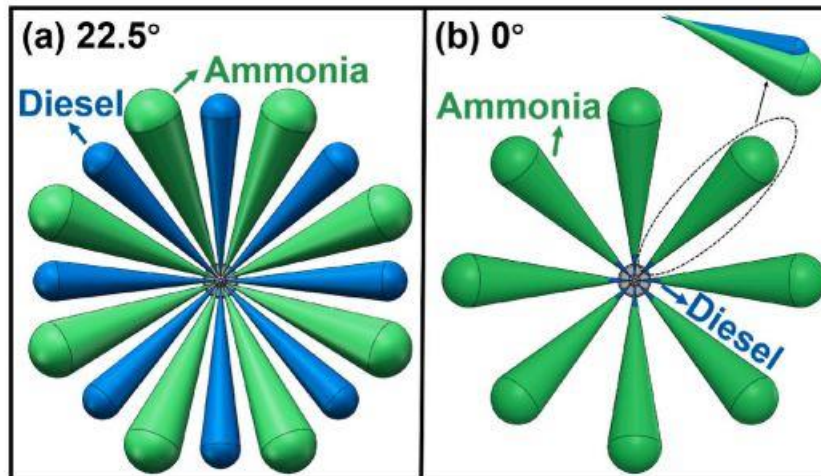


Fig. 2.2.5.1.2: Diagrama esquemático de la inyección dual HPDF (Li, y otros, 2022)

Comparando los patrones de inyección y parámetros como la velocidad de llama, la homogeneidad de la mezcla y la calidad de la combustión, además de la temperatura y otros factores, los autores llegan a la conclusión de que la configuración de inyección de 0° entre diésel y amoníaco favorece el mejor rendimiento y funcionamiento de la máquina.

En la siguiente imagen (Figura 2.2.5.1.3), además de la efectividad de cada configuración de inyección, se puede ver el tiempo (en grados de cigüeñal) que tarda cada sustancia en entrar en combustión y cómo se produce la mezcla.

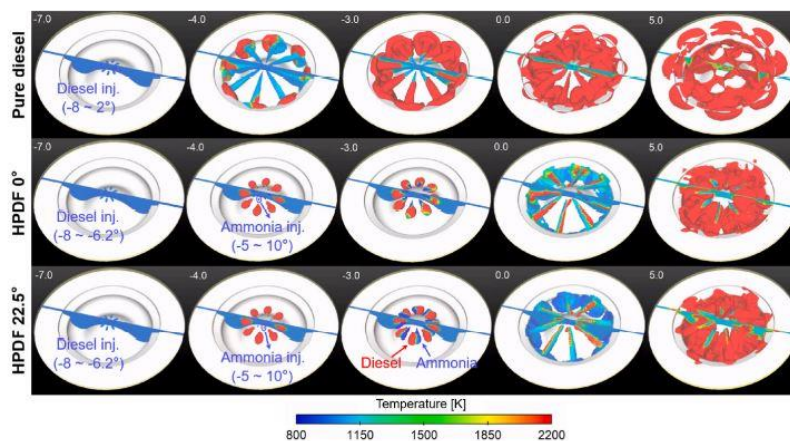


Fig. 2.2.5.1.3: Evolución de la inyección y la combustión en las distintas configuraciones estudiadas. (Li, y otros, 2022)

2.2.5.2. LPDF

En el MCI prototipo (el mismo que para HPDF, con ciertas modificaciones) se realiza la inyección de amoníaco gaseoso en el torrente de admisión, considerando que la mezcla completa se producirá dentro del propio cilindro tras el cierre de la válvula de admisión. En la siguiente Tabla (2.2.5.2.1) se detallan las condiciones de operación del equipo funcionando en modo LPDF.

<i>PARÁMETRO</i>	<i>VALOR</i>
<i>Duración de la inyección de diésel (º de cigüeñal)</i>	2 – 4 – 6
<i>Inyección de diésel (º de cigüeñal a punto muerto superior)</i>	-8
<i>Exceso de aire antes de la inyección de diésel</i>	1,6
<i>Exceso de aire tras la inyección de diésel</i>	1,43 – 1,26 – 1,10
<i>Presión de admisión (bar)</i>	1,3
<i>Temperatura de admisión (ºC)</i>	595
<i>Velocidad de giro del motor (rpm)</i>	1000
<i>Proporción energética del diésel en la mezcla (%)</i>	10 – 20 – 30

Tabla 2.2.5.2.1: Condiciones de operación en modo LPDF (Li, y otros, 2022) (Tabla de elaboración propia)

Si bien obtenemos una máquina funcional, el porcentaje de diésel piloto utilizado (hasta 30%) es muy superior al que requiere una arquitectura HPDF (3%), y por tanto genera muchas más emisiones nocivas. En cuanto a la evolución de la combustión, podemos ver que es energéticamente satisfactoria, pese a generar mayor cantidad de emisiones nocivas que otras tecnologías. La comparativa entre combustible diésel y la tecnología LPDF con distintos porcentajes de combustible piloto queda reflejada en la Figura 2.2.5.2.2, pudiendo afirmar que la combinación de 70% amoníaco con 30% de diésel obtiene mejores resultados.

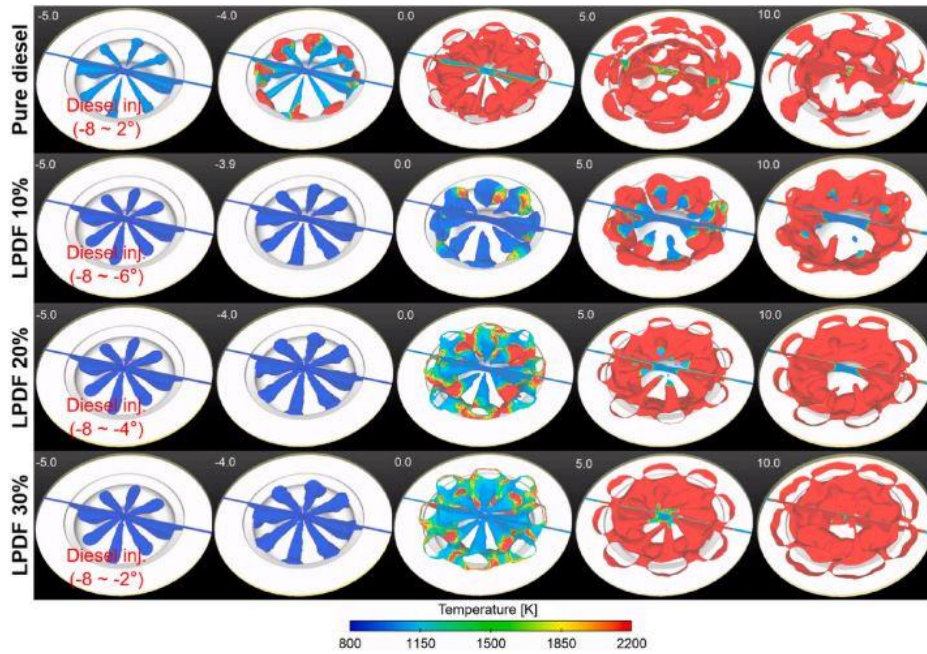


Fig. 2.2.5.2.2: Evolución de la inyección y la combustión en las distintas configuraciones estudiadas. (Li, y otros, 2022)

2.2.5.3. Conclusión del debate HPDF – LPDF

Se comparan el modo HPDF con un 3% y el modo LPDF con un 20% de diésel, ya que estos tienen el mayor rendimiento térmico indicado, la menor cantidad de emisiones de efecto invernadero y la mayor tasa de sustitución del diésel en sus categorías.

El equipo funcionando según la tecnología LPDF presenta el mayor rendimiento térmico indicado debido a que posee menos pérdidas de transferencia de calor y menores pérdidas por enfriamiento. Sin embargo, esta combustión genera muchas más emisiones de NH_3 , N_2O , NO_x , CO_2 y CO_2 equivalente que un sistema HPDF (comparativa expresada en la Figura 2.2.5.3.1). Así, incluso se puede concluir que un sistema de baja presión tan solo reduce las emisiones de CO_2 en un 25% si se compara con el mismo motor funcionando puramente a diésel.

Por tanto, podemos afirmar casi con total seguridad que la tecnología de inyección a alta presión o HPDF será la escogida para la transición energética al amoníaco que necesitamos, ya que su motivación nace casi exclusivamente de las emisiones producidas y no del rendimiento, consumo o potencia de las máquinas existentes. Sin

embargo, debido a la facilidad de reacondicionado o retrofit que permite el sistema LPDF, es probable que sea el escogido para las primeras adaptaciones de motores existentes.

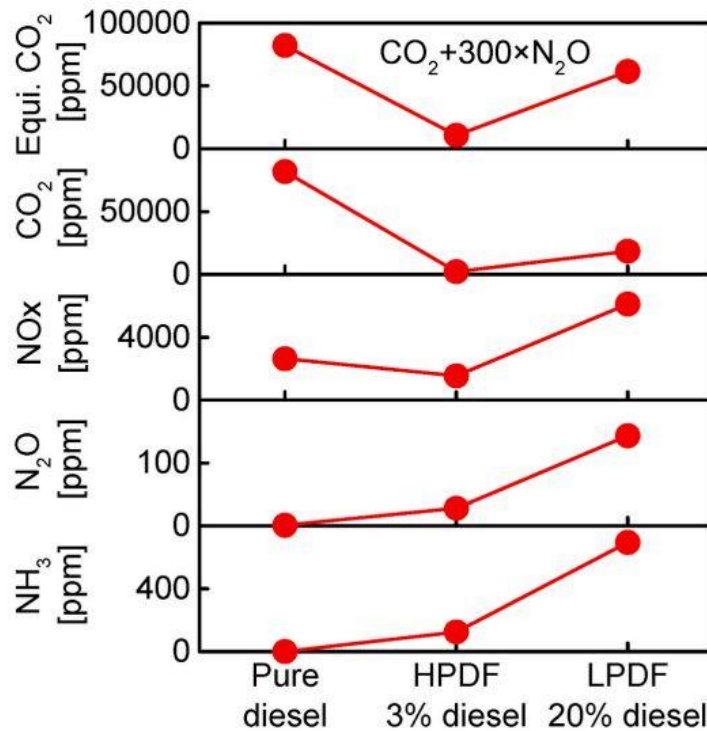


Fig. 2.5.3.1: Comparativa de emisiones entre los modos diésel, HPDF y LPDF. (Li, y otros, 2022)

2.2.6. Combustión de amoníaco + hidrógeno

Especial importancia merece esta mezcla, muy prometedora, de la que ya se ha hablado anteriormente. Debido a numerosos motivos que se detallarán a continuación, se considera la mejor opción para una transición hacia MCIs de amoníaco con baja huella de carbono.

En primer lugar, el leitmotiv de este trabajo: la capacidad de producir hidrógeno verde mediante energías renovables que, quemado junto con amoníaco limpio producido de la misma forma, permite un balance neto de emisiones igual a cero o, al menos, cercano. Esta tecnología supone obtener el combustible sin generar emisiones nocivas, y consumirlo en motores de igual manera, sin perjudicar al medio ambiente.

En segundo lugar, es sabido que la mezcla aire – amoníaco – hidrógeno posee una velocidad de llama muy superior a la del aire – amoníaco, siempre que la concentración de H_2 sea superior a un 3%, permitiendo una buena combustión en motores y un comportamiento similar en cierto modo al del combustible diésel habitual. (Ichikawa, y otros, 2015).

Por otro lado, el uso de combustibles fósiles como promotor de llama o combustible piloto genera ciertas emisiones contaminantes (CO_2 , CO , SO_x , partículas sólidas, otros gases de efecto invernadero, etc.), además de los habituales NO_x . Esta problemática queda prácticamente solventada con el uso de hidrógeno, ya que las únicas emisiones nocivas producidas son NO_x , NH_3 y/o N_2O , y su concentración es fácilmente reducible mediante determinadas medidas en los motores como combustiones cercanas a la estequiométrica y el adecuado ajuste de las mezclas para asegurar el perfecto funcionamiento de la máquina, ya sea esta de arquitectura HPDF o LPDF. (Chai, Bao, Pengfei, Tang, & Zhou, 2021).

2.3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DEL USO DE AMONÍACO COMO COMBUSTIBLE

A lo largo de la historia, por motivos forzosos como guerras, crisis o escasez de hidrocarburos, científicos y organismos de todo el mundo han posado su mirada sobre ciertos combustibles alternativos, siendo uno de ellos, por supuesto, el amoníaco.

La tecnología orientada a consumir amoníaco presenta tres épocas de gran avance: la Segunda Guerra Mundial, las crisis energéticas de los años 60 y 70, y la actualidad, debido a la necesidad de transición hacia una energía limpia y respetuosa con el medio ambiente.

2.3.1. Flota de autobuses a amoníaco

En la Bélgica de la Segunda Guerra Mundial, la escasez de hidrocarburos hizo que en abril de 1943 se pusiera en servicio por primera vez una flota de autobuses propulsada por amoníaco anhidro por parte de la S.N.C.F.V. (Société Nationale des Chemins de Fer Vicinaux).

Los ingenieros de la compañía, ante la ausencia de gasoil para la flota, analizaron las posibles alternativas, descartando sustancias como el LPG por la poca cantidad disponible. Finalmente, se decide utilizar gas de carbón, con la consiguiente pérdida de potencia de los motores (en torno al 30%), y por la problemática derivada de este pobre rendimiento y una pésima fiabilidad la flota queda fuera de servicio.

Ante la presión popular, la empresa busca nuevas formas de propulsar sus vehículos, y adopta un sistema basado en la patente de Ammonia Casale, J. L. Restieau y E. Kroch conocida como proceso Gazamo: el uso en motores de combustión interna de amoníaco, apoyado por gas de carbón rico en hidrógeno como promotor de la ignición.

En definitiva, no deja de ser un sistema similar al Low-Pressure injection Dual Fuel detallado en el apartado 2.2.5.2., pero mucho más primitivo y limitado al carecer de regulación electrónica. El amoníaco se almacena licuado en cilindros a presión situados en el frente del autocar, y el carbón gasificado o gas de carbón en recipientes presurizados a tal fin ubicados en el techo, tal y como vemos en la Figura 2.3.1.1.



Fig. 2.3.1.1: Fotografía de un autobús de la compañía equipado con el sistema Gazamo, tomada en 1943.
(Kroch, 1945)

2.3.1.1. Proceso Gazamo

Pasemos ahora a estudiar el sistema Gazamo más profundamente, tal y como lo describe uno de sus creadores, Emeric Kroch, en “Ammonia – A fuel for motor buses (1945). Como decíamos, es un LPDF primitivo, cuyo esquema básico se recoge en la Figura 2.3.1.1.1., y se compone de las siguientes partes:

- Recipientes a presión para el carbón gasificado: son metálicos y resistentes a 200 atmósferas, siguiendo las regulaciones del Estado belga en el momento. El número de estos varía entre dos y seis cilindros. Se conectan al circuito mediante manifolds forjados, con conexión para relleno (V1) por un extremo y conexión con las líneas por el otro, con una válvula de corte o “shut off” (V2).
- El siguiente bloque se compone de un filtro para el carbón gasificado (F), un manorreductor (R1) que reduce la presión a 0,7 – 0,14 bar, y un regulador atmosférico (A1) que actúa de válvula de corte cuando el motor está parado.
- El gas pasa así al mezclador (M), construido en acero o aluminio para evitar la corrosión del amoníaco en otros materiales. Este componente funciona reemplazando al carburador de un motor corriente, y hace la mezcla carbón gasificado – amoníaco correcta. Presenta un conducto Venturi a través del que

se introduce el aire, y un inyector por cada uno de los dos combustibles. Adicionalmente, se puede implementar un estrangulador en el conducto de aire, para poder realizar arranques en frío con una mezcla rica en combustible.

- En el frente del vehículo se ubican los tanques de amoníaco licuado (T), que pasa a través de un filtro o “strainer” (L) y entra en el vaporizador (E), un intercambiador donde gracias al calor cedido por el agua de refrigeración de camisas del motor.
- Dentro del vaporizador, el NH_3 entra por la parte inferior del serpentín o “coil” (C), pasando casi por completo a estado gaseoso, proceso que terminará en el conducto H. Opcionalmente, tras este proceso se puede colocar otro “strainer” (G) que termine de purificar el combustible de materia externa y no deseable.
- El siguiente bloque, compuesto por un manorreductor (R2) y un regulador atmosférico (A2), similares a los utilizados para el gas de carbón (R1 y A1). La presión proveniente del vaporizador raramente excede los 20 bar, y se reduce hasta una presión similar a la del carbón gasificado para ser introducido en el mezclador (M).
- En el salpicadero hay dos controles, K1 (carbón gasificado) y K2 (amoníaco), que permiten al conductor regular la proporción de cada combustible en la mezcla, y la riqueza de la mezcla en general (aire – carburante). Así, además, es posible efectuar el arranque del motor tan solo con gas, permitiendo que la temperatura del agua de refrigeración suba y empiece a vaporizar amoníaco. Tras este paso, se consigue un funcionamiento normal abriendo gradualmente K2 y cerrando lentamente K1, ajustando la mezcla de combustibles a las condiciones de operación.

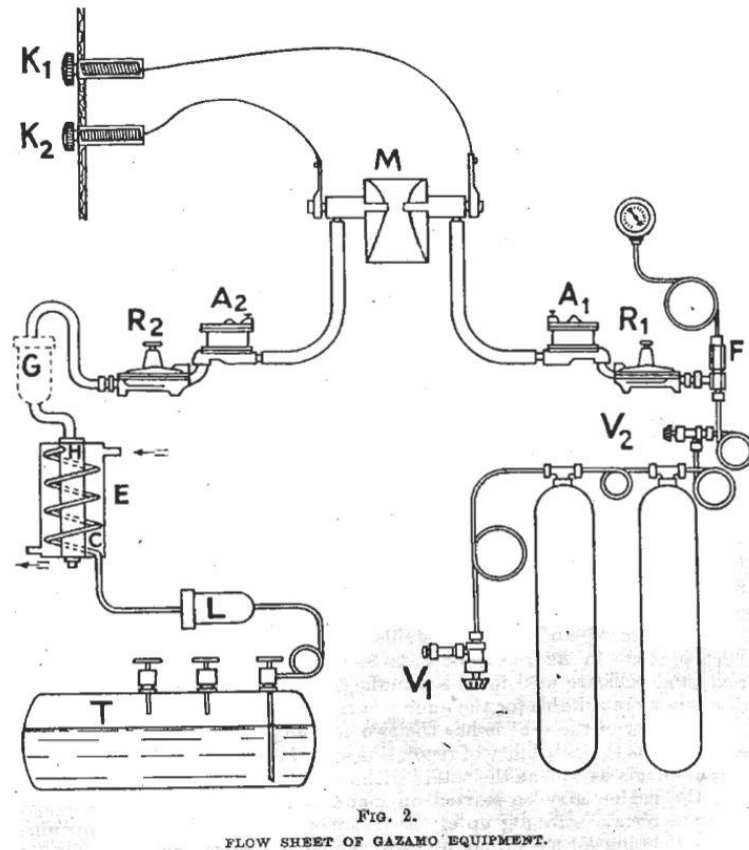


Fig. 2.3.1.1.1: Diagrama básico del sistema Gazamo (Kroch, 1945)

Cabe destacar que en este sistema hay algún detalle a tener en cuenta de cara a la seguridad, dada la peligrosidad de una sustancia como el amoníaco. Por ejemplo, en los autobuses equipados con dos depósitos de NH_3 , es recomendable utilizar el combustible contenido en uno primero y después el otro, ya que mantener abiertas las válvulas de salida de ambos tanques puede desembocar en el movimiento de este elemento entre ambos, pudiendo rebosar o generar sobrepresiones. Concretamente, este incidente sucedió en un automóvil particular (la flota de autobuses nunca sufrió ningún accidente), en el que, debido al calentamiento y expansión del amoníaco, el tanque de combustible terminó por explotar, aunque sin pérdidas humanas.

2.3.1.2. Reabastecimiento

Se diseñó y construyó una estación a tal fin en Bruselas, en la que el amoníaco se almacenaba licuado a presión en un tanque equipado con las válvulas pertinentes y otros dispositivos (I). La cantidad de combustible para repostar un determinado vehículo

se podía cuantificar mediante un recipiente vertical con visor y escala (J), que se rellenaba a partir del depósito principal inyectándole a este aire presurizado con un compresor (K), siendo también la presión la que envía el combustible al vehículo en repostaje.

Debido al elevado calor latente del amoníaco, se necesita muy poco venteo para rebajar la temperatura en el depósito del vehículo que está siendo reabastecido. Este venteo se produce, a través de un juego de válvulas y un tanque parcialmente lleno de agua (W), a la atmósfera. Una simplificación de los planos originales puede verse en la Figura 2.3.1.2.1.

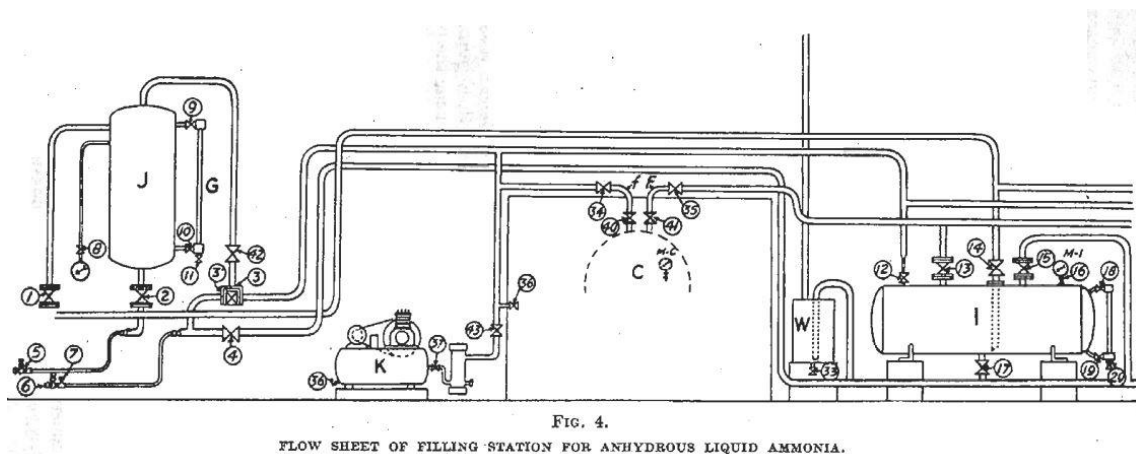


Fig. 2.3.1.2.1: Esquema básico de la estación de repostaje de la S.N.C.F.V. (Kroch, 1945)

2.3.1.3. Resultados obtenidos

Si bien el consumo específico de gas y amoníaco varía ampliamente entre vehículos y, en el mismo vehículo, entre un mes y otro, los resultados fueron totalmente satisfactorios, mostrando que el incremento de consumo (en millas/galón) tan sólo suponía un 13,5% respecto al uso del gasoil. Estas variaciones, sin embargo, están completamente justificadas por varias razones que se detallarán a continuación.

En primer lugar, la calidad del carbón gasificado y, por tanto, su capacidad calorífica, variaron ampliamente durante la guerra. Esto se debe, en parte, a las grandes cantidades de gas de agua o "blue water gas" ($H_2 + CO$) que se añadían al carbón

gasificado, y a la poca precisión de la compañía que surtía el gas en cuanto a sus mediciones de caudal suministrado.

En segundo lugar, debe tenerse en cuenta que, por la necesidad en tiempos de guerra, los buses aumentaron su capacidad de transporte de pasajeros y equipajes en un 25%, lo que sumado al peso del equipo Gazamo para el consumo de los nuevos combustibles incrementaba ampliamente el peso total del vehículo. Se observó que, en condiciones similares de peso y carga, el consumo podría ser equiparable al del vehículo propulsado mediante diésel.

Por último, se destaca en esta publicación el factor más obvio en cuanto a la disparidad de consumos: la proporción de cada combustible en la mezcla y la riqueza de la misma (aire – carburante) eran regulados manualmente por cada conductor con un amplio margen de variación.

Tras 10.000 millas (16.903 km), uno de estos motores fue desmontado del vehículo y examinado cuidadosamente, sin que fuese encontrado ningún desgaste distinto a los habituales, ni trazas de corrosión derivada del uso de amoníaco. Además, el consumo de aceite se mantuvo constante respecto al original. (Kroch, 1945).

En conclusión, se demostró que el amoníaco apoyado por otro combustible era una tecnología perfectamente útil y fiable y, sobre todo, se esbozaron detalles que sentarían las bases del enfoque actual del amoníaco como combustible, como son la utilización de hidrógeno como combustible promotor de la llama y la producción de ambas sustancias, NH_3 y H_2 , mediante agua, aire y energías renovables (concretamente, la energía hidroeléctrica).

2.3.2. Pruebas para el U.S. Army

Estudios de logística del ejército estadounidense, en los años 60 del siglo pasado, determinaron que aproximadamente el 65% del tonelaje a transportar para dar soporte a las operaciones militares eran combustibles y lubricantes para los vehículos y equipos, algo complicado tanto por el coste del propio transporte como por la crisis energética existente en aquella época. Por ello, numerosas instituciones y organismos empezaron a investigar nuevos carburantes que permitieran un mayor rendimiento y, por tanto, un menor consumo y necesidad de transporte de combustible, que ya de por sí era escaso.

Starkman, Newhall, Sutton, Maguire y Farbar (1966), de la Universidad de Berkeley, California, diseñaron y probaron un motor de encendido provocado cuya relación de compresión podía ser variada entre 6:1 y 10:1. En este equipo, el amoníaco proveniente de una botella a alta presión (contenida en un baño caliente) se introducía parcialmente descompuesto, mediante un calentador eléctrico y un catalizador de óxido de hierro, en el flujo de aire de admisión.

El experimento demostró que, en estas condiciones, el motor consumía hasta el doble de combustible a máxima carga si se comparaba su funcionamiento con el carburante corriente basado en iso-octano ($i - C_8H_{18}$). Además, las emisiones de óxido nítrico (NO) eran también superiores utilizando amoníaco (4800 ppm frente a las 3800 ppm del iso-octano). Así, la idea del motor de encendido provocado utilizando amoníaco quedó descartada. (Reiter & Kong, 2011).

Gray, Dimitroff, Meckel, y Quillian (1966), del U.S. Army Fuels and Lubricants Research Laboratory, encuadrado en el Southwest Research Institute, proponen un motor de encendido por compresión, con amoníaco líquido inyectado directamente en el cilindro. La relación de compresión para tal fin tuvo que ser elevada hasta 35:1, y el aire de admisión calentado hasta unos 150°C. También se investigó el uso de combustibles promotores de llama mezclados con el amoníaco para reducir la relación de compresión necesaria, descubriendo que prácticamente cualquier sustancia con el número de cetano suficiente servía para este fin.

Podemos destacar varios resultados importantes de esta investigación, como la capacidad de acercarse más a la combustión estequiométrica con el amoníaco que con hidrocarburos convencionales en determinadas condiciones, la urgencia de eliminar en estos equipos cobre y otras aleaciones que puedan ser corroídas, y la necesidad de estudiar más profundamente el efecto que altas velocidades de giro pueden ejercer sobre parámetros como el retardo a la ignición y la cantidad de combustible piloto.

Especial importancia cobra el estudio "Combustion of Anhydrous Ammonia in Diesel Engines", de Pearsal y Garabedian (1968), en el que se intentó la inyección directa de amoníaco líquido infructuosamente, incluso subiendo la relación de compresión hasta 30:1. Se cambió entonces de paradigma, inyectando el amoníaco en el torrente de aire

de admisión e iniciando la combustión mediante una pequeña cantidad de combustible piloto, confirmando la preferencia del amoníaco por una combustión cercana a la estequiométrica. Así, mediante una mejor utilización del aire y la mezcla adecuada de combustibles, se consiguieron potencias superiores hasta en un 32% a la operación con diésel, a costa, eso sí, de una mayor cantidad de combustible piloto (tema que ya tratábamos en la comparativa entre sistemas HPDF y LPDF, como es el caso de este, donde se obtiene un buen rendimiento térmico pero mayor cantidad de emisiones nocivas).

Sin embargo, pese a las investigaciones al respecto, motivos como el fin de la crisis energética, la relativa dificultad de la producción, transporte y almacenamiento del amoníaco respecto al diésel, el coste de retrofit y diseño de equipos que funcionen con él y la toxicidad que implica hicieron que no se adoptase el NH_3 como combustible marítimo, postergando el avance en esta tecnología hasta épocas más recientes en las que prima la reducción de emisiones nocivas a toda costa.

2.4. PROYECTOS EN DESARROLLO EN LA ACTUALIDAD

Tal y como ya se ha explicado en apartados anteriores, la transición a esta tecnología no es el futuro, es el presente. La capacidad del amoníaco para ser un combustible neutro en carbono y la posibilidad de propulsar a la flota marítima mundial con una autonomía respetable hacen que este combustible se perfila como la opción principal de cara a la transición energética que a está en curso.

En torno a estas tecnologías hay varias aproximaciones, respaldadas por gobiernos, organizaciones y empresas de todo el mundo que han aceptado la necesidad de un cambio de paradigma y empezado a tomar cartas en el asunto. Destacan principalmente dos iniciativas, que están siendo llevadas a cabo por dos de las mayores empresas del sector de la propulsión marina y la investigación energética: Wärtsilä y MAN.

Si bien las líneas generales de su trabajo son conocidas, las investigaciones de ambos grupos están rodeadas por un gran secretismo. A continuación, se recopilan los avances y logros que, hasta la fecha, han publicado estas dos empresas y los programas de desarrollo conjunto (JDP o Joint Development Program, por sus siglas en inglés) en que están encuadrados.

2.4.1. Avances de Wärtsilä Marine Power y sus socios

Esta empresa finlandesa, puntera en el sector, trabaja en la actualidad en el proyecto “Ammonia 2-4”, liderando un consorcio que también forman el estudio de arquitectura naval C-Job, la sociedad de clasificación DNV, la empresa naviera MSC y el Consejo Nacional de Investigación (CNR) de Italia. Con fondos propios y 10 millones de euros procedentes de la Unión Europea, gracias a la iniciativa “Horizon Europe”, investigan dos líneas de trabajo principales: motores rápidos de cuatro tiempos (Figura 2.4.1.1), y motores lentos de dos tiempos.



Fig. 2.4.1.1: Técnicos de la casa Wärtsilä trabajando en un motor de 4 tiempos que consume amoníaco mezclado con combustibles promotores de llama. (Wärtsilä Corporation, 2022)

Fuentes de la empresa aseguran que ya han desarrollado un motor funcional que consume mezclas con hasta un 70% de amoníaco funcionando en regímenes de carga habituales para un buque, y que en 2023 tendrán preparado un equipo que utilice únicamente NH_3 , sin necesidad de combustibles promotores de llama. El proyecto busca construir un prototipo de laboratorio para el motor rápido de cuatro tiempos, y un motor de prueba de dos tiempos al que seguirá un kit de retrofit para máquinas existentes en 2025. Además del diseño y construcción de estas máquinas, la iniciativa “Ammonia 2-4” investiga e impulsa avances en cuanto a la manipulación y almacenamiento del combustible, la seguridad de las operaciones y el marco legal que regule el uso de esta sustancia. (Wärtsilä Corporation, 2022).

Además, Wärtsilä está trabajando en desarrollar sistemas de almacenamiento y repostaje de amoníaco, como parte del proyecto “ShipFC” de la Unión Europea (en el que también desarrollan, junto a la naviera Eidesvik, pilas de amoníaco para sus buques offshore), campo en el que cuenta con ventaja por su experiencia diseñando sistemas de manipulación de carga en buques LPG (Liquid Petroleum Gas, o gas licuado de petróleo), dado que estos también pueden transportar amoníaco. También participan en el proyecto Demo2000 con la naviera Knutsen OAS, Repsol Noruega y Equinor, probando nuevos diseños de motores de cuatro tiempos a amoníaco en el Sustainable

Energy Catapult Centre en Noruega, enfocando también su investigación en motores aptos para plantas eléctricas, capaces de arrancar y soportar la carga demandada por la red en menos de dos minutos como lo haría un motor diésel convencional. (Wärtsilä Corporation, 2021).

Por último, cabe destacar el JDP (Joint Development Program) que han iniciado Wärtsilä y la firma coreana SHI (Samsung Heavy Industries) para desarrollar motores de cuatro tiempos capaces de utilizar mezclas de hasta un 70% de amoníaco, con la idea de usarlos como motores auxiliares en los grandes buques tanque y portacontenedores que operan con motores principales a dos tiempos, y auxiliares Wärtsilä de cuatro. (Wärtsilä Corporation, 2021).

2.4.2. Progresos de MAN Energy Solutions

Como su contraparte finlandesa, este grupo industrial busca explotar el potencial del amoníaco como combustible verde y sostenible en un futuro cercano. Fuentes de la empresa aseguran estar desarrollando un motor lento de dos tiempos a amoníaco que estará disponible en el mercado en 2024, cuyo prototipo se muestra en la Figura 2.4.2.1, seguido por un kit de retrofit para motores existentes en 2025 (opción que, como vemos, han adoptado ambos grupos empresariales y que permitirá una transición gradual, sin necesidad de paralizar las flotas mundiales o ralentizar el comercio). Así, MAN considera que los grandes buques tanque, portacontenedores y graneleros serán los primeros activos en adaptarse a esta tecnología.

Brian Østergaard Sørensen, jefe de investigación y desarrollo de motores dos tiempos de MAN Energy Solutions, explica que, debido a la naturaleza tóxica y corrosiva del amoníaco, están desarrollando sistemas completos que cubran el recorrido desde el tanque de almacenamiento hasta el motor y que permitan un alto nivel de seguridad y control. Para ello, hacen pruebas con mamparos dobles, distintas aproximaciones en cuanto a los materiales utilizados, software inteligente y soluciones óptimas para todos los procesos que implica esta tecnología. Además, cuentan con el apoyo de numerosas empresas navieras y energéticas (como, por ejemplo, Maersk) que buscan contribuir al objetivo común: descarbonizar el transporte marítimo y la producción de energía eléctrica. (Lindstrand, 2021).

La naviera japonesa MOL (Mitsui O.S.K. Lines) también ha apostado por el amoníaco, firmando junto con su rama tecnológica, Mitsui E&S Machinery, un memorándum de entendimiento (MoU o “memorandum of understanding”, en inglés) con MAN para adquirir los nuevos motores que esta desarrolle y equiparlos en sus buques tanque de amoníaco. (Bahtić, 2021).



Fig. 2.4.2.1: Motor MAN de dos tiempos siendo trasladado al centro de investigación de MAN Energy Solutions en Copenhague para ser adaptado al consumo de amoníaco. (Lindstrand, 2021)

También es digno de mención el proyecto AmmoniaMot (“Motor de amoníaco” en alemán, cuyo logo se refleja en la Figura 2.4.2.2), iniciado por MAN con socios de instituciones de investigación, grupos industriales y el Ministerio Federal de Asuntos Económicos y Tecnología de Alemania para estudiar el desarrollo de un motor dual diésel – amoníaco de media velocidad y cuatro tiempos apto para el transporte marítimo. Una vez más, MAN reconoce la importancia del amoníaco como uno de los combustibles libres de carbono y sostenibles que requiere la transición energética, basándose en las previsiones de la sociedad de clasificación DNV de que el amoníaco ocupará un 30% del mercado de los combustibles en 2050. A continuación, se detallarán los socios participantes en este proyecto y sus roles en el mismo. (MAN Energy Solutions, 2021).

El estudio Neptun Ship Design (NSD) analizará las regulaciones internacionales en cuanto a los requerimientos técnicos y de seguridad para desarrollar un sistema de combustible modularizado y encapsulado, que será probado por WTZ en un motor experimental.

La Universidad de Múnich (TUM) utilizará una máquina de compresión – expansión rápida para estudiar la combustión del amoníaco y desarrollará junto con MAN los modelos de combustión necesarios para adaptar esta tecnología a distintos tamaños y arquitecturas de motor.

WTZ, especialista en el sector de conversión de la energía, creará un motor de prueba de alta velocidad para desarrollar un concepto de combustión para el nuevo motor, definiendo también las limitaciones y requerimientos en cuanto al tratamiento de los gases de escape.

Woodward L'Orange, conocido fabricante de sistemas de inyección, producirá los necesarios para las pruebas de la Universidad de Múnich y el motor de WTZ, y escalará esta tecnología junto con MAN para adaptarla a los motores de serie.

Por último, MAN Energy Solutions transferirá toda esta tecnología a motores de cuatro tiempos y gran cilindrada, y los preparará para su producción y comercialización. (MAN Energy Solutions, 2021).



Fig. 2.4.2.2: Iniciativa AmmoniaMot, promovida por el Estado alemán. (MAN Energy Solutions, 2021)

2.5. PILA DE AMONÍACO

Numerosos estudios y publicaciones describen las pilas de combustible como las competidoras de los motores de combustión interna o MCI. Sin embargo, en el caso del amoníaco, nada más lejos de la realidad: Debido a su alto coste y a la inmadurez de esta tecnología, los motores de combustión serán el paso previo a la implantación de las pilas, no su competencia. Como ya detallábamos en apartados anteriores, el desarrollo de la tecnología del amoníaco pasará por la adaptación de motores existentes a su consumo, seguidos por equipos ya diseñados específicamente, para dar paso finalmente a las pilas de combustible.

Estos sistemas consisten, básicamente, en un reactor de fisión que descomponga la sustancia utilizada como combustible, en este caso NH_3 , provocando una reacción química entre sus componentes y el aire. Así se generan agua, nitrógeno y compuestos derivados de este y lo más importante, electricidad, en un proceso inverso a la electrólisis. Habitualmente, los gases de escape se hacen pasar por un convertidor catalítico y el amoníaco que no ha reaccionado y los compuestos derivados del nitrógeno resultantes del proceso son captados, dejando como únicas emisiones del equipo a la atmósfera vapor de agua (H_2O (g)) y nitrógeno gas (N_2 (g)). Pasaremos ahora a describir brevemente la composición y ventajas de una pila de amoníaco.

Existen dos tipos, directas e indirectas, siendo las primeras las más eficientes puesto que consumen directamente amoníaco, mientras que las últimas son pilas de hidrógeno obtenido mediante la descomposición del NH_3 . Algunas de las desventajas de las pilas de amoníaco indirectas consisten en que no aprovechan toda la energía contenida en el NH_3 (presentando, por tanto, un menor rendimiento), su mayor coste de fabricación, mantenimiento y operación, y que entrañan complicaciones como la necesidad de dos sistemas de almacenamiento segregados, uno para amoníaco y otro para el hidrógeno producido, con los consiguientes problemas de seguridad que esto representa. (Jeerh, Zhang, & Tao, 2020)

Dentro de las pilas de amoníaco directas, destacan las de óxido sólido (SOFC, "solid oxide fuel cells"), que pueden dividirse en pilas basadas en electrolitos conductores de aniones de oxígeno (SOFC-O) y pilas basadas en electrolitos conductores de protones (SOFC-H), y las pilas de combustible alcalinas basadas en membranas (AMFC). Las SOFC operan a

mayor temperatura, entre 500 y 1000 °C, presentando mayor eficiencia, mientras que las AMFC operan entre 50 y 250 °C. (Jeerh, Zhang, & Tao, 2020)

De obligada mención es el proyecto “ShipFC”, con fondos de la Unión Europea y ya comentado en apartados anteriores, que comenzó en 2020 y busca el desarrollo de una pila de amoníaco para propulsar buques de forma sostenible. El buque de suministro offshore (OSV) “Viking Energy”, de la compañía Eidesvik Offshore, sirve de banco de pruebas para una pequeña pila de 2 MW que le permite navegar hasta 3000 horas anuales con combustible limpio (Figura 2.5.1). Wärtsilä Marine ha diseñado el sistema de almacenamiento de amoníaco y la planta, Yara suministra el amoníaco y Prototech ha desarrollado la propia pila. Una vez se terminen todas las pruebas pertinentes, se buscará escalar esta tecnología hasta obtener equipos de 20 MW para demostrar la viabilidad del amoníaco como combustible en unidades que operen mar adentro y/o en viajes largos. Sin embargo, la limitación que se presenta a la instalación de estas tecnologías en buques existentes radica en el espacio que ocupa, pese a ser modular, algo que no ocurre en el caso del retrofit de un motor para el consumo de NH_3 (que solo requiere de los sistemas de almacenamiento pertinentes). (Vessel Performance Optimisation (VPO), 2020).



Fig. 2.5.1: Ubicación del sistema de propulsión mediante pila de amoníaco en la cubierta principal del OSV “Viking Energy”. (Vessel Performance Optimisation (VPO), 2020)

2.6. RETROFIT DE UN MOTOR EXISTENTE AL CONSUMO DE AMONÍACO

Como ya se indicaba en apartados anteriores, el primer paso lógico para una transición gradual de la propulsión marina hacia el consumo de amoníaco consiste en la adaptación, conversión o retrofit de unidades ya existentes a motores Dual Fuel, minimizando costes y tiempo de inoperatividad del buque. Esta teoría se ve reforzada por el hecho de que los grandes fabricantes que desarrollan esta tecnología como Wärtsilä Marine Power y MAN Energy Solutions afirmen en repetidos artículos y publicaciones que el lanzamiento de nuevos equipos irá acompañado de kits de retrofit para equipos diésel ya en operación.

En las siguientes secciones se detallará en qué tipo de motor de combustión interna se basa este apartado y las razones de su elección, las modificaciones requeridas para la conversión, las limitaciones que presenta esta tecnología, el aspecto económico y los resultados esperados de un retrofit de estas características.

2.6.1. Tipo de motor a utilizar

Se ha optado, debido a razones que se comentarán a continuación, por tomar como referencia un motor diésel rápido de cuatro tiempos, de inyección directa y sobrealimentado mediante turbocompresor, con refrigeración intermedia de aire de barrido (intercooling) y no reversible, ampliamente utilizado en aplicaciones de baja y media potencia: El Wärtsilä 26 (Fig. 2.6.1.1). Este motor está presente en numerosos buques de gran porte como generador auxiliar, y en otros más pequeños (buques de pesca, remolcadores, buques de trabajo offshore, etc.) como máquina principal, ya sea mediante propulsión mecánica o diésel-eléctrica.

La elección de este equipo para su adaptación al consumo de NH_3 surge de su amplio uso (en aplicaciones de propulsión mecánica o eléctrica, por su reducido y compacto tamaño y su bajo consumo, además de una alta fiabilidad) en los ya mencionados buques de suministro y trabajo offshore, como Supplies, ancleros (AHTS o “Anchor-Handling Tug Supply”), buques de soporte de buzos (DSV o “Diving Support Vessels”), unidades de construcción, servicio y operación (CSOV o “Construction Service Operation Vessels”) o similares. Muchos de estos buques acostumbran a operar en zonas ECA (como se detallaba en apartados anteriores, zonas de emisiones controladas),

especialmente en las zonas del Mar del Norte, Mar Báltico y en el Golfo de México, por lo que es muy interesante la reducción de sus emisiones de derivados de azufre (en el caso de las aguas europeas) y de derivados de azufre y nitrógeno (en aguas norteamericanas). Por ello, el amoníaco puede ser un vector clave que permita la adaptación de estas unidades a las nuevas normativas, más restrictivas, que están por venir.



Fig. 2.6.1.1: Motor Wärtsilä 6L26. (gCaptain, 2012)

Este propulsor presenta un diámetro de pistón de 260 mm y una carrera de 320 mm, con un desplazamiento de 17 litros por cilindro. Se encuentra disponible en configuraciones de 6, 8 y 9 cilindros en línea, y 12 y 16 cilindros en V a 55° (Fig. 2.6.1.2), entregando potencias que oscilan entre los 1882 y los 5440 kW con velocidades de giro de 900 o 1000 rpm. Por último, cabe destacar que, a estos dos regímenes de giro, la velocidad media del pistón (PMS, o “Piston Mean Speed”) es de 9,6 o 10,7 metros por segundo.

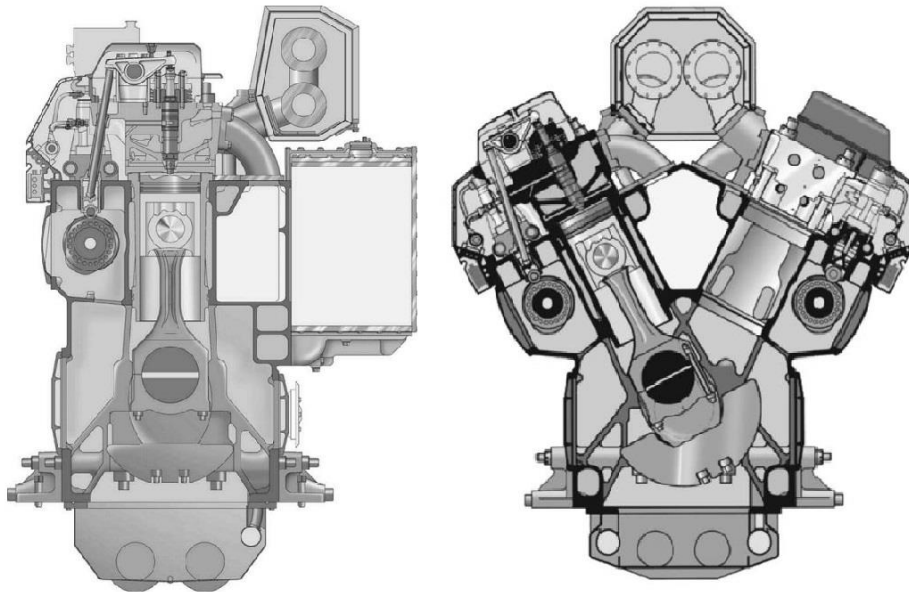


Fig. 2.6.1.2: Configuraciones del W26. (Imagen de elaboración propia a partir de las figuras del Wärtsilä 26 Product Guide (Wärtsilä Finland OY, 2018))

Habitualmente utiliza bombas de agua de mar, agua dulce de baja temperatura, agua dulce de alta temperatura, lubricación y booster de combustible del tipo acoplado, y bomba de prelubricación de accionamiento eléctrico. Sin embargo, también dispone de la opción de utilizar bombas eléctricas en todos los sistemas menos el de lubricación. El aire de barrido y el aceite de lubricación son enfriados mediante agua dulce, al igual que las camisas, bloque, culatas y demás elementos del motor, y utiliza cuatro válvulas por cilindro (dos de admisión y dos de escape) que desembocan en el MultiDuct, sistema de Wärtsilä en el cual admisión y escape discurren por el mismo costado del motor, una sobre otra. Cada cilindro posee su propia bomba de inyección del tipo Bosch, con las pertinentes cánulas y conductos que llevan a su inyector, colocado en la culata, entre las cuatro válvulas. En cuanto a los turbocompresores, estos motores equipan turbos radiales de la casa ABB y geometría fija sin sistemas de regulación de presión, una unidad en el caso de los motores lineales y dos en los motores en V (uno por cada bancada de cilindros).

Los motores más antiguos equipan el sistema de control y regulación WECS (Wärtsilä Engine Control System) en sus distintas versiones, mientras que equipos más recientes

o unidades reacondicionadas disponen del sistema UNIC (Wärtsilä Unified Controls), controlando y monitorizando todos los parámetros del motor, gestionando sus seguridades, alarmas y bloqueos y conectando estos equipos con el resto de los sistemas del buque. (Wärtsilä Finland OY, 2018).

2.6.2. Modificaciones que realizar para el consumo de NH₃

En esta sección se propondrán distintos cambios y sistemas a implementar en un buque existente con motores Wärtsilä 26 en función de los requerimientos del amoníaco como combustible. Se pretende implementar una arquitectura HPDF (High Pressure injection Dual Fuel) operando en una mezcla de un 10% de combustible diésel piloto y un 90% de amoníaco combustible, ya que mediante estas características se conseguiría un menor consumo, emisiones más reducidas y un rendimiento aceptable, sin sacrificar la fiabilidad u otros parámetros del motor.

2.6.2.1. Sistema de almacenamiento y suministro de combustible

Como ya se ha detallado en este Trabajo de Fin de Grado, una particularidad del amoníaco es que permite ser transportado en estado líquido a temperatura ambiente (20 – 25°C) y presiones bajas, entre los 9 y los 10 bar. Así, resulta fácil diseñar un sistema de almacenamiento adecuado para esta sustancia, similar a los tanques de gas licuado de petróleo (LPG) ya en uso en numerosos buques, siempre teniendo en cuenta los materiales que puede corroer y la seguridad de las personas que rodeen esta instalación.

Por ello, Marcos (2022) propone el uso de acero inoxidable AISI 316L, un acero inoxidable austenítico de grado marino con cromo, níquel y un pequeño porcentaje de molibdeno (2-3%), y con un contenido más bajo de carbono que el acero 316 estándar (especificado mediante la L en su denominación) para favorecer su soldabilidad. Además, destaca la necesidad de realizar las soldaduras protegidas mediante gas (MIG/MAG, “Metal Inert Gas”, “Metal Active Gas”) y el uso de decapantes (“pickling”) para evitar grietas, poros y otras imperfecciones que puedan llevar a un fallo catastrófico.

Estos tanques necesitan sus propios venteos por mástiles o una zona elevada del buque, asegurando que en caso de sobrepresión por evaporación o boil-off el amoníaco no llegue a afectar a la salud de la tripulación, y sobre esto en varias publicaciones se

destaca que es recomendable tarar las válvulas de alivio o relief-valves en torno a los 18 bar, para amortiguar las variaciones de la temperatura ambiente. Las líneas de NH_3 deberán llevar doble pared para proteger de fugas en caso de sobrepresiones y/o defectos del material, y se requieren sistemas de detección de amoníaco (similares a los ya existentes para la tecnología Dual-Fuel) conectados con el sistema de alarmas del buque. (Marcos, 2022)

Sería ideal la instalación de determinadas puertas estancas y válvulas de corte del suministro pilotadas por el sistema de alarmas y seguridades, siendo recomendable aislar automáticamente en caso de emergencia o shutdown la zona donde estén ubicados los tanques de combustible a la par que se corta el suministro de este a los motores.

Además, se hace necesario un sistema de purgado de líneas mediante nitrógeno (fácilmente obtenible de los gases de escape), por lo que se necesita un tanque de almacenamiento de este elemento. Otra medida aconsejable, en el caso de retrofit de buques existentes que nos ocupa, sería ubicar los tanques de amoníaco en cubierta, como se ha hecho en el OSV “Viking Energy” o como se colocan en prácticamente todos los buques reacondicionados para el consumo de LPG/LNG, para evitar los problemas derivados de la toxicidad de una sustancia como esta dentro de los espacios de máquinas del buque.

Wärtsilä Marine Power no ha publicado información relevante respecto a los sistemas de suministro de amoníaco en desarrollo; sin embargo, MAN Energy Solutions ha presentado varias publicaciones donde se describe, a grandes rasgos, un sistema de suministro de NH_3 combustible a motores dos tiempos ME-LGI (Fig. 2.6.2.1.1), adaptados a partir de motores de LPG, y, aunque no sea el mismo tipo de máquina, podemos en cierto modo escalar y esbozar cómo sería un sistema de estas características para abastecer a un Wärtsilä 26. La arquitectura de este tipo de sistema se divide en varias partes: Suministro de fuel y recirculación (FSS o “Fuel Supply and Recirculation”), el tren de válvulas de combustible (FVV o “Fuel Valve Train”), el sistema de seguridad de doble pared de las líneas (DWSS o “Double Wall Safety System”) y el sistema de captación de amoníaco (ACC o “Ammonia Catch System”). (MAN Energy Solutions, 2020)

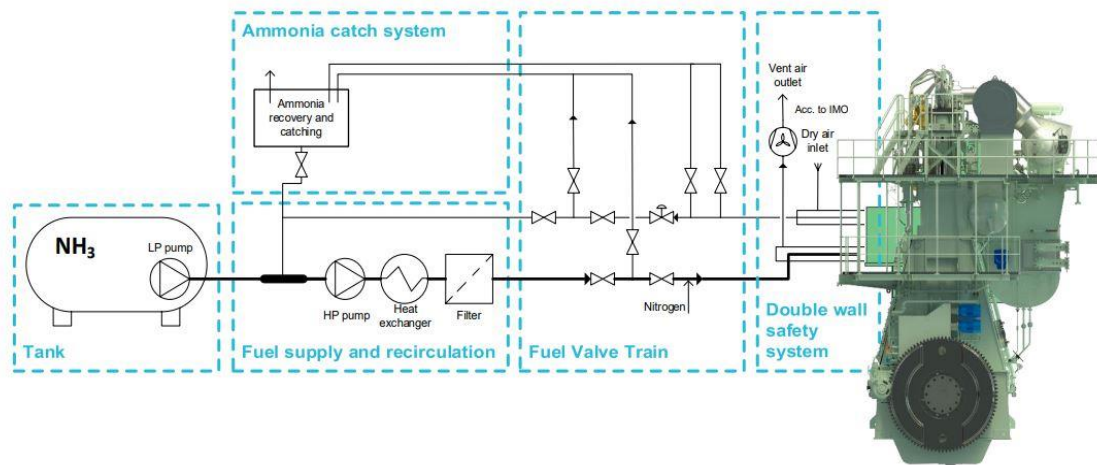


Fig. 2.6.2.1.1: Sistema de almacenamiento y suministro de NH_3 a un motor MAN ME-LGI. (Marcos, 2022)

Empezaremos describiendo el sistema de suministro de combustible y recirculación o FSS. El amoníaco líquido, al igual que pasa con el combustible diésel, necesita una o varias bombas de alimentación (lo que denominamos bomba booster) para ser trasladado de los tanques de almacenamiento al motor. Después de dichas bombas, se debe colocar un intercambiador de calor agua/amoníaco, que permita adecuar el combustible a las condiciones de suministro al MCI independientemente de las magnitudes que presente en el tanque (debido a fluctuaciones de temperatura ambiente, como se comentaba anteriormente) y seguido por sistemas de filtrado de NH_3 que eliminen las impurezas que pueda contener.

Pasaremos ahora al tren de válvulas de combustible o FVV, inmediatamente posterior al FSS y que constituye la interfaz entre el motor y los sistemas auxiliares. En él, entre el tanque de almacenamiento y el motor, se ubican las válvulas de suministro, que pueden ser pilotadas por el sistema de control (operación con NH_3 , o paso a Modo Diesel), el de seguridades (shutdown) o manualmente, para operar, detener, aislar y/o realizar mantenimiento al motor. También cuenta con un bypass que permite enviar NH_3 al sistema de captación de amoníaco (ACC), ya que se necesita una cantidad relativamente exacta de NH_3 en este para que el sistema pueda promover las reacciones pertinentes y funcionar correctamente. Además, en este primer tramo se ubica la entrada de nitrógeno al sistema de suministro de combustible, para purgar las líneas garantizando

un entorno seguro tras la parada o el cambio a combustible diésel. Por otra parte, los gases de escape provenientes del motor son dirigidos mediante un conjunto de válvulas hacia el ACC, que elimina el amoníaco restante en los gases de escape y, en caso de no ser capaz de gestionar la cantidad existente en ese momento, captará y precipitará hacia el torrente de admisión el amoníaco sobrante.

El sistema de seguridad de doble pared de las líneas o DWSS consta de una línea de suministro de aire al aro exterior de las líneas y una de venteo de dicho aire al exterior para asegurar que, en caso de fuga, el amoníaco no llegue a los espacios de máquinas. Es un sistema similar a los utilizados en la tecnología Dual Fuel existente, con gas natural licuado o gas licuado de petróleo, y protege los ya mencionados espacios gracias al encapsulamiento de los conductos de NH_3 , cuyas fugas serían arrastradas por el aire hacia el exterior.

Por último, el sistema de captación de amoníaco o ACC elimina y/o retira el amoníaco sobrante mediante una reacción química, como ya comentábamos, recirculándolo al torrente de admisión si es preciso. Incorpora también un sistema o reactor de reducción catalítica selectiva (SCR o "Selective Catalytic Reaction", mostrado en la Figura 2.6.2.1.2), que necesita cierta cantidad de amoníaco (por ello existe el bypass en el FVV mencionado anteriormente) o urea para poder promover la reacción. Si su funcionamiento es óptimo, además de retirar el amoníaco de los gases de escape, elimina las emisiones de NO_2 (dióxido de nitrógeno) y NO (óxido nítrico) haciéndolos reaccionar con el NH_3 , dando como producto final nitrógeno gas ($\text{N}_2(\text{g})$) y vapor de agua ($\text{H}_2\text{O}(\text{g})$). Otras sustancias nocivas como el N_2O (óxido de nitrógeno) se pueden eliminar de la combustión mediante ajuste electrónico de parámetros como la inyección, y las emisiones de derivados del azufre (SO_x) y carbono (CO_x) provenientes del combustible piloto se consideran ínfimas por la pequeña cantidad de este que se utiliza.

El sistema de almacenamiento y suministro de combustible diésel no necesita variaciones para el retrofit del motor a amoníaco. Los cambios necesarios se implementarán en el sistema de inyección, mediante regulación electrónica, y no en el de suministro.

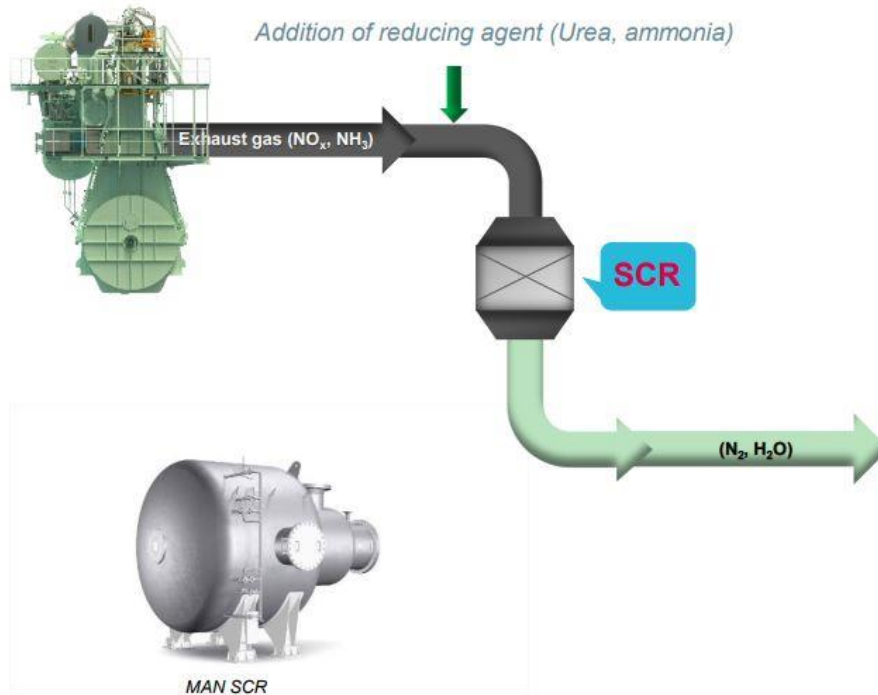


Fig. 2.6.2.1.2: Propuesta de MAN para la captación de amoníaco y eliminación de sustancias derivadas del nitrógeno en las emisiones. (Laursen, 2018)

2.6.2.2. Sistema de inyección

2.6.2.2.1. Sistema de inyección diésel

El retrofit ideado para este motor contempla mantener parte del sistema de inyección diésel existente, de modo que permita la operación en Modo Diésel o como combustible piloto, promotor de la llama (Modo Dual). Este sistema, alimentado mediante una bomba booster (acoplada, en la mayoría de las aplicaciones de este equipo) desde los tanques de consumo diario, consta de una bomba de inyección del tipo Bosch por cilindro, que desemboca mediante sus cánulas de doble pared en el inyector ubicado en la culata.

Las bombas, como corresponde a su tipo, son operadas mediante unas cremalleras de inyección (“fuel racks”), pilotadas a su vez mediante actuadores de control electrónico que responden a las órdenes del sistema WECS/UNIC, y un gobernador o regulador de velocidad hidráulico tradicional que funciona como respaldo o backup en caso de emergencia. Así, para permitir que este motor utilice el sistema de inyección diésel para

administrar el combustible piloto, se requieren modificaciones de software que reduzcan la cantidad de este acorde a ese 10% que se busca utilizar, y funcione de forma solidaria a las condiciones del motor en cada momento.

2.6.2.2.2. Inyectores

En cuanto a los inyectores, la aplicación de la arquitectura HPDF en un motor y, específicamente, en una culata existente, no permite la instalación de un segundo inyector que suministre el amoníaco. Por ello, se requiere el diseño y construcción de nuevos inyectores “duales”, es decir, similares a los que mencionábamos en el apartado 2.2.5.1. y que permitan la inyección simultánea de ambas sustancias, diésel y NH_3 . Li et al. (2020), tras estudiar la eficiencia de distintos patrones de inyección, determinan que ocho orificios para cada combustible y 0° de desfase entre los orificios de amoníaco y los de diésel aseguran una mayor homogeneidad de la mezcla de combustibles, y por tanto mayor velocidad de llama y calidad de la combustión, lo que radica en un menor consumo, menos emisiones nocivas y un mayor rendimiento respecto a otros esquemas de inyección.

Estos componentes deberían ser alimentados de diésel a través de la culata por la cánula ya existente, y de NH_3 por un segundo conducto en su parte superior, que discurra entre los balancines hacia el “operating side”, costado del motor donde se ubica todo el sistema de inyección diésel y donde también deberá ser instalado el de amoníaco, por lo que la “hot box” (zona superior del “operating side”) del motor requiere una ampliación para albergar ambos equipos.

Inicialmente, los Wärtsilä 26 realizaban la inyección de combustible diésel a una presión de 600 bar, pero debido a que la mayoría de las unidades requerían grandes subidas y bajadas de carga repentinas la casa envió una Service Letter a los operadores de estos equipos y actualmente la mayoría tienen sus inyectores timbrados a 470 bar, lo cual también les permite ser más eficientes en regímenes de baja carga. Así, se propone la inyección del combustible piloto a 470 bar, para no limitar la operación del motor en Modo Diésel, y la inyección de amoníaco a 600 bar.

En cuanto a la refrigeración de las toberas, se pretende mantener la existente, basada en la circulación de aceite lubricante.

2.6.2.2.3. Sincronización

La sincronización del motor también merece especial atención: el amoníaco reacciona de forma distinta al diésel al entrar en combustión, y el equipo debe adaptarse a ello. Por tanto, se propone la inyección de combustible piloto en torno a los -8 grados de cigüeñal al punto muerto superior (PMS o TDC) para calentar la cámara de combustión, y la inyección de amoníaco a -5 grados de cigüeñal al PMS, lo que provocaría la ignición de la mezcla en torno a los -1 grados, es decir, casi en el punto muerto superior. (Li, y otros, 2022).

Para el Modo Diésel, se considera que manteniendo la inyección a -8 grados respecto al TDC se obtienen resultados satisfactorios, al no diferir demasiado de los aproximadamente -10 grados a los que inyecta el W26 original.

2.6.2.2.4. Sistema de inyección de amoníaco líquido

Para el sistema de inyección de amoníaco líquido, alimentado por el equipo descrito en el apartado 2.6.2.1., se plantea el uso de una arquitectura “common-rail” o raíl común ubicada físicamente en la “hot-box” ampliada, sobre las bombas de inyección originales.

Este equipo obtendría su presión de una bomba eléctrica de alta presión conectada al sistema de regulación y control del motor (WECS o UNIC), ya que la instalación de una o más bombas acopladas de amoníaco implicaría una complicación técnica, económica y de seguridad (por ejemplo, en los sellos, mientras que una bomba eléctrica puede ser encapsulada totalmente). Al igual que en otros modelos de Wärtsilä que utilizan la tecnología del raíl común, se propone el uso de un acumulador de presión por cada dos inyectores.

El sistema de regulación y control del equipo también tendría que pilotar las electroválvulas que conectan el “common-rail” con los distintos inyectores, adaptando los parámetros al régimen de funcionamiento del motor en cada momento o cerrándolas si se va a operar en Modo Diésel.

2.6.2.3. Sistema de sobrealimentación/aire de barrido

Erdemir y Dincer (2020) aseguran que una medida para incrementar la potencia y rendimiento de un motor de combustión interna que consume amoníaco consiste en

aumentar la sobrealimentación de aire respecto a los valores habituales, ya que el amoníaco tiene una alta resistencia a la autoignición que permite esta modificación y también aumentar la relación de compresión (hasta cierto punto, obviamente) sin riesgos para el motor.

El W26, en cualquiera de sus versiones, utiliza turbocompresores radiales, pudiendo ser de una sola entrada de gases (en motores que no sufren subidas o bajadas bruscas de carga) o de dos entradas a distintos diámetros (en motores que sí las sufren, como se ve en la Fig. 2.6.2.3.1). Estos turbos no poseen medios de regulación de la presión (como “wastegates”), es decir, funcionan según la presión que los gases de escape le impriman, por lo que para aumentarla se plantean dos líneas de trabajo: la modificación de la geometría del colector de gases de escape, de tal modo que imprima más velocidad a la turbina del equipo, y el cambio de los álabes de dicha turbina por otros que busquen el aumento de velocidad y, por tanto, de presión.



Fig. 2.6.2.3.1: Instalación de un turbocompresor radial ABB de doble entrada en un motor Wärtsilä 6L26A. (Fotografía propia)

Para favorecer la mezcla del aire con el combustible inyectado en el cilindro y paliar en cierto modo la lenta cinética química del amoníaco, se propone dar mayor turbulencia al torrente de aire de admisión. Para ello, ya que el colector de admisión forma parte

del MultiDuct (sistema en el que admisión y escape discurren una bajo la otra en el mismo costado del equipo) y está integrado en el propio bloque motor, se busca alguna medida que no requiera la modificación extensiva de la geometría de dicho colector. Así, se proyecta la instalación de “swirlers” o “swirl flaps” (aletas móviles que dan turbulencia al flujo) en el ramal de admisión de cada cilindro, pilotadas por un sistema neumático alimentado mediante las líneas de aire comprimido del motor y controlado por el sistema WECS/UNIC. (Guojin, y otros, 2014).

2.6.2.4. Sistema de refrigeración

Li et al. (2020), en el ya mencionado artículo “A comparison between Low and High-Pressure injection Dual-Fuel modes of diesel-pilot-ignition ammonia combustion engines”, explican la disminución de temperatura que experimenta el cilindro en un motor de arquitectura HPDF respecto a la operación con combustible diésel, que ronda unos 200 °C menos, por lo que se hace necesario adaptar el sistema de refrigeración a estas condiciones de operación (Fig. 2.6.2.4.1).

Así, se plantea el uso de las válvulas termostáticas originales para la operación diésel, y un segundo juego de termostáticas taradas a distinta temperatura para la operación con amoníaco, junto con un sistema de bypasses controlado electrónicamente. No se contempla la sustitución de los intercambiadores de calor existentes en el buque, al ser la variación de temperatura descendente y no especialmente amplia.

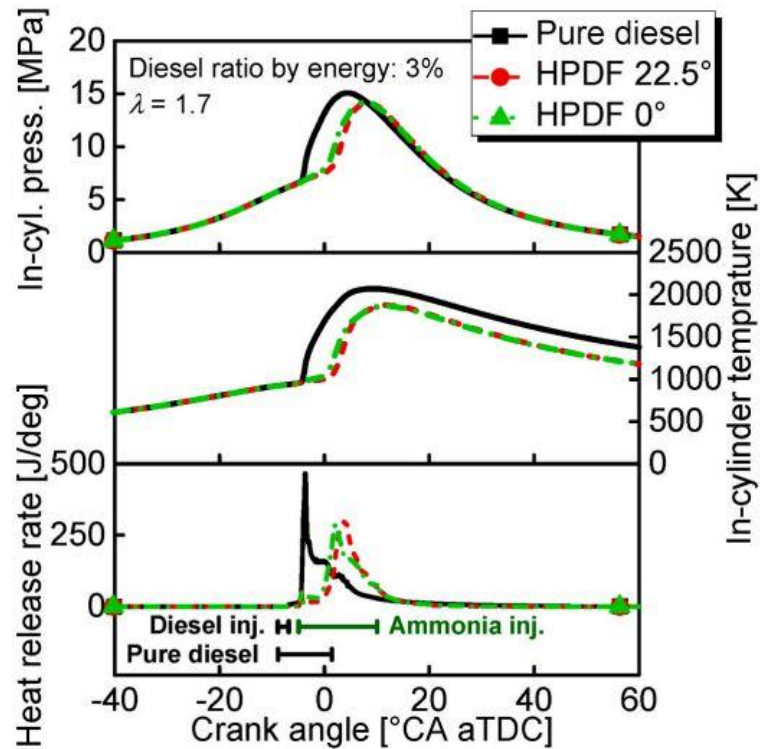


Fig. 2.6.2.4.1: Comparativa entre la operación diésel y el modo HPDF con amoníaco de un motor de prueba monocilíndrico, donde se observan las menores temperaturas del equipo utilizando NH_3 . (Li, y otros, 2022)

2.6.2.5. Sistema de escape

En cuanto a este sistema, recibiría las modificaciones comentadas en apartados anteriores: modificación o sustitución del colector de gases de escape para dar más velocidad al flujo, e instalación de un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) alimentado con el propio amoníaco (eliminando así la necesidad de la urea) que permita, tanto en Modo Dual Fuel como en Modo Diésel, cumplir las precepciones de la categoría Tier III de la IMO en lo tocante a emisiones nocivas, vigilando especialmente los NO_x o sustancias derivadas del nitrógeno.

2.6.2.6. Sistema de regulación y control

Estos motores, como adelantábamos anteriormente, equipan el sistema WECS (Wärtsilä Engine Control System) o su sucesor, el sistema UNIC (Wärtsilä Unified Controls). Estos softwares, junto con su parte física, controlan y monitorizan el motor, conectándolo

además con el resto del buque o instalación. Poseen funciones tales como pilotar los bloqueos al arranque, medir las velocidades, temperaturas y presiones del equipo, realizar arranque, parada y shutdowns automáticos (sobrevelocidad, baja presión de lubricación, etc.), control de la inyección, carga y limitador de combustible en el arranque, procesado de señales de los sensores de condición, monitorización y alarmas, control del virado del motor y comunicación con sistemas externos al equipo.

Todavía quedan muchas unidades de W26 utilizando el sistema WECS, más arcaico y con menos flexibilidad que el UNIC, adaptado a la tecnología Dual-Fuel. Por este motivo se plantea el retrofit al consumo de NH_3 en motores operando con UNIC, o la actualización de equipos con WECS a este otro sistema para poder adaptarlos al amoníaco, algo que, además, mejora la fiabilidad y seguridad del equipo, extendiendo su vida útil y rebajando los costes de mantenimiento y operación.

Este sistema se compone del LOP (“Local Operator Panel”, anteriormente llamado LDU o “Local Display Unit”), que permite el control y monitorización local, los COM o módulos de comunicación (que conectan el sistema UNIC con los sistemas del buque, ya sea mediante Modbus u otro tipo de comunicación), los CCM (“Cylinder Control Module), que monitorizan y controlan la combustión en cada cilindro, los IOM (“Input/Output Module”), que reciben las señales de los sensores de determinados parámetros del motor, y el ESM (“Engine Safety Module”), que maneja las seguridades y paradas de emergencia para asegurar el bienestar de la tripulación en caso de emergencia.(Wärtsilä Marine Solutions, 2017).

En esta actualización del sistema de regulación y control del motor para el consumo de amoníaco, se requiere la implementación del software que controle las siguientes funciones:

- El “tripeo” o paso de un modo de operación a otro (Diésel a Dual-Fuel y viceversa).
- La inyección de amoníaco, pilotando la bomba de alta presión y las válvulas del common-rail.
- La posición de las cremalleras de inyección de combustible diésel, para poder operar como combustible piloto y no solo como principal.

- La posición de los “swirlers” o “swirl flaps” de los ramales del colector de admisión a cada cilindro, para obtener la turbulencia necesaria en cada régimen de carga o revoluciones.
- Todo el sistema de seguridades del motor, implementando las paradas o shutdowns por problemas derivados de este nuevo combustible.
- La inyección de NH_3 en el sistema de reducción catalítica selectiva (SCR), en función del modo de operación, la carga y otros parámetros.
- La inertización de todo el sistema de suministro de amoníaco con N_2 al finalizar la operación Dual-Fuel o en caso de shutdown, parada o mantenimiento.
- La bomba de suministro de combustible amoníaco al motor.

Además, debido a la poca velocidad de llama del amoníaco, otra medida a adoptar consiste en la reducción de revoluciones por unidad de tiempo, de las 900 o 1000 rpm a valores que rondan las 800 revoluciones por minuto. Esto debe ser asegurado mediante el control electrónico de la inyección, y permite la disminución de la velocidad media del pistón (PMS) de los 9,6 – 10,7 m/s a unos 8,53 m/s, asegurando que mayor cantidad de amoníaco entre en combustión. Este valor, orientativo al no poder realizar pruebas en un motor real o un simulador de la casa, se ha calculado según la siguiente expresión:

$$PMS \text{ (m/s)} = 2 \times \text{Carrera (mm)} \times \text{rpm} ;$$

$$PMS \text{ (m/s)} = 2 \times 320 \text{ mm} \times 800 \text{ rpm} ;$$

$$PMS = 8,53 \text{ m/s}$$

(2.6.2.7.1)

2.6.2.7. Observaciones acerca de los materiales a emplear/reemplazar

Debido a la corrosión intrínseca a la utilización una sustancia como el amoníaco a modo de combustible, deben eliminarse de las piezas que vayan a estar en contacto con este compuesto el cobre y sus aleaciones, el aluminio, titanio, níquel, zinc y teflón u otros plásticos (especial atención, pues, a las juntas). Además, también destaca el efecto corrosivo del NH_3 en el cromo, por lo que deben sustituirse los tres aros del pistón por unos de otro material (por ejemplo, acero aleado), y dar un revestimiento cerámico a los álabes de la turbina del compresor, ya que el Inconel del que están fabricados es una

aleación con base de níquel – cromo y puede ser corroída por el amoníaco inquemado que salga junto con los gases de escape.

Sin embargo, hay ciertos materiales que, aunque son corroídos por el NH_3 , presentan cierta resistencia y tardan en sucumbir a este fenómeno, como el acero inoxidable AISI 316L mencionado anteriormente y planteado como material para los tanques almacén de combustible.

2.6.2.8. Relación final de modificaciones a implementar

Se procede ahora a resumir y enumerar los cambios o modificaciones básicas que entrañan este proyecto de retrofit, que es una aproximación teórica al concepto de la adaptación de un motor diésel marino existente al consumo de amoníaco, es decir, no tiene base experimental ni cuenta con el aval de la casa Wärtsila en cuanto a su posible implementación. En esencia, es una interpretación de cómo podrían ser estas adaptaciones que la casa proyecta para sus motores en los años venideros, de las cuales todavía no ha desvelado apenas detalles. Así, las modificaciones a realizar, organizadas según el sistema al que pertenecen, son:

- Sistema de almacenamiento y suministro de amoníaco líquido: instalación de tanques, bomba de alimentación, sistema de válvulas, filtros, venteos y líneas, sistema de purgado de líneas mediante N_2 , sistema de seguridad.
- Sistema de inyección de amoníaco: sustitución de los inyectores por nuevos inyectores duales, instalación del sistema “common-rail” y su bomba de alta presión.
- Sistema de sobrealimentación/aire de barrido: modificación o sustitución del colector de gases de escape y cambio de los álabes de la turbina (además de aplicar recubrimiento cerámico) para obtener mayor velocidad de giro y, por tanto, mayor presión de aire de alimentación. Además, instalación de “swirlers” (aletas móviles para aportar turbulencia al aire) pilotados por el sistema de regulación y control en los ramales de admisión de cada cilindro.
- Sistema de refrigeración: instalación de un segundo juego de válvulas termostáticas adaptadas a los parámetros de la operación Dual Fuel y bypasses de control electrónico.

- Sistema de escape: instalación de un equipo de reducción catalítica selectiva (SCR) que, funcionando con amoníaco, reduzca las emisiones en Modo Diésel o Dual para cumplir las normativas pertinentes, específicamente las que se corresponden con el Tier III de la OMI
- Sistema de regulación y control: actualización a sistema UNIC, e instalación de software que permita el cambio y operación con cada combustible, el control de la alimentación, la inyección y la combustión, el pilotaje de los “swirlers”, la operación del SCR y el funcionamiento de las seguridades.
- Sustitución de materiales: reemplazo de piezas fabricadas en cobre, aluminio, plásticos, teflón, titanio, níquel, zinc y cromo que vayan a estar en contacto con el NH_3 por otras fabricadas en materiales compatibles con esta sustancia.

2.6.3. Resultados esperados

Mediante la utilización de esta tecnología, se prevé que, en Modo Dual, estos motores reduzcan enormemente sus emisiones nocivas, permitiendo así que por su escape tan solo se expulsen vapor de agua, nitrógeno gas, y pequeñas cantidades de óxidos de nitrógeno o NO_x (los que el SCR no sea capaz de captar y eliminar) y óxidos de azufre o SO_x (derivados de la combustión de la sustancia piloto, en este caso combustible diésel). Además, a causa de este consumo de combustible piloto, también es probable que surjan ínfimas cantidades de las emisiones inherentes a un motor convencional: Hidrocarburos no quemados, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), micropartículas de hollín (PM) o ciertos aldehídos (como el benceno o el formaldehído). Sin embargo, se espera que la mejora sea sustancial respecto a los ya mencionados motores convencionales, gracias al uso de un buen sistema de reducción catalítica selectiva y a un perfecto control electrónico de la inyección y combustión.

En cuanto al desgaste en los materiales, es probable que se produzca en mayor medida que en un equipo convencional debido a la naturaleza corrosiva del amoníaco, pese a la sustitución de los elementos a los que más afecta en muchas piezas del motor. Se puede esperar también una reducción de potencia del equipo funcionando en Modo Dual, a causa de la menor densidad energética que este presenta respecto al combustible diésel (y otros hidrocarburos) y la relativa inmadurez de esta tecnología, sumado a que el

diseño base del motor está optimizado para el consumo de combustibles fósiles y no para el NH_3 .

2.6.4. Análisis desde el punto de vista económico

Si bien no podemos estimar de forma precisa el coste de implantación y operación de esta tecnología, debido a su inmadurez y al secretismo que rodea a las pocas iniciativas reales de desarrollo, sí se puede realizar una afirmación: la adaptación al amoníaco no es económicamente rentable en la actualidad. El alto coste de producción, almacenamiento y adaptación de propulsores a su consumo no permiten que sea competitivo frente a los hidrocarburos.

Sin embargo, el interés que suscita este combustible surge de las previsiones a futuro en cuanto a la reducción de emisiones, ya que presenta un coste menor adaptar unidades ya existentes a remotorizar los buques en activo, o a sustituir sus equipos de propulsión por otros con distinto principio de funcionamiento (por ejemplo, las pilas de combustible), con la complicación técnica y económica que entraña debido a todas las desventajas de estos frente a los motores de combustión interna.

Además, es lógico que las empresas más avanzadas tecnológicamente busquen anticiparse a las nuevas normativas y preparar una hoja de ruta para cumplir sus objetivos sin tener que renovar sus flotas por completo.

3. CONCLUSIONES

En la actualidad, se hace patente la necesidad de un cambio en cuanto a los combustibles que consumimos, especialmente en el sector marítimo, pues recordemos que este genera una gran parte de las emisiones de sustancias nocivas a nivel mundial. El amoníaco, por su capacidad de ser producido de forma sostenible, las bajas emisiones de sustancias contaminantes, la alta densidad energética frente a la de sus competidores y sus relativas estabilidad y seguridad en lo tocante al manejo, almacenamiento y adaptación de equipos, se perfila como la solución que necesitamos para dar el primer paso hacia una transición energética total.

Siguiendo los objetivos marcados al inicio de este Trabajo de Fin de Grado, se han resuelto las cuestiones planteadas en un principio: el NH_3 es una alternativa perfectamente viable a la hora de adaptar propulsores existentes a nuevos combustibles más respetuosos con el medio ambiente, desde el punto de vista técnico. Se analizan sus características, desventajas y combustión, se repasa la historia de esta sustancia como combustible, ya utilizado en el pasado, se detallan las iniciativas al respecto que están en marcha actualmente y se plantean, en líneas generales, las modificaciones a realizar para el retrofit de un motor y un buque existentes a su consumo. Pese a esto, el autor es consciente de que su aproximación a este estudio de caso mediante una arquitectura HPDF no es la más viable en cuanto a un retrofit, más fácilmente realizable con un sistema LPDF. Se ha buscado aplicar la información existente sobre estos sistemas y la adaptación de motores a amoníaco para proyectar, en líneas generales, los cambios y modificaciones que requeriría dicha operación.

Sin embargo, y pese a la ausencia de mucha información al respecto, se concluye que, aunque técnicamente viable, no es una alternativa económicamente rentable en la actualidad debido al alto coste de conversión de los propulsores y de producción, transporte y almacenamiento del amoníaco. Esta condición solo se alcanzará con el futuro endurecimiento de las normativas en cuanto a emisiones de la Organización Marítima Internacional, cuando tan solo los buques equipados con este combustible o tecnologías similares puedan navegar en las determinadas zonas limitadas por dichas normativas. Así, la adaptación que vamos a ver en los años venideros de equipos a esta tecnología no vendrá por motivos económicos inmediatos, sino por la anticipación a las

normativas mencionadas anteriormente, sin necesidad de adquirir nuevos motores y/o buques.

BIBLIOGRAFÍA

- Bahtić, F. (2021). MOL to order ammonia-fueled engine for ships. *Offshore Energy*.
- Bartels, J. R. (2008). *A feasibility study of implementing an Ammonia Economy*. Ames: Iowa State University.
- Brinks, H. (2022). *Smells like sustainability: Harnessing ammonia as ship fuel*. Obtenido de Maritime Impact.
- Chai, W. S., Bao, Y., Pengfei, J., Tang, G., & Zhou, L. (Mayo de 2021). A review on ammonia, ammonia-hydrogen and ammonia-methane fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Dias, V., Pochet, M., Contino, F., & Jeanmart, H. (2020). Energy and economic costs of chemical storage. *Engine and Automotive Engineering*.
- DieselNet. (2022). *IMO Marine Engine Regulations*. Obtenido de DieselNet Web Site.
- Erdemir, D., & Dincer, I. (2020). A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: Challenges and solutions. *International Journal of Energy Research*.
- gCaptain. (6 de Noviembre de 2012). *Wärtsilä Wins Kuwaiti Order for Over Two Dozen Marine Engines: gCaptain*. Recuperado el 2022, de gCaptain Web site: <https://gcaptain.com/wartsila-wins-kuwaiti-order/>
- Gray, J. T., Dimitroff, E., Meckel, N. T., & Quillian, R. J. (1967). *Ammonia Fuel - Engine compatibility and combustion*. US Army Fuels and Lubricants Research Laboratory - Southwest Research Institute.
- Guojin, C., Miaofen, Z., Zhongmin, L., Tingting, L., Shaohui, S., & Yijiang, C. (2014). Study on Air Intake and Cooling System for Marine Diesel Engine. *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*.

- Ichikawa, A., Hayakawa, A., Kitagawa, Y., Somarathne, K. K., Kudo, T., & Kobayashi, H. (2015). Laminar burning velocity and Markstein length of ammonia/hydrogen/air premixed flames at elevated pressures. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Jeerh, G., Zhang, M., & Tao, S. (Noviembre de 2020). Recent progress in ammonia fuel cells and their potential applications. *Journal of Materials Chemistry A*.
- Jiménez, I., Centeno, M., Scotti, R., Morazzoni, F., Arbiol, J., Cornet, A., & Morante, J. (2004). NH₃ interaction with chromium-doped WO₃ nanocrystalline powders for gas sensing applications. *Journal of Materials Chemistry*.
- Kroch, E. (1945). Ammonia – a fuel for motor buses.
- Kurien, C., & Mittal, M. (2021). Review on the production and utilization of green ammonia as an alternate fuel in dual-fuel compression ignition engines. *Energy Conversion and Management*.
- Laursen, R. S. (2018). *Ship Operation Using LPG and Ammonia as Fuel on MAN B&W Dual Fuel ME-LGIP engines*. MAN Energy Solutions.
- Li, T., Zhou, X., Wang, N., Wang, X., Chen, R., Li, S., & Yi, P. (2022). A comparison between low- and high-pressure injection dual-fuel modes of diesel-pilot-ignition ammonia combustion engines. *Journal of the Energy Institute*.
- Lindstrand, N. (2021). *Unlocking ammonia's potential for shipping: MAN Energy Solutions*. Recuperado el 2022, de MAN Energy Solutions: <https://www.man-es.com/discover/two-stroke-ammonia-engine#:~:text=Green%20ammonia%20is%20among%20several,existing%20maritime%20vessels%20by%202025>
- MAN Energy Solutions. (2020). *MAN B&W two-stroke engine operating on ammonia*. Copenhagen.
- MAN Energy Solutions. (2021). *Industry Consortium to Develop Medium-Speed, Ammonia-Fuelled Engine*. Copenhagen.

- Marcos, F. (Marzo de 2022). *MAN B&W Ammonia Engine: MAN Energy Solutions*. Obtenido de Ingenierosnavales.com: <https://ingenierosnavales.com/wp-content/uploads/2022/03/MAN-Energy-Solutions-Fernando-Marcos-1.pdf>
- Pearsal, T. J., & Garabedian, C. G. (1968). *Combustion of anhydrous ammonia in diesel engines*. SAE International.
- Reiter, A. J., & Kong, S.-C. (2011). Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel. *Fuel*(90).
- Ryste, J. A. (2019). *Comparison of Alternative Marine Fuels*. DNV GL, Environment Advisory, Høvik, Norway.
- Starkman, E., Newhall, H., Sutton, R., Maguire, T., & Farbar, L. (1966). *Ammonia as a spark ignition engine fuel: theory and application*. Berkeley, California: SAE International.
- Thomas, G., & Parks, G. (2006). *Potential Roles of Ammonia in a Hydrogen Economy*. United States Government, U.S. Department of Energy.
- Tornatore, C., Marchitto, L., Sabia, P., & De Joannon, M. (22 de Julio de 2022). Ammonia as Green Fuel in Internal Combustion Engines: State-of-the-Art and Future Perspectives. (E. G. Giakoumis, Ed.) *Engine and Automotive Engineering*.
- Vessel Performance Optimisation (VPO). (2020). Ammonia fuel cells for deep-sea shipping. *Vessel Performance Optimisation (VPO)*.
- Wärtsilä Corporation. (Septiembre de 2021). *Wärtsilä and SHI agree to collaborate on ammonia fuelled engines for future newbuilds*. Obtenido de Wärtsilä Corporation.
- Wärtsilä Corporation. (Julio de 2021). *Wärtsilä launches major test programme towards carbon-free solutions with hydrogen and ammonia*. Recuperado el 2022, de Wärtsilä Corporation Web site.
- Wärtsilä Corporation. (Abril de 2022). *Wärtsilä coordinates EU funded project to accelerate ammonia engine development*. Recuperado el 2022, de Wärtsilä Corporation Web site: <https://www.wartsila.com/media/news/05-04-2022->

wartsila-coordinates-eu-funded-project-to-accelerate-ammonia-engine-development-3079950

Wärtsilä Finland OY. (2018). *Wärtsilä 26 Product Guide*. Vaasa: Wärtsilä Finland OY.

Wärtsilä Marine Solutions. (2017). *Wärtsilä UNIC Engine Control System Overview*. Vaasa.

DEFINICIONES Y ABREVIATURAS

- Al_2O_3 : Óxido de aluminio.
- CH_4 : Metano.
- CO : Monóxido de carbono.
- CO_2 : Dióxido de Carbono.
- H_2 : Hidrógeno.
- H_2O : Agua.
- N_2 : Nitrógeno.
- N_2O : Óxido nitroso.
- NH_3 : Amoníaco.
- NO_x : Óxidos de nitrógeno.
- SO_x : Óxidos de azufre.
- ACC: Ammonia Catch System, sistema de captación de amoníaco.
- AHTS: Anchor-Handling Tug Supply, buque anclero y de suministro.
- AMFC: Alkaline Membrane Fuel Cell, pila de combustible alcalina basada en membranas.
- ASU: Air Separator Unit, unidad separadora de aire.
- Boil-off: Gas evaporado que se desprende en los tanques de almacenamiento de gas licuado.
- Bypass: Derivación.
- Catalizador: Sustancia que interviene en la velocidad de una reacción química sin modificarla.
- CCM: Cylinder Control Module, módulo de control de cilindro.

- CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche, Consejo Nacional de Investigación de Italia.
- Coil: Serpentín.
- COM: Módulo de comunicación.
- Common-Rail: Raíl común de inyección.
- Cooler: Enfriador.
- COV/VOC: Compuestos orgánicos volátiles.
- CSOV: Construction Support Offshore Vessel, buque de soporte a la construcción mar adentro.
- DSV: Diving Support Vessel, buque de soporte a buzos.
- Dual Fuel: Combustible doble, utilización de dos combustibles simultáneamente en un motor de combustión interna.
- DWSS: Double Wall Safety System, sistema de seguridad de doble pared en las líneas.
- ECA: Emission Control Area, zona de emisiones controladas.
- EEDI: Índice de eficiencia de proyecto.
- EEOI: Indicador operacional de la eficiencia energética.
- ESM: Engine Safety Module, módulo de seguridad del motor.
- FSS: Sistema de suministro de fuel y recirculación.
- Fuel Rack: Cremallera de la bomba de inyección en un motor diésel.
- FVV: Tren de válvulas de combustible.
- Governor: Regulador, unidad de control de velocidad del motor.
- GT: Gross Tons, toneladas brutas de un buque.
- HE: Hydrogen-Embrittlement, fragilización de algunos materiales por acción del hidrógeno.
- HFO: Heavy Fuel Oil, fueloil o fuelóleo pesado.
- HPDF: High Pressure injection Dual Fuel, inyección a alta presión con combustible dual.
- HVO: Hydrotreated Vegetable Oil, combustible diésel de origen renovable.
- Hydrogen-carrier: Portador de hidrógeno.
- i-C₈H₁₈: Isooctano.
- ICE: Internal Combustion Engine, motor de combustión interna.

- IMO/OMI: International Maritime Organization/Organización Marítima Internacional.
- IOM: Input/Output Module, módulo de entrada/salida de señales.
- JDP: Joint Development Program, programa de desarrollo conjunto.
- LDU: Local Display Unit, unidad local de visualización o interfaz.
- LNG: Liquefied Natural Gas, gas natural licuado.
- LOP: Local Operator Panel, panel local para el operador.
- LPDF: Low Pressure injection Dual Fuel, inyección a baja presión con combustible dual
- LPG: Liquefied Petrol Gas, gas licuado de petróleo.
- MAG: Metal Active Gas, soldadura de metal por gas activo.
- MARPOL: International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques.
- MCI: Motor de combustión interna.
- ME-LGI: Tecnología MAN de inyección de gas líquido, Liquid Gas Injection.
- MGO: Marine Gas Oil.
- MIG: Metal Inert Gas, soldadura de metal por gas inerte.
- MOL: Mitsui O.S.K. Lines.
- MultiDuct: Conducto múltiple, sistema de admisión y escape donde ambos discurren por el mismo costado del motor.
- OSV: Offshore Supply Vessel, buque de suministro mar adentro.
- OTEC: Ocean Thermal Energy Conversion, energía térmica marina.
- PEM: Proton Exchange Membrane, membrana de intercambio de protones en un electrolizador.
- Pickling: Uso de decapantes en el proceso de soldadura.
- PM: Particulate Matter, partículas en suspensión.
- PMS: Piston Mean Speed o Punto Muerto Superior, dependiendo del contexto.
- Relief-Valve: Válvula de alivio.
- Retrofit: Reacondicionado.
- RPM: Revoluciones por minuto.
- SCR: Selective Catalytic Reduction, reducción catalítica selectiva.

- Scrubber: Torre de lavado de gases, sistema de eliminación de ciertas sustancias de los gases de escape mediante este método. Normalmente, se utiliza este término para referirse a las torres de lavado para derivados de azufre.
- SEEMP: Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque.
- SHI: Samsung Heavy Industries.
- Shutdown: Parada de un motor, normalmente por alarmas o emergencias.
- Slip: Deslizamiento, paso de combustible sin quemar a los gases de escape.
- SNCV: Société Nationale des Chemins de Fer Vicinaux, compañía de transporte público belga.
- SOFC: Solid Oxide Fuel Cell, pila de combustible de óxido sólido.
- Strainer: Filtro.
- Swirler: Dispositivo consistente en una o más aletas móviles que otorgan turbulencia al aire de admisión en un motor de combustión interna.
- TDC: Top Dead Center, punto muerto superior.
- TUM: Technische Universität München, Universidad Técnica de Munich.
- UNIC: Wärtsilä Unified Control system.
- VLSFO: Very Low Sulphur Fuel Oil, fuelóleo de muy bajo contenido en azufre.
- VPO: Vessel Performance Optimisation.
- Wastegate: Válvula de descarga de un turbocompresor.
- WECS: Wärtsila Engine Control System.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2.5.1.1: Parámetros del motor HPDF utilizado	28
Tabla 2.2.5.2.1: Condiciones de operación en modo LPDF	30

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1.2.1.1: Límites de emisión de NO _x establecidos por el Anexo VI	13
Fig. 2.1.2.1.2: Límites de emisión de SO _x establecidos por el Anexo VI	13
Fig. 2.2.1.1.1: Ciclo Haber-Bosch básico	15
Fig. 2.2.1.1.2.1: Distintos métodos de producción de amoníaco.....	17
Fig. 2.2.2.1: Propiedades del amoníaco	19
Fig. 2.2.3.1: Comparativa de combustibles marinos fósiles, biológicos y renovables ...	22
Fig. 2.2.4.3.1: Comparación entre combustibles gaseosos.	27
Fig. 2.2.5.1.2: Diagrama esquemático de la inyección dual HPDF	29
Fig. 2.2.5.1.3: Evolución de la inyección y la combustión en las distintas configuraciones estudiadas.....	29
Fig. 2.2.5.2.2: Evolución de la inyección y la combustión en las distintas configuraciones estudiadas.....	31
Fig. 2.5.3.1: Comparativa de emisiones entre los modos diésel, HPDF y LPDF.....	32
Fig. 2.3.1.1: Fotografía de un autobús de la compañía equipado con el sistema Gazamo, tomada en 1943.....	35
Fig. 2.3.1.1.1: Diagrama básico del sistema Gazamo	37
Fig. 2.3.1.2.1: Esquema básico de la estación de repostaje de la S.N.C.F.V.....	38
Fig. 2.4.1.1: Técnicos de la casa Wärtsilä trabajando en un motor de 4 tiempos que consume amoníaco mezclado con combustibles promotores de llama	43

Fig. 2.4.2.1: Motor MAN de dos tiempos siendo trasladado al centro de investigación de MAN Energy Solutions en Copenhague para ser adaptado al consumo de amoníaco..	45
Fig. 2.4.2.2: Iniciativa AmmoniaMot, promovida por el Estado alemán.....	46
Fig. 2.5.1: Ubicación del sistema de propulsión mediante pila de amoníaco en la cubierta principal del OSV “Viking Energy”	48
Fig. 2.6.1.1: Motor Wärtsilä 6L26	50
Fig. 2.6.1.2: Configuraciones del W26.....	51
Fig. 2.6.2.1.1: Sistema de almacenamiento y suministro de NH ₃ a un motor MAN ME-LGI.....	54
Fig. 2.6.2.1.2: Propuesta de MAN para la captación de amoníaco y eliminación de sustancias derivadas del nitrógeno en las emisiones.....	56
Fig. 2.6.2.3.1: Instalación de un turbocompresor radial ABB de doble entrada en un motor Wärtsilä 6L26A.....	59
Fig. 2.6.2.4.1: Comparativa entre la operación diésel y el modo HPDF con amoníaco de un motor de prueba monocilíndrico, donde se observan las menores temperaturas del equipo utilizando NH ₃	61