

HACIA EL BUQUE DE ACTIVIDAD SOSTENIBLE:
REVISIÓN DE MEDIDAS DE REDUCCIÓN DE
EMISIONES ATMOSFÉRICAS Y ALTERNATIVAS AL
EMPLEO DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Javier Ramón Sánchez Girón

Proyecto final de carrera – Licenciatura en náutica y transporte marítimo

Facultat de Naútica de Barcelona

Universitat Politècnica de Catalunya

2012



Barcelona, Marzo 2012

Índice de contenido

Introducción.....	7
Capítulo 1 – Emisiones atmosféricas originadas por la actividad del transporte marítimo y su impacto medioambiental.....	9
1.1 Emisiones atmosféricas originadas por la actividad del transporte marítimo.....	9
1.2 Impacto ambiental de las emisiones atmosféricas generadas por la actividad del transporte marítimo.....	12
1.2.1 Impacto atmosférico.....	12
Efecto directo	12
Efecto indirecto.....	13
1.2.2 Impacto en la calidad del aire.....	17
Impacto en la salud humana.....	17
Impacto en los ecosistemas naturales; acidificación y eutrofización.....	19
Contaminación por ozono troposférico.....	20
1.3 Futuras emisiones atmosféricas derivadas de la actividad del comercio marítimo internacional.....	22
1.4 Previsión del agotamiento del petróleo.....	28
1.4.1 Consumo actual y previsible de la flota mercante mundial.....	28
1.4.2 Agotamiento del petróleo.....	30
Capítulo 2 - Combustibles alternativos al diesel y fuel marino; aprovechamiento en motores y turbinas adaptadas a su empleo.....	33
2.1 Combustible nuclear: Reactor modular de helio – turbina de gas (GT-MHR).....	33
2.1.1 La propulsión nuclear en la marina mercante.....	33
2.1.2 Reactores nucleares de Generación IV.....	36
2.1.3 El reactor modular de helio – turbinas de gas (GT-MHR).....	37
2.1.4 Descripción de la planta.....	38
2.1.4.1 Elementos de la vasija del reactor.....	39
2.1.4.2 Elementos de la vasija de conversión de potencia.....	42
2.1.5 Funcionamiento de un reactor modular de helio acoplado a una turbina de gas.....	44
2.1.6 Seguridad del reactor.....	46
2.1.7 Resistencia del reactor a la proliferación nuclear, terrorismo y piratería.....	49
2.1.8 Impacto medioambiental de un reactor GT-MHR.....	50
2.1.8.1 Emisiones atmosféricas y residuos nucleares generados por un GT-MHR.....	50
2.1.9 Estado de la técnica.....	52
2.2 Aprovechamiento de hidrógeno en turbinas de gas aeroderivadas.....	53
2.2.1 Historia del empleo de hidrógeno en turbinas de gas.....	53
2.2.2 Propiedades del hidrógeno como combustible.....	54
2.2.3 Ciclos de combustión del hidrógeno.....	57
Ciclo de combustión de hidrógeno y oxígeno (H ₂ /O ₂).....	57
Ciclo de combustión de hidrógeno y aire.....	59
2.2.4 Adecuación tecnológica de los ciclos de combustión a la marina mercante.....	60
2.2.4.1 Infraestructura requerida para el aprovechamiento de LH ₂	62

Sistema de almacenamiento.....	62
Sistema de utilización.....	64
2.2.4.2 Aspectos relativos a la seguridad.....	66
2.2.5 Impacto ambiental del aprovechamiento de hidrógeno en turbinas de gas.....	70
2.2.5.1 Impacto directo: emisiones generadas durante la combustión del hidrógeno en una turbina de gas.....	70
2.2.5.2 Impacto indirecto: Producción de hidrógeno.....	71
2.2.6 Regulación actual.....	76
2.3 Aprovechamiento de gas natural como combustible en turbinas de gas y motores de combustión interna.....	78
2.3.1 Propiedades del gas natural.....	78
2.3.2 Aprovechamiento de gas natural.....	80
2.3.2.1 Motores duales.....	80
2.3.2.2 Motores de gas.....	82
2.3.2.3 Turbinas de gas aeroderivadas.....	84
2.3.2.4 Infraestructura requerida para el aprovechamiento de LNG.....	84
Sistema de almacenamiento.....	84
Sistema de manejo.....	85
2.3.2.5 Aspectos relativos a la seguridad.....	86
2.3.3 Producción, disponibilidad y mercado del gas natural	87
2.3.4 Impacto ambiental del aprovechamiento del gas natural como combustible.....	89
2.3.5 Estado de la técnica.....	90
2.4 Medios alternativos de aprovechamiento del hidrógeno y gas natural: Pilas de combustible y turbina vorticial Jirnov.....	91
Aprovechamiento de gas natural e hidrógeno en pilas de combustible.....	91
2.4.1 Introducción.....	91
2.4.2 Tipos de pilas de combustible y su adecuación a la marina mercante.....	92
2.4.2.1 PEMFC.....	92
2.4.2.2 SOFC.....	93
2.4.2.3 MCFC.....	94
2.4.2.4 Combustible de las pilas.....	97
2.4.2.5 Comparación entre pilas de combustible, motores diésel y turbinas de gas.....	97
Eficiencia térmica y consumo de combustible.....	97
Emisiones atmosféricas.....	100
Densidad energética por unidad de peso y volumen.....	102
2.4.3 Estado de la técnica.....	104
Aprovechamiento del gas natural o hidrógeno en una turbina de ciclo avanzado: Turbina vorticial Jirnov.....	105
2.4.4 Introducción.....	105
2.4.5 Funcionamiento de una TVJ.....	106
2.4.6 Elementos de una TVJ.....	107
2.4.7 Ventajas de una TVJ.....	110
2.5 Aprovechamiento de biodiésel.....	111

2.5.1	Introducción e historia del biodiésel.....	111
2.5.2	Propiedades del biodiésel.....	114
2.5.3	Producción de biodiésel, almacenamiento, manipulación y distribución:.....	117
	Producción a partir de plantas.....	117
	Producción a partir de algas.....	119
	Producción mundial de biodiésel	121
2.5.4	Emisiones atmosféricas derivadas de la combustión de biodiésel en motores alternativos de combustión interna.....	124
	Emisiones de CO ₂	124
	Emisiones de SO _x , NO _x , PM, CO, HC, PAH, nPAH'S e hidrocarburos.....	124
2.5.6	Estado del arte: empleo de biodiésel a bordo de buques mercantes.....	126
Capítulo 3 – Aprovechamiento de energías renovables.....		127
3.1	Aprovechamiento de la energía solar	127
3.1.1	Introducción.....	127
3.1.2	Aplicación de la energía solar en la marina mercante.....	129
3.1.3	Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la energía solar.....	130
3.1.4	Estado del arte.....	131
3.2	Aprovechamiento del viento.....	135
3.2.1	Introducción.....	135
3.2.2	Cometa tractora/SkySail.....	136
	3.2.2.1 Componentes de un dispositivo de cometa tractora.....	136
	3.2.2.2 Operatividad y seguridad.....	140
	Condiciones de operatividad y clasificación.....	140
	Sistema de seguridad.....	141
	3.2.2.3 Ventajas del dispositivo SkySail.....	141
	3.2.2.4 Desventajas del dispositivo SkySail.....	144
3.2.3	Rotor flettner.....	145
	3.2.3.1 Historia del rotor flettner y su empleo en la marina mercante.....	145
	3.2.3.2 El efecto Magnus y el funcionamiento del rotor flettner.....	147
	3.2.3.3 Recuperación del rotor Flettner, empleo en la actualidad.....	149
	3.2.3.4 Ventajas y desventajas de los rotores Flettner.....	151
3.2.4	Velas rígidas.....	152
	3.2.4.1 Estado del arte.....	157
3.3	Aprovechamiento de la energía undeomotriz.....	159
	3.3.1 Introducción.....	159
	3.3.2 Descripción de medios de aprovechamiento de las olas.....	159
Capítulo 4 - Propulsores.....		165
4.1	Propulsión eléctrica y motores marinos superconductores.....	165
4.1.1	Introducción.....	165
4.1.2	Introducción a los motores eléctricos superconductores.....	167
4.1.3	Estado de la técnica – Prototipos de motores superconductores para buques.....	169
	4.1.3.1 Motor superconductor de 5 MW y 36 MW.....	169
	4.1.3.2 Motor de superconductor de imanes permanentes de 400 kW montado en	

propulsor azimutal.....	171
4.1.4 Ventajas de los motores superconductores.....	172
4.2 Propulsor magneto-hidrodinámico.....	174
4.2.1 Introducción.....	174
4.2.2 Principios físicos básicos del funcionamiento de un propulsor MHD.....	176
4.2.3 Funcionamiento y tipos de propulsores MHD.....	179
4.2.4 Rendimiento de un propulsor MHD.....	181
4.2.5 Ventajas y desventajas de los propulsores MHD:.....	187
4.3 Hélices CLT.....	189
4.3.1 Introducción y descripción.....	189
4.3.2 Ventajas y desventajas del empleo de hélices CLT.....	190
4.3.3 Estado de la técnica.....	191
4.4 Hélices contra-rotativas en dispositivo azimutal	195
4.4.1 Introducción y descripción.....	195
4.4.2 Ventajas y desventajas de las hélices contra-rotativas en dispositivo azimutal.....	199
4.4.3 Estado de la técnica.....	204
4.5 Otros propulsores.....	206
4.5.1 Hélice de paletas de Grim (Grim Vane Wheel).....	206
4.5.2 Wale tail wheel®.....	207
4.5.3 Propulsores oscilatorios/ondulantes.....	210
4.5.4 Eyector de onda de choque/ Pursuit Marine Drive®.....	212
Capítulo 5 - Mejoras estructurales.....	214
5.1 Lubricación con aire.....	214
5.2 Optimización de la forma y dimensiones del buque.....	217
5.2.1 Optimización de las líneas del casco.....	217
5.2.2 Optimización de las formas de proa (bulbo).....	217
5.2.3 Optimización de las formas de popa.....	217
5.2.4 Adecuación de la situación de la línea de ejes.....	220
5.3 Empleo de materiales más ligeros.....	221
5.4 Reducción del incremento de resistencia debido a aberturas practicadas en el casco.....	221
Capítulo 6 - Sistemas auxiliares y complementarios.....	223
6.1 Sistema de recuperación de calor residual.....	223
6.2 Torre de lavado.....	223
6.3 Sistema de recirculación de los gases de escape.....	224
6.4 Sistema de agua en combustible.....	226
Capítulo 7 – Valoración económica.....	227
7.1 Metodología.....	227
7.2 Valoraciones económicas, análisis de cálculos MAC y comentarios.....	236
7.2.1 Aprovechamiento de combustible nuclear en un reactor modular de helio con turbina de gas.....	236
7.2.2 Aprovechamiento de hidrógeno en turbinas de gas.....	237
7.2.3 Aprovechamiento de LNG en motores de combustión interna	239
7.2.4 Aprovechamiento de gas natural e hidrógeno en pilas de combustible.....	240

7.2.5 Aprovechamiento de biodiésel en motores de combustión interna.....	241
7.2.6 Cometa tractora.....	241
7.2.7 Paneles solares.....	243
7.2.8 Lubricación con aire.....	244
7.2.9 Optimización de las aberturas practicadas en el casco.....	245
7.2.10 Aprovechamiento del calor de los gases de escape.....	245
Capítulo 8 - Revisión de la regulación actual de emisiones atmosféricas.....	247
Capítulo 9 - Ventajas y desventajas de las alternativas estudiadas.....	251
Conclusiones.....	261
Bibliografía.....	268
Citas.....	268
Publicaciones consultadas.....	273
Páginas web.....	275
ANEXO I – GESTIÓN DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD.....	276
I.I Esquema general de la gestión de los residuos nucleares de alta actividad y explicación de sus pasos.....	277
I.I.I Almacenamiento temporal de combustible gastado.....	277
I.I.II Ciclos de tratamiento.....	282
I.I.III Almacenamiento final de combustible gastado y residuos de alta actividad.....	283
I.I.IV Reutilización del combustible.....	287
ANEXO II – TABLAS DE COSTES Y POTENCIAL REDUCTOR, CONSUMO Y PRECIOS DEL COMBUSTIBLE Y VALORACIONES ECONÓMICAS.....	289
II.I Tablas de costes y potencial reductor de los distintos medios de reducción de emisiones atmosféricas.....	289
II.II Tablas de consumo y precios de combustible.....	289
II.III Cálculos MAC.....	289



Introducción

El objetivo del presente proyecto no es otro que el de la realización y divulgación de una revisión de toda medida o alternativa técnica potencialmente capaz de reducir el consumo de combustible de un buque o sustituirlo en su totalidad, logrando de este modo una disminución en las emisiones atmosféricas originadas en su actividad y un menor o incluso nulo consumo de combustibles fósiles; factores determinantes en la consecución del cumplimiento de criterios de sostenibilidad ecológica. La importancia del desarrollo, publicidad y fomento de estas medidas y alternativas capaces de reducir el consumo de combustibles fósiles radica, por tanto, no solo en el agotamiento de las reservas mundiales de los mismos, si no en la necesidad de mantener la integridad del ecosistema terrestre mediante la promulgación de un modo de transporte marítimo comprometido con el medio ambiente.

Para la satisfacción del mencionado objetivo, el presente trabajo ofrece en primer término, un análisis sobre la cantidad e impacto de las emisiones atmosféricas, presentes y futuras, originadas en la actividad de la marina mercante; así como una cuantificación del consumo de combustible de la flota mundial. El propósito de este primer apartado es el de justificar la posterior revisión de medidas y alternativas técnicas mediante la exposición del impacto medioambiental causado por la flota mercante mundial en su actividad.

En segundo término se analizan de forma detallada los aspectos técnicos de aquellos combustibles alternativos al fuel y diésel marino, sus sistemas de aprovechamiento, dispositivos de aprovechamiento de energías renovables, propulsores distintos a los convencionales, mejoras estructurales del casco del buque y sistemas auxiliares o complementarios para las plantas propulsoras convencionales.

En tercer término se realiza una valoración económica de los dispositivos de aprovechamiento de energía renovables, propulsores, mejoras estructurales y sistemas auxiliares o complementarios mediante las directrices proporcionadas y recomendadas

por la OMI. Para la valoración económica de los combustibles y sus sistemas de aprovechamiento se propone un método basado en las directrices de la OMI, pero con ciertas modificaciones que lo adecuan a la valoración económica de estos.

En cuarto y último término se identifican, de forma resumida, las ventajas y desventajas de las medidas estudiadas, así como los factores límites en su aplicación.

Capítulo 1 – Emisiones atmosféricas originadas por la actividad del transporte marítimo y su impacto medioambiental

1.1 Emisiones atmosféricas originadas por la actividad del transporte marítimo

En esta sección se expone, de forma cuantificada, las distintas *emisiones atmosféricas contaminantes* originadas por la actividad del transporte marítimo. Resulta clave conocer estas cantidades para poder comprender el impacto que la actividad del transporte marítimo realiza en el medio ambiente; no obstante, es en la sección II del presente capítulo donde se presentará una visión más detallada del alcance de dicho impacto. Se hace por tanto imprescindible, en primer lugar, conocer el significado de emisiones atmosféricas: la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) contempla como *emisiones atmosféricas contaminantes* a cualquiera constituida por alguno de los siguientes compuestos, a saber; dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), fluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6); óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles sin metano (NMVOC), compuestos orgánicos volátiles (VOC), monóxido de carbono (CO), material en partículas (PM) y óxidos de azufre (So_x); las originadas por el transporte marítimo serán, por tanto, las que respondiendo a esta apreciación, son generadas fruto de una actividad de naturaleza comercial realizada por buques mercantes entre distintos países. En el contexto de transporte marítimo, dichas emisiones atmosféricas pueden clasificarse según su origen en los tres siguientes grandes grupos [1]:

- **Gases de escape:** Son aquellos emitidos por la maquinaria principal, las calderas y maquinaria de generación auxiliar. No se incluyen entre estos aquellos gases liberados en incineradores, ya que su cantidad no llega a ser tal cómo para considerarse relevante.
- **Gases derivados del transporte de crudo:** Son aquellos gases y compuestos orgánicos volátiles emitidos durante las operaciones de transporte de crudo.

- **Gases derivados de la utilización de productos refrigerantes:** Son aquellos emitidos en la operación y mantenimiento de equipos refrigerantes y de aire acondicionado pertenecientes a cualquier tipo de buque, así como lo emitidos por los sistemas de frío de contenedores refrigerados.

Las respectivas emisiones atmosféricas asociadas a estos grupo, así como sus cantidades fruto de la actividad del transporte marítimo en el año 2007 pueden apreciarse emitidas en el año 2007 se muestran en la Tabla 1.

Compuesto	Gases de escape [MMTm]	Gases derivados del transporte de crudo [MMTm]	Gases derivados de la utilización de productos refrigerantes [MMTm]	Total [MMTm]
CO ₂	870			870
CH ₄	0,08	0,14		0,22
N ₂ O	0,02			0,02
HFC			0,004	0,0004
PFC				
SF ₆				
NO _x	20			20
NMVOG	0,7	2,3		3
CO	2			2
PM	1,5			1,5
SO _x	12			12

Tabla 1 – Emisiones atmosféricas originadas por la actividad del transporte marítimo en el año 2007 (Fuente: OMI; tabla elaborada por el autor)

Las emisiones de CO₂ derivadas de la actividad del transporte marítimo internacional suponen un 3,3% del total de emisiones de CO₂ a nivel mundial (Figura 1), siendo los gases de escape la principal fuente de emisión. Sin embargo, en comparación con las estimaciones de las emisiones atmosféricas producidas por el transporte por carretera y la

aviación, las emisiones del transporte marítimo más significativas resultan ser las de NO_x, SO₂ y PM10; todas con un valor muy próximo (o incluso mayor en el caso del SO₂) a las producidas por el transporte por carretera (Figura 2).

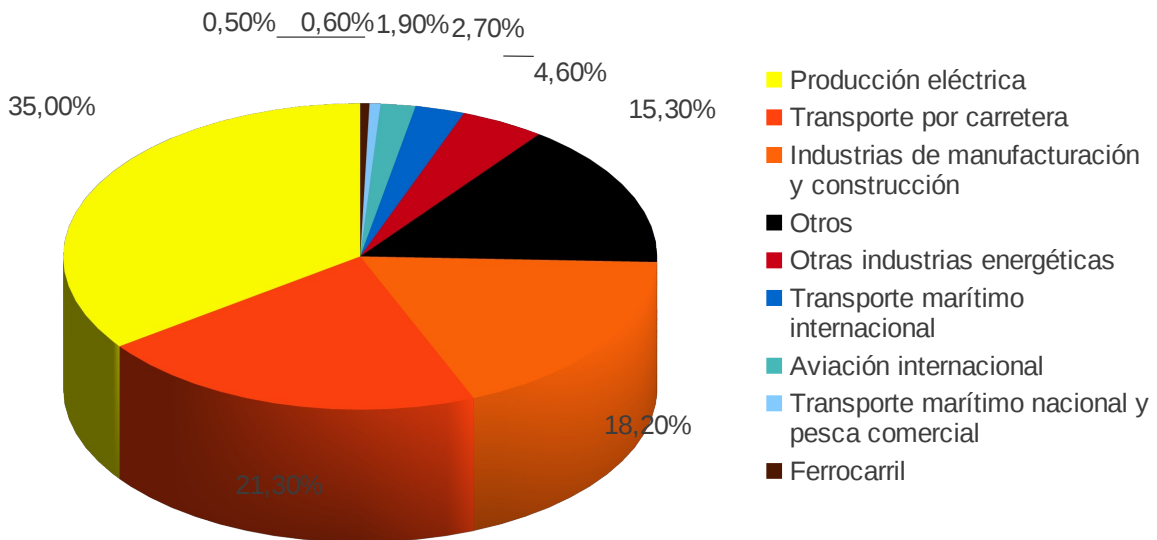


Figura 1 – Porcentaje de emisiones de CO₂ generadas en el año 2007 por los distintos sectores energéticos (Fuente: OMI; gráfico elaborado por el autor)

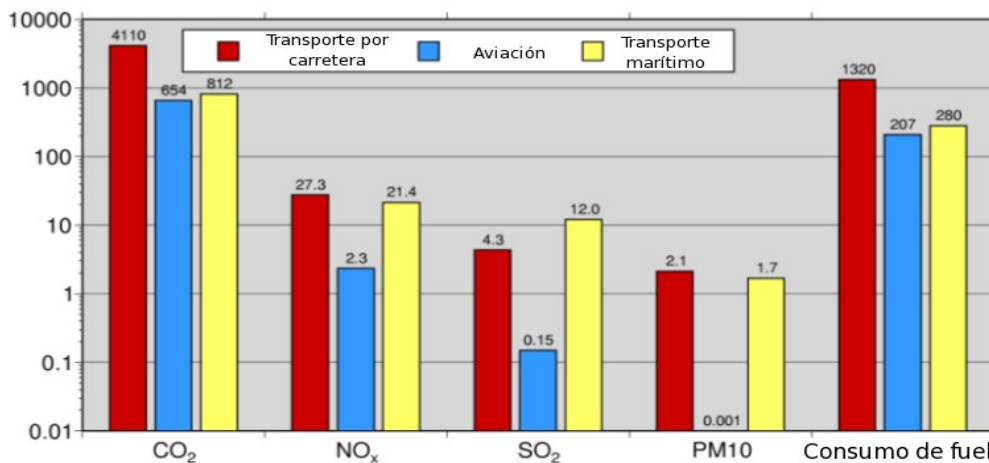


Figura 2 – Estimación en Tm de las emisiones atmosféricas producidas por la actividad de los tres principales medios de transporte en el año 2000 (Fuente: Eyring et al, 2007; gráfico adaptado por el autor)

1.2 Impacto ambiental de las emisiones atmosféricas generadas por la actividad del transporte marítimo

En este capítulo se exponen los daños, tanto de forma teórica como cuantificada, a los que se ve expuesto al medio ambiente como resultado de las emisiones atmosféricas generadas por la actividad del transporte marítimo.

1.2.1 Impacto atmosférico

Efecto directo

El efecto directo producido por las emisiones atmosféricas generadas por la actividad del transporte marítimo consiste en la alteración inmediata del efecto invernadero terrestre. Dicha alteración se cuantifica habitualmente en W/m^2 , expresión conocida como unidades de *forzante radiativo* (RF), las cuales indican el cambio producido en el balance energético de la atmósfera terrestre desde el periodo preindustrial; lo que se traduce, si el RF es positivo, en un aumento de la temperatura media del planeta o un descenso de la misma si el RF es negativo.

Los principales compuestos emitidos a la atmósfera por la actividad del transporte marítimo internacional capaces de alterar el efecto invernadero terrestre de forma inmediata son los siguientes:

- **CO₂**: Su RF es positivo, de modo que contribuye a un aumento de la temperatura media del planeta.
- **BC (carbono negro)**: Se produce por la combustión incompleta de combustibles derivados del petróleo. Su RF es positivo; contribuye a un aumento de la temperatura media del planeta.
- **SO_x**: Su RF es negativo; contribuye a un descenso de la temperatura media del planeta.

Efecto indirecto

Los efectos indirectos causados por las emisiones atmosféricas generadas por la actividad del transporte marítimo se producen cuando los integrantes de éstas reaccionan con otros ya existentes en la atmósfera. Dichos integrantes son los mencionados a continuación:

- PM (material en partículas):** El material en partículas es un producto resultado de la combustión de combustibles con contenido de azufre carbono, en motores de combustión interna, caldera y turbinas de gas. Está formado principalmente por sulfato, agua asociada con sulfuro y material orgánico (Figura 3). Da lugar a la formación de estelas capaces de modificar las propiedades de las nubes al actuar como núcleos de condensación o por disolverse entre ellas y alterar su tensión superficial. Esto contribuye a aumentar la propiedad reflectante de la nube, por lo que se refleja una mayor radiación solar hacia el espacio, aumentando así el albedo del planeta y por tanto el enfriamiento de la superficie terrestre. Su RF es negativo, de modo que contribuye a un descenso de la temperatura media del planeta.

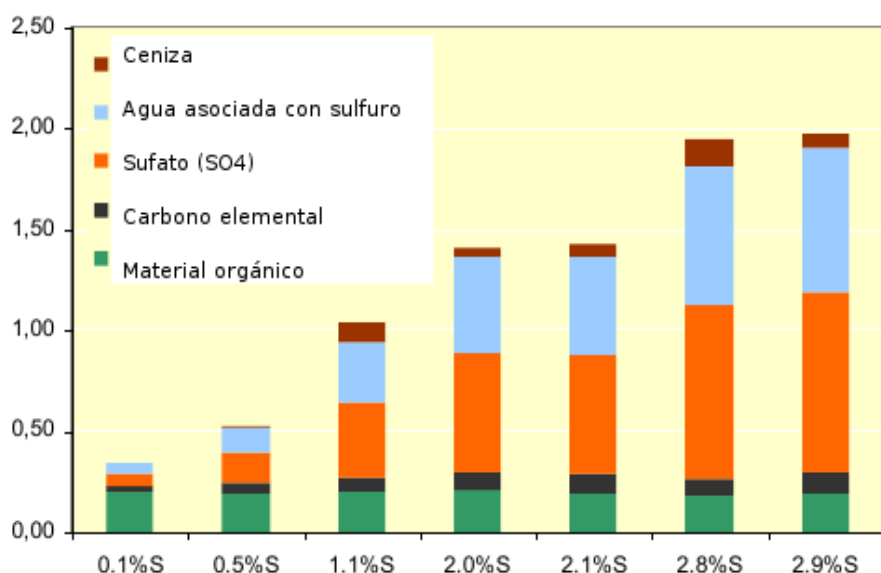


Figura 3 – Composición del material en partículas (g/kWh eje ord. - % de azufre de distintos combustibles eje de abscisas) (Fuente: OMI; gráfico adaptado por el autor)

- **NO_x**: Contribuye a aumentar la producción de ozono troposférico, lo que se traduce, al ser el RF de este último positivo, en un aumento de la temperatura media del planeta. También contribuye a reducir el CH₄ a través de la unión con radicales hidróxilos (OH), contribuyendo así al descenso de la temperatura media del planeta.
- **CO, VOC y CH₄**: Contribuyen a aumentar la producción de ozono troposférico, lo que conlleva un aumento de la temperatura media del planeta.

Las Figuras 4, 5 y 6 expuestas a continuación muestran los distintos RF correspondientes a las emisiones atmosféricas derivadas de la actividad del transporte marítimo mundial en el año 2007 así como su repercusión en la temperatura media del planeta, así como el efecto que tendrán estos mismos residuos en el año 2050 y 2100.

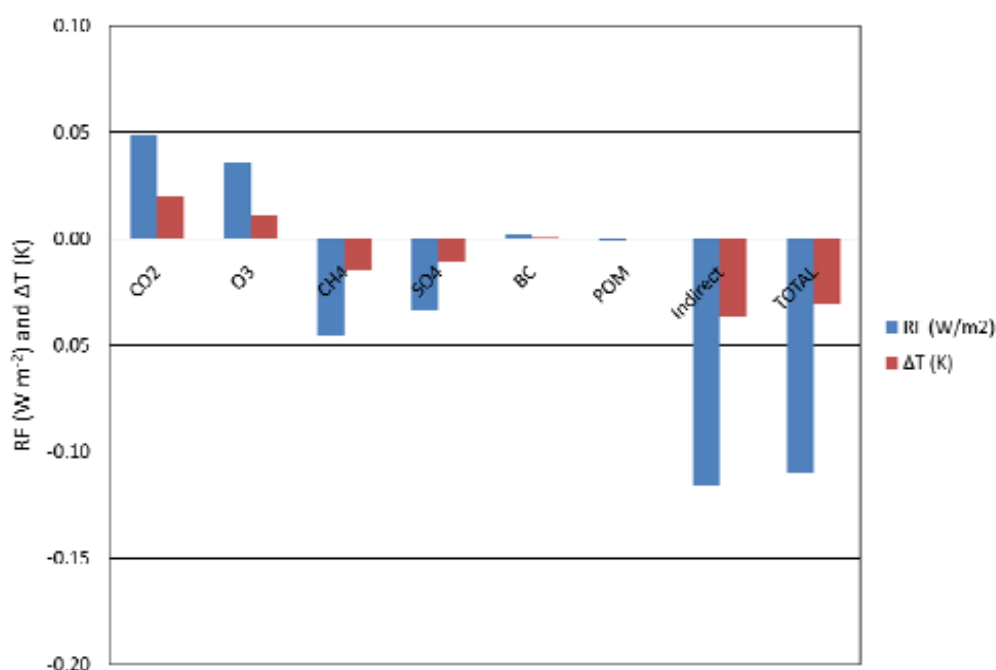


Figura 4 - RF correspondiente a los compuestos emitidos a la atmósfera por la flota mercante mundial en el año 2007 y su repercusión en la temperatura media del planeta el mismo año (Fuente: OMI)

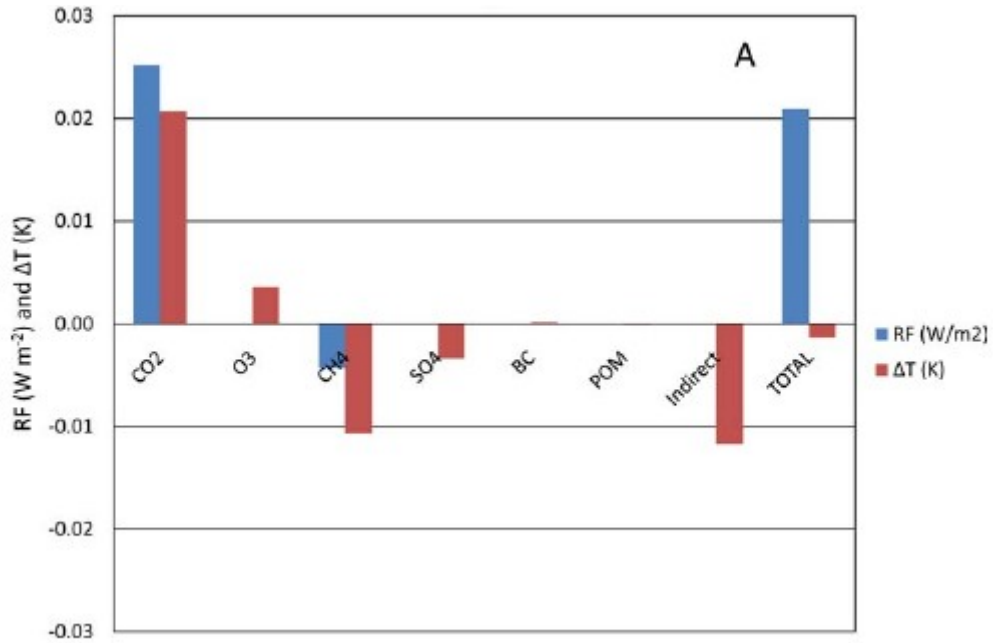


Figura 5 - RF residual correspondiente a los compuestos emitidos a la atmósfera por la flota mercante mundial en el año 2007 y su repercusión en la temperatura media del planeta en el año 2050 (Fuente: OMI)

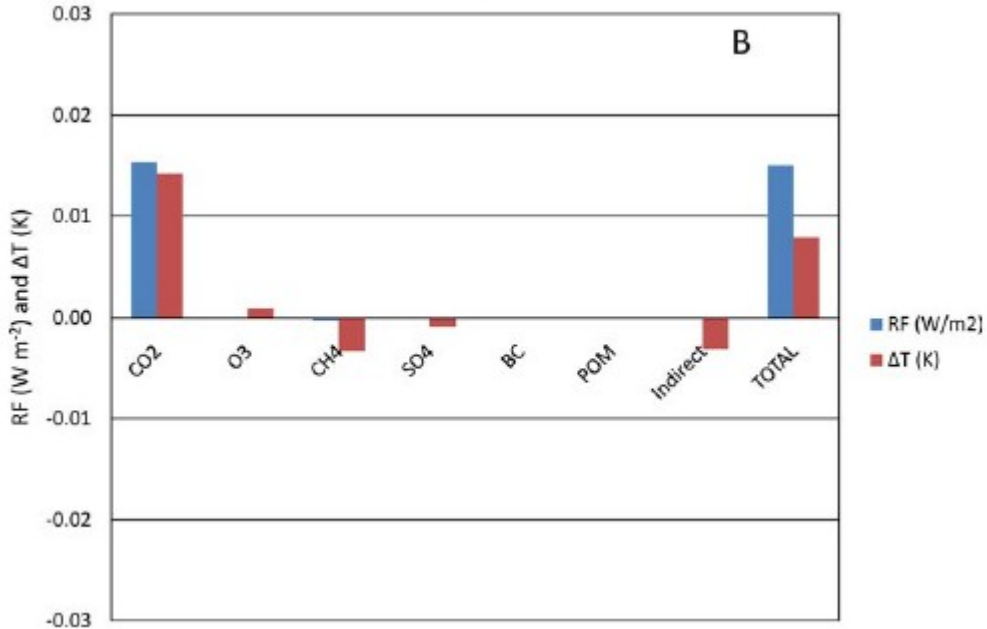


Figura 6 - RF residual correspondiente a los compuestos emitidos a la atmósfera por la flota mercante mundial en el año 2007 y su repercusión en la temperatura media del planeta en el año 2100 (Fuente: OMI)

Para el año 2050 puede observarse como el RF residual deja de ser negativo y se vuelve positivo, pero a pesar de ello, el efecto en la temperatura permanece negativo. Esto es debido a la longeva duración del efecto indirecto de las emisiones atmosféricas producidas en año 2007. Sin embargo, en el año 2100 el RF residual y la temperatura se vuelven positivas. Esto se debe a la desaparición del RF negativo correspondiente al CH₄ y al efecto indirecto así como a la persistencia del RF positivo del CO₂. Se deduce entonces, que las emisiones atmosféricas emitidas por la flota mercante mundial en el año 2007 contribuyen de manera significativa, pero a largo término, al aumento del efecto invernadero del planeta.

Ninguna de las figuras expuestas en la página anterior contemplan el efecto de interacción entre el carbono negro emitido por la flota mercante mundial y la nieve, ya que a día de hoy no existe estudio alguno que haya cuantificado dicho efecto [1]. Sin embargo, sí se ha demostrado que esta interacción contribuye a un aumento del RF producido por el carbono negro, pudiendo ser especialmente peligroso su contribución en el Ártico al aumento de temperaturas, ya que en dicho lugar del planeta que se está experimentando un brusco cambio climático causante de la fundición de sus hielos, y donde, debido a ello, se augura un aumento del tráfico marítimo en los próximos años.

1.2.2 Impacto en la calidad del aire

Impacto en la salud humana

Las emisiones atmosféricas derivadas de la actividad del transporte marítimo internacional contienen partículas de materia que son transportadas a regiones costeras urbanas afectando negativamente a la salud humana; causando enfermedades respiratorias tales como bronquitis, asma, neumonía, trastornos cardiorespiratorios y cáncer de pulmón. En concreto, estas dos últimas son las causantes de un importante número de muertes prematuras y están directamente asociadas a las concentraciones de partículas de materia de menos de 2.5 μm ($\text{PM}_{2,5}$).

En este apartado se muestra la cuantificación de estos fallecimientos prematuros asociados a $\text{PM}_{2,5}$, del estudio realizado por Corbett en el año 2007 [2]. En dicho estudio, son considerados tres inventarios distintos de emisiones (Tabla 2) y dos modelos atmosféricos, a partir de los cuales se calculan las concentraciones de $\text{PM}_{2,5}$ y su localización espacial en el planeta. A partir de estas concentraciones y el conocimiento del número de población expuesto a ella se cuantifica el número de fallecidos en un año. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Inventario/Año	A/2002	B/2001	C/2012
Publicación	Corbett et al; 2007	Eyring et al; 2005	Corbett et al; 2007
Fuente de datos	ICOADS	AMVER	ICOADS
Buques considerados	Buques de carga y pasaje	Flota mundial incluida su maquinaria auxiliar	Buques de carga y pasaje
NO_x	16,4	21,3	24,5
SO_x	9,2	11,7	13,7
SO₄	0,35	0,77	0,5
CO	1,08	1,28	1,61
BC	0,07	0,05	0,1
POM	0,71	0,13	1,06

Tabla 2 – Relación de inventarios de emisiones atmosféricas consideradas (Fuente: Corbett et al, 2007; tabla elaborada por el autor)

Caso	1a		1b		1c		2a		2b		3	
	A	GEOS-CHEM BC, POM, SO ₄	A	ES/MI-MADE BC, POM, SO ₄	A	ES/MI-MADE Todas	B	ES/MI-MADE BC, POM, SO ₄	B	ES/MI-MADE Todas	C	GEOS-CHEM BC, POM, SO ₄
Región	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América	Norte América
Fallecidos por enfermedades cardiopulmonares	1860 (680-350)	2820 (1020-4160)	4590 (1660-7510)	5470 (1980 - 8950)	7910 (2870 - 12940)	2770 (1010 - 4540)						
Fallecidos por cáncer de pulmón	210 (80-350)	320 (120-150)	520 (190-850)	620 (230 - 1020)	900 (330 - 1470)	320 (120 - 520)						
Total	2070 (760 - 3400)	3140 (1140 - 5130)	5110 (1850 - 8360)	6090 (2210 - 9970)	8810 (3200 - 14410)	3090 (1130 - 5060)						
Región	Europa/ Mediterráneo	Europa/ Mediterráneo	Europa/ Mediterráneo	Europa/ Mediterráneo	Europa/ Mediterráneo	Europa/ Mediterráneo						
Fallecidos por enfermedades cardiopulmonares	6770 (2450 - 11070)	11830 (4290 - 19350)	24350 (8840 - 39810)	7250 (2630 - 11860)	15100 (5480 - 24690)	8990 (3260 - 14700)						
Fallecidos por cáncer de pulmón	670 (250 - 1090)	1100 (410 - 1800)	2360 (870 - 3840)	650 (240 - 1060)	1430 (530 - 2320)	880 (330 - 1440)						
Total	7440 (2700 - 12160)	12390 (4700 - 21150)	26710 (9710 - 43650)	7900 (2870 - 12920)	16530 (6010 - 27010)	9870 (3590 - 16140)						
Región	Sur Asia	Sur Asia	Sur Asia	Sur Asia	Sur Asia	Sur Asia						
Fallecidos por enfermedades cardiopulmonares	4050 (1470 - 6630)	7250 (2630 - 11870)	9440 (3420 - 15450)	11240 (4080 - 18390)	15460 (5610 - 25260)	6090 (2210 - 9970)						
Fallecidos por cáncer de pulmón	230 (90 - 380)	390 (150 - 640)	510 (190 - 830)	600 (220 - 970)	820 (300 - 1340)	350 (130 - 570)						
Total	4280 (1560 - 7010)	7640 (2780 - 12510)	9950 (3610 - 16280)	11840 (4300 - 19360)	16280 (5910 - 26600)	6440 (2430 - 10540)						
Región	Este Asiático	Este Asiático	Este Asiático	Este Asiático	Este Asiático	Este Asiático						
Fallecidos por enfermedades cardiopulmonares	3490 (1270 - 5710)	11970 (4340 - 19590)	17920 (6500 - 29900)	9640 (3500 - 15780)	13800 (5010 - 22570)	5170 (1880 - 8460)						
Fallecidos por cáncer de pulmón	370 (140 - 610)	1300 (480 - 2110)	1950 (720 - 3170)	1030 (380 - 1680)	1480 (550 - 2410)	550 (200 - 900)						
Total	3860 (1410 - 6320)	13270 (4820 - 21700)	19870 (7220 - 32470)	10670 (3880 - 17460)	15280 (5560 - 24980)	5720 (2080 - 9360)						
Región	Este de Sur América	Este de Sur América	Este de Sur América	Este de Sur América	Este de Sur América	Este de Sur América						
Fallecidos por enfermedades cardiopulmonares	380 (140 - 620)	520 (190 - 850)	690 (250 - 1130)	1120 (410 - 1840)	1540 (560 - 2520)	570 (210 - 930)						
Fallecidos por cáncer de pulmón	50 (20 - 90)	70 (30 - 120)	100 (40 - 160)	160 (60 - 260)	220 (80 - 350)	80 (30 - 130)						
Total	430 (160 - 710)	590 (220 - 970)	790 (290 - 1290)	1280 (470 - 2100)	1760 (640 - 2870)	650 (240 - 1060)						
Global	Global	Global	Global	Global	Global	Global						
Fallecidos por enfermedades cardiopulmonares (total)	17340 (6290 - 28390)	35610 (12910 - 58260)	58640 (21270 - 95900)	39970 (13410 - 60490)	56790 (20600 - 92870)	24780 (8980 - 40540)						
Fallecidos por cáncer de pulmón (total)	1580 (580 - 2570)	3260 (1200 - 5310)	5540 (2050 - 9020)	3220 (1190 - 5240)	5050 (1870 - 8230)	2240 (830 - 3650)						
Total	18920 (6870 - 30960)	38870 (14110 - 63570)	64180 (23320 - 104920)	40190 (14600 - 65730)	61840 (22470 - 101100)	27020 (9810 - 44190)						

Tabla 3 – Número de fallecidos por enfermedades cardiopulmonares y cáncer de pulmón según regiones y casos (Fuente: Corbett et al, 2007; tabla adaptada por el autor)

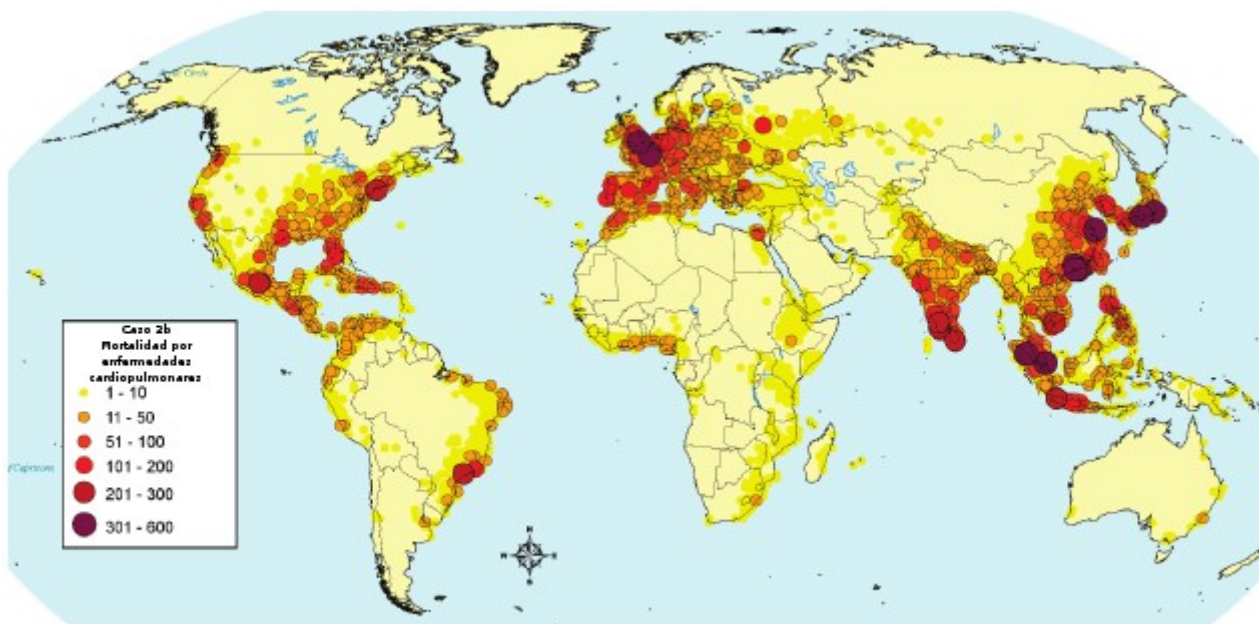


Figura 7 – Mortalidad por enfermedades cardiopulmonares y su localización espacial en el caso 2b (Fuente: Corbett et al, 2007)

Es importante destacar que en el estudio por Corbett no se han cuantificado las afecciones por enfermedades cardiopulmonares como el asma, bronquitis y neumonía; los resultados se ciñen únicamente a la cuantificación de la mortalidad y no de afecciones. De los resultados, expuestos en la Tabla 3 y Figura 7, se deduce que las partículas de materia procedentes de las emisiones atmosféricas derivadas de la actividad del transporte marítimo es la causa de una media de 60000 muertes anuales a escala global, con un mayor impacto concentrado en las regiones costeras por donde transcurren las principales rutas comerciales. La mayor mortalidad se ve reflejada en Asia y Europa donde coinciden altas concentraciones de población y de partículas de materia. Se augura que esta cantidad aumente en un 40% para el presente año 2012 [3].

Impacto en los ecosistemas naturales; acidificación y eutrofización

Las emisiones de NO_x y SO_x emitidas a la atmósfera por la flota mercante mundial contribuyen a aumentar la concentración de nitrógeno y azufre en los ecosistemas

naturales, las cuales por encima de ciertos límites críticos pueden causar la acidificación y eutrofización de los mismos así como de los ríos y lagos. La biodiversidad se ve de igual forma amenazada debido a un aporte excesivo de nitrógeno a los ecosistemas [3]. En la Figura 8, puede apreciarse la contribución originada por la actividad de la marina mercante a la concentración global anual de nitritos [4]. Tal y como se puede apreciar en la imagen, en algunos lugares llega a suponer un 40% de la contribución global.

Contaminación por ozono troposférico

El ozono troposférico, a cuyo aumento, tal y como se mencionan en el apartado 1.2.1 del presente capítulo, contribuyen las emisiones atmosféricas de CO, VOC, CH₄ y NO_x, además de producir un aumento del efecto invernadero del planeta, puede repercutir de forma negativa en la salud de las personas, las cosechas agrícolas y causar daño a edificios [5]. Del estudio realizado por Richter en el año 2004 [6], se puede apreciar la concentración de NO₂ troposférico a lo largo de las principales rutas marítimas internacionales en el mar Rojo y el Océano Índico (Figura 9), obtenida mediante observaciones realizadas con satélite¹. La Figura 10 [4] muestra la contribución de la emisiones originadas por la actividad de la marina mercante a la contribución global de ozono troposférico; tal y como se puede apreciar estas contribuyen de forma muy significativa con hasta una tasa del 6.5% en zonas de alta densidad de tráfico, Las predicciones realizadas mediante modelos muestran, además, una relación de crecimiento lineal directa de la cantidad de ozono troposférico respecto a la cantidad de NO_x; de este modo, si las emisiones de NO_x aumentasen hasta el doble de las cantidad de emisiones actuales, de igual modo lo haría la cantidad de ozono troposférico.

¹ Dicha observación fue realizada por el satélite de investigación Europeo ENVISAT mediante el empleo de un dispositivo SCIAMACHY (SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric Chartography).

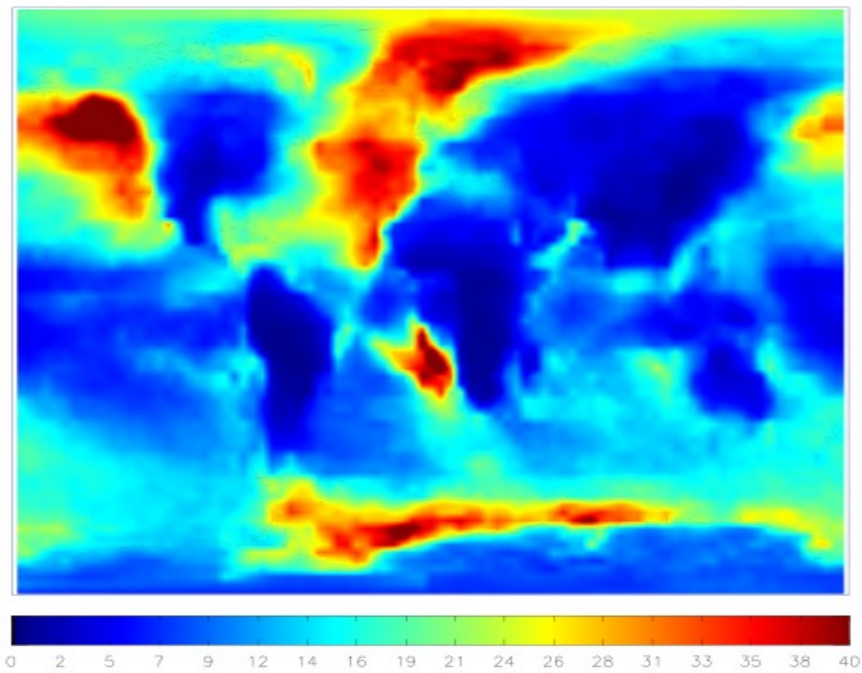


Figura 8 - Contribución anual (%) de las emisiones atmosféricas de la flota mercante mundial a las concentraciones de nitratos (Fuente: Dalsøren et al, 2008)

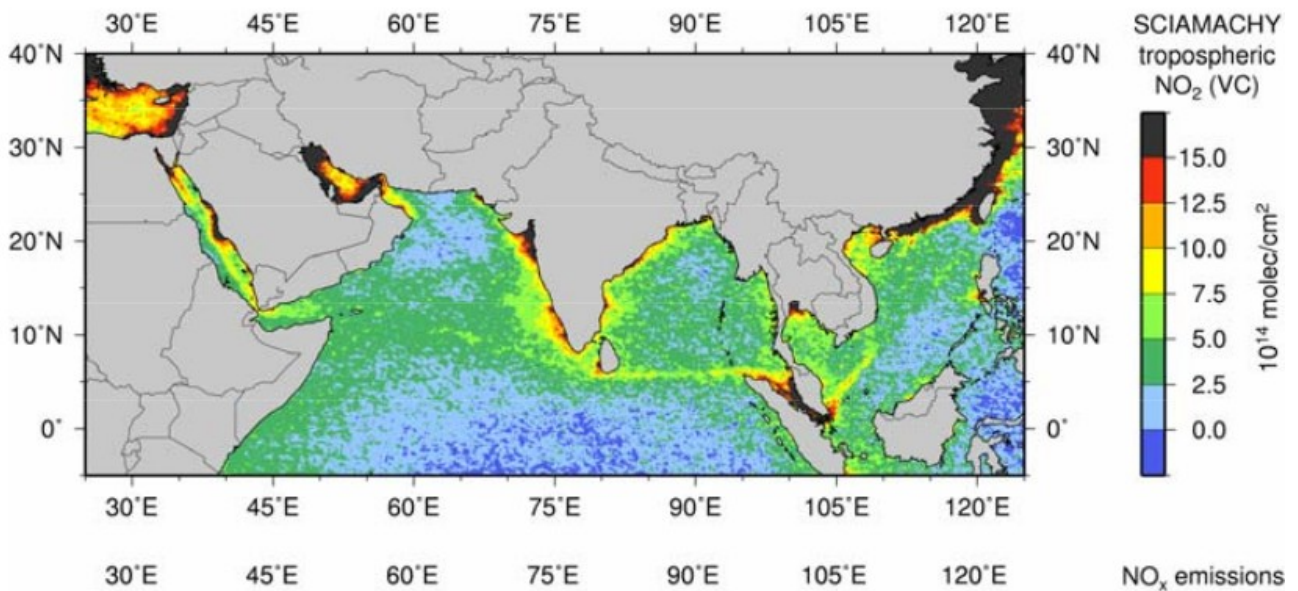


Figura 9 – Huella de NO_x originada en la actividad de los buques de la marina mercante. Columnas de NO₂ troposférico observadas mediante dispositivo SCIAMACHY entre Abril del 2002 y Agosto del 2004 (Fuente: Ritcher et al, 2004)

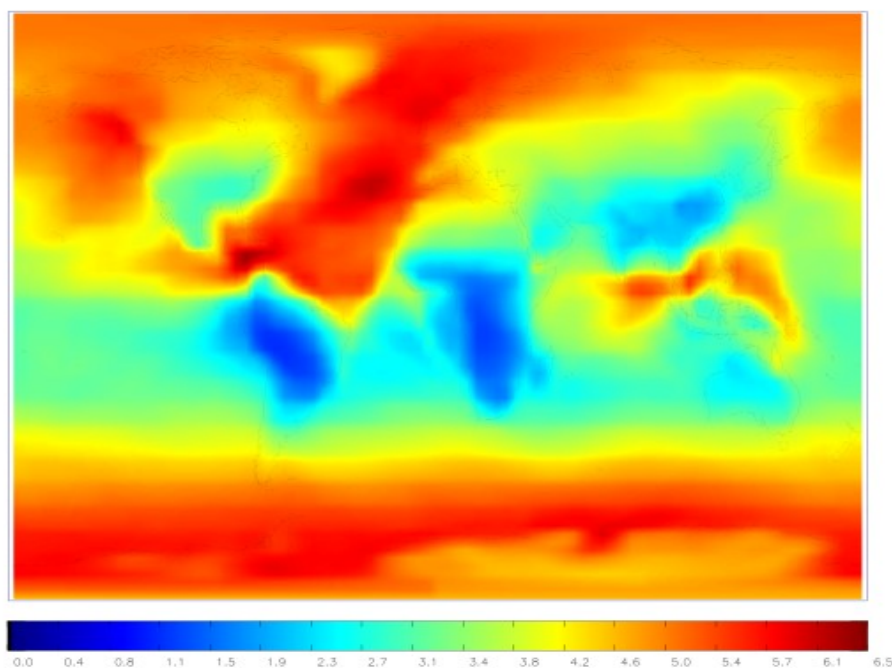


Figura 10 – Contribución anual (%) de las emisiones atmosféricas de la flota mercante mundial a la concentración de ozono troposférico (Fuente: Dalsøren et al, 2008)

1.3 Futuras emisiones atmosféricas derivadas de la actividad del comercio marítimo internacional [1]

El estudio de las posibles futuras emisiones derivadas del transporte marítimo internacional está basado en los escenarios de futuras emisiones de gases de efecto invernadero propuestos por el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) y su adaptación al ámbito del transporte marítimo internacional mediante la incorporación de una serie de variables que pueden afectar a sus futuras emisiones atmosféricas.

Los escenarios de emisiones propuestos por el IPCC están agrupados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2), y se elaboraron en base a un análisis de las tendencias mundiales relativas a los principales factores (fuerzas motrices) de carácter social, económico, tecnológico y político con posible influencia en la emisión de gases de efecto invernadero. Estas tendencias mundiales son definidas como la globalización frente a la regionalización y la predominancia de valores medioambientales frente a la predominancia de los valores económicos (Figura 11). Los escenarios son descritos tal y como sigue:

- El escenario A1 presupone un crecimiento económico mundial muy rápido, un máximo de la población mundial hacia mediados de siglo que después decrece, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Los patrones regionales específicos tienden a desaparecer como resultado de un aumento de la interacción cultural. La brecha existente entre regiones en relación con los ingresos *per cápita* se reduce sustancialmente. Se han desarrollado tres alternativas a este escenario que describen diferentes fórmulas de obtención de energía: combustibles fósiles (A1F1), energías de origen no fósil (A1T) y energía obtenida de forma equilibrada entre cualquier tipo de fuentes (A1B).
- El escenario A2 describe un mundo heterogéneo basado en la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, lo que se traduce en un aumento constante de la población. El desarrollo económico está orientado regionalmente y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico están más fragmentados que en el escenario A1.
- El escenario B1 representa un mundo convergente con la misma población mundial que A1 pero cuya evolución de las estructuras económicas es más rápida y dirigida hacia una economía de servicios e información. Supone reducciones en el consumo y la introducción de tecnologías limpias y eficientes. El concepto de sostenibilidad es enfatizado a través de soluciones globales incluyendo la mejora de la equidad pero sin iniciativas adicionales respecto al clima.
- El escenario B2 describe un mundo enfatizado con las soluciones locales dirigidas hacia la sostenibilidad social, económica y ambiental. Su población es creciente pero a tasas más lentas que en otros escenarios, con niveles de desarrollo económico intermedio y un cambio tecnológico lento pero variado. La sociedad está orientada hacia la protección ambiental y la equidad social priorizando los ámbitos local y regional.

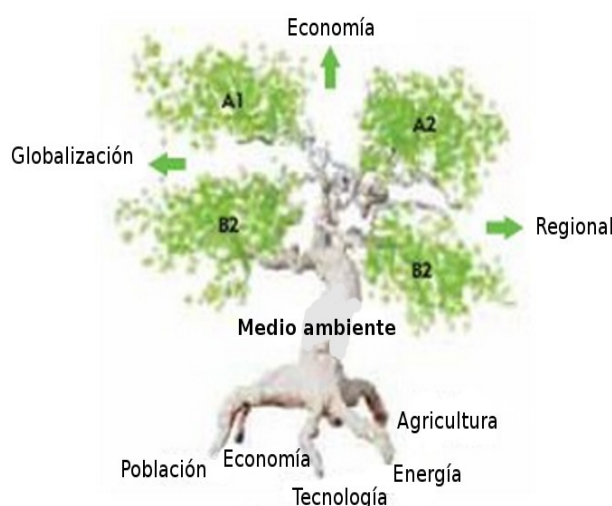


Figura 11 – Escenarios propuestos por el IPCC (Fuente: OMI; imagen adaptada por el autor)

Las variables que pueden afectar a las emisiones atmosféricas derivadas del transporte marítimo internacional en el futuro se clasifican en tres categorías “Economía”, “Eficiencia del transporte” y “Energía”; todas ellas están estrechamente relacionados con ciertos elementos que pueden hacer que su valor varíe en el futuro (Tabla 4).

Categoría	Variable	Elementos relacionados
Economía	Demanda de transporte marítimo	Población, crecimiento económico regional y local, cambios en la demanda de los distintos sectores
Eficiencia del transporte	Eficiencia del transporte	Diseño del buque, avances en la propulsión, velocidad del buque, regulación enfocada a reducir las emisiones de GEI
Energía	Fracción de carbono del fuel utilizado en el transporte marítimo	Precio y disponibilidad de fueles

Tabla 4 – Variables consideradas en la evolución del transporte marítimo para los escenarios propuestos por el IPCC (Fuente: IMO; tabla elaborada por el autor)

En todos los escenarios predomina el empleo de los mismo combustibles fósiles utilizados hoy en día en los sistemas de propulsión de la flota mercante mundial, sin embargo es también considerado el mercado potencial de nuevos combustibles como los destilados, los fueles pesados, el LNG, el LPG, el biodiesel, el diesel sintético como el FTD y otros fueles renovables. Se considera así mismo que las regulaciones de emisiones de sulfuros reguladas por el Anexo VI de MARPOL han sido adoptadas.

A partir del estudio de estos escenarios se han cuantificado las emisiones originadas en la actividad del transporte marítimo previsible hasta el año 2050 en los distintos escenarios A1, A1F1, AT y AB; A2, B1y B2. Los resultados se exponen en las Figuras 12, 13, 14, 15; y Tablas 5 y 6.

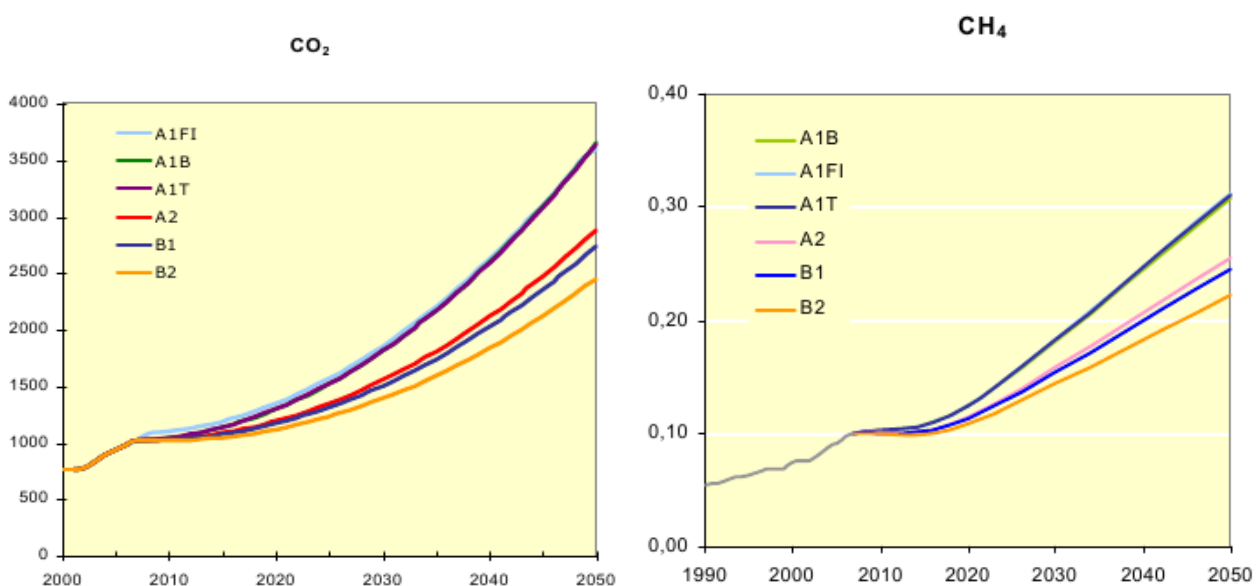


Figura 12 – Emisiones atmosféricas (millones de toneladas) de CO₂ y CH₄ previsible hasta el año 2050 (Fuente: OMI)

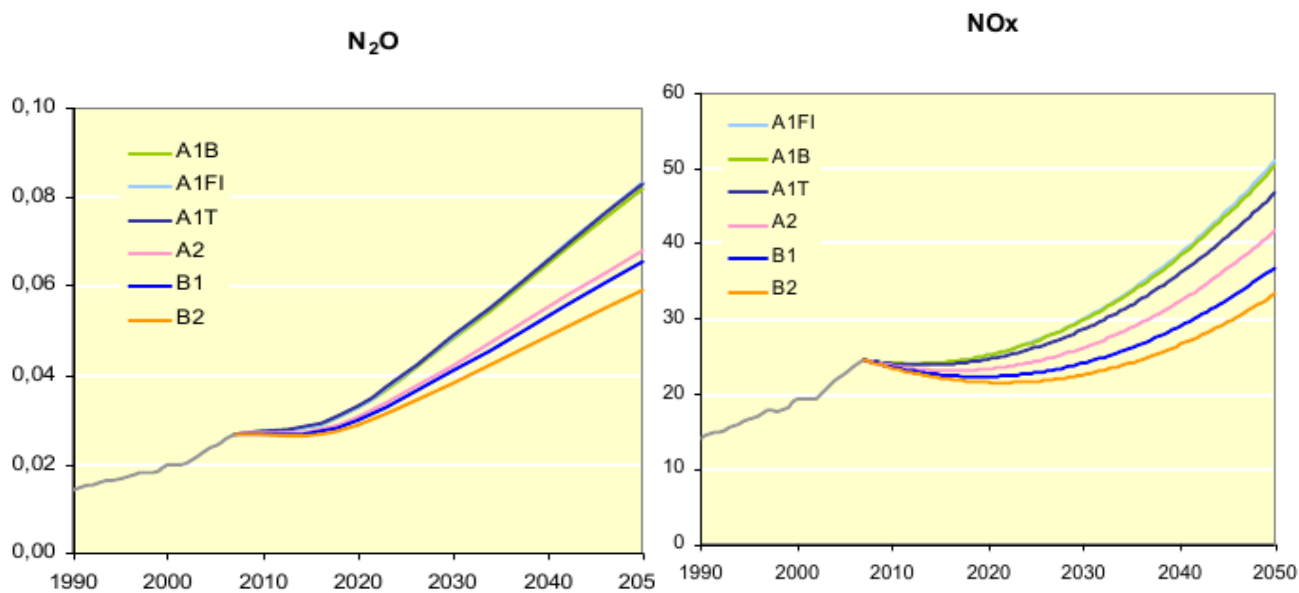


Figura 13 – Emisiones atmosféricas (millones de toneladas) de N₂O y NO_x previsibles hasta el año 2050 (Fuente: OMI)

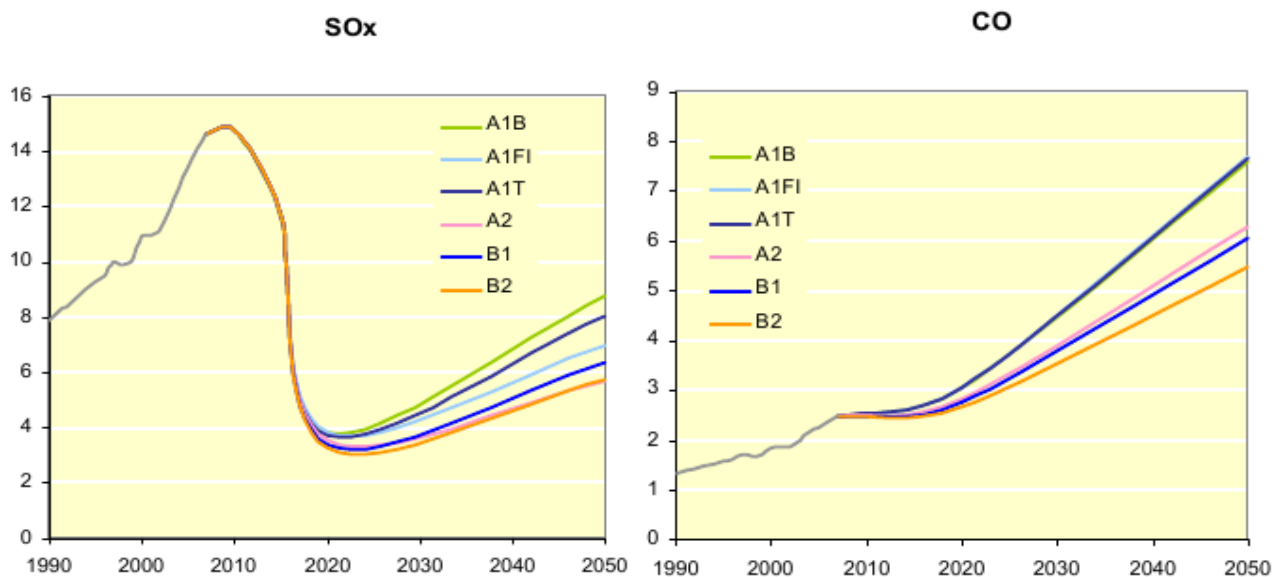


Figura 14 – Emisiones atmosféricas (millones de toneladas) de SO_x y CO previsibles hasta el año 2050 (Fuente: OMI)

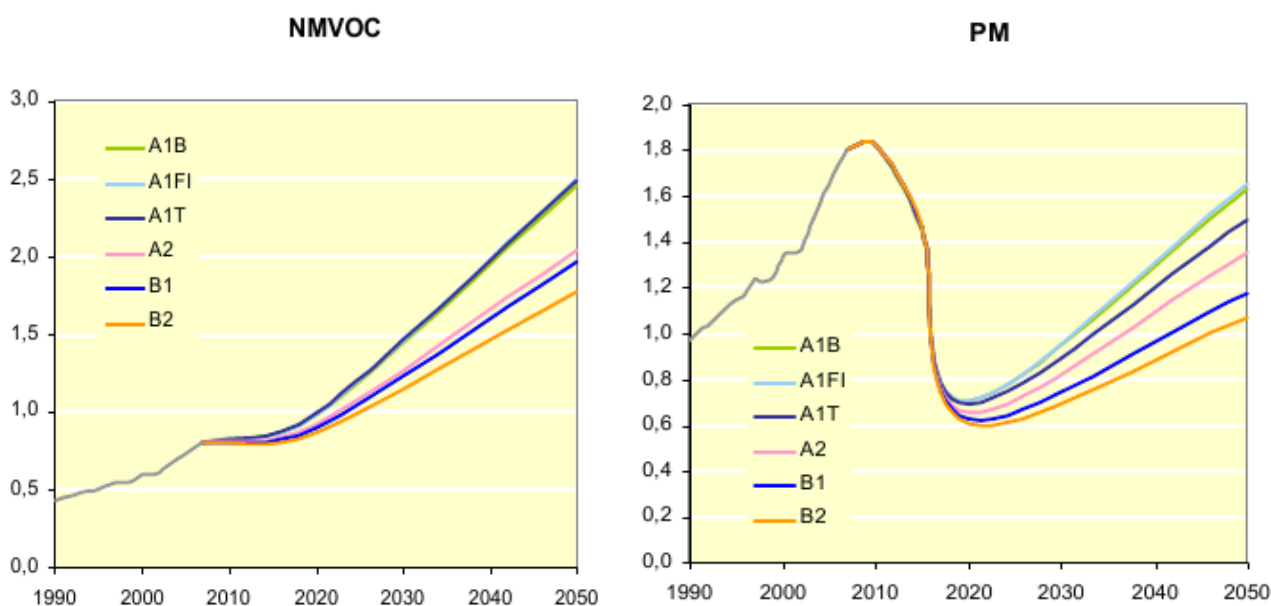


Figura 15 – Emisiones atmosféricas (millones de toneladas) de NMVOC y PM previsibles hasta el año 2050 (Fuente: OMI)

Compuesto	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
NO _x	25,1	25,1	24,6	23,3	22,3	21,5
SO _x	3,8	3,8	3,7	3,5	3,4	3,2
PM	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6
CO	3	3	3	2,8	2,8	2,7
NMVOC	1	1	1	0,9	0,9	0,9
CO ₂	1345	1293	1294	1188	1167	1114
CH ₄	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11
N ₂ O	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Tabla 5 – Emisiones atmosféricas (millones de toneladas) originadas en los gases de escape de la flota mercante mundial en el año 2020 (Fuente: OMI; tabla elaborada por el autor)

Compuesto	A1B	A1F	A1T	A2	B1	B2
NO _x	50,3	51	46,7	41,6	36,8	33,3
SO _x	8,8	6,9	8	5,7	6,3	5,7
PM	1,6	1,7	1,5	1,3	1,2	1,1
CO	7,6	7,7	7,7	6,3	6	5,5
NMVOG	2,5	2,5	2,5	2	2	1,8
CO ₂	3595	3644	3634	2878	2735	2449
CH ₄	0,31	0,31	0,31	0,25	0,22	0,22
N ₂ O	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06

Tabla 6 – Emisiones atmosféricas (millones de toneladas) originadas en los gases de escape de la flota mercante mundial en el año 2050 (Fuente: OMI; tabla elaborada por el autor)

Las emisiones atmosféricas previsibles hasta el año 2050 originadas por la flota mercante mundial en los distintos escenarios A1, A1F1, AT y AB; A2, B1 y B2 son mayores que las estimadas en el año 2007, aun teniéndose en cuenta la aplicación de normas que regulen las emisiones (Anexo VI de MARPOL) y una posible mejora en la eficiencia energética de los buques, lo cual indica claramente la necesidad de nuevas alternativas y soluciones que permitan reducir de manera significativa las emisiones originadas en la actividad del transporte marítimo.

1.4 Previsión del agotamiento del petróleo

1.4.1 Consumo actual y previsible de la flota mercante mundial

La totalidad de buques actuales que constituyen la flota mercante mundial suman en conjunto 870,152118 millones de GT [1] (Tabla 7). Su consumo de combustible se estima en una media de 610 millones de Tm (Tabla 8, Figura 16).

Asumiendo un crecimiento del 3% de la flota mercante mundial y 30 años de vida útil de los barcos que la integran, para el año 2020 se estima que su GT sume un total de 1397,15 millones. Suponiendo un consumo constante de 0,7 millones de Tm, en el año 2020 el consumo de la flota mercante mundial alcanzaría una media de 979,44 millones

de Tm de fuel. Actualmente, el consumo anual de la flota mundial supone aproximadamente un 8% del petróleo total consumido en el mundo cada año.

AÑO	2007	2020
Rutas internacionales	536 731 017	954 049 435
Rutas nacionales	80 986 919	95 022 648
Portacontenedores	126 217 091	348 078 393

Tabla 7 – GT totales de la flota mundial en el año 2007 y previsibles para el año 2020

(Fuente: OMI; tabla elaborada por el autor)

Año	Flota mundial			Flota mundial		
	Mínimas	Media	Máximas	Mínimas	Media	Máxima
1990	150	179	215	120	149	185
1991	157	187	224	125	155	193
1992	160	191	229	128	159	197
1993	166	199	239	133	165	205
1994	172	205	246	137	170	212
1995	177	211	254	141	176	218
1996	181	216	260	145	180	223
1997	191	228	274	153	190	236
1998	189	226	271	151	188	233
1999	193	230	276	154	191	238
2000	208	248	298	166	206	256
2001	209	250	300	167	208	258
2002	212	253	304	169	210	261
2003	226	270	325	181	225	279
2004	242	289	347	193	240	298
2005	255	304	365	204	253	314
2006	269	321	385	215	267	331
2007	279	333	400	223	277	34

Tabla 8 – Consumo de la flota mundial e internacional (millones de tm) entre los años 1990 y 2007 (Fuente: OMI; tabla elaborada por el autor)

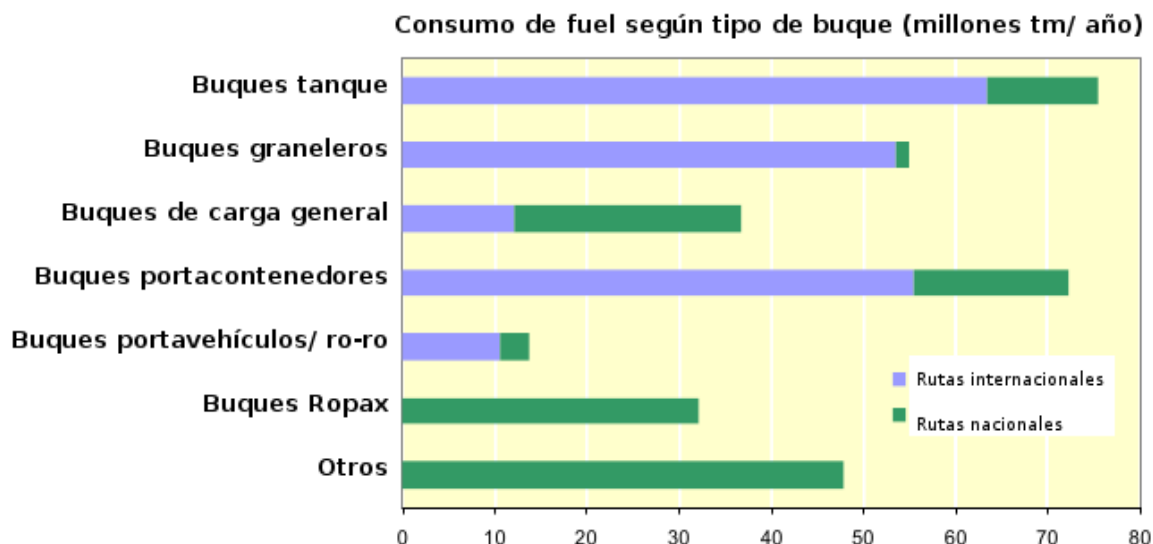


Figura 16 – Consumo de fuel según tipo de buque (millones tm/año) (Fuente: OMI; tabla adaptada por el autor)

Año	2000	2005	2010
Consumo mundial de petróleo	3562,083	3877,793	3943,332
Consumo mundial de gas natural	2175,453	2498,324	2828,281

Tabla 9 – Consumo mundial anual de petróleo y gas natural (millones de Tm) (Fuente: British Petroleum; tabla elaborada por el autor)

1.4.2 Agotamiento del petróleo

El modelo matemático de Hubbert fue diseñado para la predicción del nivel de extracción de petróleo a lo largo del tiempo. El modelo se basa en la teoría de que la extracción de un pozo petrolífero cualquiera sigue una curva que refleja su producción, encontrándose su máximo productivo (cénit de producción) en su centro. Cuando la capacidad de

extracción de un pozo alcanza ese punto, la extracción de cada barril de petróleo se hace progresivamente más cara, hasta que la producción deja de ser rentable al necesitarse gastar más cantidad de crudo que el que se obtiene de extraerlo, es decir cuando se necesita consumir el equivalente a un barril de petróleo o más, para obtener ese mismo barril de crudo del subsuelo. Esta teoría se extiende también a la producción nacional de los distintos países: si la curva de producción de un pozo siguiese una simple función gaussiana, la curva de producción de países enteros y, por extensión, la curva mundial, seguirían patrones similares.

El modelo matemático de Hubbert se basa en la producción histórica de crudo, las reservas disponibles, el consumo y la tecnología existente y predice la fecha de máxima producción para un campo petrolífero o, por extensión, para toda una región entera. El máximo de extracción es citado como el pico. Tras el pico la extracción entra en la fase de agotamiento. Se pueden identificar distintos estudios que pronostican el cénit de producción petrolífera en distintos años. Algunos de estos estudios consideran que el pico se ha alcanzado ya en el año 2006, mientras que otros los sitúan a mediados del siglo XXI. Sin embargo la mayoría de estudios parecen coincidir en que el cénit de producción se alcanzará entre el año 2030 y 2050 y el agotamiento definitivo del petróleo sucederá entre principios y mediados del siglo XXII.

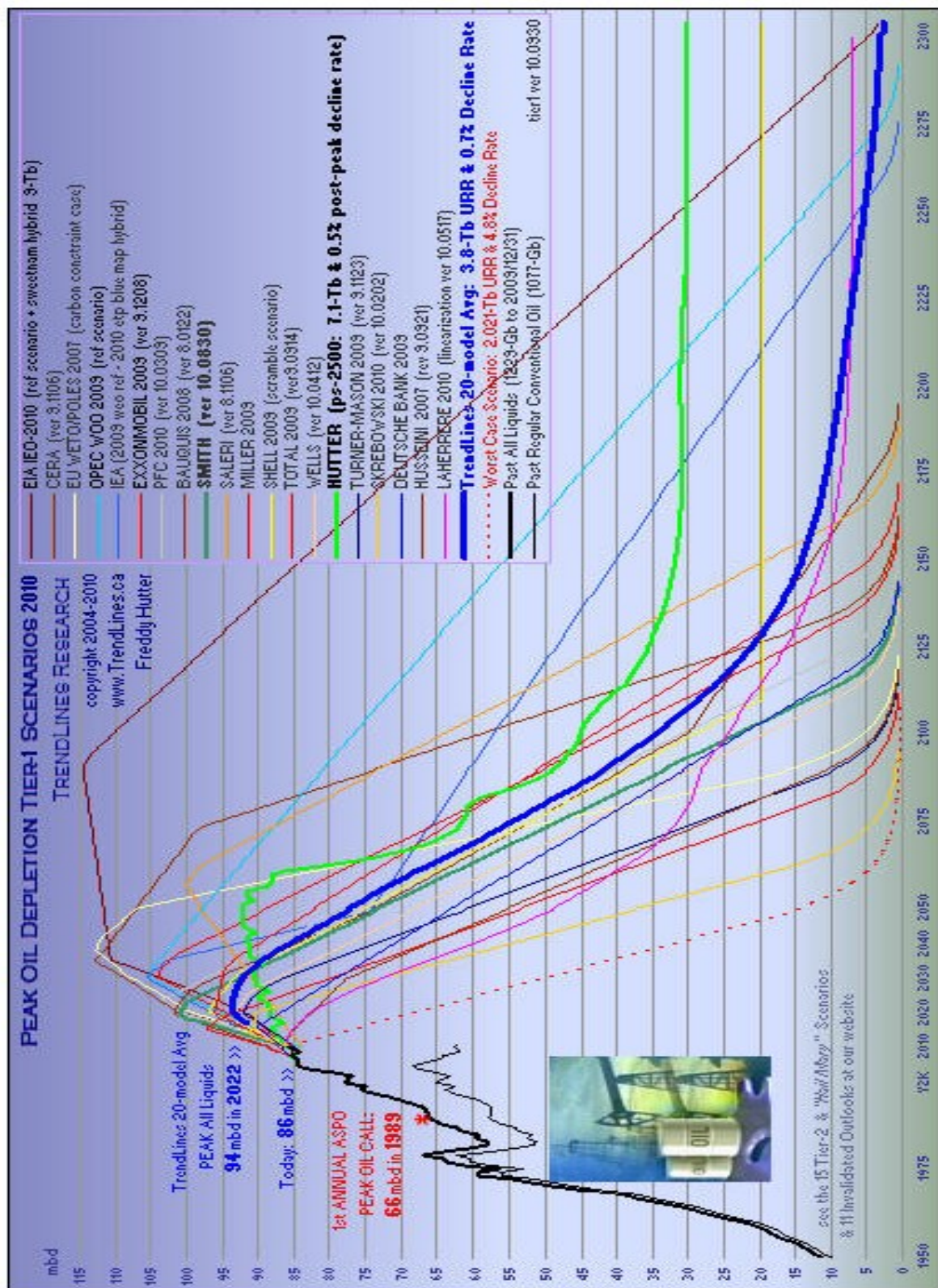


Figura 17 – Resultado de los distintos estudios realizados sobre el cénit de producción petrolífera del planeta (Fuente: Trendlines)

Capítulo 2 - Combustibles alternativos al diesel y fuel marino; aprovechamiento en motores y turbinas adaptadas a su empleo

2.1 Combustible nuclear: Reactor modular de helio – turbina de gas (GT-MHR)

2.1.1 La propulsión nuclear en la marina mercante

En el año 1957 el primer buque civil de propulsión nuclear era botado a la mar en Rusia bajo el nombre de *Nuclear Ship (NS) Lenin* (Figura 18). En 1959 comenzaba su servicio como buque rompehielos en aguas Árticas y 30 años después, en 1989, era retirado oficialmente de su actividad. El *NS Lenin*, con 16000 toneladas de desplazamiento, fue provisto inicialmente con tres reactores de agua presurizada (PWR) OK-150 de 90 MW de potencia que a través de cuatro turbinas proporcionaban energía eléctrica a los tres propulsores que dotaban al buque de una velocidad máxima de 18 nudos. En su periodo de actividad, el *NS Lenin* sufrió dos averías en sus reactores pero ambas fueron subsanadas sin mayor relevancia salvo por los costos de su reparación, ya que a raíz de la segunda, los tres reactores OK-150 fueron substituidos por dos reactores de nueva generación OK-900, de 171 MW de potencia cada uno y también de agua presurizada. El *NS Lenin demostró*, a pesar de ello, su rentabilidad económica, ya que satisfacía la alta demanda de potencia requerida en su operación y vencía las dificultades de aprovisionamiento reinantes en la zona Ártica. Tal fue el éxito del *NS Lenin*, que inspirados en este se creó la clase *Arktika* que cuenta a día de hoy con cuatro rompehielos operativos y dos retirados tras una prestación media de 23 años (33 años el *NS Arktika* y 15 el *NS Sibir*).

No sería sin embargo hasta 1959 la botadura del primer buque civil mercante, el *NS Savannah* (Figura 19), de 10059 Tm de desplazamiento y provisto con un PWR de 74 MW de potencia. Su periodo de actividad terminó en el año 1972, y durante este tiempo operó como buque de pasajeros y carga general sin sufrir ningún accidente ni avería grave. El *NS Savannah* fue diseñado con la intención de promover el uso pacífico de la energía

nuclear² y ostentar el potencial tecnológico de Estados Unidos, y no como un buque de pretensiones absolutamente comerciales. Es por ello que su rentabilidad económica fue nula, ya que disponía de poco espacio de carga y los costes de mantenimiento era elevados.

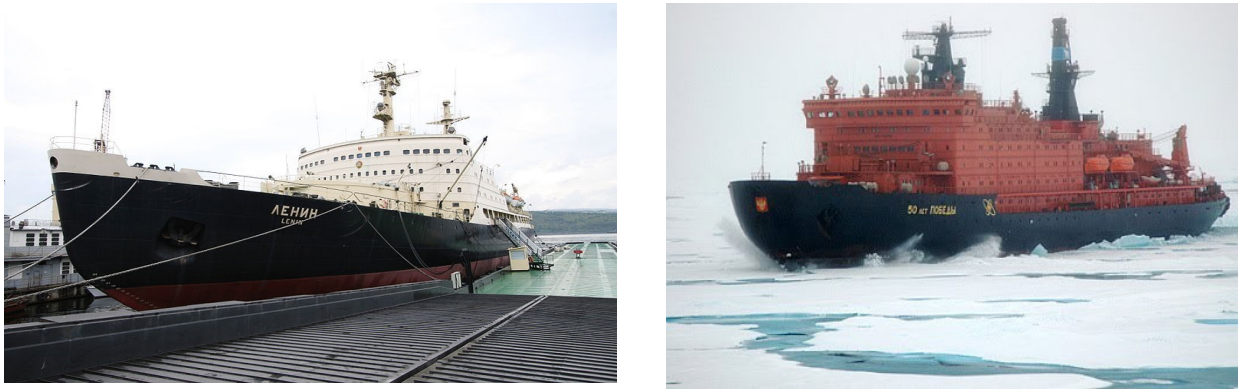


Figura 18 – Rompehielos NS Lenin (izquierda) y NS 50 Let Pobedy, último de la clase Arktica, puesto en servicio en el año 2007 (derecha) (Fuente: Wikipedia)

Los dos siguientes intentos en la incursión nuclear de la marina mercante fueron el *NS Otto Hahn*, buque Alemán en servicio desde el año 1968 hasta el año 1979 y el *NS Mutsu*, buque Japonés que estuvo en programa experimental desde el año 1970 hasta el año 1992. El primero no sufrió ningún accidente o avería destacable pero sus costes de mantenimiento fueron muy elevados, demostrando su baja rentabilidad económica. El buque Japonés no llegó a transportar mercancía en sus 22 años activos, sirviendo únicamente para la realización de pruebas. Fue el primero en experimentar una fuga de radiación gama y neutrones que si bien no alcanzó límites peligrosos, sí generó polémica entre los pescadores de su puerto base en Ohminato, que llegaron a bloquearle el acceso al mismo. El coste de mantenimiento del programa experimental fue muy elevado y los resultados insatisfactorios y dio prácticamente por finalizada la aventura nuclear en la marina mercante.

2 El uso pacífico de la energía nuclear fue promovido por el presidente americano Dwight Eisenhower en el año 1955 a través de la iniciativa “*Atoms for peace*”.



Figura 19 – NS Savannah (Fuente: Wikipedia)

De los buques pioneros en la propulsión nuclear se puede decir que el factor límite en su desarrollo, construcción e intrusión en el mercado mundial fueron principalmente los factores económicos, salvo en el caso particular de los rompehielos donde su rentabilidad queda justificada por su demanda de alta potencia. La baja rentabilidad de los prototipos mercantes se debe principalmente a las características del reactor PWR en su versión marina; éste requiere grandes presiones para mantener el refrigerante en estado líquido, necesario para proveer una eficiencia térmica satisfactoria, y exige un exhaustivo control de sus condiciones químicas para reducir los efectos mecánicos y radioquímicos de los productos de corrosión; esto se traduce en un gran volumen y peso, que resta capacidad al buque, y en un elevado coste de adquisición (resultan relativamente caros cuando su potencia es inferior a los 500 MW eléctricos) y mantenimiento. El aspecto concerniente a la seguridad resultó ser moderadamente exitoso, reforzado además por la satisfactoria carrera nuclear en la marina militar. Sin embargo, y a juicio del autor, el número total de experiencias de la marina civil y su poca variedad parece poco significativo como para afirmar que los riesgos a los que pueden verse sometidos los buques equipados con PWR se encuentran totalmente minimizados. ¿Por qué entonces la opción nuclear podría presentarse como una alternativa a tener en cuenta en la actual marina mercante? Principalmente por dos motivos: su nula emisión de gases de efecto invernadero y la no necesidad de utilizar combustibles fósiles en su actividad. Esta justificación se ve

reforzada además por una mejora en la tecnología nuclear, que cada vez reúne más condiciones de seguridad y compromiso con el medio ambiente, y los cambios experimentados en la flota mundial y el comercio internacional, los cuales podrían rendir y rentabilizar los costes de un buque equipado con un reactor nuclear de última generación de mayor rendimiento que el de sus predecesores.

Es por ello que en este apartado se analizan los aspectos técnicos, los relativos a la seguridad, los económicos y los medioambientales de un reactor nuclear de cuarta generación aplicado a un buque de la marina mercante, en concreto los de un reactor modular de helio y turbina de gas, que por sus especiales características se adecuan a las prestaciones de un buque de carga civil. La información expuesta relativa al modelo de GT-MHR aplicable a buques mercantes está basada en el estudio realizado por Vergara Y McKesson en el año 2002 [7].

2.1.2 Reactores nucleares de Generación IV

El concepto de reactores nucleares de Generación IV tiene origen en la iniciativa conocida como Generation IV International Forum creada en Septiembre del año 2002 y desarrollada en base a dos incentivos, a saber, la necesidad de mayores y más extensas investigaciones en tecnología nuclear, con el fin de mejorar su atractivo como fuente energética, y la colaboración internacional mediante la unión de diferentes recursos de cada uno de los países implicados³.

El objetivo del foro es el desarrollo de nuevas centrales nucleares que presenten ventajas en los aspectos concernientes a su seguridad, rentabilidad, resistencia a la proliferación nuclear y minimización de residuos. Estos nuevos reactores están pensados para la producción de electricidad, producción de hidrógeno para el transporte, aplicaciones petroquímicas e incluso desalinización del agua. Para alcanzar estos objetivos se han diseñado una serie de nuevos reactores, cuya posible construcción se augura para no

3 Argentina, Brasil, Canadá, Francia, Japón, República de Corea, Sur África, Suiza, Reino Unido y los Estados Unidos de América.

antes del año 2030. Entre ellos se encuentra el mencionado GT-MHR.

2.1.3 El reactor modular de helio – turbinas de gas (GT-MHR)

El predominio del PWR en la generación de energía eléctrica y en la propulsión nuclear, en caso de la marina mercante, se debe a la temprana elección del agua como refrigerante, por sus cualidades como moderador, capacidad de transferencia de calor, disponibilidad y costo, versatilidad para bombeo; y su relativa estabilidad química en operación. Sin embargo, estos reactores, tal y como se comenta en el apartado 2.1.1, presentan una serie de inconvenientes que los hacen poco adecuados para la propulsión de buques mercantes.

Un reactor nuclear adecuado para la propulsión de un buque podría ser el reactor GT-MHR, refrigerado por gas helio y acoplado directamente a una turbina de gas donde este realiza el trabajo que se convertirán en propulsión, utilizando el ciclo térmico Brayton. Este tipo de reactor se basa en la tecnología de los reactores de gas de alta temperatura (HTGR) desarrollada en los últimos 45 años y probada en hasta siete centrales nucleares. El GT-MHR satisface los objetivos propuestos por el Generation IV International Forum y ha despertado el interés de varias empresas para generar electricidad debido a la afinidad entre el combustible y el refrigerante, que posibilita una eficiencia térmica del orden del 47% frente al 32% un PWR convencional y evita la degradación mecánica de las barreras de contención del combustible. La mayor eficiencia térmica es debida a la expansión del gas refrigerante en una turbina de potencia, y de ahí su adaptabilidad a su empleo en un buque, ya que este trabajo puede convertirse directamente en empuje mediante el accionamiento del propulsor. Conceptualmente, esta planta es similar a la compuesta por una turbina de gas aeroderivada, con la diferencia que sustituye los quemadores de esta por un reactor nuclear y que opera con helio en ciclo cerrado, en vez de aire en ciclo abierto, lo cual permite una reducción en la carga de compresión. Para elevar la eficiencia térmica sobre una turbina de gas de ciclo simple de

un ciclo simple se utiliza un recuperador de calor, que reduce el tamaño del reactor aportando energía residual desde las turbinas, más un preenfriador, y un interenfriador para reducir la potencia de compresión.

2.1.4 Descripción de la planta

El **GT-MHR** (Figura 20) consiste en una vasija (1) que contiene un reactor modular refrigerado por helio (**MHR**) y que va acoplada directamente a otra vasija (2) que contiene una turbina de gas de ciclo Brayton (**GT**) donde el mismo helio que sirve de refrigerante se expande, convirtiendo su energía térmica en energía cinética, y pudiendo accionar directamente el eje del elemento propulsor. La utilización de helio se debe precisamente a su elevada afinidad entre servir de refrigerante y combustible, permitiendo un alto grado de quemado del combustible nuclear en el reactor sin que la integridad de su contenedor se vea comprometido y logrando una eficiencia térmica en la turbina muy superior al 32% de un reactor convencional de agua presurizada (PWR).

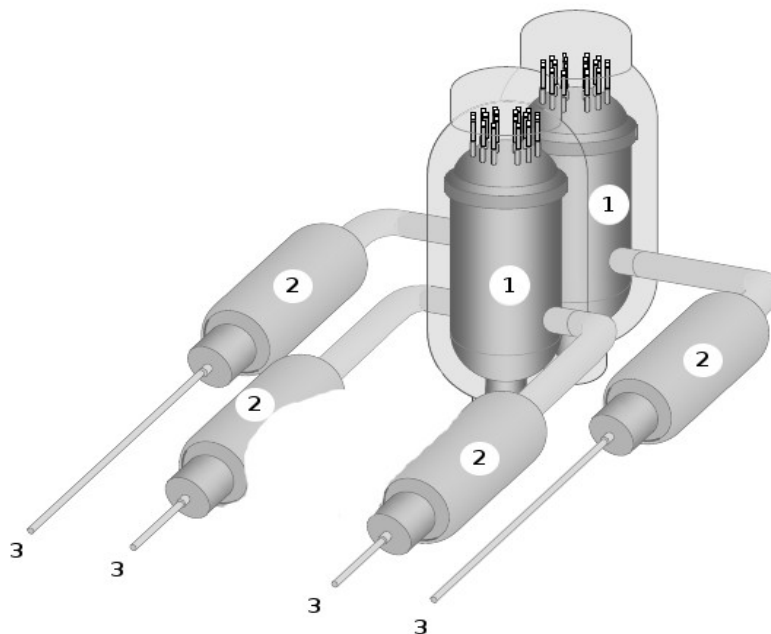


Figura 20 – Par GT- MHR dispuestos conjuntamente y acoplados a sus respectivas turbinas de gas (Fuente: Vergara and McKesson, 2002 ; imagen adaptada por el autor)

2.1.4.1 Elementos de la vasija del reactor

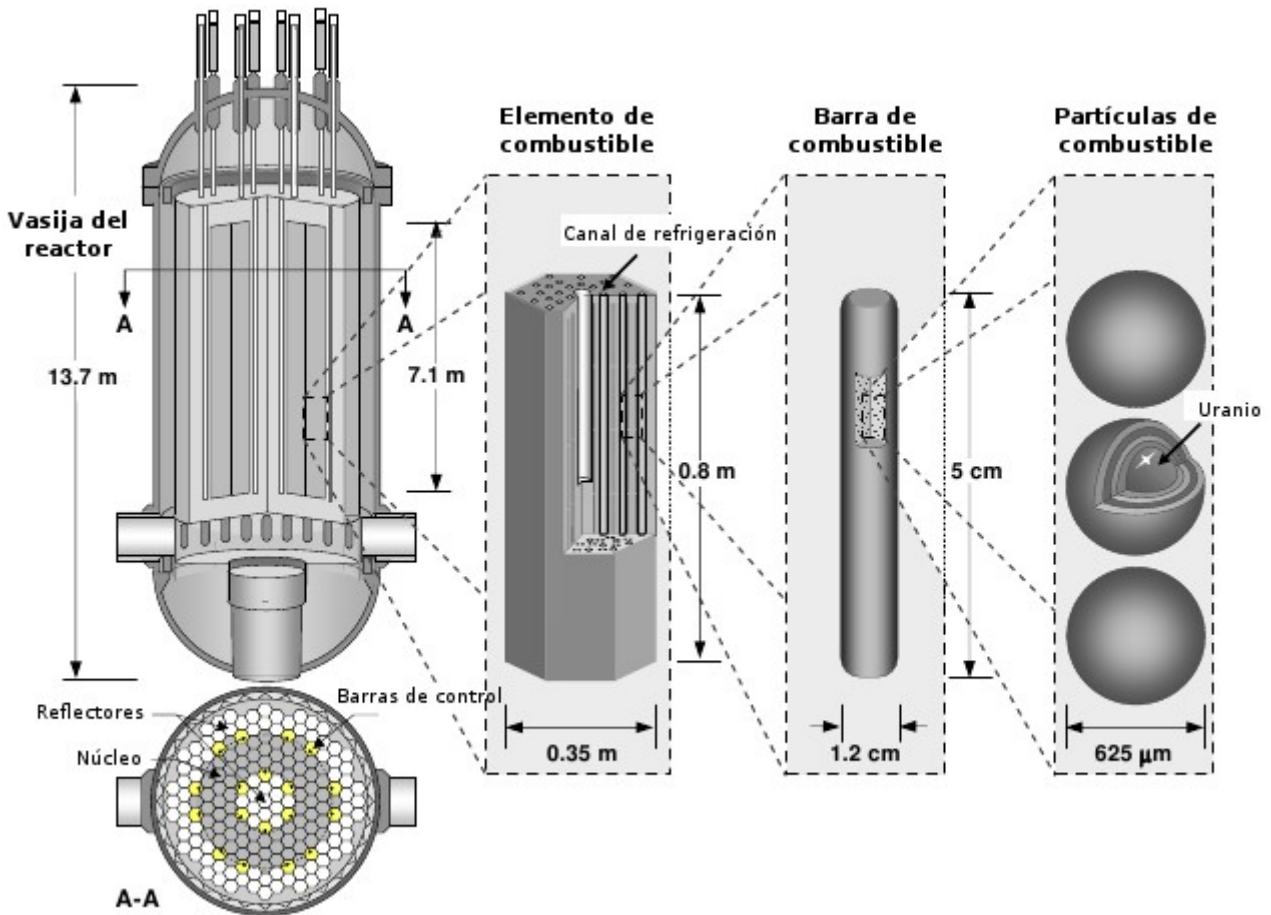


Figura 21 – Elementos de la vasija del reactor (Fuente: Vergara and McKesson, 2002; imagen adaptada por el autor)

- **Reactor:** El reactor del MHR lo constituyen el núcleo, la envoltura de reflectores de grafito y la envoltura de acero del conjunto. El núcleo del MHR está formado por un conjunto de contenedores de combustible nuclear de forma hexagonal y rodeado por reflectores de grafito sólido soportados verticalmente mediante una placa radial y lateralmente por la envoltura del reactor.
 - **Combustible:** Cada elemento de combustible corresponde al tipo TRISO Tristructural-Isotropic coated particles (TRISO) (Figura 23). Consiste en una matriz de grafito hexagonal-prismático de 0.8 metros de alto por 0.35 metros de ancho con 94 barras de combustible con 3000 células de combustible y 108

canales de refrigeración. Las partículas de combustible tienen 1.2 centímetros de diámetro y 5 centímetros de alto y contienen en su interior un núcleo esférico de uranio encapsulado tras varias capas de revestimiento refractario (grafito poroso, carburo de silicio y carbón pirolítico) que forman a su alrededor una vasija impermeable en miniatura de 0.6 milímetros de diámetro resistente a la liberación de productos de fisión metálicos y gaseosos. En concreto proporciona una estructura resistente a altas temperaturas (Figura 22) y capaz de retener productos de fisión incluso cuando se ve expuesto a estas: el revestimiento no se empieza a degradar hasta no haber alcanzado temperaturas próximas a 2000°C. Las temperaturas habituales de operatividad del reactor no exceden los 1250°C y en caso de pérdida de refrigeración se mantienen por debajo de los 1600°C.

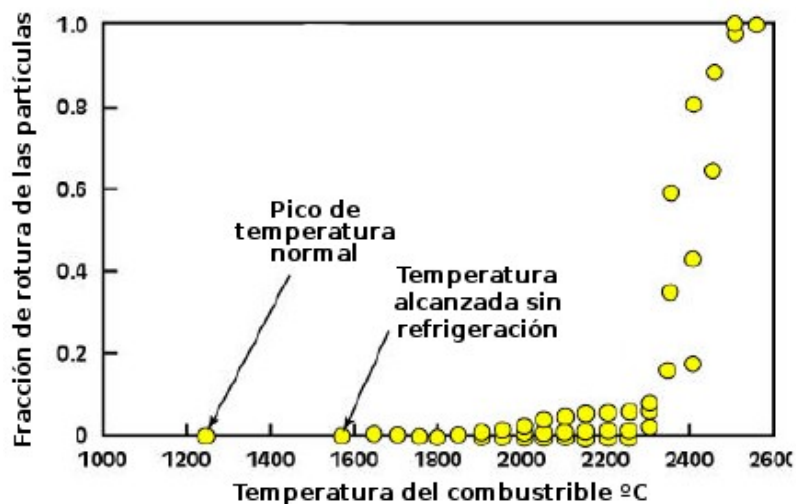


Figura 22 - Resistencia térmica del combustible TRISO (Fuente: General Atomics, imagen adaptada por el autor)

El combustible TRISO es susceptible de experimentar el efecto ensanchamiento doppler por el cual, generará menos energía en el núcleo a medida que su temperatura aumente, no pudiendo sufrir un aumento de la reacción en cadena de la fisión nuclear inicial. Considerando la baja densidad energética del

combustible TRISO (5.5 t/m³, aproximadamente el 5% del utilizado en un PWR) propuesto para su uso en un GT-MHR de aplicación náutica, el reactor puede diseñarse de tal modo que pierda más calor a través de su contención que el que genere en su interior.



Figura 23 – Combustible TRISO (Fuente: General Atomics, US Department of energy, imágenes modificadas y adaptadas por el autor)

- **Refrigerante:** En un reactor GT-MHR se utiliza helio en estado gaseoso como refrigerante. El helio en fase gaseosa presenta las propiedades de un gas noble y se comporta como tal, es decir, es inerte y monoatómico; de forma que no se vuelve radioactivo ni reacciona con otras sustancias. Su conductividad térmica (0,152 W) y su alto calor específico (5193 J) lo convierten en un buen refrigerante y conductor de calor.
- **Moderador:** El reactor GT-MHR utiliza el grafito contenido en el combustible y en los reflectores como moderador de neutrones a fin de conseguir y mantener una reacción nuclear en cadena eficaz.
- **Barras de control:** Las barras utilizadas para el control de la reacción nuclear en cadena se encuentran distribuidas entre las barras de combustible y los reflectores. Los mecanismos de operación de las mismas se encuentran en la parte superior

externa de la vasija de contención del reactor.

- **Sistema de refrigeración auxiliar:** Consiste en un serpentín refrigerante de emergencia situada en el seno de la vasija comunicado con el mar mediante válvulas de seguridad. En caso de fallo de la refrigeración se establece una circulación de agua fría en el seno del reactor (Figura 24, EE) que evacua la energía térmica residual de los reactores al mar. Ya que el helio es un gas inerte, aunque el agua entrara en contacto con este, no se volverá radiactiva.

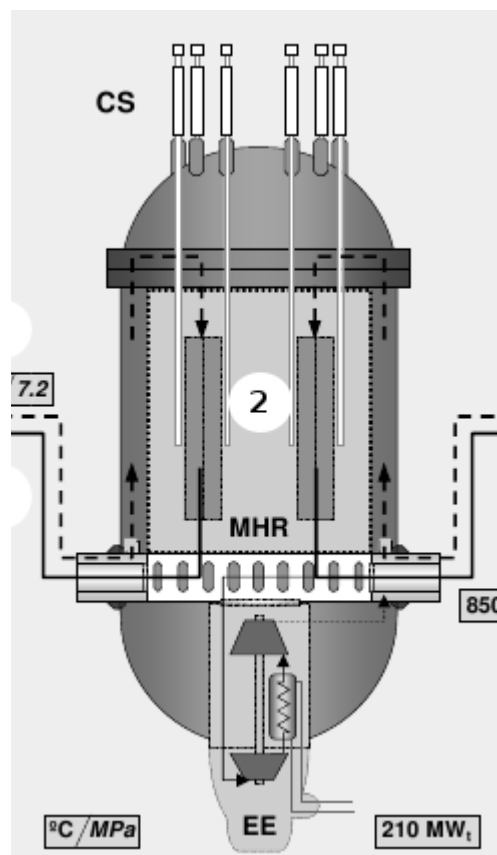


Figura 24 – Diagrama del reactor (Fuente: Vergara and McKesson, 2002)

2.1.4.2 Elementos de la vasija de conversión de potencia

- **Combustible:** El reactor GT-MHR utiliza el mismo helio usado en la refrigeración como combustible debido a su afinidad para realizar esta función. El helio tiene un bajo peso molecular (4.0026_u) por lo que requiere una relación de compresión relativamente baja para alcanzar su rendimiento óptimo a 300°C menos que una

turbina de gas convencional de ciclo abierto, lo cual expone a los álabes de la turbina a una carga termodinámica mucho menor. Otra de las características que lo convierten en un buen combustible es su baja densidad (0.1785 kg/m^3) lo que permite lograr flujos elevados sin restricción por aproximación a la velocidad del sonido lo cual suele ser un factor limitante en las turbinas convencionales.

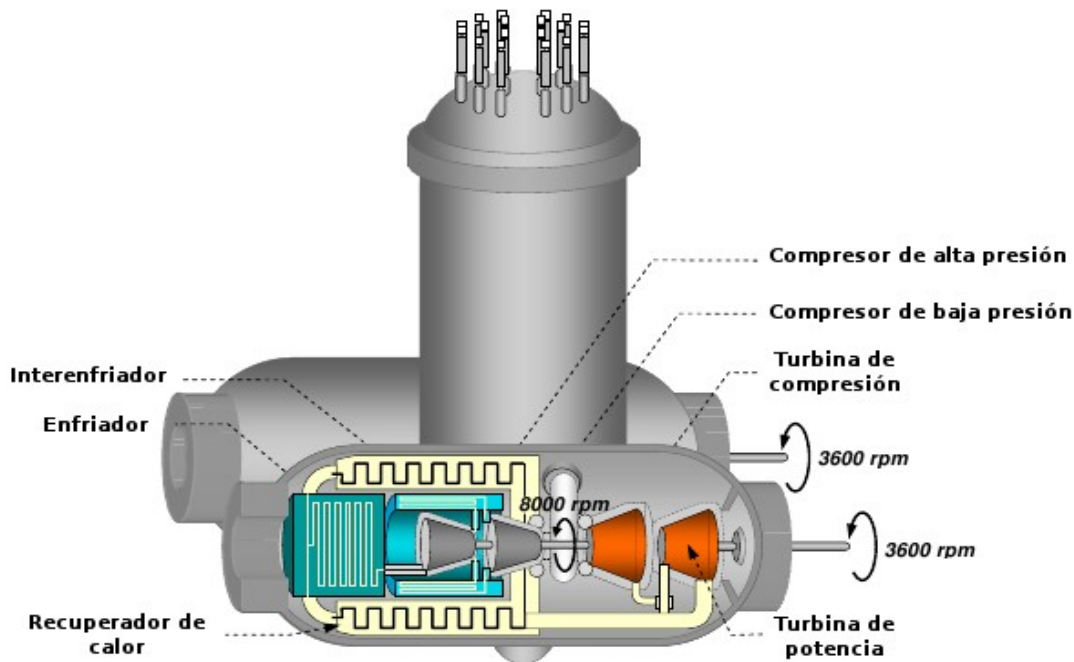


Figura 25 – Elementos de la vasija de conversión de potencia (Fuente: Vergara and McKesson, 2002; imagen adaptada por el autor)

- **Turbina de compresión y potencia**
- **Recuperador de calor:** Aporta energía térmica residual desde la vasija del conversión de potencia al reactor de forma que aumenta la eficiencia térmica sobre una de ciclo simple y permite reducir el tamaño del reactor.
- **Turbina de compresión y de potencia**
- **Recuperador de calor**
- **Preenfriador e interenfriador:** Ayudan a la reducción de la compresión del gas a la salida de las turbinas
- **Compresor de alta y de baja presión**

2.1.5 Funcionamiento de un reactor modular de helio acoplado a una turbina de gas

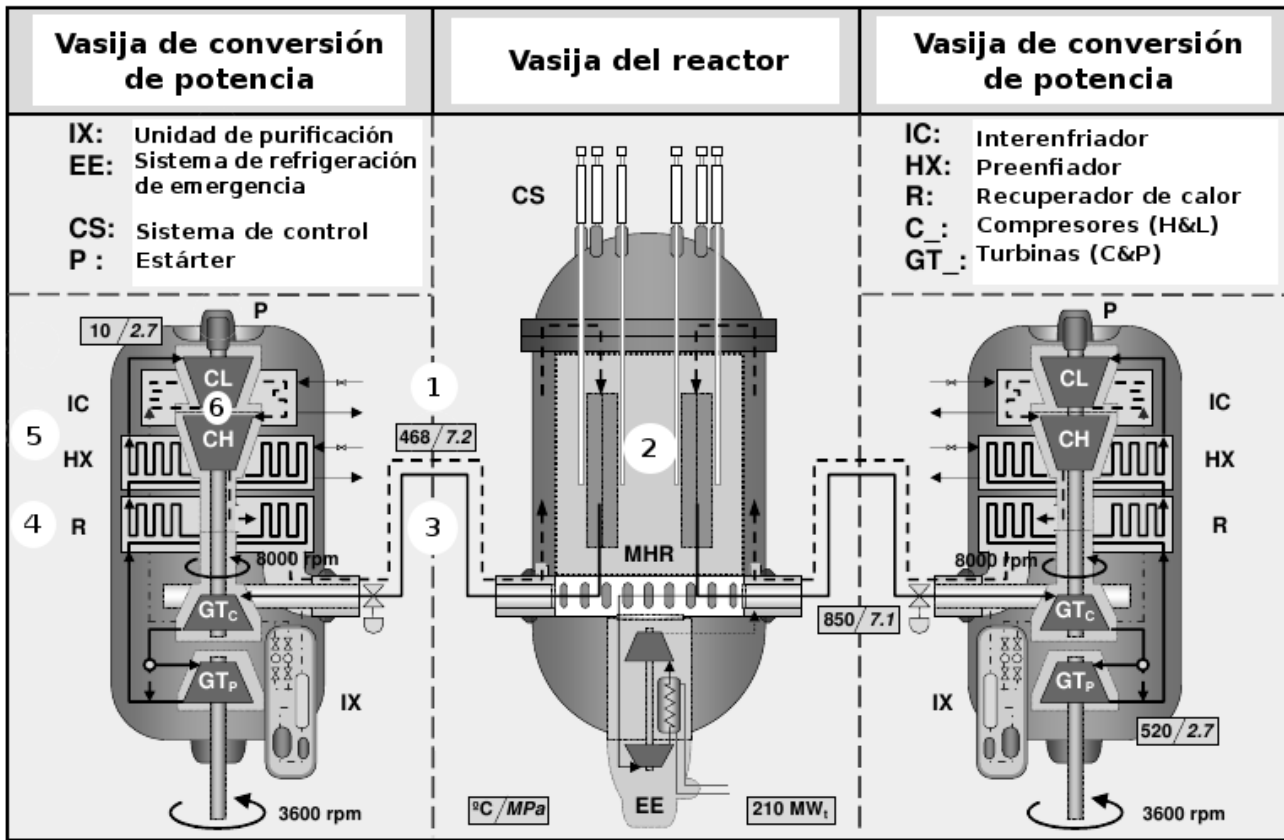


Figura 26 - Diagrama de funcionamiento de un GT – MHR (Fuente: Vergara and McKesson, 2002; imagen adaptada por el autor)

(1) El helio proveniente de la vasija del reactor de potencia se inyecta a la vasija del reactor a una temperatura de 468 °C y 7.2 MPa y asciende por su interior hasta alcanzar el reactor (**MHR**) y en él los elementos de combustible (2), por donde desciende a través de los canales de refrigeración, manteniendo la operatividad del reactor a un temperatura adecuada para el control de las reacciones de fisión del combustible. El calor producto de las reacciones de fisión absorbido por el helio provocan un aumento de su temperatura y su volumen.

(3) El helio regresa a la vasija de conversión de potencia a una temperatura de 850 °C y 7.1 MPa por donde pasa a través de la turbina de compresión (**GT_c**) y la turbina de potencia (**GT_p**), expandiendo en la primera su volumen y convirtiendo en

la segunda su energía térmica en energía cinética haciendo girar los álabes de la turbina a 3600 rpm.

(4) El helio a 520 °C y 2.7 MPa pasa a través del recuperador donde parte de su calor es absorbido y enviado al reactor para elevar su eficiencia térmica.

(5) El helio discurre a través del pre-enfriador y el inter-enfriador donde se reduce su temperatura a 2.7 Mpa.

(6) Para recuperar la caída de presión causada por la expansión térmica y la fricción, el helio pasa a través de un compresor de alta (CL) y baja presión (CT), donde aumenta su presión y temperatura.

(1) El ciclo cerrado comienza de nuevo.

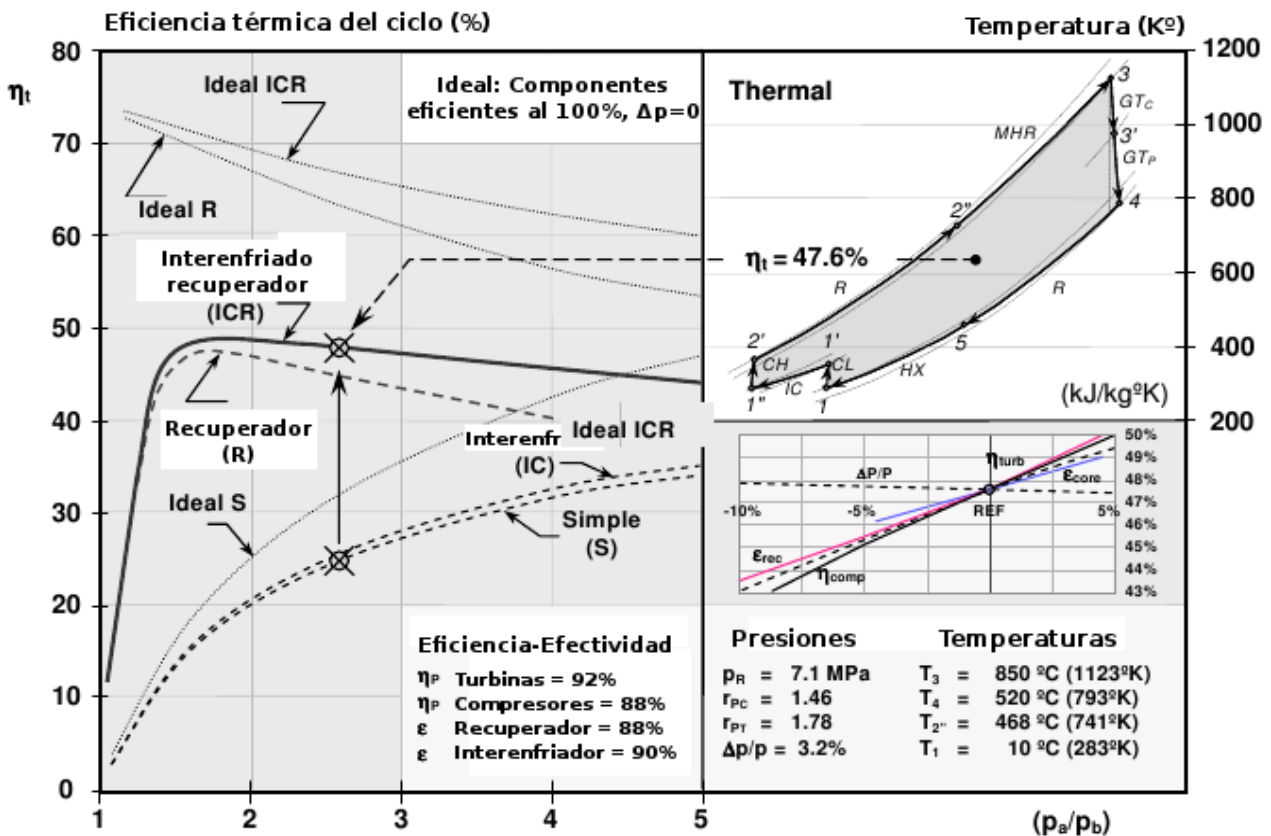


Figura 27 – Eficiencias térmicas del ciclo Brayton cerrado de helio (Fuente: Vergara and

McKesson, 2002; imagen adaptada por el autor)

2.1.6 Seguridad del reactor

La seguridad de la operatividad e integridad de un reactor es requisito indispensable para asegurar su puesta en funcionamiento y posterior comercialización de manera que en todo momento se garantice la protección de la salud de los operarios y la integridad del medio ambiente.

El reactor GT-MHR presenta una serie de características, tanto en su versión terrestre como en su versión marina, que lo hacen intrínsecamente seguro:

- **El empleo de helio en una única fase como refrigerante:** presenta las propiedades de un gas noble siendo inerte y no volviéndose radiactivo. Sus características de gas inerte no solo limitan casi totalmente su reactividad si no que además suponen un menor desgaste por corrosión a los materiales del reactor y de los elementos conversores de potencia.
- **Núcleo de grafito:** proporciona una alta capacidad térmica, lo que contribuye a mantener la temperatura e impedir la fusión del núcleo, posee una baja respuesta térmica; el calentamiento y enfriamiento del núcleo no sucede de forma inmediata permitiendo tiempo para efectuar medidas correctoras que restauren el funcionamiento normal del reactor, y firme estabilidad estructural ante altas temperaturas.
- **Partículas de combustible en capas reflectantes,** las cuales retienen los productos de fisión a temperaturas más elevadas que las de operaciones rutinarias e incluso temperaturas críticas bajo condiciones de accidente.
- **Coefficiente de temperatura de reactividad negativa** (efecto de ensanchamiento doppler) lo cual supone la desactivación del núcleo cuando está expuesto a temperaturas superiores a las de operaciones rutinarias.
- **Baja densidad energética del combustible** (5.5 MW/m^3) geometría hexagonal-prismática lo que supone que el núcleo no se verá expuesto a una fusión del

núcleo aún cuando experimente una pérdida parcial de refrigeración o pérdida total del refrigerante, pues permiten la convección y radiación del calor residual sin que el núcleo alcance temperaturas superiores a las de rotura de las partículas de combustible. En la Figura 28 puede apreciarse la máxima temperatura alcanzada por el núcleo con pérdida total y parcial del refrigerante así como el tiempo de enfriamiento del mismo.

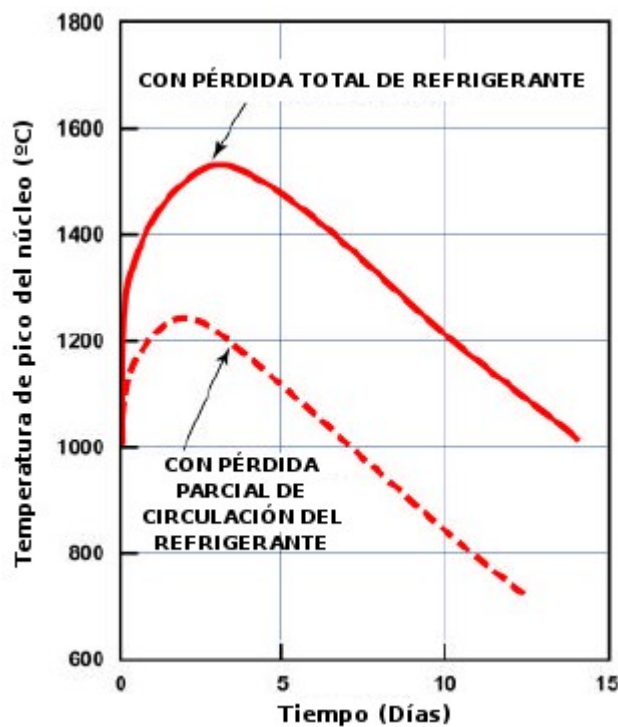


Figura 28 – Temperatura del núcleo y tiempo de enfriamiento (Fuente: General Atomics, imagen modificadas y adaptadas por el autor)

En relación a estas propiedades y según la clasificación de niveles de seguridad⁴ (Figura 38), el reactor GT-MHR se considera de nivel 1, es decir reactor *sin necesidad de sistemas activos en caso de fallo de los subsistemas. Inmune a fallos de la estructura principal o errores del operador*. No obstante, en su versión marina, el reactor GT-MHR se ve expuesto a riesgos adicionales que deben de ser especialmente considerados para adecuar su diseño y mejorar su seguridad, a saber:

⁴ La clasificación en niveles de seguridad ha sido desarrollada por el profesor Lawrence Lidsky del instituto tecnológico de Massachusetts.

- **Entrada de agua:** La entrada de agua puede afectar al control de la reactividad de la reacción nuclear (el agua posee las características de un buen moderador) y en caso de rotura del recubrimiento de las células de combustible facilitaría la dispersión de productos radiactivos y la propia agua se volvería radioactiva al entrar en contacto con los mismos.
- **Rotura de los álabes de la turbina o el compresor:** Puede ocurrir por una velocidad de rotación excesiva, defectos de fabricación, y deformación o fatiga. La rotura de los álabes de la turbina o el compresor puede causar diferencias de presión que provoquen altas velocidades del flujo, cargas estructurales por exceso de presión e incluso reversión en la dirección del flujo y pérdidas del refrigerante. En caso de suceder, los efectos podrían reducirse pudiendo desengranar la turbina de potencia y mediante un diseño de la vasija de conversión de potencia adecuado. Sin embargo, la carga estándar a la que se ven sujetas los álabes de la turbina y compresor son menores a los de una turbina de gas convencional.
- **Abordaje, varada o hundimiento:** Estos son accidentes potenciales para cualquier tipo de barco, se cual sea la propulsión que utilicen; no obstante son los más frecuentes. Para evitar daños al medio ambiente en cualquiera de estos casos los aspectos más a tener en cuenta son el diseño estructural de la planta y del buque. En caso de hundimiento el reactor debería de tener la posibilidad de equilibrar la presión a fin de evitar su destrucción por colapsamiento (sobrepresión), sin embargo el recubrimiento de las partículas de combustible podría mantener la tasa de expulsión de productos radiactivos baja de forma que no se altere el nivel de radiación medio ambiental habitual.

2.1.7 Resistencia del reactor a la proliferación nuclear, terrorismo y piratería

El reactor GT-MHR presenta pocas probabilidades de contribuir a la proliferación nuclear debido principalmente a las características únicas de su combustible TRISO y su baja densidad energética:

- La cantidad de material fisible (plutonio y uranio) por elemento de combustible gastado en un reactor GT-MHR es baja (aproximadamente 50 veces más bajo que un reactor de agua ligera).
- El contenido de plutonio (material cuya posibilidad de proliferación es la más preocupante) por elemento de combustible gastado en un reactor GT-MHR es baja en cantidad y calidad debido a la alta temperatura a la que se ven expuestos los elementos de combustible, haciéndolo poco atractivo para su uso en armas.
- No existe en la actualidad proceso tecnológico alguno que permita separar el material fisible residual en un elemento de combustible TRISO.
- El sistema de capas envolventes del combustible TRISO proporciona una contención segura frente a los productos resultante de la fisión nuclear permitiendo su almacenamiento geológico seguro.

No obstante, y a pesar de que el combustible TRISO presenta una alta resistencia a su reutilización en el desarrollo de armamento nuclear, el número de buques mercantes que pudiesen estar equipados con este tipo de reactor y su poca protección los convierten en objetivos extremadamente vulnerables a los ataques de terrorismo y especialmente, considerando el crecimiento de la misma, a la actividad pirata. Un buque equipado con un reactor nuclear es susceptible de ser utilizado como un arma: si bien las reacciones que se producen en el interior del núcleo del reactor difieren de las una bomba nuclear y por tanto no es posible de ninguna manera generar una explosión a partir del mismo, si se logra la destrucción del reactor, en concreto del elemento combustible, se verterían al medio ambiente un elevado número de sustancias radioactivas con efectos desastrosos

para la su integridad y la de la salud humana. A pesar de que esta última actividad no es sencilla (la envoltura contenedora de las partículas de combustible no comienza a fragmentarse hasta verse expuesta a temperaturas cercanas a los 2000 °) si es posible y por tanto constituye un riesgo.

Este riesgo se presenta como un factor limitante al empleo de la energía nuclear en la marina mercante mientras no se garantice la total protección de los buques que naveguen por zonas de actividad pirata o no se haya asegurado el control y tráfico seguro por las mismas, y los buques no dispongas de la suficiente inmunidad ante la susceptibilidad convertirse en objeto de amenazas o atentados terroristas.

2.1.8 Impacto medioambiental de un reactor GT-MHR

2.1.8.1 Emisiones atmosféricas y residuos nucleares generados por un GT-MHR

Las reacciones nucleares producidas en el núcleo del reactor GT-MHR no producen ninguna emisión de productos atmosféricos contaminantes. Si la planta propulsora de un buque estuviera únicamente constituida por reactores MHR, las emisiones atmosféricas del buque serían entonces nulas. No obstante, y tal como se comenta en el apartado 2.1.9, la configuración más óptima, en términos económicos resulta la de una planta GT-MHR con una turbina de gas adicional funcionando con combustible fósil.

En la Tabla 10 puede apreciarse la reducción de emisiones de CO₂, SO_x, NO_x y PM de las dos posibles configuraciones frente a una planta que emplee solamente turbina de gas de la misma potencia operando con combustibles diésel. Tal y como puede apreciarse, la reducción generada por la planta GT-MHR es muy significativa en cualquiera de sus configuraciones. No obstante, la planta GT-MHR sí genera residuos de naturaleza radiactiva. En concreto, la cantidad anual de estos residuos se estima entre 4,7 y 5,3 toneladas de residuos de alta actividad y entre 0,18 y 0,21 toneladas de residuos persistentes dependiendo respectivamente de la configuración escogida. Los residuos nucleares de alta actividad se caracterizan por tener una elevada actividad específica en

emisores de vida corta, contener radionucleidos emisores alfa de vida larga en concentraciones apreciables y generar calor. La larga vida de este tipo de residuos, unido a una generación importante de calor, condicionan todas las operaciones de su gestión, como son el manejo, transporte, acondicionamiento y almacenamiento. Debido a la existencia de radionucleidos de vida muy larga, han de pasar decenas de miles de años hasta que la actividad de este tipo de residuos quede al nivel del fondo natural, por lo que se requerirá un almacenamiento tal que garantizar el aislamiento de estos residuos durante períodos de tiempo de este orden de magnitud. De igual modo, si bien su impacto es menor, los residuos persistentes no pueden ser eliminados, por lo que de igual manera, han de aislarse y almacenarse. En el ANEXO I se exponen las posibles vías de gestión de los residuos de alta radiactividad y las especificaciones para los generador por un reactor GT-MHR (residuos de combustible TRISO).

Factor/Emisión	Turbina de gas (5 uds. de 50 MW)	GT-MHR (4 TG de 50 MW) + TG (50 MW)	GT-MHR (5 TG de 50 MW)
Combustible fósil consumido	350100	33900	
Combustible nuclear consumido		5,0	5,6
SO ₂	6700	645	
CO ₂	1000200	96700	
NO _x	8300	806	
PM	500	48	
Residuos nucleares de alta actividad		4,7	5,3
Residuos nucleares persistentes		0,18	0,21

Tabla 10 – Combustible consumido, emisiones atmosféricas y residuos generados por un conjunto de cinco turbinas de gas y un GT-MHR (Fuente: Vergara and McKesson, 2002; tabla elaborada por el autor)

2.1.9 Estado de la técnica

A día de hoy no existe todavía ningún reactor GT-MHR terrestre construido y en funcionamiento, ni por tanto su versión marina. Para asegurar la tecnología de este tipo de reactores se necesita primero un proyecto de demostración donde se puedan despejar las incertidumbres existentes en su diseño: aspectos de su seguridad general, condiciones operativas del combustible, diseño de la vasija de conversión de potencia y de la de contención. En la versión marina del GT-MHR, las principales incertidumbres que necesitan ser solventadas conciernen a los rodamientos magnéticos de la vasija de conversión de potencia y a los (dry seal) así como el funcionamiento de los intercambiadores de calor. La combinación de estas incertidumbres suponen una serie de riesgos que dificultan la obtención de fondos para la construcción de un reactor prototipo. Actualmente los principales países participantes en el desarrollo de este tipo de reactor son Francia, Alemania, Japón, China, Rusia; motivados aparentemente por creciente perseverancia y competencia tecnológica mostrada por Sur África. Este esfuerzo conjunto es apoyado y asistido por la agencia internacional de energía atómica (IAEA).

Se estima que un proyecto de desarrollo de un GT-MHR marino podría realizarse de la misma forma, en base a un esfuerzo conjunto y coordinado. Sin embargo, para la construcción y evaluación de un GT-MHR marino, es necesario conocer primero su funcionamiento y respuesta como reactor terrestre, especialmente en el aspecto más concerniente a la reacción nuclear y su control, por lo que el desarrollo de este tipo de propulsión va estrechamente ligado a la evolución del primero, lo que hace pensar que dicha tecnología propulsora no se encontrará disponible hasta más allá del 2030.

2.2 Aprovechamiento de hidrógeno en turbinas de gas aeroderivadas.

El empleo de hidrógeno como combustible en buques de la marina mercante se reduce a día de hoy a estudios, modelos teóricos y aplicaciones reducidas en pilas de combustible. No existen todavía motores marinos de combustión interna alimentados por hidrógeno. No obstante, en el presente capítulo se expone la posibilidad del empleo del hidrógeno en turbinas de gas aeroderivadas, ya que por su afinidad por el combustible son las más propicias a emplearlo. De igual forma se exponen una serie de observaciones respecto al empleo de hidrógeno como combustible en lo concerniente a su seguridad, almacenamiento y aprovechamiento, estas independientes de si el combustible es utilizado en motores de combustión interna, turbinas de gas o pilas de combustible.

2.2.1 Historia del empleo de hidrógeno en turbinas de gas

El primer intento de utilizar hidrógeno como combustible en un turbina de gas tuvo lugar en el año 1943 en un experimento llevado a cabo por la universidad de Ohio de los Estados Unidos, el cual pretendía demostrar su empleo en motores de aviación. Este primer intento asentó las bases de la utilización del hidrógeno licuado (LH₂) y oxígeno licuado (LO₂) en los programas espaciales de la NASA.

En el año 1956, se llevaron a cabo otra serie de experimentos en el Lewis Research Centre utilizando un avión modelo *Martin B-57 Canberra* con uno de sus motores modificados para permitir el empleo de H₂ como combustible. A raíz de este, la compañía Pratt and Whitney inició un programa de investigación con el apoyo de la US Air Force, cuyo objetivo era desarrollar un motor de hidrógeno para el avión prototipo *Lockheed CL-400 Sontan*. A pesar de que el proyecto fue cancelado en 1958, se desarrolló con éxito el motor del aparato, de 8950 kW, 18 etapas y 25000 rpm, siendo probado de manera satisfactoria y estableciendo las bases para el empleo de hidrógeno en el programa espacial Apollo y las lanzaderas espaciales. Fue a partir de esta investigación donde se demostró que debido a la mayor capacidad de mezcla del H₂ con el aire, se podían

conseguir combustiones más efectivas que con el empleo de hidrocarburos. Consecuentemente, el tamaño de la cámara de combustión de la turbina de gas podía verse reducido, dando lugar a un motor de menor tamaño y peso. La investigación en turbinas de gas de H₂ continuó durante los años 70 y culminó al principio de los años 90 en un exitoso proyecto de investigación realizado por Rusia y Alemania conjuntamente. Dicho proyecto, involucraba un avión trimotor *Tupolev 155* y un *Airbus A320* convertidos para el empleo de LH₂ como combustible. Paralelamente en Estados Unidos, Lockheed Martin preservó durante esos años la investigación en el empleo de H₂ como combustible en aviones supersónicos y subsónicos de pasajeros.

En el ámbito marítimo solo existe un experimento llevado a cabo por el profesor David W. Taylor del Naval Research and Development centre de la US Navy realizado en el año 1977 de forma satisfactoria. En él se consiguió la adaptación de una turbina de gas de 260 kW al interior de una lancha de 36 pies de eslora para su empleo con hidrógeno en fase gaseosa (GH₂). De las conclusiones pudieron extraerse una serie de especificaciones técnicas aplicables a otras turbinas como la utilizada en el experimento.

2.2.2 Propiedades del hidrógeno como combustible

Concentración estequiométrica [%Volumen]	29.60
Coefficiente de difusión	7.9
Rango de inflamabilidad [%Volumen]	4.0 – 75.0
Velocidad de llama [cm/s]	265
Energía de ignición mínima [mJ]	0.018
Distancia de apagado [100
Temperatura de auto-ignición	500 - 571
Densidad (fase líquida) [kg/m³]	10.1
Densidad (fase gaseosa/200 bar) [kg/m³]	70.8
Energía específica	120.65

Tabla 11 – Propiedades físico-químicas del hidrógeno

- **Rango de inflamabilidad amplio:** El hidrógeno dispone de un rango de inflamabilidad amplio en comparación con cualquier otro combustible. A efectos prácticos, supone que la combustión del hidrógeno puede realizarse en mezclas pobres; mezclas donde la cantidad de combustible es menor que la cantidad teórica, estequiométrica o químicamente ideal necesaria para la combustión con una cantidad dada de aire. Esto se traduce en un mayor rendimiento económico del combustible y una reacción de combustión más completa.
- **Energía de ignición baja:** La energía necesaria para la combustión del H₂ es muy baja, lo que asegura una rápida ignición en mezclas pobres. No obstante, una baja energía de ignición supone también una mayor sensibilidad a aquellas partes de la turbina de gas que estén lo suficientemente calientes como para considerarse posibles fuentes de ignición.
- **Temperatura de autoignición alta:** El hidrógeno dispone de una temperatura de autoignición alta, lo cual reviste importancia en la relación de compresión de la mezcla del H₂ con el comburente ya que a partir de la primera se determinará la relación de compresión para la combustión ya que está relacionada con el aumento de temperatura durante la compresión **(1)**.

$$T_2 = T_1 (V_1/V_2)^{\gamma - 1} \quad (1)$$

donde:

V₁/V₂ = relación de compresión

T₁ = temperatura inicial absoluta

T₂ = temperatura final absoluta

γ = relación de calores específicos

La temperatura final absoluta limita la relación de compresión. La elevada temperatura de autoignición del hidrógeno permite usar mayores relaciones de compresión que cualquier otro combustible fósil.

- **Velocidad de llama alta:** En condiciones estequiométricas la velocidad de llama del hidrógeno es alta, lo cual supone una mayor acercamiento al ciclo de termodinámico ideal de la turbina de gas. Sin embargo ha de tenerse en cuenta que con mezclas pobres de aire/hidrógeno, la velocidad de la llama disminuye significativamente.
- **Difusividad alta:** La alta capacidad de difusión del hidrógeno nos indica la facilidad del mismo para dispersarse el aire. Esto facilita la formación de un mezcla uniforme del mismo con el comburente y propicia la dispersión del hidrógeno en el ambiente en caso de producirse una fuga.
- **Distancia de apagado corta:** La distancia de apagado de la combustión del hidrógeno es muy corta, lo que provoca que las llamas producidas durante la combustión circulen más cerca de las paredes del quemador y la turbina de expansión, por lo que resultará más difícil apagar una llama de hidrógeno que de otro combustible.
- **Densidad energética baja:** La densidad energética del hidrógeno, es, en cualquiera de sus fases líquida o gaseosa, inferior a la del fuel marino o al gas oil (865 kg/m^3). No obstante, la fase líquida resulta claramente superior a la fase gaseosa para su almacenamiento, transporte y aprovechamiento.
- **Energía específica alta:** La energía específica del hidrógeno es muy superior a cualquier combustible fósil. En comparación con el gas oil ($42,69 \text{ MJ/Kg}$), energía específica del hidrógeno es casi tres veces superior. Esto se traduce en un menor consumo de combustible para la producción de un potencia dada y por tanto en un mayor rendimiento como combustible.

2.2.3 Ciclos de combustión del hidrógeno

Ciclo de combustión de hidrógeno y oxígeno (H₂/O₂)

En 1983, el profesor Herbert Jericha de la Universidad de Graz (Austria) propuso un nuevo ciclo termodinámico que utilizaba hidrógeno de combustible y oxígeno puro como comburente. La estructura está basada en el Ciclo de Brayton, pero como fluido de trabajo se emplea el propio vapor de agua, que opera en ciclo cerrado (excepto la purga del caudal formado en la combustión), y alcanza eficiencias en el entorno del 60%.

Entre los años 1993 y 2002 el gobierno japonés patrocinó un ambicioso programa de investigación, desarrollo y prospectiva bajo el nombre de World Energy Net (WE-NET) en el que además del organismo oficial participaron otras empresas como Toshiba, Mitsubishi y Westinghouse. El objetivo de este programa consistía en el estudio de las posibilidades que ofrece el hidrógeno en diferentes aplicaciones energética. El programa estaba dividido en dos fases abarcando la primera el periodo comprendido entre los años 1993 y 1998 y la segunda el comprendido entre los años 1998 y 2002. Durante la primera fase se realizó el estudio de la configuración más eficiente para turbinas de gas, eligiendo el ciclo Graz y el ciclo Rankine como punto de partida y creando en base a estos un ciclo más adecuado para la combustión del H₂. Una vez se estableció el ciclo óptimo, se realizó un riguroso estudio sobre su diseño y la viabilidad de los diferentes componentes dando como resultado un ciclo regenerativo cerrado combinado con una turbina de combustión de H₂ de 500 MW de potencia (Figura 29). Tal y como muestra el ciclo Graz, se utiliza vapor de agua resultante del ciclo de combustión del H₂ y O₂, por lo que no hay emisiones de CO₂ ni de NO_x.

El O₂ necesario para la combustión del H₂ es licuado en la propia planta mientras que el H₂ se proporciona en estado líquido desde un tanque de almacenamiento. La capacidad del H₂ de disipar calor es aprovechada por los intercambiadores de calor para la licuefacción del O₂.

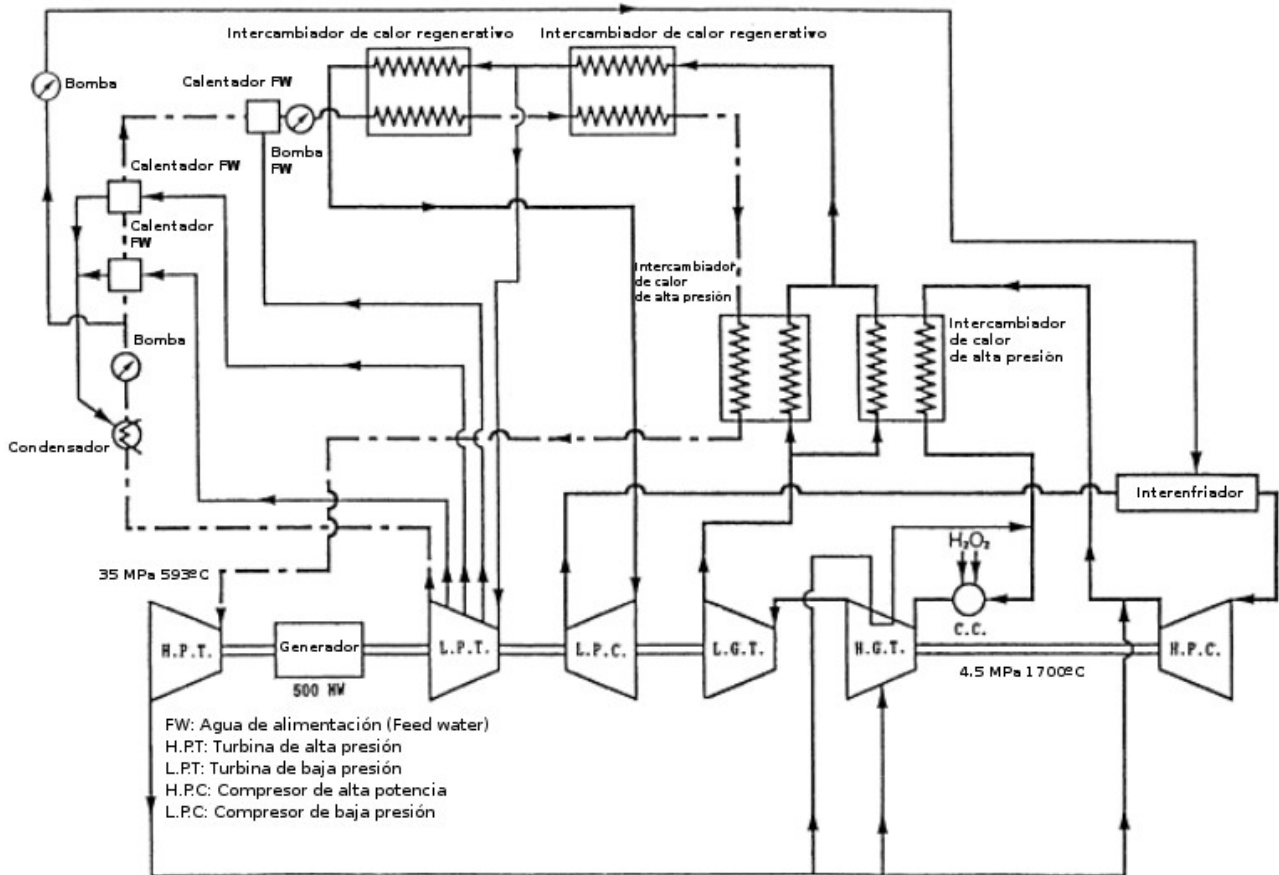
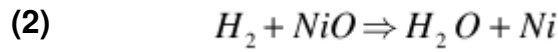


Figura 29 - Ciclo regenerativo cerrado combinado con una turbina de combustión de H₂/O₂ de 500 MW de potencia (Fuente: Veldhius, 2007; imagen adaptada por el autor)

Este sistema es capaz de lograr una eficiencia térmica del 60% lo que requiere que la temperatura del H₂ a la entrada de la turbina sea de 1700°C; una temperatura tan elevada causa no obstante un elevado esfuerzo térmico en los álabes de la turbinas.

La reducción de la temperatura de entrada de la turbina así como el aumento de la eficiencia térmica del ciclo puede lograrse mediante la inserción en el ciclo de un sistema químico en bucle basado en algún óxido metálico (Figura 30), lo que hace innecesaria la presencia del O₂ almacenado. En este ciclo de potencia, la reacción química de oxidación entre el H₂ y el óxido metálico es la equivalente a la reacción de combustión mostrada en el primer ciclo. Tal y como muestra la ecuación (2) el H₂ combinado con óxido de níquel produce vapor y reduce la cantidad de óxido de níquel liberando energía y añadiéndola al

sistema, incrementando su eficiencia térmica hasta el 63.5% y reduciendo la temperatura de entrada el vapor en la turbina a los 1200 °C.



El níquel reducido es trasladado a un pequeño depósito donde recibe O₂ del ventilador de la turbina, volviéndose a oxidar para su reutilización en la oxidación del H₂, de acuerdo a la ecuación (3).

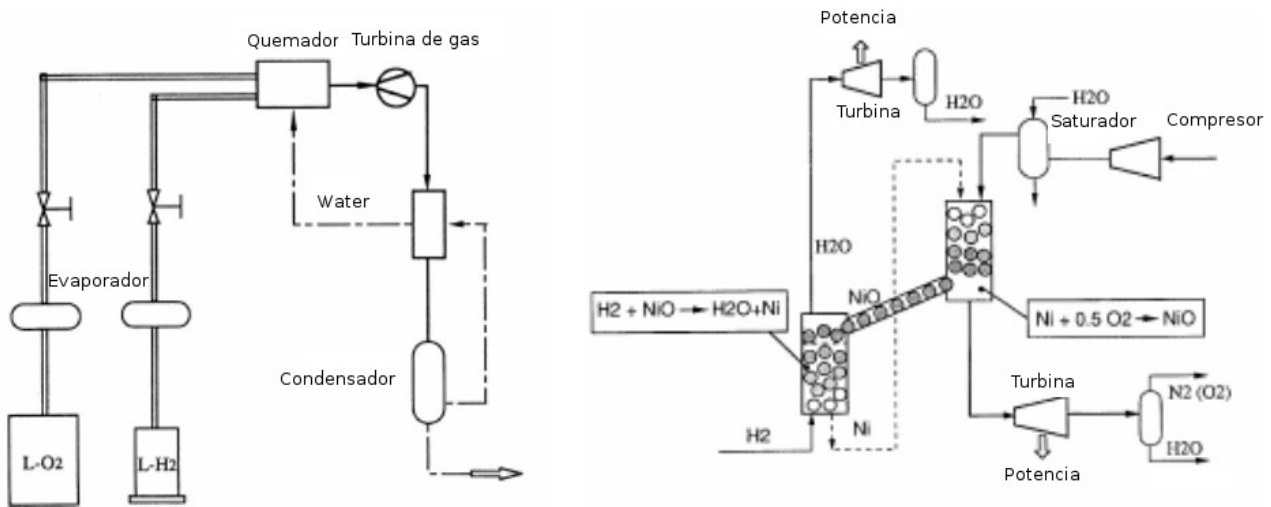
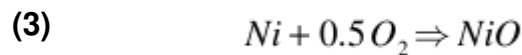


Figura 30 - Ciclo de combustión regenerativo H₂/O₂ simplificado (izquierda) y ciclo de oxidación regenerativo simplificado H₂/NiO (derecha) (Fuente: Veldhuis, 2007; imagen adaptada por el autor)

Tal y como se puede apreciar ninguno de los dos ciclos genera NO_x ya que en ninguno de los casos la combustión se realiza con aire ambiental ni CO₂ debido a que ningún combustible fósil es utilizado.

Ciclo de combustión de hidrógeno y aire

El ciclo de combustión de H₂ y aire siempre se ha considerado como una posible aplicación a los modelos de transporte actual. Si bien todavía no existe ni se ha presentado ningún diseño concreto para buques mercantes, sí existen prototipos y

estudios en el campo de la aeronáutica⁵ que, a pesar de su diferente proyección⁶, presentan un importante avance en el sector y algunos de sus resultados son también aplicables al campo náutico, pues las turbinas aeroderivadas ya se emplean actualmente en buques de alta velocidad (HSC).

2.2.4 Adecuación tecnológica de los ciclos de combustión a la marina mercante

Los distintos ciclos de combustión de hidrógeno en turbinas de gas mencionados en el apartado anterior sufren de ciertas dificultades en su aplicación en buques mercantes. El ciclo cerrado de combustión H_2/O_2 proporciona la eficiencia térmica más elevada en comparación con los ciclos abiertos pero el elevado peso de las instalaciones de almacenamiento del H_2 y O_2 licuado así como el alto coste del segundo imposibilitan su aplicación en buques mercantes. El peso de los reactores adicionales requeridos para el bucle químico supondría de la misma forma un añadido de peso indeseado para el buque. Desde un punto de vista tecnológico próximo a los años venideros el ciclo de combustión de H_2 con aire utilizando turbinas de gas aeroderivadas y almacenamiento de H_2 licuado ofrece enormes posibilidades.

Tal y como se comenta en el apartado anterior, las turbinas aeroderivadas ya se utilizan actualmente en buques de alta velocidad; tal es el caso del *HSS Stena 1500* (Figura 31) equipado con 2 turbinas de gas GE 1600 derivadas del modelo GE F404 utilizado en aviones de combate (*Lockheed F-117*, *McDonnell Douglas F/A-18* entre otros) y 2 turbinas adicionales GE 2500 derivadas del modelo GE CF6 utilizado en aviones comerciales (*Airbus A300*, *A310 A330*; *Boeing 767*; *McDonnell Douglas MD-10*).

5 Nos referimos aquí con especial relevancia al proyecto llevado a cabo en el año 2001 por la industria aeronáutica europea bajo tutela de la *European Aeronautic Defence and Space Company* (EADS) bautizado como *Cryoplane*.

6 Las turbinas de gas empleadas en los motores (turbofán) de un avión se diseñan en base a la potencia necesaria para el despegue mientras que en las de aplicación marítima se busca la mejor relación potencia/velocidad de crucero.



Figura 31 – HSS Stena 1500 (Fuente: Wikipedia)

A día de hoy la turbina aeroderivada de mayor potencia existente en el mercado es la LM6000 Sprint de General Electric (Figura 32)

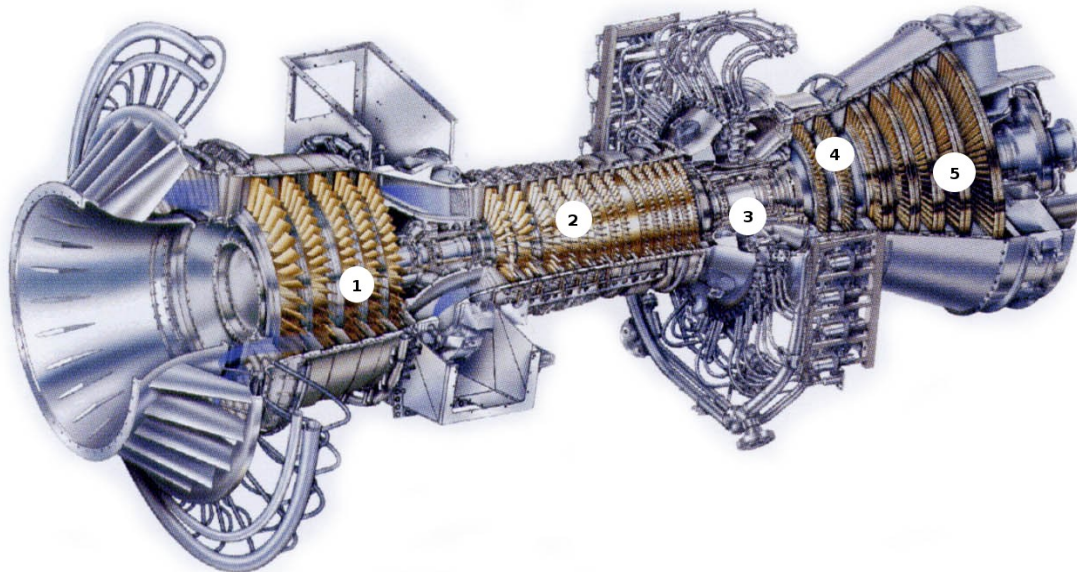


Figura 32– Turbina de gas aeroderivada LM6000 (Fuente: Rolls Royce; imagen adaptada por el autor)

Esta turbina consiste en un compresor de baja presión de cinco etapas **(1)** seguido de un compresor de alta presión de catorce etapas **(2)**. Un quemador en forma de anillo con 30 surtidores **(3)** proporciona el combustible caliente y tras reaccionar con el aire discurre por

una turbina de alta presión de dos etapas **(4)** y posteriormente por una turbina de baja presión de cinco etapas **(5)**. Este diseño proporciona una relación de compresión de 29:1 y opera a un régimen de 3600 rpm.

En 1998 GE introdujo el interenfriador de espray para turbina en una nueva versión de la LM 6000, la LM 6000 Sprint. Esta mejora aprovecha el aire de descarga del compresor para enfriar los componentes de la turbina de alta presión y aumenta la eficiencia del ciclo térmico y la generación de potencia.

El empleo de H₂ en esta turbina supondría un aumento de la eficiencia del ciclo térmico de un 1.92% y un 3.8% en la potencia proporcionada al propulsor. Por otra para conocer el consumo que de H₂ en una turbina LM6000 nos puede facilitar una idea aproximada de la autonomía que puede tener un buque que disponga de este modelo. De forma simplificada se puede establecer a partir del flujo másico, de acuerdo a la ecuación **(4)**:

$$(4) \quad \dot{M}_{fuel} = \frac{\dot{W}_{net}}{Q_{fuel} \cdot \eta_{thermal}}$$

donde:

\dot{W}_{net} = potencia neta = 49,220 MW

Q_{fuel} = energía específica = 120,650 kJ/kg

$\eta_{thermal}$ = eficiencia térmica = 44.62%

De acuerdo a esta ecuación el flujo másico será 0.914 kg/s mientras que el consumo específico de combustible será 66, 872 g de H₂ por kW/hora.

2.2.4.1 Infraestructura requerida para el aprovechamiento de LH₂

Sistema de almacenamiento

El hidrógeno presenta ciertas propiedades (apartado 2.2) que hacen que su almacenamiento sea una de las cuestiones más complejas para su utilización como combustible. La baja densidad se traduce, tanto si se encuentra en estado líquido como

en gaseoso, en un bajo contenido energético por unidad de volumen; de este modo, un volumen dado de hidrógeno contendrá menos energía que el mismo volumen de otros combustibles. Esto aumentará también el tamaño relativo del tanque de almacenamiento, pues se requerirá mayor cantidad de hidrógeno, y por ello un mayor volumen, para satisfacer los requisitos del buque. A pesar de su baja densidad de energía volumétrica, el hidrógeno dispone de la relación energía – peso más elevada que cualquier otro combustible, sin embargo esta ventaja es eclipsada en la mayoría de los casos por el peso de los tanques de almacenamiento.

La forma más adecuada para el almacenamiento de H_2 a bordo de un buque resultar ser entonces en su fase líquida, no solo por tener una mayor densidad energética, si no por que se da solución a muchos de los problemas relacionados con el peso y el tamaño que tienen los sistemas de almacenamiento de gas a alta presión. Sin embargo, una de los mayores desafíos presentados por el H_2 , es la necesidad de encontrarse a temperaturas criogénicas para permanecer en fase líquida. El H_2 líquido por tanto solo puede almacenarse por debajo de su punto normal de ebullición o cerca de la presión ambiental en un tanque Dewar súper-aislante de doble pared (Figura 33). Éste aislamiento está formado por varias capas de vacío separadas por capas de fibras y permite que el H_2 permanezca en estado líquido en su interior con pérdidas (boil off) reducidas a un 1% - 2% de su capacidad total al día.

El hidrógeno no se puede almacenar en estado líquido indefinidamente ya que todo tipo de tanque, sin importar la calidad de su aislamiento, permiten que una cierta cantidad de calor del ambiente que rodea al tanque se transfiera al interior del mismo. Este calor provoca la evaporación de cierta cantidad de H_2 del tanque, y por tanto, la presión del mismo aumentará. La forma ideal de un tanque destinado al almacenamiento de H_2 es la esférica, dado que esta forma geométrica ofrece la menor área superficial para un volumen dado, con lo que tendrá el área más pequeña de transferencia térmica.

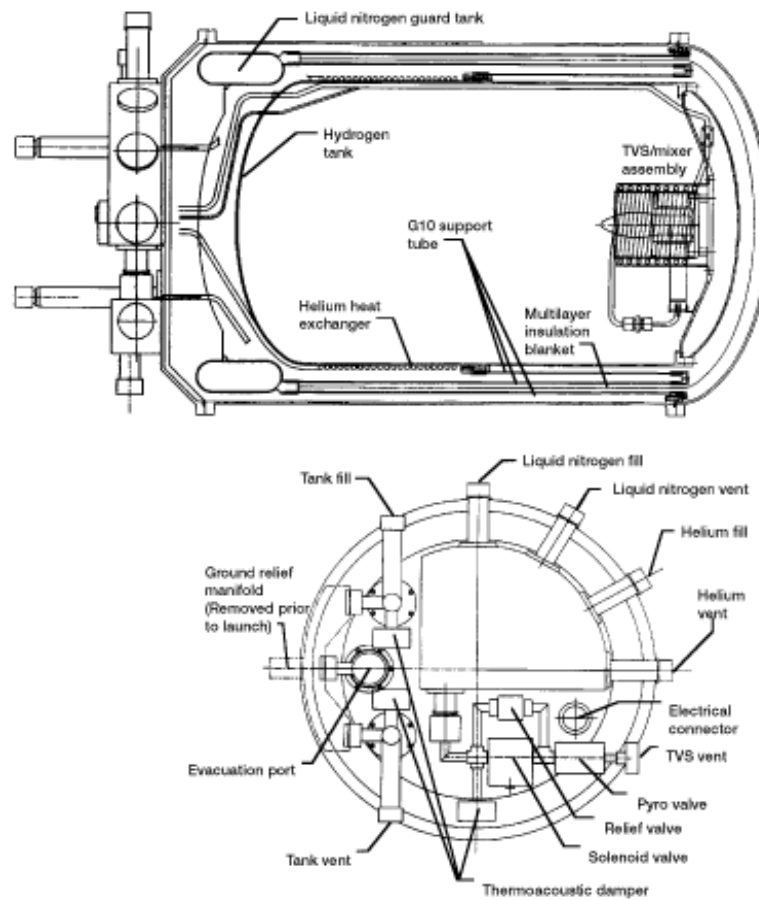


Figura 33 – Modelo de tanque Dewar empleado en lanzaderas espaciales (Fuente: Nasa)

Sistema de utilización

Tal y como se expone en el apartado anterior, el almacenamiento óptimo de H_2 a bordo de un buque es en su fase líquida a temperaturas criogénicas. Esto conlleva ciertos aspectos que repercutirán en la infraestructura requerida a bordo para la utilización del H_2 : a parte de los tanques, ya mencionados en el apartado anterior, ha de considerarse la reutilización del H_2 evaporado en los mismos (boil-off) y el cambio de fase del H_2 de líquida a gaseosa para su aprovechamiento en la turbina de gas. En base a estas variables, se puede determinar de forma conceptual una infraestructura genérica requerida por el empleo de H_2 licuado a bordo de un buque como la que se muestra en la Figura 34.

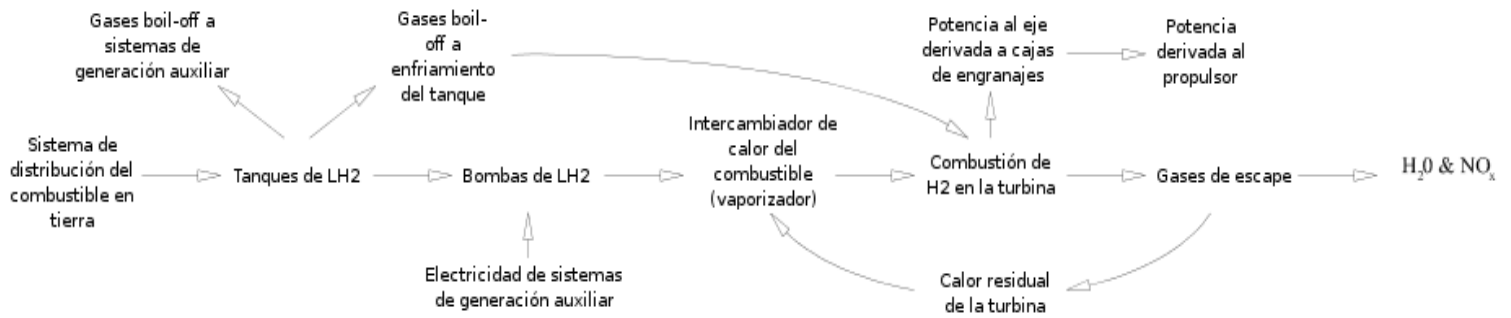


Figura 34 - Infraestructura genérica requerida por el LH₂ a bordo de un buque (Fuente:

Veldhius, 2007; imagen adaptada por el autor)

Por otra parte, las bajas temperaturas con las que operará el sistema lo convierten en un sistema totalmente distinto a los de combustibles convencionales, en el que una serie de consideraciones habrán de tenerse en cuenta para su diseño:

- **Temperatura de operación:** Considerando que las temperaturas a la que se verá expuesto el sistema son temperaturas criogénicas, el primer criterio que se debe considerar en el diseño es que el sistema sea de tipo cerrado. Al exponer un fluido criogénico a condiciones atmosféricas más calidas este se evaporará si no en su totalidad, en grandes cantidades. Es por ello que un sistema cerrado requiere trabajar a mayores presiones que las atmosféricas evitando que el aire entre en el sistema, ya que, en contacto con un líquido criogénico como el LH₂ se congelaría inmediatamente formando cristales de hielo. Estos cristales pueden bloquear las líneas de fluido del sistema y dañar las bombas, riesgo que ha de evitarse. En el caso de los tanques, las exigencias de un sistema cerrado supone que estos estén separados de la atmósfera mediante una presión mayor que la ambiental, lo cual es opuesto al diseño de los tanques de combustible convencionales en donde los tubos de respiración los conectan con la atmósfera con el fin de contrarrestar la fluctuación de presión ocasionada por la disminución gradual del contenido del tanque. En su lugar, en los tanques de LH₂, el cambio de volumen debe ser

contrarrestado con gas a temperatura criogénica, el cual mantiene el balance entre la presión interna del tanque y la atmosférica.

- **Manejo de estado líquido y gaseoso del LH₂:** Un segundo requisito en el diseño del sistema es su capacidad de manejar tanto el estado líquido como gaseoso del LH₂. Los sistemas de combustibles convencionales solamente tratan con el estado líquido de los mismos mientras que debido al cambio de fase que el LH₂ experimenta para su aprovechamiento en la turbina de gas, por lo que su sistema deberá estar adaptado por tal aspecto, sobre todo en cuanto a la velocidad del flujo, su caudal másico y sus temperaturas y presiones.
- **Materiales del sistema:** Los materiales utilizados en el sistema han de ser capaces de soportar fragilización por H₂, ser impermeables a H₂ en estado gaseoso, mantener su ductibilidad y resistencia a la fractura a temperaturas criogénicas y tener una reparación y mantenimiento amena.

2.2.4.2 Aspectos relativos a la seguridad

Debido a su alto contenido energético y a sus excelentes propiedades de combustión, el hidrógeno es capaz de crear situaciones de riesgo para los humanos. Sin embargo, posee ciertas características que lo convierten en un combustible más seguro de lo que el público general opina. Como ya se comentó en el apartado 2.2, su densidad es muy baja y su velocidad de difusión muy elevada, lo que provoca que al entrar en contacto con el aire gane suficiente altitud como para no suponer un riesgo en un intervalo de tiempo muy breve. Esta propiedad puede observarse en práctica en la Figura 35, donde se expone los resultados de la simulación de una pérdida de LH₂ y gasolina en un coche en un intervalo de 3 y 60 segundos respectivamente desde que se produce la fuga.

El GH₂ presurizado es liberado a través de un dispositivo de alivio de presión situado en la parte trasera del coche, mientras que la gasolina sale al exterior a través de un agujero de 0.16 cm de diámetro situado en la línea de gasolina bajo el coche. Debido a las

distintas posiciones de los orificios de escape del combustible, los daños provocados en el coche difieren, sin embargo estas no favorecen al daño ocasionado por la combustión de la gasolina. En la simulación se liberaron 73854 kJ de gasolina y 184635 kJ de GH2. Las consecuencias para el coche de gasolina y sus ocupantes son dramáticamente distintas de las del coche de GH2, como se puede apreciar en la imagen.

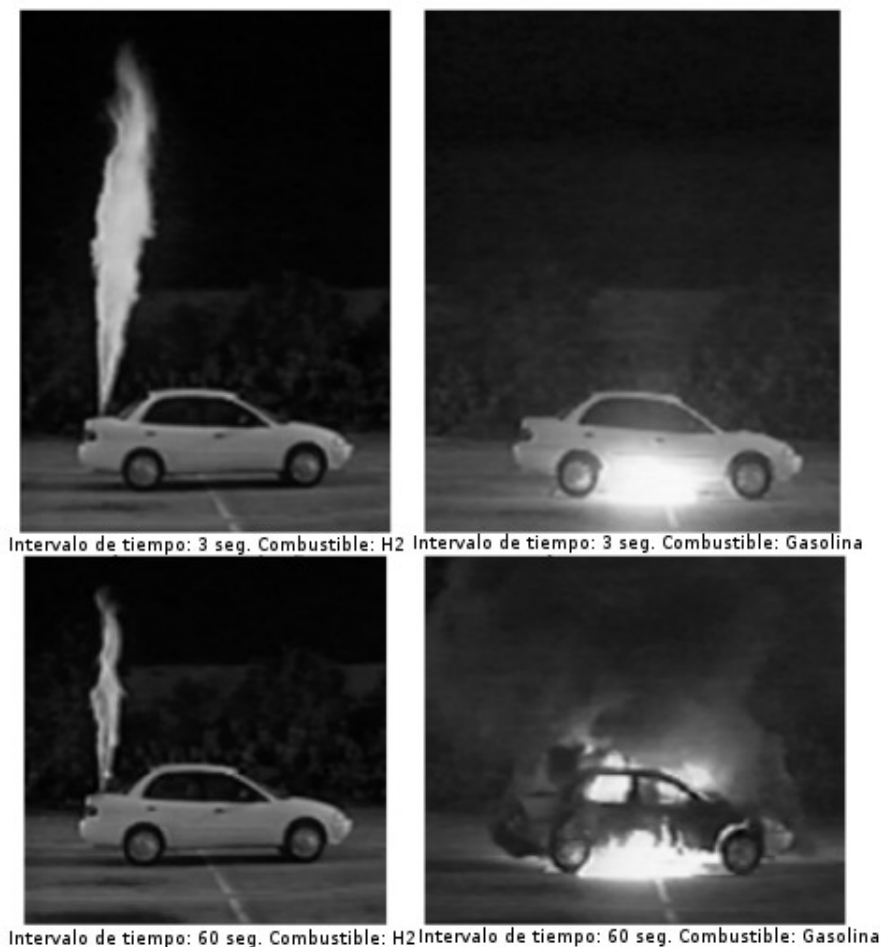


Figura 35 – Reacción de combustión y fuga comparada (Fuente: Veldhius, 2007; adaptada por el autor)

Otro de los aspectos de riesgo relacionados con el manejo de hidrógeno licuado es su baja temperatura. Los principales riesgos son identificados de la siguiente forma:

- **Quemadura criogénicas y congelación:** su severidad dependerá de la temperatura y del tiempo de exposición. De forma similar, la inhalación de vapor criogénico puede dañar los pulmones y la exposición prolongada a los mismos

puede causar lesiones en los ojos.

- **Deficiencia de oxígeno (anoxia):** puede ocurrir cuando un líquido criogénico se evapora y desplaza el oxígeno en las inmediaciones de una persona. Pueden sucederse varias fases de asfixia; la más dramática es la asfixia repentina, causada de igual forma por la inhalación de vapores criogénicos sin contenido de oxígeno.
- **Toxicidad:** Inexistente en el caso del hidrógeno.
- **Quemaduras térmicas:** pueden ocurrir cuando una fuga criogénica arde espontáneamente al entrar en contacto con electricidad estática. Las llamas de hidrógeno no son visibles al ojo desnudo, por lo que debería prestarse especial atención a las llamas que pudieran producirse en zonas de ventilación. Las quemaduras térmicas ocurren normalmente a través de radiación del calor o mediante el contacto directo con la llama.
- **Hipotermia:** ocurre cuando la temperatura interna del cuerpo humano cae por su debajo de su nivel normal. La hipotermia puede detectarse en una reducción sustancial de las reacciones y capacidades de una persona.

Con tal de evitar sufrir estos riesgos han de tomarse ciertas medidas que podemos englobar de forma resumida en los siguientes puntos:

- Empleo de ropa térmica y accesorios de protección por los operarios del departamento de máquinas cuando realicen operaciones en los espacios de la sala de máquinas distinto al espacio de la cámara de control.
- Incrementar el número de aparatos de respiración de emergencia situados en la sala de máquinas y sus inmediaciones.
- Disponer de ayudas térmicas en la sala de máquinas y sus inmediaciones.
- Realizar cualquier tipo de operación en la sala de máquinas bajo la supervisión de otro operario.

- Crear y emplear un código de prácticas y medidas de seguridad para aquellos buques que empleen hidrógeno licuado como combustible.

A parte de los mencionados, los líquidos criogénicos engloban una serie de riesgos que pueden comprometer la estructura del buques. Cuando un líquido criogenizado se evapora por el ingreso de calor o exposición a temperaturas de ambiente cálidas verá su volumen incrementado drásticamente. Del mismo modo, cuando se halle confinado en un espacio limitado, la presión en su interior aumentará muy rápidamente. Estas presiones internas pueden superar las presiones de construcción del tanque que contiene el líquido criogenizado, por lo que se hace necesario dotar a la estructura de dispositivos de alivio de presión. Estos dispositivos pueden ser válvulas de resorte, válvula de mecanismo piloto o discos de ruptura. Las líneas diseñadas para transferencias de líquidos criogénicos deben de ser protegidas con tales dispositivos para evitar aumentos de presión causada por la evaporación del líquido.

Teniendo en cuenta la elevada inflamabilidad del hidrógeno, las siguiente medidas de seguridad pueden ser también consideradas para evitar la formación de atmósferas explosivas y posteriores incendios:

- Segregación de los espacios de cámara de bombas, espacio destinado a los tanques de almacenamiento y alojamiento del vaporizador.
- Empleo de gas inerte en los espacios de cámara de bombas, espacio destinado a los tanques de almacenamiento y alojamiento del vaporizador. Empleo de gas inerte así mismo para el purgado de bombas, líneas y el espacio inter-barreras de los tanques de almacenamiento.
- Instalación de sensores de detección de fugas y sus correspondientes alarmas.
- Instalación de dispositivos de medida de temperatura y presión en el interior de los tanques de almacenamiento.

2.2.5 Impacto ambiental del aprovechamiento de hidrógeno en turbinas de gas

2.2.5.1 Impacto directo: emisiones generadas durante la combustión del hidrógeno en una turbina de gas

El aire terrestre contiene nitrógeno en una proporción aproximada del 78%, lo que produce, al ser utilizado como comburente en una reacción de combustión, la formación de partículas NO_x . Existen no obstante, ciertos factores relativos a esta formación que influyen en la cantidad de partículas de NO_x producidas como son:

- La máxima temperatura de llama estequiométrica.
- El porcentaje de aire en exceso utilizado durante por encima de la cantidad teórica de aire necesario para la combustión estequiométrica.
- La presión de la cámara de combustión.
- Tiempo de combustión a máxima temperatura.
- Cantidad de N_2 contenida en el combustible usado.
- Las dimensiones y forma geométrica de los surtidores de combustible.

Debido a la alta temperatura de llama que la combustión de H_2 puede llegar a alcanzar, la producción de NO_x será mayor que la producida en la combustión de un combustible fósil y aumentará en función de cuánto mayor sea la temperatura de la llama (Figura 36). Sin embargo, la alta velocidad de llama del H_2 en comparación con otros hidrocarburos reduce el tiempo de combustión, lo que a su vez disminuye la formación de partículas de NO_x . Se calcula que esta reducción es mayor que el incremento debido a la temperatura de la llama; las emisiones NO_x producidas por la combustión de H_2 son un 40% menor que las producidas por la combustión de queroseno en el turbofán de un avión. Esta comparación muestra el potencial reductor del H_2 en cuanto a emisiones de partículas NO_x en una turbina de gas.

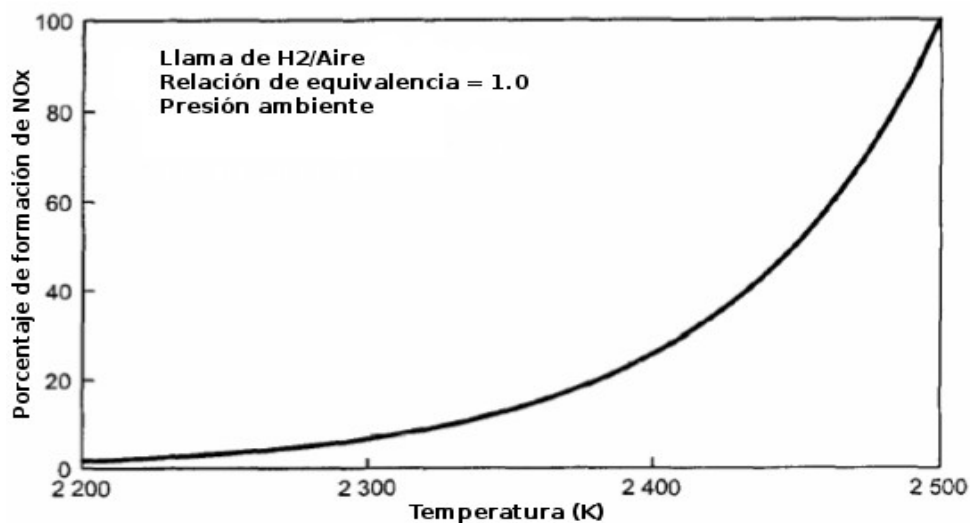


Figura 36 – Formación de NOx en función de la temperatura de llama (Fuente: Veldhuis, 2007; imagen adaptada por el autor)

La combustión del H₂ no emite cantidad alguna de CO₂ ni SO_x, tampoco de PM ni CO, lo cual supone una enorme ventaja; sin embargo no hay que olvidar que el vapor de agua generado en su reacción de combustión puede resultar perjudicial para el medio ambiente debido a que contribuye a aumentar el efecto invernadero.

2.2.5.2 Impacto indirecto: Producción de hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo (se estima en aproximadamente un 75% de su masa conocida) pero en la Tierra no es posible encontrarlo en su forma natural ya que posee una alta reactividad, y en su estado gaseoso (H₂), su pequeña masa le permite escapar de la interacción gravitatoria. Estas características hacen que el hidrógeno tenga que ser generado a partir de otros componentes químicos mediante una cierta inversión energética, lo que lo convierte en un portador secundario de energía. En la actualidad existen diversas formas de producir H₂:

- **Reformado de hidrocarburos:** El reformado de hidrocarburos es el proceso de extracción de H₂ a partir de metano (gas natural), metanol, gasolina y diésel o carbón. Actualmente es la mayor fuente de generación de H₂ y el proceso menos

costoso, pero presenta la desventaja de causar emisiones atmosféricas contaminantes (principalmente CO₂ y NO_x) y basarse en el consumo de recursos no renovables.

La principal técnica de reformado consiste en un proceso químico en el cual el hidrógeno contenido en el combustible reacciona con la presencia de vapor (proceso que recibe el nombre de *reformado por vapor*), oxígeno (*reformado por oxidación*), o ambos (*reformado autotérmico*) resultando en una mezcla rica en H₂ denominada reformado. La composición específica del reformado depende del combustible y del proceso utilizados, pero siempre contiene otros compuestos como N₂, CO₂, CO y un pequeño porcentaje de combustible que no haya sido reformado. A partir del reformado se extrae el H₂ puro, quedando una mezcla residual de los demás compuestos denominada refinado.

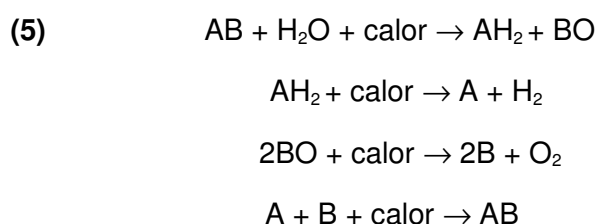
También se puede extraer el H₂ contenido en un combustible mediante descomposición térmica, produciéndose H₂ de alta pureza (95%) y carbón sólido, no obstante esta es la forma de obtención de menor eficiencia térmica.

- **Electrólisis del agua:** La electrólisis consiste en la descomposición del agua en sus componentes elementales (H₂ y O₂) mediante la circulación de una corriente eléctrica a través suya. La pureza del H₂ obtenida en el proceso es muy elevada y la naturaleza del mismo hace que sea aplicable a escalas locales o industriales. Su principal ventaja radica en no emitir sustancia contaminante alguna ni consumir ningún recurso renovable de forma directa, sin embargo requiere grandes cantidades de energía eléctrica para llevarse a cabo lo que, dependiendo de la fuente utilizada para la generación de esta energía, puede suponer que el proceso no sea ni limpio ni sostenible, convirtiéndose en una desventaja. En este aspecto, el empleo de energías renovables (fotovoltaica, solar y térmica) constituyen un papel fundamental ya que harían de la generación de H₂ un proceso totalmente

limpio y renovable.

El rendimiento de este proceso es otros de sus aspectos menos atractivos económicamente, ya que ofrece un rendimiento energético sensiblemente menor (entre un 65% y 80%) y el coste quemar los combustibles fósiles para generar electricidad para la electrólisis es de tres a cinco veces mayor que en el caso de reformado de hidrocarburos para obtener hidrógeno.

- **Descomposición termoquímica del agua:** Consiste en la descomposición de agua en sus componentes elementales (H_2 y O_2) mediante aplicación térmica directa hasta que el agua la temperatura de disociación natural ($\pm 2500^\circ C$). Este valor resulta demasiado elevado como para considerarse un procedimiento de generación de H_2 práctico, por lo que se añaden ciertos reactivos químicos que facilitan la descomposición del agua mediante una reacción de oxidación – reducción (5) que sucede aproximadamente a $700^\circ C$:



Donde A y B son compuestos químicos que normalmente contienen hierro, oxígeno y clorina.

La eficiencia de este proceso es aproximadamente del 50% y al igual que en electrolítico, será tan limpio y renovable como su fuente de energía. En este aspecto, y a pesar de no ser una energía completamente limpia ni renovable, la opción nuclear ofrece la posibilidad de generación de H_2 y O_2 a través los planeados reactores de Generación IV comentados en el capítulo anterior. Este tipo de reactores emplean un ciclo termoquímico basado en azufre y yodo que tiene lugar a unos $850^\circ C$, temperatura alcanzada por el refrigerante, que se hace

circular por una sistema donde tiene su temperatura se aprovecha para llevar a cabo la reacción y de este modo generar hidrógeno (Figura 37).

- **Fotoelectrólisis del agua:** La fotoelectrólisis consiste en un proceso electrolítico en el que la electricidad necesaria para descomponer el agua en sus componentes elementales es proporcionada directamente por la energía solar. Debido a la incapacidad del agua de absorber la energía solar directamente, ya que resulta transparente para las longitudes de onda requeridas, el proceso más común utilizado se basa en una serie de células, cada una de ellas con un par de fotoelectrodos semiconductores sumergidos en un electrolito acuoso y separados por una membrana, que permiten la transferencia de iones pero evita la mezcla de gases. El cátodo está realizado con un material semiconductor con un exceso de protones, mientras que el ánodo se realiza de un material semiconductor con un exceso de electrones. Cuando el ánodo recibe la radiación solar, los electrones absorben la energía luminosa y la hacen pasar a través de un circuito externo al cátodo. Esto crea un par de “huecos de electrones”. El hueco positivo reacciona posteriormente con el agua para crear los iones de hidrógeno positivos y oxígeno gaseoso. Los iones de hidrógeno pasan a través de la membrana para recombinarse con los electrones en el cátodo, dando como resultado gas de hidrógeno (Figura 38) Este tipo de sistema alcanza eficacias máximas de entre el 8% y el 12%.
- **Producción a partir de biomasa:** La biomasa es aquella materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. A partir de su descomposición se puede producir hidrógeno, ya sea mediante gasificación o pirólisis. El interés por producir hidrógeno a partir de la biomasa resulta obvio si tenemos en cuenta la abundancia de materiales de desecho y su consecuente potencial de proveer grandes cantidades de hidrógeno,

sin embargo no es un recurso limpio ya que en su combustión se producen emisiones de CO₂ a la atmósfera.

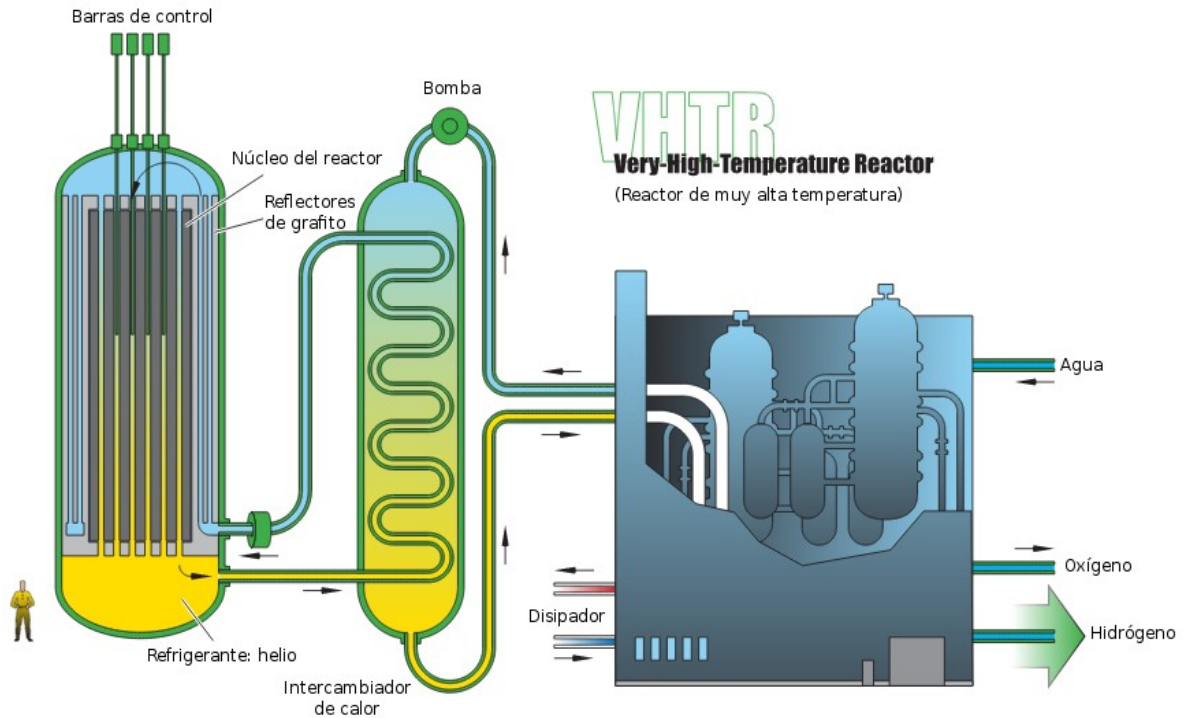


Figura 37 - Generador de H₂ instalado en un reactor de muy alta temperatura (Fuente: General Atomics, imagen adaptada por el autor)

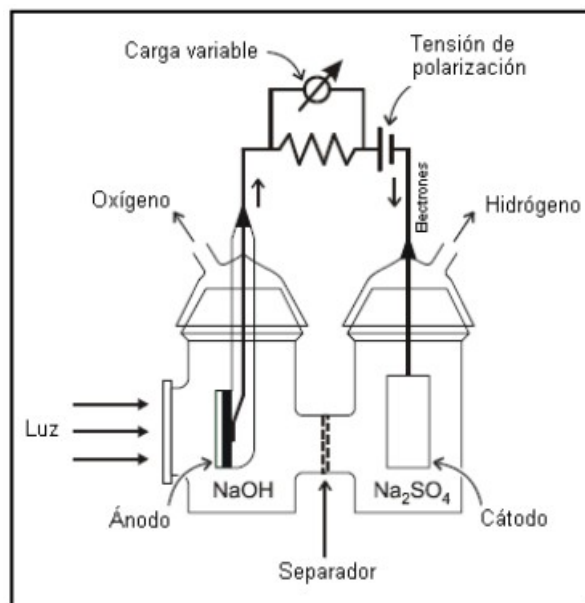


Figura 38 – Célula semiconductor de fotoelectrólisis (Fuente: Fàbrega, 2009)

2.2.6 Regulación actual

A día de hoy no existe ninguna regulación específica sobre el empleo de hidrógeno como combustible a bordo de los buques, sin embargo, algunas sociedades de clasificación como la American Bureau of Shipping (ABS) ya han presentado ciertos requisitos que este tipo de buques deberían reunir para hacer su operación segura. Entre estos destaca la necesidad de dotar al buque con sistemas de detección de fugas de GH₂, sistemas contraincendios y sistemas de ventilación de emergencia. Debido a la elevada presencia del factor humano en la consecución de accidentes, la ABS recomienda que el empleo de estos sistemas sea de forma automática.

Otro de los aspectos que requerirá un exhaustivo control será el diseño de los sistemas de almacenamiento criogénico con vistas a soportar el movimiento del buque en la mar.

La ABS prevé que las sociedades de clasificación recurran a los estándares y códigos ya existentes sobre el empleo de H₂ en tierra para su incorporación al medio marino.

Es de esperar que tanto las regulaciones de SOLAS y MARPOL asuman un papel fundamental en el diseño de sistemas criogénicos y el empleo de H₂ como combustible a bordo de un buque. La ABS señala en este sentido, algunos de los aspectos más a tener en consideración:

- La localización de la planta propulsora en relación a los demás espacios del buque.
- El equipo contraincendios.
- La estabilidad del buque.
- Los dispositivos de seguridad y salvamento.
- El almacenamiento de H₂ y los sistemas de líneas.
- La formación y preparación de la tripulación

Actualmente no se permite el transporte de H₂ a granel en buques. Serán necesarias por lo tanto nuevas regulaciones que estandaricen el desarrollo y empleo de sistemas de almacenamiento criogénico a bordo. El empleo de GH₂ en turbinas de gas y su

almacenamiento criogénico es similar al empleado en los buques de transporte de gas natural licuado (LNG). Debido a la satisfactoria carrera histórica de este tipo de buques en cuestiones de seguridad, se prevé que las sociedades de clasificación recurran a las vigentes regulaciones sobre buques tanque LNG para evaluar el empleo del hidrógeno como combustible y su almacenamiento criogénico.

2.3 Aprovechamiento de gas natural como combustible en turbinas de gas y motores de combustión interna

2.3.1 Propiedades del gas natural

El gas natural está formado por entre un 90%-95% de metano, y el porcentaje restante consiste en una mezcla de nitrógeno, helio, y ácido sulfhídrico. Se extrae de campos gasíferos y en su forma más pura suele contener pequeños porcentajes de butano, propano, vapor de agua y dióxido de carbono, pero estos suelen ser extraídos a fin de hacer la combustión del gas natural más segura y estable.

Concentración estequiométrica [%Volumen]	9.60
Coefficiente de difusión	0.2
Rango de inflamabilidad [%Volumen]	5.0 – 15.0
Velocidad de llama [cm/s]	33
Energía de ignición mínima [mJ]	0.033
Distancia de apagado [390
Temperatura de auto-ignición	580
Densidad (fase líquida) [kg/m³]	450
Densidad (fase gaseosa/200 bar) [kg/m³]	119.1
Energía específica [kJ/kg]	48.71

Tabla 12 – Propiedades físico-químicas del gas natural

- **Rango de inflamabilidad limitado:** El metano dispone de un rango de inflamabilidad limitado pero superior al de otros combustibles derivados del crudo como gasóleos o gasolinas. De esto se deduce que un bajo volumen de metano en una mezcla con oxígeno serán suficientes para su combustión, pero si el volumen de metano es superior al 15% de la mezcla, la combustión no tendrá lugar. Esto le convierte en un combustible cuyo empleo entraña más riesgos que la gasolina o el gasóleo, pero que puede ser controlado de forma segura.
- **Energía de ignición baja:** La energía necesaria para la combustión del gas natural es muy baja, lo que asegura una rápida ignición en mezclas pobres. No obstante,

una baja energía de ignición supone también una mayor sensibilidad a aquellas partes del motor, caldera o turbina que estén lo suficientemente calientes como para considerarse posibles fuentes de ignición.

- **Temperatura de autoignición alta:** El gas natural dispone de una temperatura de autoignición alta, lo cual reviste importancia en la relación de compresión de la mezcla del metano con el comburente ya que a partir de la primera se determinará la relación de compresión para la combustión ya que está relacionada con el aumento de temperatura durante la compresión (Apartado 2.1.1).

La temperatura final absoluta limita la relación de compresión. La elevada temperatura de autoignición del metano permite usar mayores relaciones de compresión que cualquier otro combustible fósil.

- **Difusividad baja:** La baja capacidad de difusión del gas natural nos indica la tendencia del metano a dispersarse en el aire en un considerable periodo de tiempo. Esto entraña un riesgo alto en el caso de producirse una fuga del combustible ya que tenderá a concentrarse en un mismo punto, lo que supondrá, una mayor posibilidad de producirse una explosión o un fuego, y una mayor duración de éste.
- **Densidad energética:** La densidad energética del gas natural es uno de los aspectos condicionantes de su empleo como combustible. Al ser inferior en casi un 50% a la de los gasóleos o diésel, las instalaciones para su almacenamiento a bordo ocuparán casi el doble de espacio, lo que restará capacidad de carga y rentabilidad al buque. La forma líquida resulta la más adecuada para su empleo y almacenamiento ya que posee una mayor densidad energética. El gas natural alcanza dicha fase a -163°C , donde ocupa solamente 1/600 del espacio que ocuparía en fase gaseosa.

2.3.2 Aprovechamiento del gas natural

2.3.2.1 Motores duales

En este apartado se expone el funcionamiento de los motores duales, en concreto los pertenecientes a la casa Wärtsilä.

Los motores duales se caracterizan por poder trabajar tanto con combustible gas natural como diésel. Cuando emplean gas natural como combustible los motores trabajan en ciclo Otto, utilizando premezcla pobre de aire y gas en la cámara de combustión. La mezcla pobre, definida así por el exceso de aire necesario para completar la combustión, reduce las temperaturas máximas de operación, produciendo así menos NO_x y aumentando el rendimiento al incrementar la tasa de compresión y optimizar los tiempos de la inyección. La mezcla además, facilita la prevención de la auto-ignición.

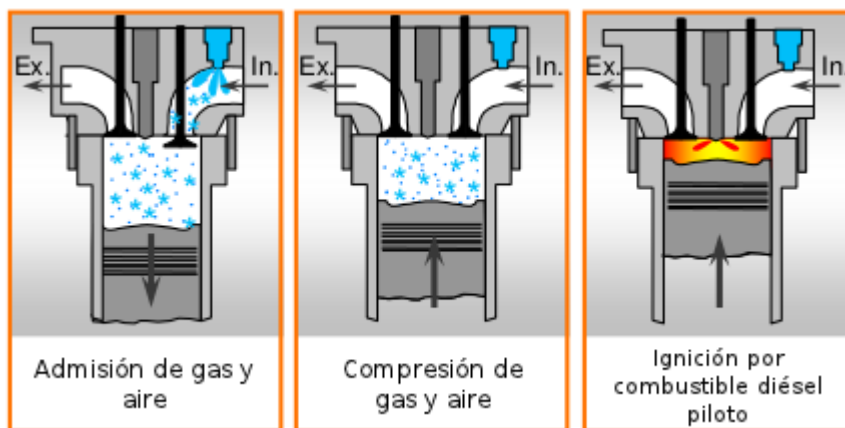


Figura 39 – Motor-dual Wärtsilä funcionando con gas natural (Fuente: Wärtsilä; imagen adaptada por el autor)

El motor dual funciona con gas natural, trabaja de la siguiente manera (Figura 39): el gas es introducido dentro del cilindro por la entrada de aire durante la carrera de admisión. Para su ignición, en vez de utilizar una bujía, aplicada normalmente en motores de gas de mezcla pobre, la mezcla se enciende inyectando una pequeña cantidad de combustible diésel en la cámara de combustión, la que, debido a su elevada energía asegura la ignición de la mezcla, necesaria cuando se trabaja con una alta potencia específica por cilindro y una mezcla de aire y gas pobre. Para asegurar unas bajas emisiones de NO_x es

esencial que la cantidad de combustible diésel inyectado sea muy pequeña. Los motores duales de Wärtsilä usan la "micro inyección", con menos de un 1 % de combustible diésel inyectado a la carga nominal para conseguir que las emisiones de NOx sean de una décima parte de las de un motor diésel estándar. La mejor forma de controlar la combustión, en orden de evitar la auto-ignición o fallos en el encendido, es de acuerdo a Wärtsilä [8], usar un control electrónico tanto de la inyección como de la entrada de gas en cada cilindro.

Respecto a la inyección del combustible piloto, este se introduce en la cámara de combustión por medio de un sistema de raíl común, basado en una bomba de alta presión montada en el motor, que lo suministra a cada una de las válvulas de inyección a una presión constante de 900 bar. La válvula de inyección posee dos agujas, con la aguja del combustible piloto controlada electrónicamente por el sistema.

En modo diésel el motor trabaja de igual modo que un motor diésel estándar (Figura 40), empleando un sistema de inyección de combustible por bomba pulsatoria. Es decir, el combustible se inyecta a alta presión en la cámara de combustión justo antes del punto muerto superior. En este modo de funcionamiento, la admisión de gas se está desactivada, al contrario que cuando el motor funciona con gas natural, donde la inyección del combustible diésel permanece activada para asegurar una ignición fiable.

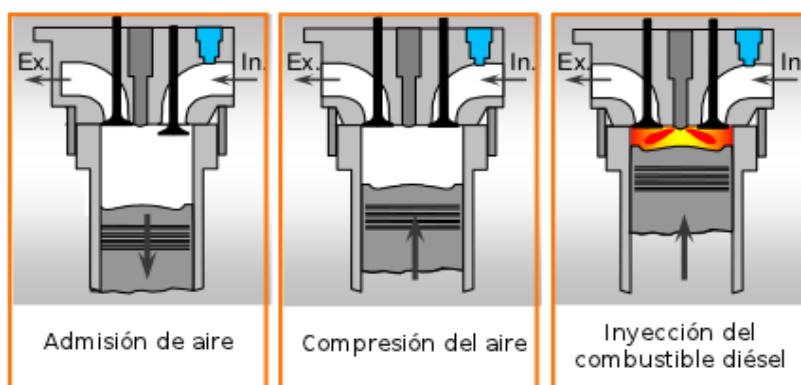


Figura 40 - Motor-dual Wärtsilä funcionando en modo diésel (Fuente: Wärtsilä; imagen adaptada por el autor)

Los motores Wärtsilä duales pueden emplear, en su funcionamiento con diésel, combustible ligero (diesel marino o gas oil) o combustible pesado (HFO). Cuando trabajan con gas, el motor cambia automáticamente a la operación diésel si la alimentación de gas se interrumpe u ocurre algún fallo en los componentes o de modo manual a elección del usuario (Figura 41). El cambio lleva menos de un segundo y no tiene efectos en la velocidad del motor ni la carga durante. La transferencia entre el trabajo con diésel y gas es, sin embargo, gradual: el suministro del combustible diésel se reduce lentamente mientras que la cantidad de gas admitido se aumenta. El efecto de las variaciones de la velocidad del motor y la carga no obstante, es mínimo.

Tal y cómo se puede apreciar, los motores duales están pensados para trabajar principalmente con gas natural; el modo diésel se limita a asegurar un funcionamiento estable y continuado bajo condiciones críticas o de emergencia.

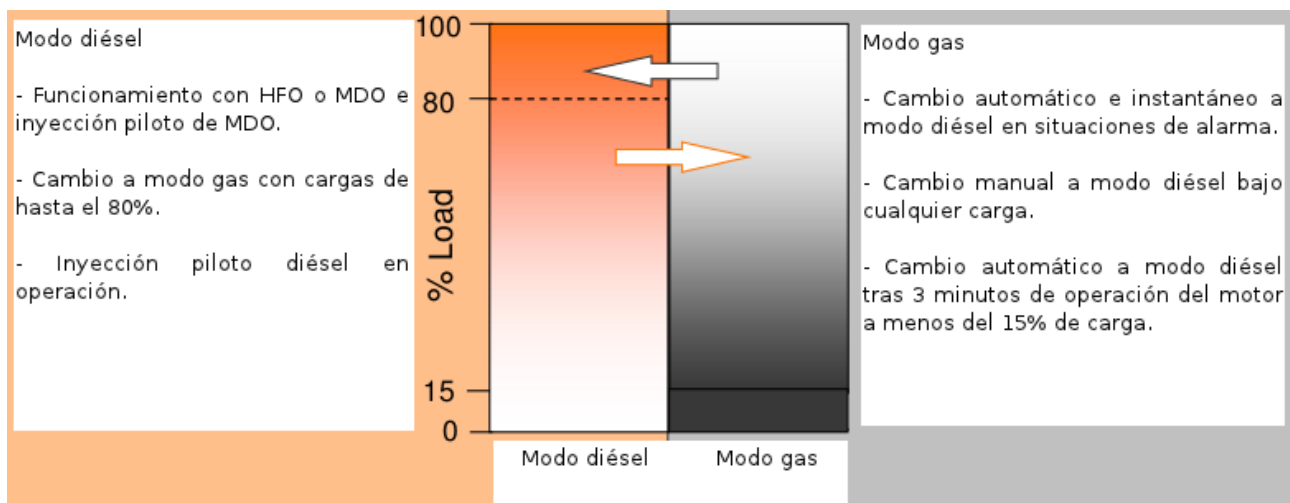


Figura 41 – Modos de funcionamiento de un motor dual Wärtsilä (Fuente: Wärtsilä; imagen adaptada por el autor)

2.3.2.2 Motores de gas

La compañía Rolls-Royce trabaja actualmente en el desarrollo de los motores Bergen para el aprovechamiento de gas natural, basados en los pertenecientes a la serie existente Bergen B, con los que comparten una gran parte de componentes.

Los motores de gas desarrollados por Rolls-Royce utilizan la tecnología de combustión de motores de mezcla pobre en un ciclo Otto con una fuente de ignición externa. Una mezcla rica de gas natural y aire se ignicia en una cámara de precombustión y es posteriormente admitida en el cilindro junto con la mezcla pobre de gas natural y aire, permitiendo una combustión completa de la misma (Figura 42).

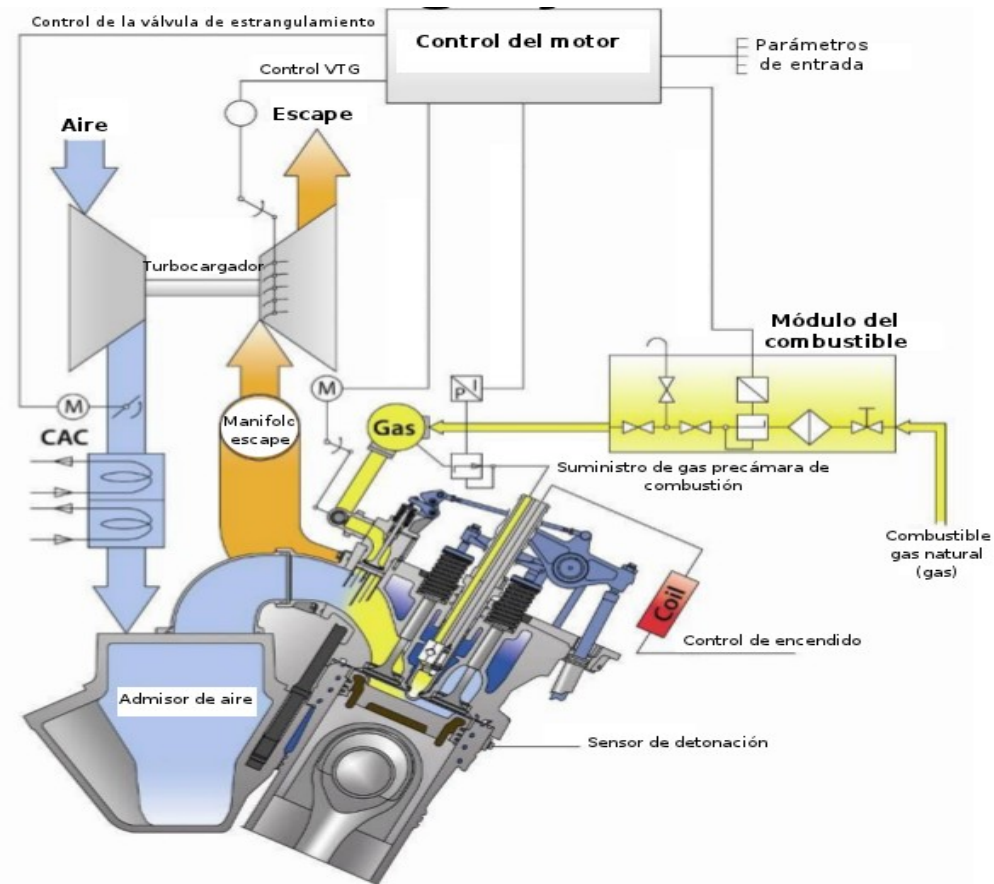


Figura 42 – Diagrama de funcionamiento de un motor Rolls-Royce Benger de gas (Fuente: Rolls-Royce; imagen adaptada por el autor)

Las principales características de estos motores pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Alta eficiencia, 48%
- Aprobado por las sociedades de clasificación como medio de propulsión marina
- Control electrónico del sistema con monitorización constante de los parámetros de funcionamiento.

2.3.2.3 Turbinas de gas aeroderivadas

Las turbinas aeroderivadas son otras de las posibles opciones para el aprovechamiento de gas natural como combustible. Actualmente no existe ningún modelo comercialmente disponible que esté adaptado al funcionamiento con gas natural exclusivamente, si bien podemos encontrar turbinas duales que pueden operar tanto con combustibles diésel como con gas natural, como la MT 30 diseñada por Rolls Royce. Estas turbinas duales se pensaron inicialmente para su utilización en buques de transporte de LNG, donde el combustible se obtendría directamente del LNG evaporado en los tanques de carga. No obstante, pueden considerarse para cualquier otro tipo de buque que disponga de tanques de combustible de gas natural licuado.

2.3.2.4 Infraestructura requerida para el aprovechamiento de LNG

Sistema de almacenamiento

El gas natural a presión atmosférica y temperatura ambiente ocupa una enorme cantidad de volumen. El espacio disponible en los buques para los tanques de combustible está limitado para obtener una mayor capacidad de carga y por tanto un mayor rendimiento económico del mismo, por lo que en la elección de un combustible, siempre será preferible aquel de mayor densidad energética. Cuando el gas natural se enfría hasta el punto de licuefacción (-163°C) y se mantiene presurizado en esa fase, la densidad energética es ligeramente superior a la mitad de la densidad energética obtenida en el mismo volumen de diésel. Si en lugar de licuar el gas, se comprimiera hasta los 200 bar de presión, la densidad energética sería aproximadamente de una quinta parte de la densidad energética obtenida en el mismo volumen de diésel. La licuefacción es por tanto la opción elegida para el transporte y almacenamiento del gas natural a bordo.

Los tanques tipo C (Figura 43) se consideran los más adecuados para el almacenamiento de combustible LNG a bordo ya que ofrecen varias ventajas; no poseen restricciones estructurales para el llenado parcial, no poseen una barrera secundaria (por lo tanto

ocupan menos espacio), pueden ser diseñados para distintos rangos de presión en función de la maquinaria de propulsión, son de fácil instalación, su mantenimiento es mínimo y poseen un largo historial de funcionamiento sin que se produjeran fugas.

Otra opción a considerar son los tanques de clase A (Figura 43), que permitirían un ahorro de espacio mayor al de los tanques tipo C, pero que presentan problemas relativos al mantenimiento de una presión concreta y a su barrera de contención secundaria que no han sido todavía ni tecnológica ni económicamente solucionados [9].

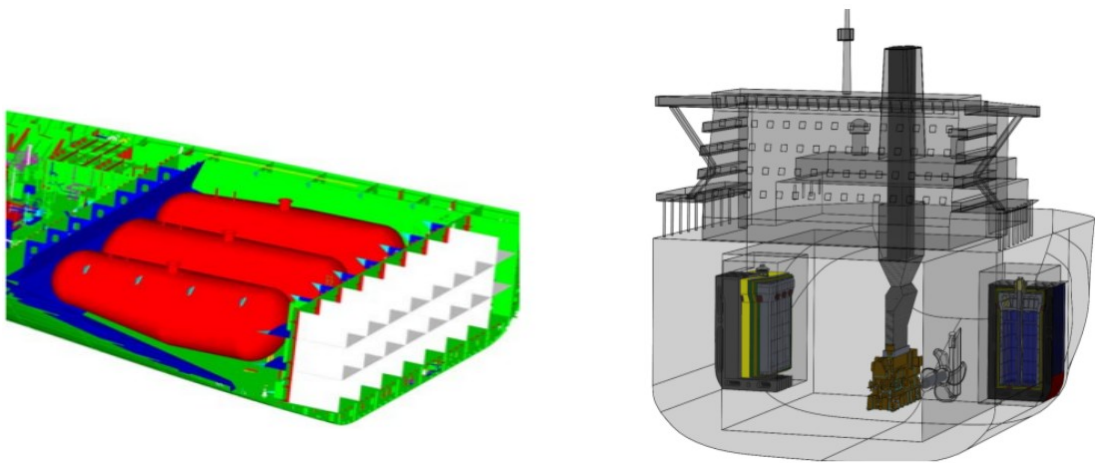


Figura 43 – Tanques IMO tipo C (izquierda) y tipo (derecha) para almacenamiento de combustible LNG (Fuente: Ship and offshore)

Sistema de manejo

Tal y como se expone en el apartado anterior, el almacenamiento óptimo de gas natural a bordo de un buque es en su fase líquida -163°C . Esto conlleva ciertos aspectos que repercutirán en la infraestructura requerida a bordo para el aprovechamiento del gas natural. Tales son reutilización del gas natural evaporado en los mismos (boil-off) y el cambio de fase del gas natural de líquida a gaseosa para su aprovechamiento en el sistema de propulsión. En base a estas variables, se puede determinar una infraestructura genérica requerida por el gas natural licuado a bordo de un buque como la expuesta en la Figura 44:

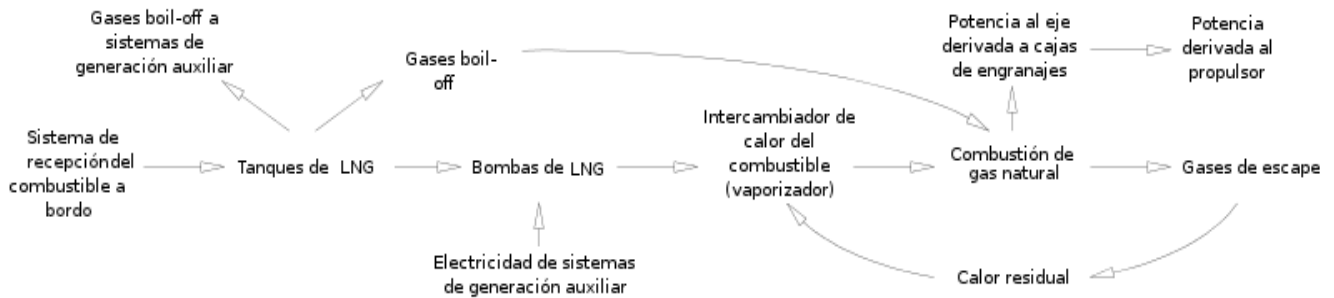


Figura 44 - Infraestructura genérica requerida por el combustible LNG a bordo de un buque

- **Sistema de recepción del combustible a bordo:** Consistirá en un conjunto de tuberías para la carga, líneas de enfriamiento, válvulas y conexiones manifold que permitan el acoplamiento a los de la terminal.
- **Bombas de LNG:** Pueden ser o no necesarias en función de la situación de los tanques respecto a la maquinaria de propulsión en el buque. En caso de emplearse, pueden ser de dos de tipos, sumergidas o de alta presión. La elección de uno u otro tipo irá en función de las condiciones del tanque, su instalación y la presión requerida por la maquinaria de propulsión.
- **Intercambiador de calor del combustible (vaporizador):** Se consideran diseños basados en la circulación de agua-glycol.

El espacio que requerirá la mencionada infraestructura respecto a una planta convencional basada en combustibles diésel será de entre dos veces y media y tres veces mayor para la misma generación de potencia. Los tanques tipo A en desarrollo podrían reducir éste volumen a dos veces el ocupado por una planta convencional.

2.3.2.5 Aspectos relativos a la seguridad

Ciertas propiedades del LNG le convierten en un combustible que trabaja dentro de unos márgenes razonablemente seguros, a saber:

- Su temperatura de almacenamiento (-163°) dista mucho de la temperatura de

autoignición (580 °C), por lo que en condiciones normales el LNG no corre riesgos de arder espontáneamente.

- Su limitado rango de inflamabilidad (5%-15%).
- Su densidad menor que el aire.

Por otra parte, el transporte de LNG viene sucediéndose en los últimos 40 años con un asombroso historial de seguridad del que se derivan ciertas consideraciones aplicables a una infraestructura de combustible LNG a bordo de un buque:

- Empleo de gas inerte para evitar la formación de atmósferas explosivas en tanques, tuberías y líneas de carga.
- Detectores automáticos de fugas de gas natural.
- Segregación de los tanques de combustible respecto a la sala de máquinas.
- Precámara de vaporización separada de la maquinaria de principal (Figura 45)
- Líneas conductoras de LNG a la maquinaria de propulsión principal y la precámara de vaporización dobles (Figura 45)

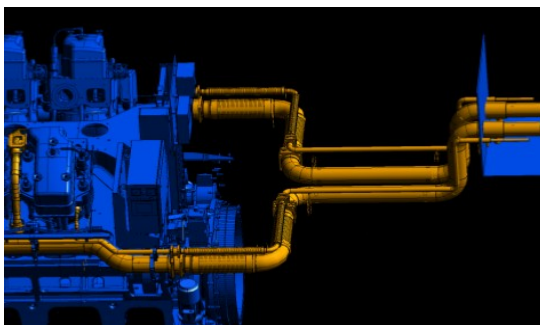


Figura 45 – Precámara de vaporización separada de la maquinaria principal (lado derecho de la imagen) y sistema de tuberías de LNG dobles (Fuente: Rolls Royce)

2.3.3 Producción, disponibilidad y mercado del gas natural

Producción

El gas natural se obtiene mediante su extracción de yacimientos petrolíferos, donde puede encontrarse asociado a él, o de yacimientos donde se encuentra de forma pura

disuelto. También puede encontrarse en depósitos de carbón.

La producción de gas natural del año 2009 se estimó de forma aproximada en 2987 billones de metros cúbicos, siendo Rusia y los Estados Unidos los principales productores [10].

Disponibilidad: Las reservas probadas en el años 2009 cuantifican en 187,49 trillones de metros cúbicos la cantidad de gas natural restante en el planeta [10].

Mercado del gas natural: El LNG comprado en el mercado internacional bajo contratos de larga duración cuesta alrededor de entre 6 y 8 \$ por unidad térmica británica (BTU), mientras que el precio de crudo ronda los 15 \$ por BTU [11]. Aún asumiendo los costes de procesamiento y distribución para ambos combustibles, se estima que el LNG como combustible para buque estaría disponible por la mitad de precio que el de los combustibles basados en crudo. Sin embargo a día de hoy el coste de LNG como combustible para buques es caro, quizá incluso más que los combustibles convencionales. Esto es debido a la escasa infraestructura de distribución existente actualmente. Resultará entonces condicionante para el precio del combustible LNG el empleo y consumo que se haga del mismo; una distribución a gran escala supondrá un abaratamiento de los costes y el precio de mercado, mientras que una distribución local marginal encarecerá los mismos. También hay que considerar en el precio del LNG como combustible los necesarios costes de la inversión inicial: adquisición de una tecnología de mayor coste a bordo de los buques, planificación y edificación de infraestructuras de procesamiento y distribución, formación de nuevas empresas y contratación de empleados. No obstante, es de esperar que una vez superada esta primera fase de inversión, el precio se reduzca y se establezca, viéndose su aumento únicamente condicionado por el agotamiento de las reservas mundiales, la creciente demanda energética y las fluctuaciones del mercado global.

2.3.4 Impacto ambiental del aprovechamiento del gas natural como combustible

El gas natural licuado se caracteriza por ser un combustible más limpio que otros combustibles fósiles. Su contenido en azufre es mínimo, prácticamente inexistente, lo que en su combustión, supone eliminar casi por completo las posibles emisiones de SO_x . Lo mismo ocurre con su contenido de nitrógeno, alrededor de un 3%, que de igual forma reduce las emisiones de NO_x . Por otra parte, los motores diésel de gas natural no operan a temperaturas cercanas a los 800°C , por lo que tampoco se producirá en ellos formación de NO_x por el contenido de N en el aire.

Respecto a las emisiones de CO_2 , la combustión del gas natural genera menores cantidades que otros combustibles fósiles. La razón de que esto suceda se debe a su principal componente, el metano. Éste contiene cuatro átomos de hidrógeno y uno de carbono, produciendo en su combustión 2 moléculas de agua por cada una de CO_2 , mientras que los hidrocarburos de cadena larga (líquidos) producen sólo 1 molécula de agua por cada 1 de CO_2 .

En cuanto a formación de material en partículas, la combustión de gas natural no propicia la formación de los mismos, reduciendo aproximadamente en un 98% la formación de estos en comparación con los combustibles convencionales.

Las diferentes compañías fabricantes de motores para el aprovechamiento del gas natural estiman [12] [13] que aproximadamente la combustión de gas natural en lugar de diésel marino puede suponer un 30% menos de emisiones de CO_2 , un 86% menos de emisiones de NO_x , un 100% menos de emisiones de SO_x y un 98% menos de PM.

2.3.5 Estado de la técnica

Los motores tanto duales como de gas natural ofrecidos por Wärtsilä y Rolls Royce respectivamente se encuentran tecnológica y comercialmente ya disponibles en rangos de potencia de entre 2 y 9 MW. Otros fabricante como MAN también ofrecen motores duales para buques de media y alta velocidad y trabaja desde el 2010 [14] en el desarrollo de motores de baja velocidad duales marinos. Rolls Royce tiene comercialmente disponible la turbina aeroderivada MT 30, hasta la fecha unicamente empleada en buques militares.

2.4 Medios alternativos de aprovechamiento del hidrógeno y gas natural: Pilas de combustible y turbina vorticial Jirnov

Aprovechamiento de gas natural e hidrógeno en pilas de combustible

2.4.1 Introducción

En el año 1838 el científico Suizo Christian Friedrich Schönbein descubrió el principio de funcionamiento de la pila de combustible, haciéndolo público en una de las revistas de divulgación científica de la época. Basándose en este trabajo, el funcionamiento de la primera pila de combustible fue demostrado por el científico y abogado galo Sir William Robert Grove en 1839 en otra de las publicaciones de carácter científico de la época.

No sería sin embargo hasta 1959 el momento en que se desarrollase la primera pila de combustible estacionaria de 5 kW a manos del ingeniero británico Francis Thomas Bacon. El mismo año, Bacon y su equipo aplicaron esta pila de combustible a un equipo de soldadura cuyas patentes licenciadas por Pratt & Whitney en los Estados Unidos, fueron utilizadas en el programa espacial de Estados Unidos para proveer a los astronautas de electricidad y de agua potable a partir del hidrógeno y oxígeno disponibles en los tanques de la nave espacial.

A pesar de su éxito en programas espaciales, estos sistemas no se convirtieron en una opción comercial y aplicable a un empleo cotidiano hasta el final de los años 80, debido principalmente a su alto coste. UTX, subsidiaria de UTC Power, fue la primera compañía en fabricar y comercializar un sistema de células de combustible estacionario a gran escala, destinado a su empleo como cogenerador eléctrico en universidades y grandes edificios de oficinas. A día de hoy, UTX persiste en su comercialización bajo el nombre de PureCell 200 y sigue siendo el único proveedor para la NASA para su uso en vehículos espaciales. UTX también trabaja en el desarrollo de pilas de combustible para automóviles, autobuses, y antenas de telefonía móvil.

La aplicación de pilas de combustible en el ámbito marítimo es muy reducida y se limita a proyectos experimentales civiles y militares, todos ellos puestos en marcha no antes del año 1997.

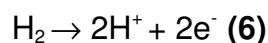
2.4.2 Tipos de pilas de combustible y su adecuación a la marina mercante

Las pilas de combustible que mayor potencial han demostrado tener hasta la fecha, a raíz de diversos proyectos experimentales realizados en la marina naval [15], son las pilas de alta temperatura del tipo MCFC y SOFC y las de baja temperatura del tipo PEMFC. Su funcionamiento se describe en los siguientes apartados.

2.4.2.1 PEMFC

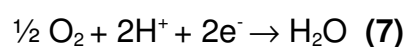
La pila de membrana de intercambio de protones, también conocida como pila de membrana electrolítica polimérica (PEMFC), es una de las pilas desarrolladas principalmente para su aplicación en medios de transporte, zonas estacionarias (hospitales, residencias...) y otros dispositivos móviles. Su principal característica son su temperatura típica de trabajo (entre 50 y 120 C°) y su membrana electrolítica polimérica que separa el ánodo del cátodo.

En este tipo de pila de combustible (Figura 46) el hidrógeno se hace circular por el lado del ánodo, donde se disocia en electrones y protones por acción del catalizador (6)



Los protones son conducidos a través de la membrana al cátodo, mientras que los electrones, debido al aislamiento del electrolito, son forzados a recorrer un circuito externo, creando así corriente eléctrica.

Por el cátodo se hace circular una corriente de aire cuyo oxígeno reacciona a nivel molecular con los protones de hidrógeno, dando lugar a la formación de vapor de agua, el único residuo de la reacción (7)



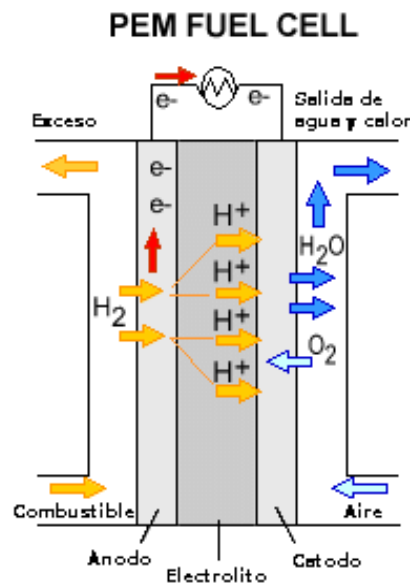


Figura 46 – Diagrama de funcionamiento de una PEMFC (Fuente: Wikipedia, imagen modificada por el autor)

2.4.2.2 SOFC

Una pila de combustible de óxido sólido es un dispositivo de producción de energía eléctrica mediante de la oxidación directa de un combustible. Por su temperatura típica de operatividad (entre 500 y 1000 C°) se la considera una pila de combustible de alta temperatura. Su principal característica distintiva es el material empleado en el electrólito, que puede ser un óxido o cerámica. Su principal ventaja radica en una mayor eficiencia, estabilidad a largo plazo, flexibilidad de combustible, bajas emisiones y relativo bajo coste. Su mayor desventaja es la alta temperatura de operación, lo que se provoca mayores tiempo de iniciado y problemas de compatibilidad mecánica y química.

En este tipo de pila de combustible se hace circular aire por el cátodo de forma que el oxígeno contenido en el mismo se reduce dando lugar a iones de oxígeno. Estos iones se difunden por el electrólito hasta llegar al ánodo donde producen la oxidación del combustible (Figura 47). Esta oxidación tiene como resultado un número par de electrones que se hacen circular por un circuito externo de forma que producen electricidad, y un residuo de agua.

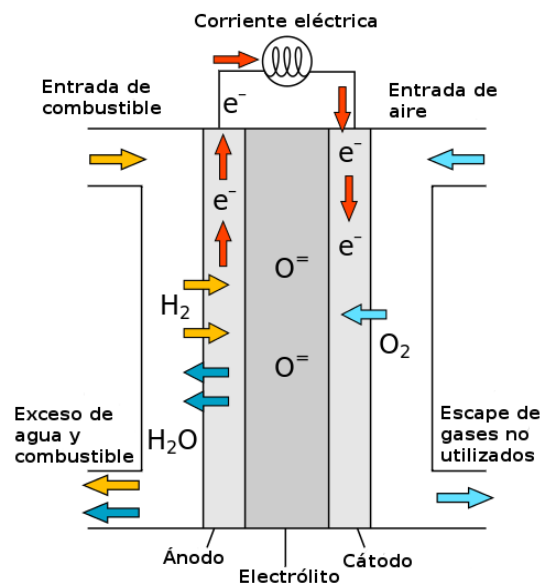


Figura 47 – Diagrama de funcionamiento de una SOFC (Fuente: Wikipedia, imagen modificada por el autor)

2.4.2.3 MCFC

Las pilas de carbonato líquido son pilas de combustible de alta temperatura que operan a temperaturas superiores a los 600 C° . Se caracterizan por emplear combustibles distintos del hidrógeno como gas natural o carbón, ya que debido a las altas temperaturas a las que operan, pueden producir el hidrógeno de forma directa a partir de estos. Por otra parte, su particular funcionamiento (Figura 48) aprovecha el CO_2 resultante del reformado del combustible otra característica que las distingue es su electrolito, compuesto por una mezcla salubre de carbonato líquido suspendido en una matriz porosa y químicamente inerte de beta-alumina sólido (BASE). Su principal desventaja radica en su durabilidad, la cual se ve reducida debido a las altas temperaturas de operatividad y la corrosividad del electrolito.

Tanto las pilas de combustible MCFC como las SOFC son ideales para su empleo en un sistema combinado con una turbina de gas (Figura 49). En su operación normal (Figura 50), el aire entra por una toma, discurre por un filtro que elimina parte de sus impurezas y es comprimido en el compresor de la turbina a 3.02975 bares. El aire comprimido pasa a

través del recuperador de calor, donde es precalentado para su entrada en la pila de combustible junto al gas natural, lugar en el que tendrán lugar las reacciones electroquímicas generadoras de la corriente eléctrica (DC). Los gases de escape presurizados resultantes de estas reacciones se expanden posteriormente en la turbina, originando el movimiento tanto del compresor como del generador de corriente alterna (AC). Tras su expansión, los gases transcurren por el recuperador y después son liberados a la atmósfera a una temperatura de 200 C. La energía eléctrica es producida conjuntamente por los generadores AC y DC usando el mismo flujo de combustible/aire. Los experimentos realizados indican que en estos sistemas híbridos se logra una eficiencia eléctrica del 55% en plantas de baja potencia (250 kW) y hasta un 60% en plantas de media potencia (1 MW). En plantas de mayor potencia y con turbinas de gas más sofisticadas pueden lograrse eficiencias de hasta el 70% de acuerdo a los estudios realizados.

De todas los modelos aquí expuestos, este último ofrece las opciones más prometedoras para su aplicación en la marina mercante.

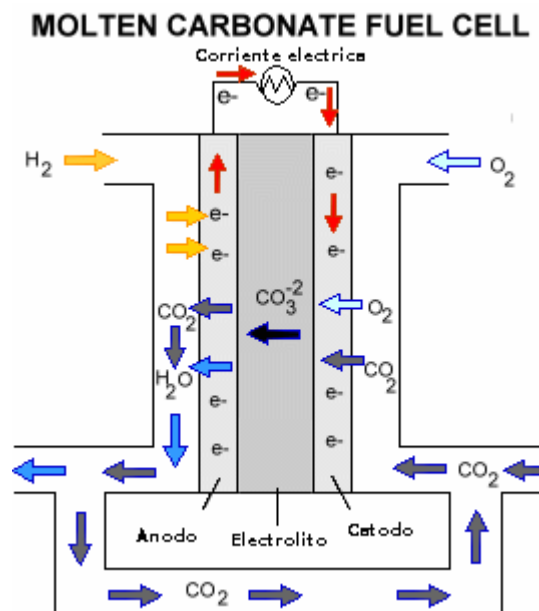


Figura 48 – Diagrama de funcionamiento de una MCFC (Fuente: Wikipedia, imagen modificada por el autor)

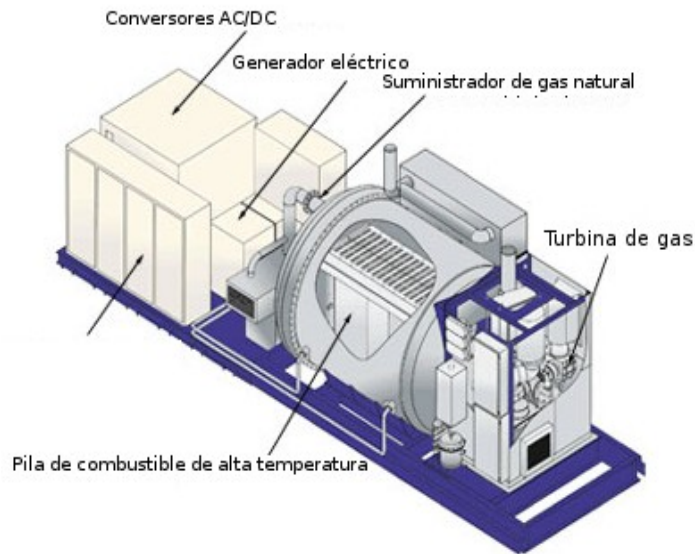


Figura 49 - Pila de combustible de alta temperatura y turbina de gas (Fuente: Siemens Westinghouse, imagen adaptada por el autor)

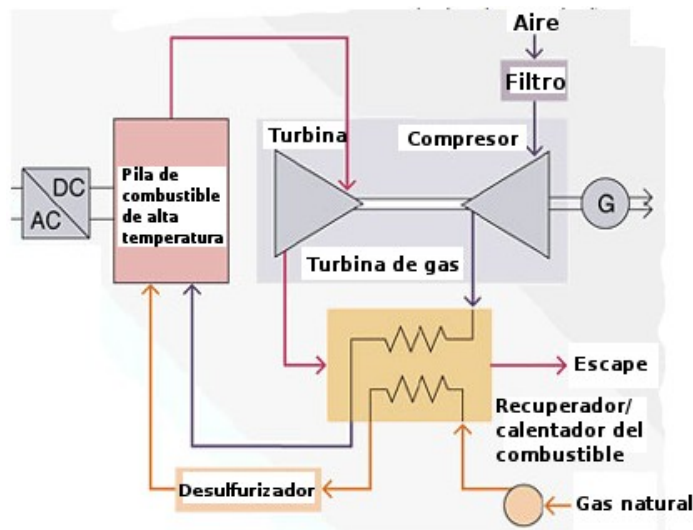


Figura 50 - Diagrama de funcionamiento de una pila de combustible de alta temperatura (SOFC) y turbina de gas (Fuente: Siemens Westinghouse, imagen adaptada por el autor)

2.4.2.4 Combustible de las pilas

Tal y como se puede observar en el apartado anterior, las pilas de alta temperatura del tipo SOFC pueden funcionar tanto con hidrógeno como combustible como con gas

natural, mientras que las MCFC están diseñadas para funcionar con gas natural u otro combustible fósil.

El empleo de hidrógeno como combustible en las pilas de tipo SOFC, plantea la dificultad de obtener el hidrógeno de forma limpia debido a su naturaleza de vector energético. El empleo por tanto de pilas de combustible, ya sea como medio de propulsión o generación energética para los sistemas auxiliares y de navegación del buque, no será limpio ni sostenible mientras el medio de obtención del hidrógeno tampoco lo sea. Por otra parte, el empleo de gas natural como combustible proporciona ciertas ventajas económicas y facilidades técnicas, ya que la distribución y obtención de gas natural actualmente es menos costosa y tecnológicamente menos compleja que la del hidrógeno, lo que sumado a su naturaleza más respetuosas con el medioambiente, lo convierte en un combustible muy atractivo. No obstante, su empleo como combustible en pilas no se puede considerar una solución definitiva al problema de las emisiones atmosféricas de GEI ni al del agotamiento de combustibles fósiles, sin embargo, debido a su inmediata disponibilidad técnica y comercial, si puede considerarse como una medida paliativa adecuada. En los apartados siguientes se exponen sus ventajas y desventajas y sus futuras posibilidades frente a los medios de propulsión vigentes hoy en día, así como ciertos sistemas diseñados hasta la fecha.

2.4.2.5 Comparación entre pilas de combustible, motores diésel y turbinas de gas

En este apartado se comparan las propiedades principales de las pilas de combustible con aquellas de los motores diésel convencionales y las turbinas de gas en base a un estudio realizado por Rolls-Royce en el año 2002 [15].

Eficiencia térmica y consumo de combustible

Las siguientes Figuras (51, 52 y 53) muestran las comparaciones entre las distintas eficiencias térmicas de las diversas opciones de plantas propulsoras/generadoras de electricidad, así como el correspondiente consumo de cada una de estas. En la primera

Figura (51) se muestra la eficiencia térmica con respecto a la generación eléctrica para todos los sistemas auxiliares mientras que la segunda muestra la eficiencia térmica con respecto a la generación eléctrica únicamente destinada al propulsor. La tercera figura muestra los consumos estimados correspondientes a cada tecnología de propulsión. Los datos relativos a las pilas de combustible incluyen las pérdidas derivadas de la conversión de la energía eléctrica a mecánica (la eficiencia típica de conversión es aproximadamente del 95%).

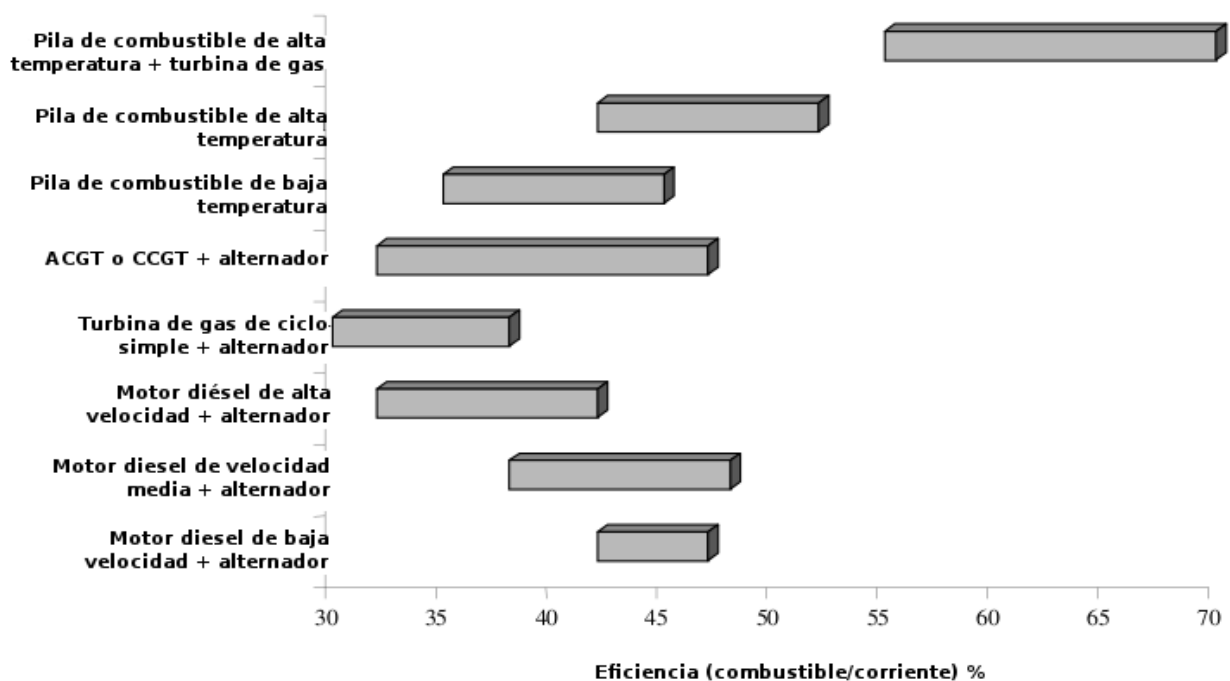


Figura 51 – Eficiencia de generadores auxiliares (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

De las Figuras (51) y (52) se deduce que las pilas de combustible de alta temperatura son competitivas con motores diésel de media y baja velocidad e incluso más eficientes que las turbinas de gas de ciclo simple. No obstante, es la pila de alta temperatura combinada con turbina de gas la que ofrece la mayor eficiencia de cualquiera de las tecnologías existentes, lo que la convierte en una opción comercialmente muy competitiva.

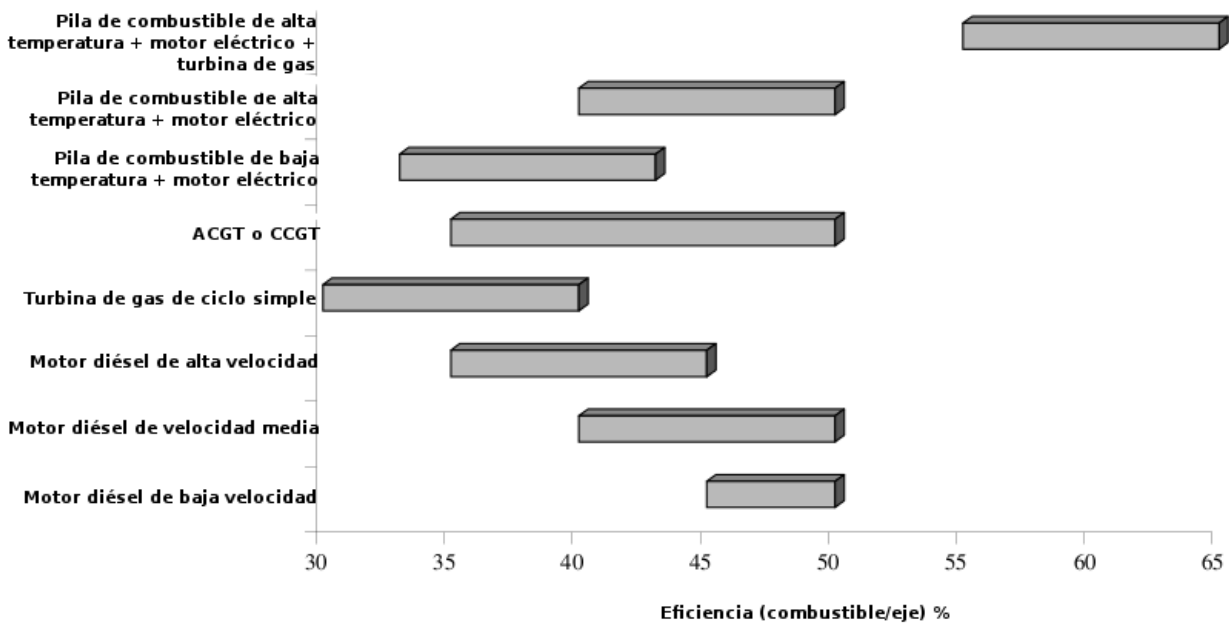


Figura 52 – Eficiencia de las distintas tecnologías empleadas como elemento motriz de propulsión (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

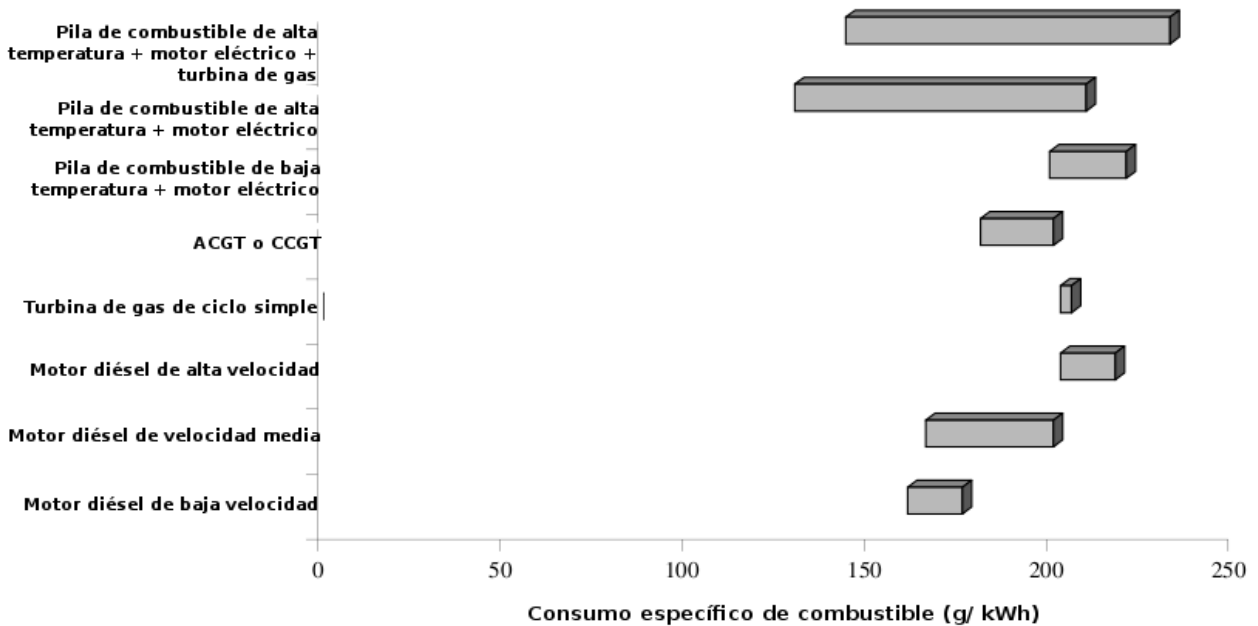


Figura 53 – Consumo específico de combustible para las distintas tecnologías empleadas como elemento motriz de propulsión (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

De la Figura 53 se deduce que Los consumos estimados para las pilas de alta temperatura son considerablemente mejores que los estimados para las tecnologías

convencionales aún incorporando un motor eléctrico (reduce la eficiencia térmica/mecánica), lo que los convierte en serios competidores. No obstante, las pilas de combustible de baja temperatura solo son competitivas con turbinas de gas de ciclo simple y motores diésel de alta velocidad.

Emisiones atmosféricas

- Emisiones de NO_x: El NO_x puede formarse a partir de nitrógeno contenido en el combustible o mediante reacciones a altas temperaturas (superiores a 1000°C) con el nitrógeno presente en el aire. Los típicos combustibles marinos como el combustible pesado (Heavy fuel oil, HFO) contiene mayor proporción de nitrógeno que el combustible destilado o el gas natural, sin embargo los estudios llevados a cabo por el consejo internacional de motores de combustión interna (International Council for Internal Combustion Engines, CIMAC) sugieren que es la combustión con el aire el proceso dominante de formación de NO_x.

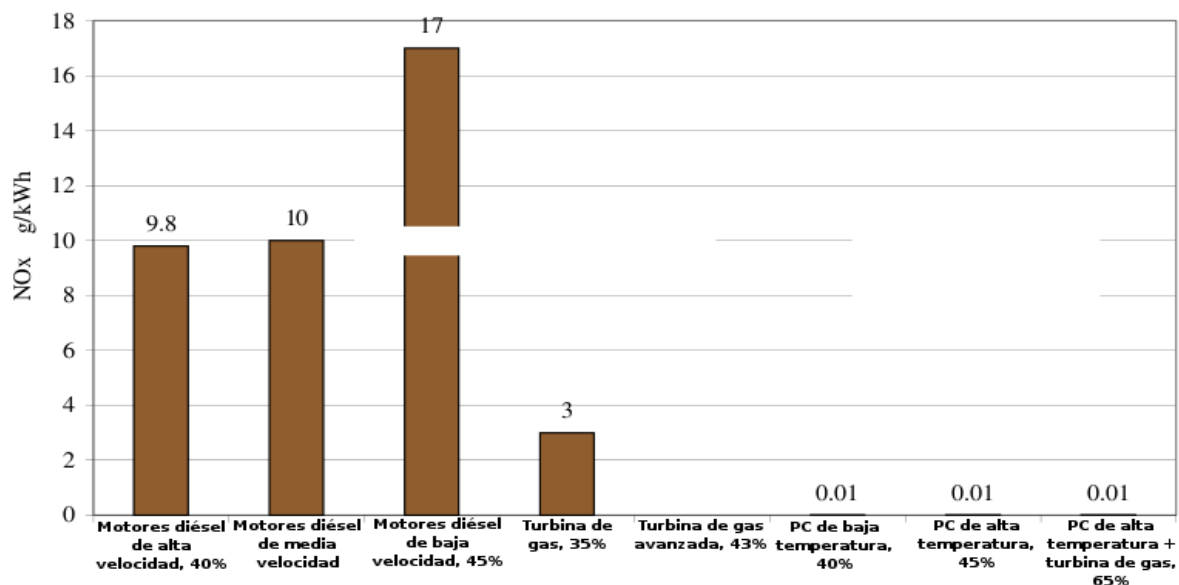


Figura 54 - Emisiones de NO_x de las pilas de combustible en comparación con otros medios de propulsión (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

Tal y como se puede observar en la Figura 54, las emisiones de NO_x de las pilas de combustible resultan ser más bajas que las de otros medios de combustión (a excepción de la turbina de gas avanzada) debido a su empleo de combustibles más refinados (con muy poco contenido de nitrógeno) y a su temperatura de operación por debajo de las temperaturas críticas de formación de NO_x.

- **Emisiones de SO_x:** Considerando que las pilas operan con gas natural, o incluso hidrógeno, ambos combustibles muy destilados, es decir, con bajo contenido en azufre, las emisiones de SO_x resultantes de su funcionamiento serán mínimas o incluso nulas (Figura 55). Esto podría lograrse de igual manera en otros medios de combustión utilizando de la misma forma combustibles con bajo contenido en azufre pero la diferencia radica en que, mientras que las pilas de combustible no operarán de forma normal con combustibles con alto contenido sulfuroso, los motores de combustión convencionales sí lo harán (algunos incluso requiriendo combustibles con considerable contenido en azufre para su reutilización en la lubricación del motor).

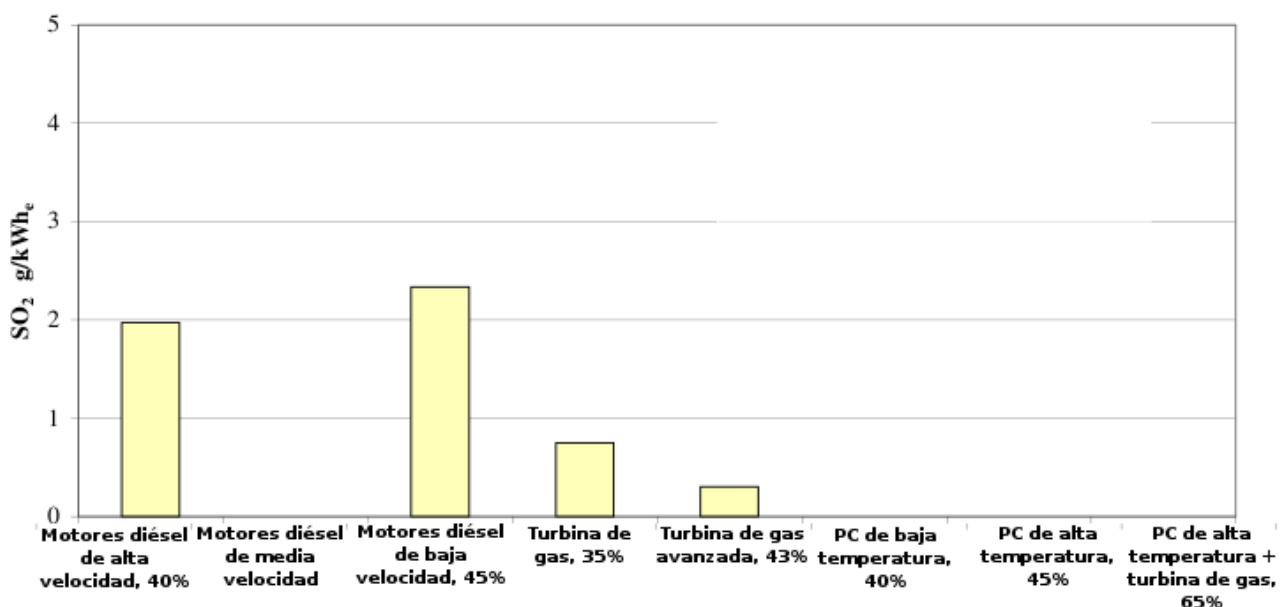


Figura 55 – Emisiones de SO_x de las pilas de combustible en comparación con otros medios de propulsión (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

- Emisiones de CO₂:** Las pilas de combustible de alta temperatura que en su funcionamiento emplean gas natural, debido a su superior eficiencia, emiten menos CO₂ que algunos medios convencionales, especialmente el sistema híbrido combinado con turbina de gas, que alcanza la menor de las cuotas de emisión de CO₂ (Figura 56). Hay que considerar que si en su funcionamiento se emplease hidrógeno directamente, sin necesidad de un combustible del que obtenerlo previamente, sus emisiones de CO₂ serían nulas, aspecto no reflejado en la tabla.

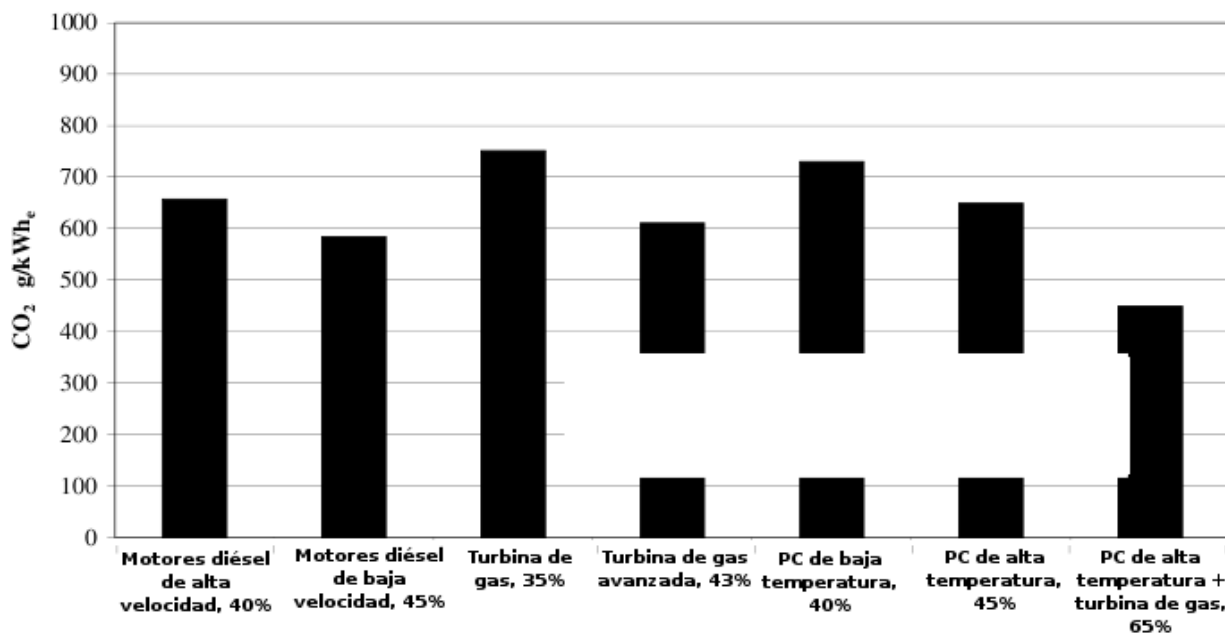


Figura 56 - Emisiones de CO₂ de las pilas de combustible en comparación con otros medios de propulsión (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

Densidad energética por unidad de peso y volumen

En las Figuras 57 y 58 se pueden apreciar las densidades energéticas típicas de distintos medios de propulsión. Las mostradas para las pilas de combustible se basan en diseños tanto teóricos como ya demostrados de pilas terrestres estacionarias, ya que existe un mayor número de proyectos y experiencias que en el sector naval. Para la elaboración de esta gráfica, se considera que todas las pilas de combustible emplean gas natural en su

funcionamiento y disponen de convertidores de corriente alterna en corriente continua, lo que contribuye al aumento de su peso y volumen.

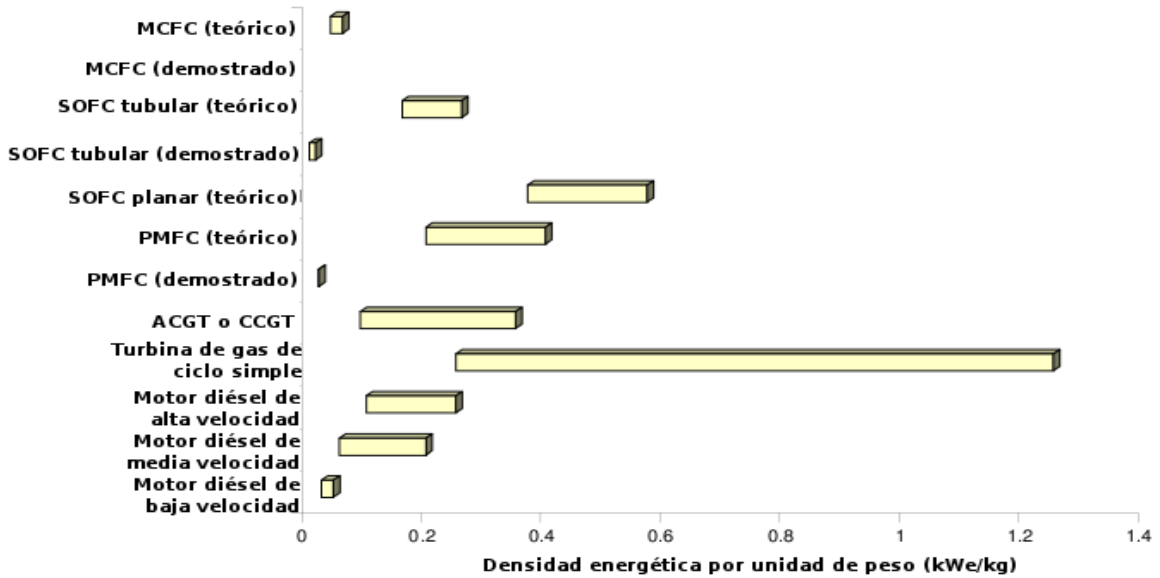


Figura 57 – Densidad energética por unidad de peso (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

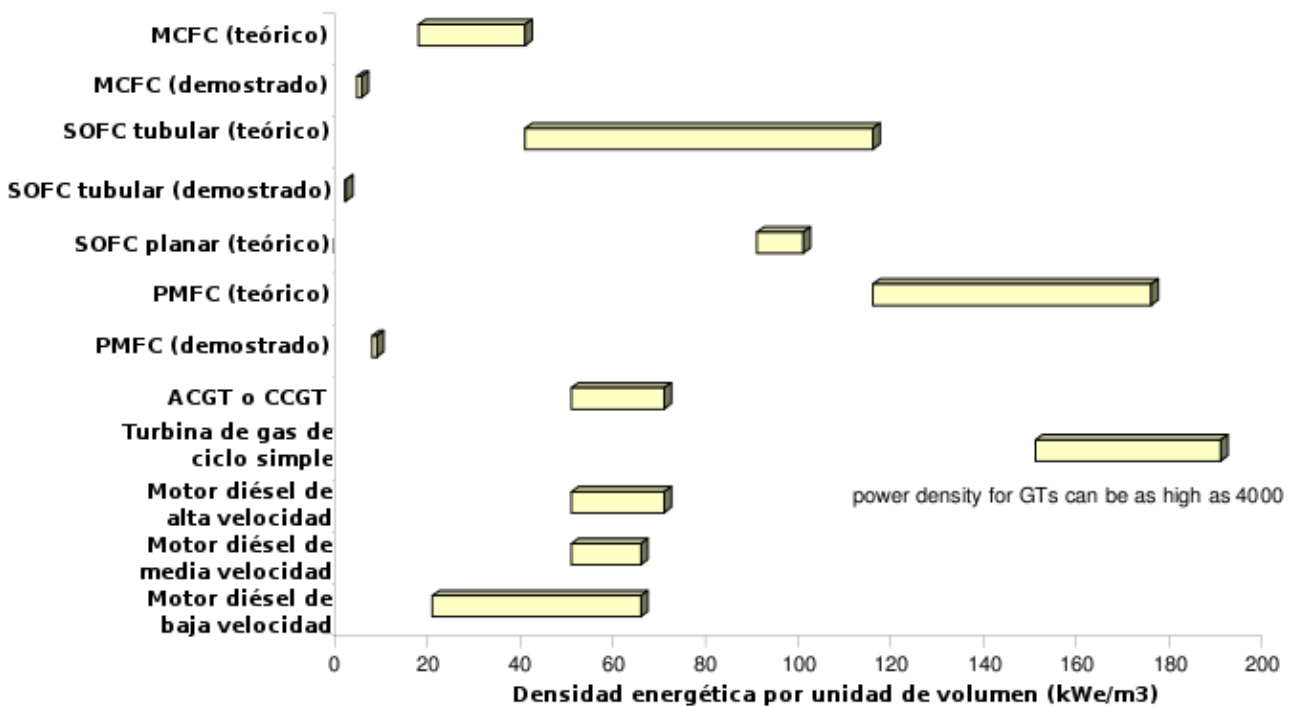


Figura 58 – Densidad energética por unidad de volumen (Fuente: Bourne et al, 2001; imagen adaptada por el autor)

Los tipos de pilas acompañados de la etiqueta “demostrado” son sistemas existentes sobre los que ya se han realizado experiencias, por lo que los datos relativos a estas son de carácter fiable. Por otra parte, de los diseños teóricos se deduce que las PEMFCs y las SOFCs pueden lograr rendimientos similares a los motores diésel mientras que las MCFCs no pueden competir con los motores diésel en términos de densidad energética por unidad de volumen.

En resumen se puede establecer que las pilas de combustible ofrecen rendimientos pobres en términos de peso y volumen. Solamente son competitivas con los motores diésel de media y baja velocidad ya que los motores diésel de alta velocidad y turbinas de gas de ciclo simple suponen una competitividad muy alta.

2.4.3 Estado de la técnica

Actualmente existen diversos proyectos de investigación y diseño de pilas de combustible aplicadas al sector marítimo, tanto para aplicaciones militares como civiles, llevadas a cabo principalmente en los Estados Unidos y en Europa. Por otra parte, los proyectos y estudios realizados para pilas de combustible terrestre son cada vez más, y, debido a su uso más extendido, han logrado mayores resultados que los proyectos navales. No obstante, todavía no hay ningún modelo de pila de combustible disponible para buques de la marina mercante.

Aprovechamiento del gas natural o hidrógeno en una turbina de ciclo avanzado:

Turbina vorticial Jirnov

2.4.4 Introducción

La turbina vorticial Jirnov (TVJ) [16] se trata de una turbina de gas avanzada basada en un ciclo Brayton modificado que le permite alcanzar rendimientos de entre el 58% y el 70%. Las dos grandes modificaciones aplicadas al ciclo Brayton estándar consisten en el empleo de compresión isotérmica, el aprovechamiento de la energía contenida en los gases de escape y el empleo de un fluido de trabajo de doble fase. La compresión isotérmica se escoge en lugar de la adiabática o la politrópica por su mayor eficiencia; aplicada al ciclo Brayton supone un aumento del orden del 15%. Por su parte, el aprovechamiento de la energía contenida en los gases de escape supone un incremento de aproximadamente el 20%. Añadiendo este 35% a la eficiencia del ciclo Brayton estándar, de un 25%, se obtiene una eficiencia de en torno al 60%. No obstante, los elementos mecánicos empleados para este aumento del rendimiento difieren de los que podrían emplearse en una turbina convencional, especialmente los de tipo vorticial; esto son: compresor rotatorio isotérmico de desplazamiento positivo, una turbina de expansión rotatoria de desplazamiento positivo, un separador vorticial, un intercambiador-recuperador de calor vorticial, una cámara de combustión vorticial, una bomba y un radiador.

La TVJ debe su nombre al Dr. Alexei Jirnov, científico ruso que en los años 90 llegó a los Estados Unidos para continuar sus investigaciones en la Universidad de Houston. En el año 1993 comenzó con el Dr. Anatoli Borissov en el desarrollo termodinámico de un nuevo motor. En el año 2002, los dos doctores, el hermano de Borissov y un emprendedor local fundaron la compañía General Vortex, la cual trabaja actualmente en el perfeccionamiento de la TVJ.

2.4.5 Funcionamiento de una TVJ

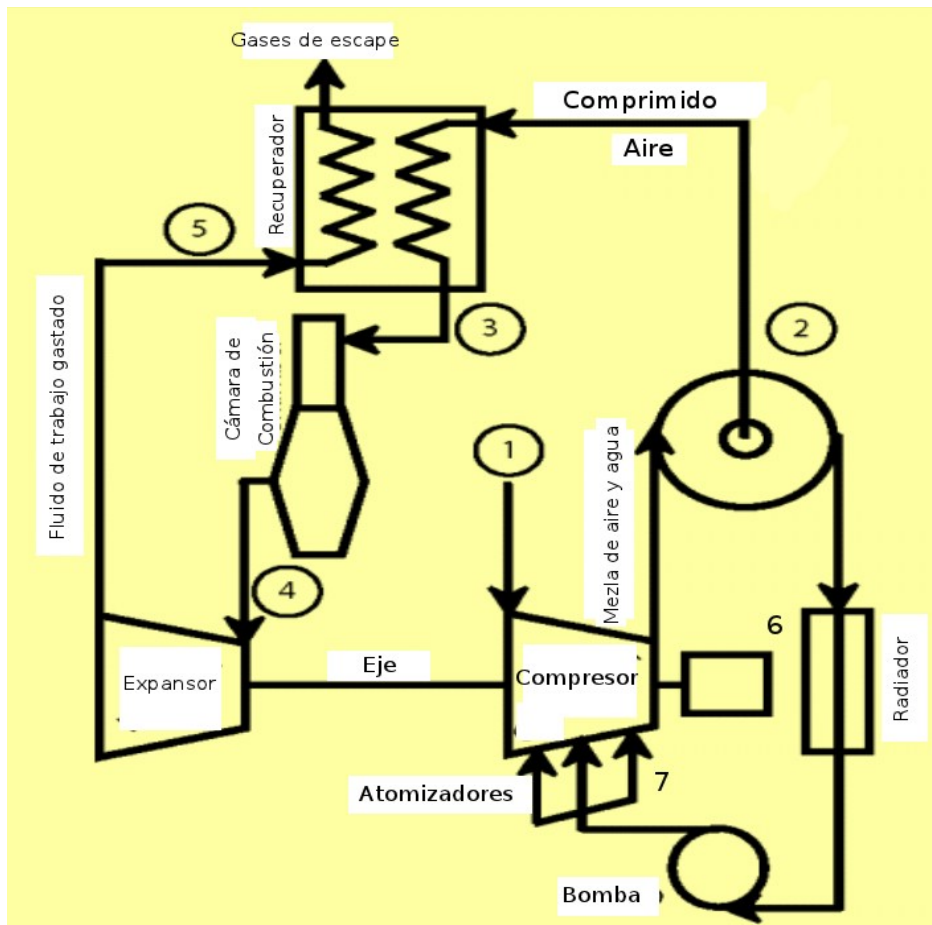


Figura 59 – Diagrama de funcionamiento de una TVJ (Fuente: Borissov et al, 2005; imagen modificada por el autor)

En una TVJ, el aire ambiente se mezcla con el agua vaporizada dando lugar a un fluido de trabajo doble que simultáneamente se comprime en el compresor rotatorio isotérmico de desplazamiento positivo (1). El aire comprimido se separa de la mezcla con el agua en el separador vorticial (2) y discurre hasta el intercambiador-recuperador de calor vorticial, donde es precalentado mediante el empleo del calor residual de los gases de escape y posteriormente introducido en la cámara de combustión vorticial (3). La mezcla explosiva resultante de la combustión del aire con el combustible se expande adiabáticamente en la turbina de expansión rotatoria de desplazamiento positivo (4), generando trabajo mecánico que a su vez se aprovecha para hacer girar el rotor del compresor rotatorio

isotérmico de desplazamiento positivo (1). Estos gases de escape son isobáricamente trasladados al recuperador-intercambiador de calor, aportando su energía calorífica residual al aire comprimido y siendo posteriormente evacuado por el escape (5)

El agua separada de la mezcla con el aire entra en el sistema de expansión y enfriamiento y es posteriormente descargada en un radiador-condensador (6), donde se enfría hasta alcanzar la temperatura ambiente. Después se inyecta en el compresor rotatorio isotérmico de desplazamiento positivo a través de los atomizadores (7) para generar el fluido de trabajo de doble fase. El fluido de doble fase se emplea en la compresión isotérmica del aire, completando de este modo el ciclo de funcionamiento del sistema.

2.4.6 Elementos de una TVJ

- **Compresor y turbina rotaria isotérmica de desplazamiento positivo:** El compresor y la turbina (Figura 60) disponen de cámaras de forma ovalada con rotores cilíndricos alojados en su interior. Cada uno de esos rotores tiene por lo menos dos álabes rectangulares cuya posición relativa puede variar de forma radial y al rotar se deslizan por encima de unas ranuras practicadas en la cámara ovalada. Estos rotores cilíndricos están conectados por un eje, lo que permite que al expandirse el gas en la turbina, el trabajado mecánico generado por éste en el rotor de la misma sea transmitido al rotor del compresor, haciéndolo de esta forma girar de forma simultánea. En funcionamiento, la rotación del rotor del compresor absorbe aire ambiente en la cámara de compresión, donde se comprime junto con el agua inyectada simultáneamente por los atomizadores.
- **Intercambiador-recuperador vorticial de calor:** El intercambiador-recuperador vorticial (Figura 61) dispone de una cámara por la que circula el aire comprimido, recibiendo el calor residual de los gases de escape que se hacen circular por unos conductos cilíndricos dispuestos alrededor de la misma, lo que asegura una alta transferencia calorífica.

- **Cámara de combustión vorticial:** En la Figura (62) puede apreciarse la cámara de combustión vorticial, formada por la cámara y pre-cámara de combustión. En ella el combustible se introduce a la cámara de pre-combustión, la cual dispone de una entrada de admisión de aire con el objeto de producir una mezcla enriquecida con el combustible que se igniciará y combustionará parcialmente antes de pasar a la cámara de combustión principal. En esta pre-cámara también puede realizarse la transformación de combustibles pesados a través de un proceso denominado gasificación. La mezcla enriquecida, al no ser totalmente consumida, se convierte en una mezcla empobrecida cuando alcanza la cámara de combustión principal, donde su especial configuración produce un flujo de torbellino que mantiene a las partículas de combustible líquido en la zona de combustión el tiempo suficiente como para lograr su completa oxidación, aumentando así la eficiencia de la combustión. El flujo de torbellino se genera mediante la inyección tangencial de aire a través de paletas situadas en las paredes periféricas de la cámara. En el proceso de combustión una pequeña porción de combustible humidifica las paredes interiores y permanece así sin participar en el proceso de combustión para ser posteriormente recolectado por un sistema recolector situado en el exterior de las cámaras y reutilizado en el proceso de combustión.

La especial configuración y funcionamiento de la cámara de combustión vorticial le permite emplear todo tipo de combustibles, ya sea líquidos o gaseosos, y permite reducir las emisiones atmosféricas ya que opera a temperaturas menores que otras turbinas de gas y la combustión realizada en la cámara principal se realiza en una mezcla empobrecida.

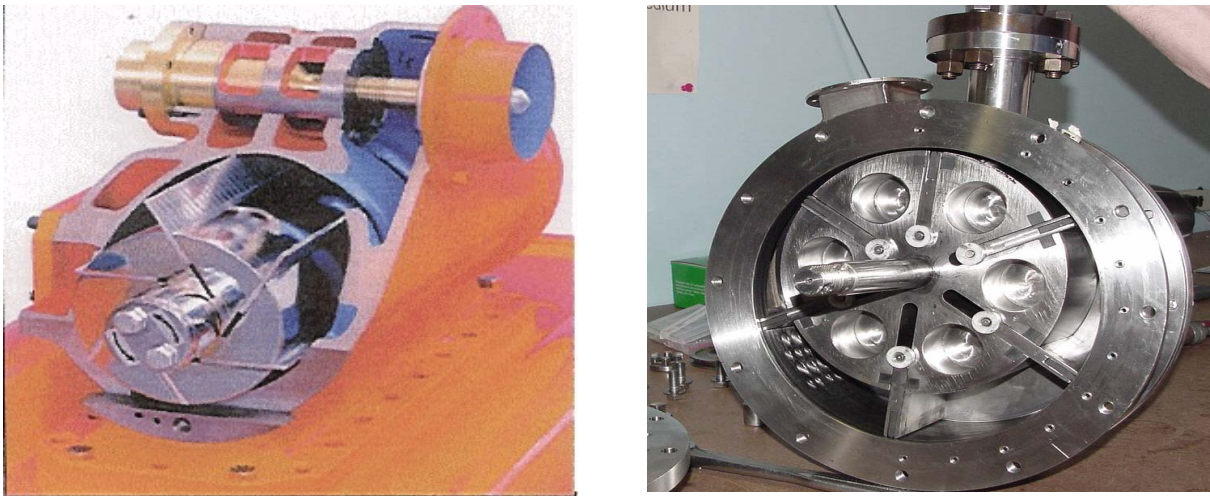


Figura 60 – Compresor (izquierda) y turbina rotatoria (derecha) de desplazamiento positivo

(Fuente: Bourne et al, 2001)



Figura 61 – Intercambiador recuperador vorticial de calor *(Fuente: Bourne et al, 2001)*



Figura 62 – Cámara de combustión vorticial *(Fuente: Bourne et al, 2001)*

2.4.7 Ventajas de una TVJ

- Alta eficiencia térmica y volumétrica.
- Baja fricción deslizando.
- Capacidad de trabajo aun cuando sobrecargado.
- Capaz de emplear diversos combustibles: hidrocarburos gaseosos combustibles líquidos, por lo que podría utilizarse con hidrógeno o LNG.
- Diseño sencillo y de fácil fabricación.
- Permite la reutilización de combustibles como el exceso de hidrógeno de las pilas de combustible o los gases de evaporación de tanques de transporte de LNG.
- Independientemente del combustible utilizado, al tener una eficiencia mayor a cualquier otro motor, sus emisiones de CO₂, NO_x, So_x y PM son inferiores.

2.4.8 Estado de la técnica

En el año 2003 el departamento de investigación de la marina estadounidense subvencionó con 100000 \$ a la compañía General Vortex con el fin de construir el primer prototipo TJV, de 25 kW. La construcción y demostración de su funcionamiento fue un éxito, lo que consiguió a la compañía una nueva subvención de un millón de dólares destinado a la construcción de un nuevo prototipo de 125 kW, la cual comenzó en el año 2006 y se mantiene en desarrollo hasta el día de hoy, con dos de sus característicos componentes ya construidos y probados. Una vez haya sido construida será probada y evaluada, y en caso de ser de forma exitosa, el departamento de investigación de la marina estadounidense dotará a la compañía con una nueva subvención de tres millones de dólares para su producción industrial. Su aplicación para la marina mercante todavía parece lejana, no solo por su falta de producción si no por la potencias de trabajo actuales, que por el momento son escasas para cumplir con la demanda de cualquier buque. No obstante su futuro desarrollo puede ser una aplicación muy prometedora.

2.5 Aprovechamiento de biodiésel

2.5.1 Introducción e historia del biodiésel

El biodiésel es un biocombustible líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales; siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas para este fin, así como las algas marinas, esta última de enorme potencial pero todavía poco desarrollada. Las propiedades del biodiésel son prácticamente las mismas que las del gasóleo de automoción en cuanto a densidad y número de cetano. Además, presenta un punto de inflamación superior. Por todo ello, el biodiésel puede mezclarse con el gasóleo para su uso en motores e incluso sustituirlo totalmente si se adaptan éstos convenientemente. La definición de biodiésel propuesta por las especificaciones de la American Society for Testing and Material Standard (ASTM) lo describe como ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de lípidos renovables tales como aceites vegetales o grasas de animales, y que se emplean en motores de ignición de compresión.

A diferencia de otros combustibles, los biocombustibles presentan la particularidad de utilizar productos vegetales como materia prima. Esto es la causa de que sea preciso tener en cuenta las características de los mercados agrícolas, junto a la complejidad que ya de por sí presentan los mercados energéticos. En este sentido, hay que destacar que el desarrollo de la industria de los biocombustibles no depende principalmente de la disponibilidad local de materia prima, sino de la existencia de una demanda suficiente. Al asegurar la existencia de una demanda de biocombustibles, el desarrollo de su mercado puede aprovecharse para potenciar otras políticas como la agrícola, favoreciendo la creación de empleo en el sector primario, la fijación de población en el ámbito rural, el desarrollo industrial y de actividades agrícolas, y reduciendo a la vez los efectos de la desertización gracias a la plantación de cultivos energéticos.

En cuanto a la utilización del biodiésel como combustible de automoción, ha de señalarse

que las características de los ésteres son más parecidas a las del gasóleo que las del aceite vegetal sin modificar. La viscosidad del éster es dos veces superior a la del gasóleo frente a diez veces o más de la del aceite crudo; además el índice de cetano de los ésteres es superior, siendo los valores adecuados para su uso como combustible.

En el año 1900, el inventor alemán Rudolf Diesel presentó en la Exposición Universal de París el primer motor diésel, el cual funcionaba con aceite de cacahuete y pretendía potenciar la agricultura como fuente energética. Sin embargo, los fabricantes de biocarburantes de la época encontraron el proceso de obtención del aceite de cacahuete demasiado costoso, lo que, sumado a la expansión de la industria petrolífera y a los problemas originados por el empleo del mismo en los motores (taponamiento de filtros y de inyectores, depósitos de carbón en la cámara de combustión, excesivo desgaste del motor, degradación del aceite lubricante por polimerización...) relegaron completamente el empleo de biocarburantes, y su industria fue siendo progresivamente abandonado. No obstante, los motores diésel han seguido utilizando aceite vegetal como combustible en momentos en los que se han presentado problemas de abastecimiento de productos petrolíferos, especialmente durante las dos guerras mundiales y en el período comprendido entre los años veinte y cincuenta en países como el Reino Unido, Francia, Alemania, Brasil, China y Japón.

Durante la crisis energética (1973-1979) disminuyó la oferta de petróleo elevándose su precio. Se planteó entonces la urgente necesidad de ahorrar energía y utilizar recursos energéticos renovables, iniciándose entre otras la investigación en el campo de los biocombustibles líquidos de origen vegetal. A comienzos de esta crisis, al científico Chavanne de la Universidad de Bruselas en Bélgica se le concede la primera patente de obtención de biodiésel. Esta se basaba en el proceso de transesterificación o alcoholisis del aceite vegetal, mediante la que se transformaba para su empleo como combustible. El proceso partía del tratamiento de los aceites vegetales con alcohol etílico y metanol, para

posteriormente sustituir la glicerina con alcohol tras haber eliminado los ácidos grasos de ésta. Este proceso de producción continuó hasta mediados los años setenta del pasado siglo, ya que con la transesterificación se rebajaba la viscosidad de los aceites vegetales hasta valores cercanos a las de los gasóleos de origen fósil, por lo que podían usarse en los motores diésel disminuyendo con creces los problemas derivados del taponamiento, desgaste y acumulación de carbón.

En el periodo comprendido entre 1977 y 1989 se desarrolla el proceso de obtención del biodiésel en varias partes del mundo. En 1977, el científico Brasileño Parente patenta un proceso que emplea etanol durante la transesterificación, el cual es posteriormente reconocido y aceptado por la industria automovilística, así como el producto bioqueroseno, certificado por Boeing y la NASA para su empleo como biodiésel de aviación. En 1979, se desarrolla en Sudáfrica un proceso de obtención de biodiésel a partir de aceite de girasol, pero no será hasta 1983 cuando se obtiene el primer biodiésel globalmente aceptado para su empleo en motores de automóviles.

A comienzos de los años noventa se crean en Europa varias plantas de biodiésel debido a la creciente preocupación social por proteger el medio ambiente. En 1997, un considerable número de naciones firman el Protocolo de Kyoto dentro del Convenio Marco sobre Cambio Climático de la ONU (UNFCCC), motivando un resurgimiento del interés por este combustible en diferentes partes del planeta.

Durante las últimas décadas, en los países industrializados la tecnología de producción del biodiésel ha sido desarrollada satisfactoriamente y su empleo en motores diésel ha sido probado con éxito. No obstante, aún persisten dos aspectos no resueltos que limitan una mayor expansión y difusión de su uso: por un lado, el alto costo de los aceites vegetales para la producción de biodiésel cuando se utilizan cultivos oleaginosos convencionales y por otro, la logística para el aprovisionamiento de los insumos en el caso de la utilización de aceites comestibles usados. Hoy en día países como Alemania,

Austria, Canadá, Estados Unidos, Francia, Italia, Malasia y Suecia son pioneros en la producción, ensayo y uso de biodiésel en automóviles.

Las experiencias de empleo de biodiésel como combustible en la marina mercante son muy reducidas. En el año 2007, el pesquero *M/S Codepeca I* realizó el primer viaje impulsado por sus motores diésel alimentados parcialmente con biodiésel.

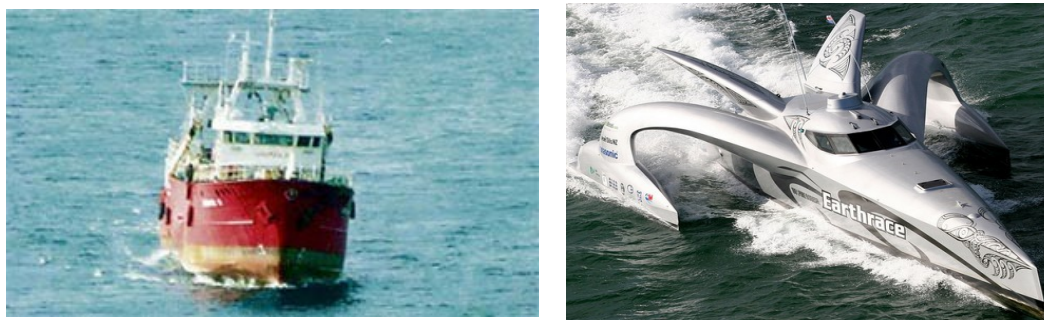


Figura 63 – M/S Codepeca I (izquierda) y Bloog (derecha) (Fuente: Wikipedia)

Otro prototipo el Earthrace, sin fines comerciales, dio la vuelta al mundo en su totalidad utilizando únicamente biodiésel en sus motores. A parte de estas, su aplicación no se ha realizado todavía en buques mercantes.

2.5.2 Propiedades del biodiésel

- **Composición y origen:** Los aceites vegetales (oliva, girasol, colza, palma, etc.) están formados por moléculas de triglicéridos de ácidos grasos (entre 14 y 22 carbonos), mono y triglicéridos, en una pequeña proporción, y algunos elementos que se eliminan en el proceso de refinamiento. La composición del biodiésel puede variar en función de su procedencia, pero se acepta en promedio la siguiente: $C_{18,7}H_{34,9}O_2$. Esta mezcla de ésteres, a pesar de no tener una composición química similar a la de los gasóleos (que son hidrocarburos saturados) por contener oxígeno, tiene unas propiedades físicas muy similares, lo que hizo pensar que podría utilizarse como sustituto de aquellos, como combustible e incluso como carburante en motores diésel.
- **Toxicidad:** Según indica CSIRO (Commonwealth Scientific & Industrial Research

Organization - Australia) no existen riesgos para la salud por las emisiones tóxicas originadas por la combustión. Todas las emisiones tóxicas de gases de escape del biodiésel son inferiores respecto del petrodiésel, excepto para la acroleína. Aunque esta es altamente tóxica el ligero incremento es compensado por el decremento de las emisiones de aldehídos tóxicos.

- **Biodegradabilidad:** La biodegradabilidad es la facilidad con la cual la molécula de un compuesto químico se descompone por efecto de la actividad microbiana en otras más simples dando lugar a la formación de CO_2 y H_2O . La propiedad de ser biodegradable es deseable en el caso de pérdidas o derrames de biodiésel en el medioambiente. Inversamente, esta característica afecta a la estabilidad del carburante biodiésel en lo que respecta a su almacenamiento, manipulación y la distribución. Los componentes del diésel se biodegradan lentamente o no son biodegradables ya que está formado por una mezcla de alcanos, alcanos ramificados, cicloalcanos e hidrocarburos aromáticos; de los cuales solo los alcanos pueden ser degradados por microorganismos. El diésel, además, contiene pocos componentes que posean oxígeno, motivo por el que se le considera poco activo biológicamente hablando. Por su parte, el biodiésel está formado por cadenas hidrocarbonadas que forman ésteres con dos átomos de oxígeno, lo que lo hace biológicamente activo. En el proceso de degradación los ácidos grasos se oxidan y degradan formando ácido acético y un ácido graso con pocos átomos de carbono. Los biodiésel derivados del aceite de colza y del aceite de soja son fácilmente biodegradables en ambiente acuático. Se ha demostrado en estudios [20] que el biodiesel derivado del aceite de colza y aquel derivado del aceite de soja poseen una biodegradabilidad del 88,49 % en 28 días. La máxima biodegradabilidad del petrodiésel después de 28 días es del orden del 26 %. Las mezclas de biodiésel y petrodiésel han mostrado que la biodegradabilidad se

acelera, así la mezcla B20 se biodegrada dos veces más rápido que el petrodiesel. Se ha hallado también [17] que el biodiesel derivado del aceite de soja puede ser biodegradado por bacterias bajo condiciones aeróbicas así como anaeróbicas tanto en agua como en tierra.

El petrodiesel se degrada en condiciones aeróbicas cuatro veces más lentamente que el biodiesel, pero resiste la biodegradación en condiciones anaeróbicas. Por lo tanto se puede decir que desde el punto de vista del impacto ambiental es ventajoso el empleo del biodiesel o de sus mezclas. Es así como en ciertas actividades el biodiesel alcanza una gran difusión, como puede ser en el ámbito marítimo por su menor biodegradabilidad y toxicidad para los organismos acuáticos.

• **Propiedades como combustible:**

Propiedad	Biodiesel	Gasoil
Viscosidad a 40 °C	3.5/4.5	3
Rango de inflamabilidad [%Volumen]	Variable	0..7 - 5
Temperatura de congelación	0°/-5°C	-20 °C
Temperatura de auto-ignición	148.89	200-400
Densidad (fase líquida) [kg/m ³]	890	865
Energía específica [kJ/kg]	37.3	42.7
Número de cetano	47-56	40-60

Tabla 14 – Propiedades del biodiesel como combustible

De la Tabla 14 pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- La densidad y viscosidad cinemática del biodiesel aumentan con respecto al gasoil.
- El índice de cetano, que guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión, es mayor en el metil éster que en el gasoil. Un menor índice de cetano implica un retraso de la ignición.
- El poder calorífico es menor en el biodiesel, por lo que su potencia es inferior, (en

torno al 5%) lo que conlleva a un consumo de combustible ligeramente superior al del diésel tradicional.

- El punto de congelación del diésel es de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ frente a los $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ del biodiésel. Por ello el uso de biodiésel en motores de automoción requiere de anticongelantes en zonas frías.

2.5.3 Producción de biodiésel, almacenamiento, manipulación y distribución

Producción a partir de plantas [18]

El biodiésel es una mezcla de ésteres monoalquílicos de ácidos grasos de cadena larga derivados de recursos renovables tales como aceites vegetales o grasas animales (ASTM, 6751-09). Esta definición también es aceptada por las especificaciones de la Unión Europea (estándar EU 14214). Puede usarse en su forma pura (B100) o en mezclas con diésel fósil que pueden ser del 2% (B2), 5% (B5) y 20% (B20). Las propiedades del biodiésel varían de acuerdo a la materia prima y entre las más sobresalientes y atractivas están su biodegradabilidad y no toxicidad, comparado con el diésel fósil. Frecuentemente, se considera que el balance de carbono en la producción de biodiésel a partir de plantas es neutral. Sin embargo, para mayor precisión, se debe tomar en cuenta el carbono utilizado en todo el ciclo de producción, respecto al liberado durante la combustión. La razón principal por la cual los aceites vegetales no se pueden utilizar directamente en los motores diésel es por su alta viscosidad, la cual está relacionada con su estructura química. Conforme aumenta la longitud de la cadena carbonada de los lípidos, mayor es la viscosidad. Sin embargo, la viscosidad disminuye cuando aumenta el número de enlaces dobles (grado de insaturación). Existen cuatro procesos químicos que se utilizan para resolver el problema de viscosidad: dilución, microemulsificación, pirólisis y transesterificación, siendo este último el más recomendado y preferido. La reacción de transesterificación es la transformación de un triglicérido en un éster alquílico de ácidos grasos, en presencia de un alcohol (metanol o etanol) y un catalizador (un álcali o un

ácido), obteniendo glicerol como subproducto. Las moléculas lineales del éster resultante reciben el nombre de biodiésel y están formadas por el éster del ácido graso y el alcohol. La reacción de transesterificación requiere de 3 moles de alcohol por cada mol de triglicéridos para producir 1 mol de glicerol y 3 moles de metil ésteres (biodiesel). El biodiésel obtenido tiene menor viscosidad, menor masa molecular, menor intervalo de ebullición y menor punto de inflamación que el triglicérido original. En los procesos industriales se usan 6 moles de metanol por cada mol de triglicéridos para asegurar la producción de metil ésteres o biodiesel. La Figura 64 muestra un diagrama general de los procesos de producción de biodiesel. En el caso de la producción de biodiésel a partir de plantas, ésta tiene algunas limitaciones, como por ejemplo: estar en conflicto con la utilización de aceites para alimento y ver su uso limitado por las grandes extensiones de terreno necesarias para la producción de semillas oleaginosas. Además, para la producción de biodiésel sólo se emplea la semilla de la planta y el resto de la biomasa se desecha; y los cultivos son dependientes de la estación del año y su ubicación geográfica.

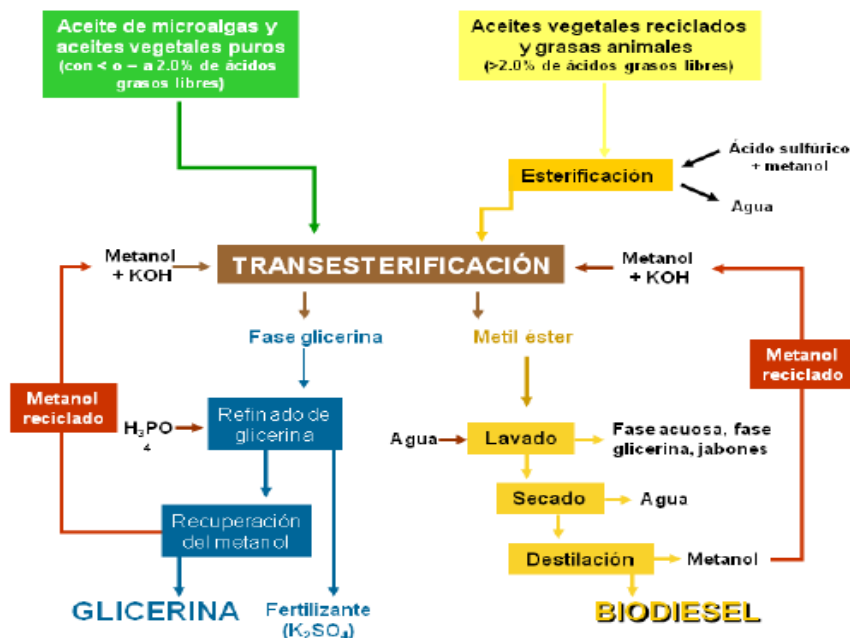


Figura 64 – Diagrama de producción de biodiésel (Fuente: Revista Latinoamericana de

Bioteología)

Producción a partir de algas: Se ha notificado que diversos microorganismos tales como las levaduras *Cryptococcus curvatus*, *Cryptococcus albidus*, *Lipomyces lipofera*, *Lipomyces starkeyi*, *Rhodotorula glutinis*, *Rhodospiridium torulooides*, *Trichosporo pullulan* y *Yarrowia lipolytica*, y bacterias del grupo actinomicetos tales como *Mycobacterium spp*, *Rhodococcus spp.* y *Nocardia spp*, son capaces de sintetizar triglicéridos intracelulares, bajo ciertas condiciones de cultivo, hasta en un 80% de su peso seco utilizando diversas fuentes de carbono (azúcares, ácidos orgánicos, alcoholes y aceites entre otras) y diferentes subproductos y/o residuos industriales o agrícolas (suero de leche, hidrocarburos, aceites vegetales, melazas de caña de azúcar, salvado de trigo, desechos de frutas y verduras). El problema al utilizar este tipo de microorganismos, es el costo de producción, dado que requieren un alto consumo de oxígeno. En contraste, en las últimas décadas se ha destacado que las microalgas representan una alternativa más conveniente que cualquier otro tipo de organismo para la producción de triacilglicéridos y su conversión a biodiésel, ya que algunas especies oleaginosas, siendo organismos fotosintéticos, sólo requieren energía solar, agua, CO₂ y algunas sales para producir muy altos rendimientos de biomasa rica en lípidos. De hecho, son los organismos fotosintéticos más eficientes, absorben más CO₂ y liberan más O₂ que cualquier planta, crecen extremadamente rápido y llegan a acumular grandes cantidades de diversos productos. Algunas microalgas doblan su biomasa en veinticuatro horas y el tiempo de duplicación de biomasa durante la fase exponencial puede ser tan corto como tres horas y media. De manera más específica, los beneficios que se obtienen al usar microalgas para la producción de biodiésel son:

- Las microalgas tienen un rendimiento de aceite mucho mayor que cualquier cultivo convencional. Es de 10 a 20 veces mayor que el derivado del aceite de palma y de 200 a 400 veces mayor que el derivado del aceite de soya (Figura 65).

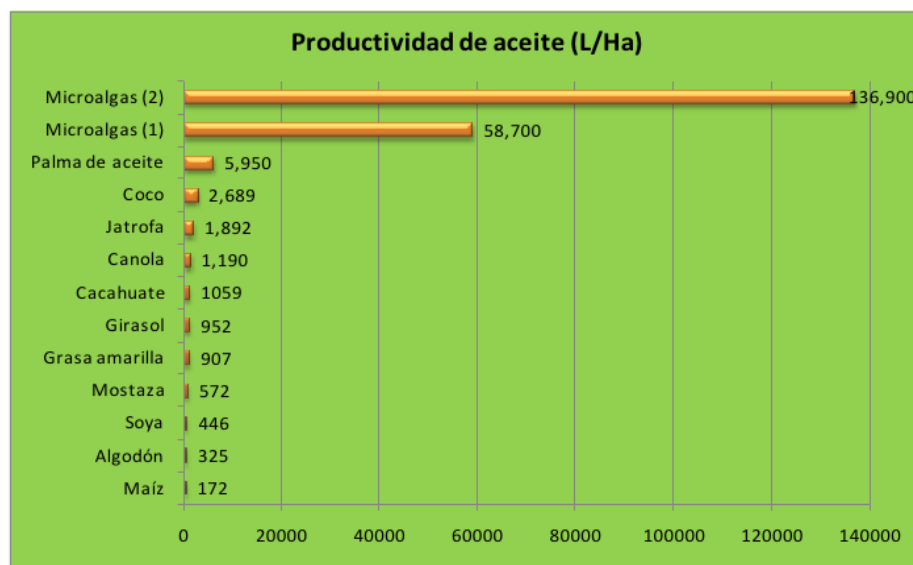


Figura 65 – Productividad de aceite (L/Ha) (Fuente: *Revista Latinoamericana de Biotecnología*)

- Solo este bioenergético tiene una verdadera huella ecológica pequeña, dado que requiere una superficie de 1-2 órdenes de magnitud menores en comparación a los cultivos convencionales o los árboles. Requiere de 1.5 a 3.2 millones de hectáreas (M has) para satisfacer el 50% de las demandas de energéticos de transportación en U.S.A. En contraste, la soya, principal fuente de biodiésel en U.S.A. requiere de 330 a 450 M has para un propósito similar. En México, se ha estimado que sólo se requiere el 1% de la superficie total del país, para cubrir el 100% de la demanda actual de diésel de petróleo.
- Con biodiésel de microalgas cultivadas en lagunas abiertas (LA), sólo se requieren 200,000 hectáreas para producir 1 cuadrillón de BTU. En contraste, se requieren aproximadamente 40 millones de has si se utiliza etanol derivado de maíz o 20 millones de has si se utiliza biodiésel derivado de frijol de soya.
- Las microalgas oleaginosas pueden ser cultivadas en agua de mar o en agua salobre, disminuyendo así la presión sobre el agua dulce requerida para la producción de alimento. Algunas otras especies aisladas de agua dulce, pueden crecer en aguas residuales.
- Con relación a la emisión de gases invernadero, es de los pocos bioenergéticos con

un valor negativo. Es decir, no se produce CO₂ durante el ciclo de vida de producción y el valor de este parámetro para microalgas (-183 kgCO₂/MJ) es el más negativo respecto a los otros bionergéticos con valores negativos (etanol a partir de pastos o de residuos celulósicos). En contraste, el diésel a partir de fuentes fósiles produce 83 kgCO₂/MJ y el etanol a partir de maíz produce 81-85 kgCO₂/MJ.

Producción mundial de biodiésel: La Figura muestra la producción de biodiésel desde el periodo transcurrido entre el año 2005 y 2009. En 5 años, la producción ha experimentado un crecimiento de casi un 400%. El principal continente productor de biodiésel es Europa seguido por América y Asia. Dentro de ellos, Alemania y Francia, Estados Unidos, Brasil, China y Tailandia son los principales productores (Figura 67).

El biodiésel comercialmente producido actualmente es aquel originado a partir de aceites de palma y girasol, semilla de soja y colza, y jatropha. En la Figura 68 puede apreciarse la distribución de la producción de biodiésel en función de la materia prima de procedencia. La semilla de soja es la principal fuente de biodiésel. La producción de biodiésel algal se haya todavía en fase experimental, motivo por el cual su producción no aparece reflejada en la gráfica.

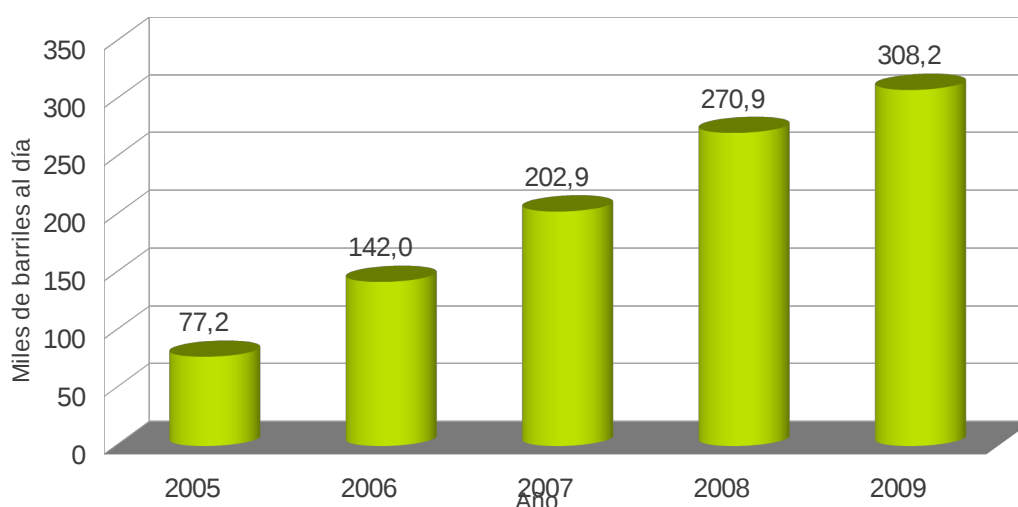


Figura 66 – Producción mundial anual de biodiésel (Fuente: U.S. Energy Information Administration, International Energy Statistics, Biofuels Production; gráfico elaborado por el autor)

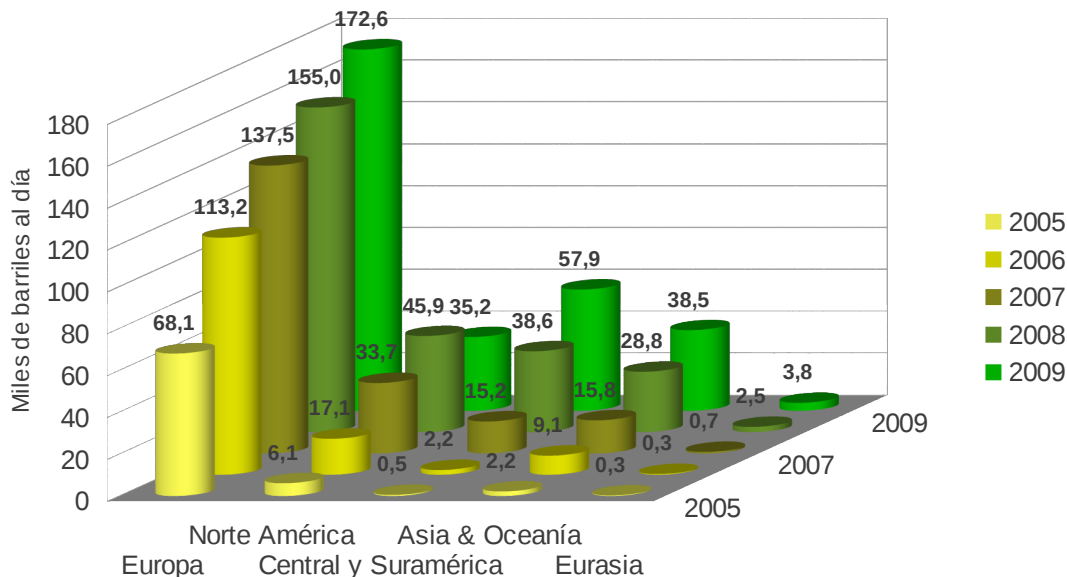
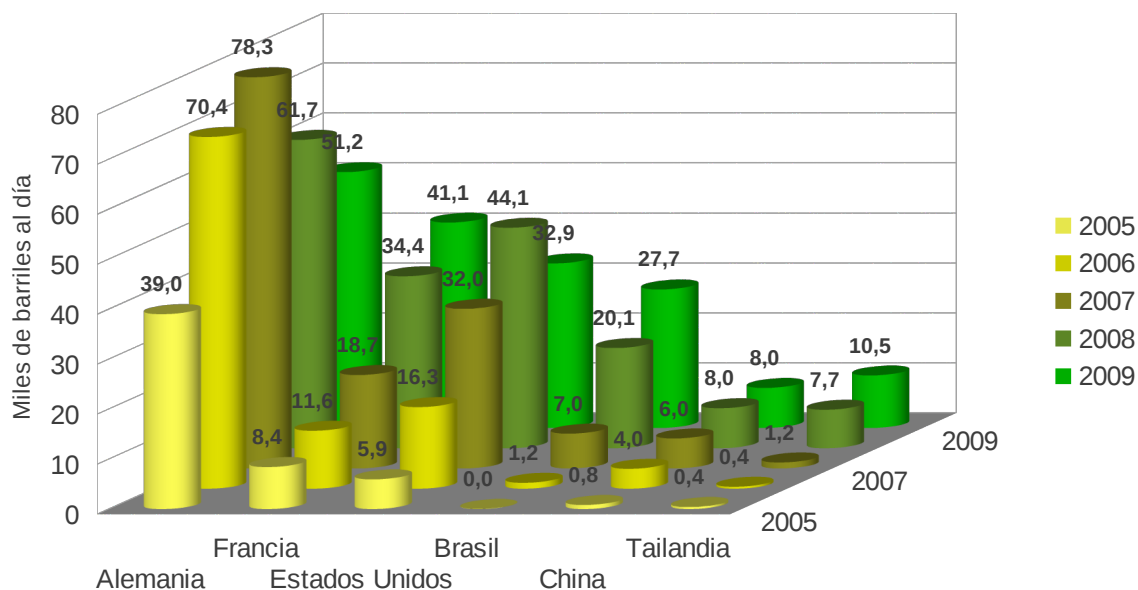


Figura 67 – Producción mundial anual de biodiésel por principales países productores

(Fuente: U.S. Energy Information Administration, International Energy Statistics, Biofuels Production; gráfico elaborado por el autor)



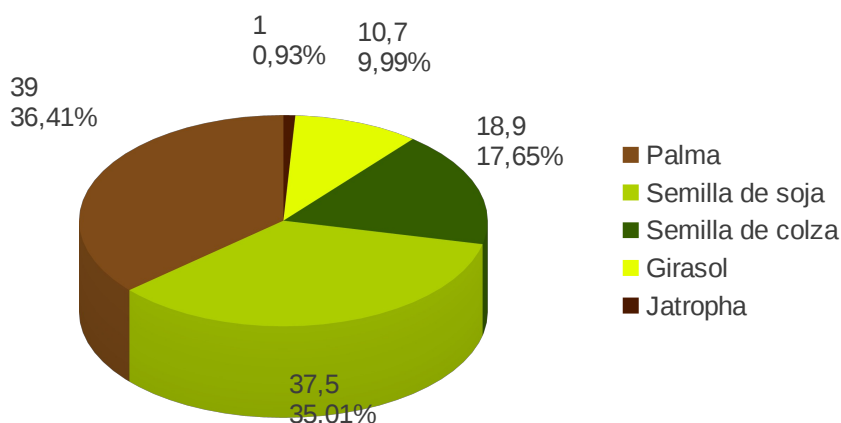


Figura 68 - Distribución de la producción de biodiésel en el año 2007 por su origen vegetal

(tm) (Fuente: IFP; gráfico elaborado por el autor)

Almacenamiento, manipulación y distribución de biodiesel: El biodiésel no es más peligroso en su manipulación y almacenaje que el petrodiesel. No se requieren tanques especiales ni medidas extraordinarias de seguridad para su almacenamiento.

La principal característica que le convierte en intrínsecamente más seguro que el diésel fósil es su mayor punto de inflamación.

Los productores de biodiésel aconsejan almacenarlo por no más de 3 a 6 meses a menos que se utilicen aditivos para estabilizarlo debido a su capacidad de biodegradación. Esto es válido también para las mezclas. Una vida más prolongada puede lograrse con la adición de estabilizantes.

El número de ácido del biodiésel y de sus mezclas puede elevarse si el combustible envejece, o si no fue producido en modo correcto. El incremento de este parámetro está asociado a la formación de depósitos y reduce la vida de la bomba y los filtros.

El biodiésel puede solidificar a bajas temperaturas mucho más fácilmente que el petrodiesel, sin embargo las mezclas con menos del 20% mantienen en frío las mismas propiedades de fluidez que el diésel base, y por debajo del 5% es prácticamente igual al petrodiesel sin alterar.

2.5.4 Emisiones atmosféricas derivadas de la combustión de biodiésel en motores alternativos de combustión interna

Emisiones de CO₂

Por cada kW/h producido en la combustión de biodiésel se liberan 272,58 g de CO₂. En la gráfica de la Figura 69 puede apreciarse que este valor es el más elevado de todos los combustible convencionales y los evaluados en este trabajo, sin embargo, este aumento se ve compensado por el origen del biocombustible, pues la materia prima de la que procede el biodiésel necesita CO₂ para realizar la fotosíntesis. Por lo tanto, la emisión que se obtiene al quemar este combustible en un motor alternativo de combustión interna cerraría el ciclo que utilizaría este CO₂ emitido para alimentar el cultivo que produciría de nuevo el biodiésel. De acuerdo al departamento de energía de los Estados Unidos, la producción y combustión de biodiésel supone un 75.8% menos de emisiones de CO₂ a la atmósfera.

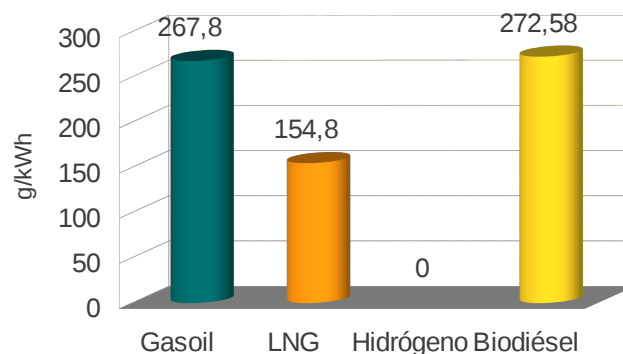


Figura 69 – Emisiones de CO₂ según combustible (Fuente: Martín y Sala, 2011; gráfico elaborado por el autor)

Emisiones de SO_x, NO_x, PM, CO, HC, PAH, nPAH'S e hidrocarburos: Las emisiones emitidas durante la combustión de biodiésel son nulas ya que su contenido en azufre es inexistente. Las mayores emisiones de NO_x son debidas a que el el biodiésel, por su mayor índice de cetano, debe tener un menor retardo de ignición, por tanto su proceso de combustión comienza más rápido y alcanza mayores temperaturas en la cámara de

combustión, lo cual favorece a la formación de NO_x . Esta aumentaran cuanto mayor sea el contenido de biodiésel en el combustible. No obstante, las principal reducción del biodiésel atañe a las cantidades de PM, CO y HC, que disminuyen conforme le contenido de biodiésel en el combustible aumenta, lo que demuestra que a una mayor pureza, menor grado de emisión de las mismas. Las gráficas de la Figura 70 muestran la reducción en las emisiones de NO_x , PM, CO, HC, PAH, nPAH'S e hidrocarburos respecto al diésel convencional.

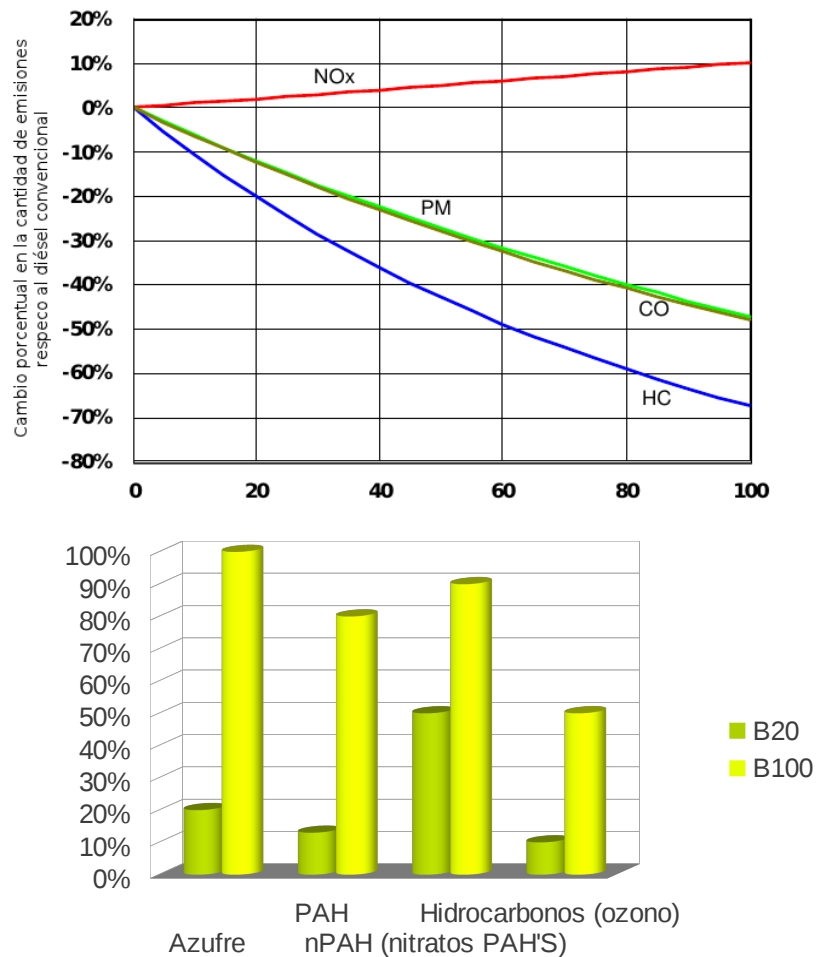


Figura 70 – Reducción en las emisiones de NO_x , PM, CO y HC (arriba) y SO_x , PAH, nPAH e hidrocarburos (abajo) respecto al diésel convencional (Fuente: United States Environmental Protection Agency, gráfico adaptado por el autor)

2.5.6 Estado del arte: empleo de biodiésel a bordo de buques mercantes

Lloyd's Register group identifica [19] los siguientes aspectos como factores límite actualmente para el empleo de biodiésel en buques mercantes:

- No existencia de red, ni de distribución ni de almacenamiento de biodiésel para su empleo en buques.
- Falta de estándares de calidad que regulen las especificaciones del biodiésel, ya sea puro o esté mezclado con diésel fósil, las condiciones de transporte, distribución y almacenamiento de biodiésel para su empleo en buques.
- Impacto social de su producción.

Por otra parte, en el documento realizado por la compañía noruega ZERO para el Marine Environment Protection Committee (MEPC) en Diciembre 2007 se resaltan los siguientes factores sobre el empleo de biodiésel en buques de la marina mercantes:

- El empleo de biodiésel en buques de la marina mercante no representa ningún problema operacional para los motores convencionales ni los sistemas de tratamiento del combustible. De la experiencia de la compañía MAN B& W DIESEL se ha concluido que un motor modificado para el empleo de biodiésel tendrá un coste de aproximadamente un 5% más que la versión convencional y que los motores diseñados para quemar combustibles pesados serían capaces de quemar aceite de palma no transesterificada.
- El principal factor que a día de hoy dificulta el empleo de biodiésel en los buques de la marina mercante es la diferencia de precio del mismo con el diésel fósil.
- El empleo de biodiésel en el futuro vendrá condicionado por una reducción en el precio del biocombustible y una adecuada red de almacenamiento y distribución.

La compañía Maersk está realizando actualmente [20] pruebas con biodiésel como combustible en su buque M/S Maersk Kalmar las cuales se esperan dar por concluidas a finales del presente año.

Capítulo 3 – Aprovechamiento de energías renovables

3.1 Aprovechamiento de la energía solar

3.1.1 Introducción

La energía solar es la energía obtenida mediante la captación de la radiación solar, es decir la luz y calor emitidos por el Sol. Puede emplearse para la generación de electricidad o calor, siendo una energía totalmente renovable y limpia, ya que no se emite ningún contaminante atmosférico ni en el proceso de captación ni de transformación. No obstante, los paneles fotovoltaicos pueden suponer al final de su vida útil un residuo contaminante de difícil reciclaje.

La radiación solar es aprovechable en sus componentes directos y difusos o en la suma de ambos. La radiación directa es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

La constante solar es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestres en un plano perpendicular a los rayos del Sol. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de 1366 W/m^2 .

La energía solar puede captarse de forma directa o indirecta; es decir mediante un dispositivo mecánico proyectado e instalado a tal efecto o sin necesidad de este. Los dispositivos mecánicos de la captación de la energía solar pueden clasificarse de forma general en tres grupos:

- **Colectores térmicos:** Captan la radiación mediante captadores solares convirtiéndola en energía térmica que después se transfiere a un fluido de trabajo

capaz de emplearse en procesos de generación eléctrica o calefacción. Un captador solar es un elemento material que puede tratarse de una placa plana o un tubo de vacío. Los sistemas de captación planos (o de placa plana) con cubierta de vidrio son los comunes mayoritariamente en la producción de agua caliente sanitaria. El vidrio deja pasar los rayos del Sol, estos calientan unos tubos metálicos que transmiten el calor al líquido de dentro. Los tubos son de color oscuro, ya que las superficies oscuras calientan más.

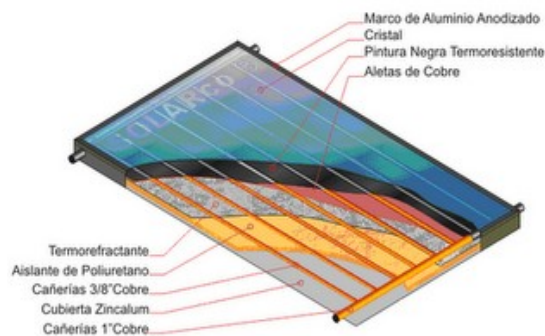


Figura 71 – Colector solar térmico (Fuente: Wikipedia)

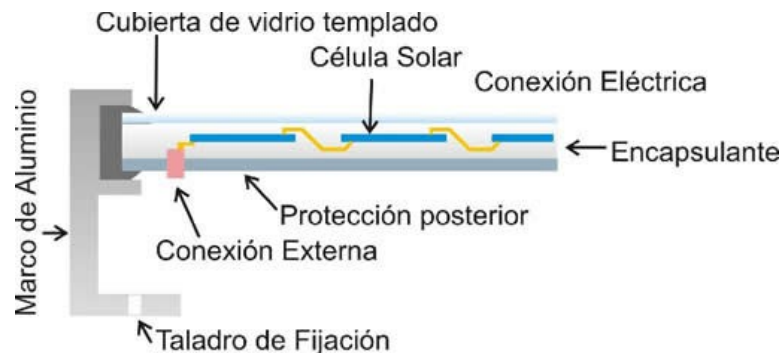


Figura – 72 Diagrama de un panel solar fotovoltaico (Fuente: Instituto de investigaciones eléctricas)

- **Paneles fotovoltaicos:** Captan la energía lumínica de la radiación solar y la transforman mediante células fotovoltaicas en energía eléctrica. Una célula fotovoltaica es un dispositivo electrónico compuesto por un material que presenta

un efecto fotoeléctrico, es decir, posee la capacidad de absorber fotones y emitir electrones libres que al capturarse, resultan en una corriente eléctrica. La eficiencia máxima alcanzada por las células fotovoltaicas comercialmente disponibles en la actualidad es del orden del 20%, si bien se han logrado eficiencias en proyectos de investigación cercanas al 40% [21].

3.1.2 Aplicación de la energía solar en la marina mercante

La instalación de paneles solares fotovoltaicos o colectores térmicos en buques mercantes viene limitada por el espacio disponible en cualesquiera de las cubiertas del buque, si bien existen ciertos dispositivos que permitirían ampliar la superficie útil en estas para la instalación de paneles solares, como lo son las velas solares SolarSail. Esta limitación espacial implica que una instalación de paneles solares solo podrá realizarse en aquel tipo de buques con espacio suficiente, por lo que algunos, como los buques porta-contenedores o que carguen sobre cubierta, apenas podrán beneficiarse de las mismas. La instalación de paneles solares en buques mercantes también se verá condicionada y limitada por los factores climáticos y propios de la navegación a los que se verá expuestos: exposición a agua de mar, presiones, vientos y vibraciones estructurales.

Debido a su baja densidad energética, eficiencia y a la limitación de espacio existente en los buques mercantes, los paneles fotovoltaicos disponibles tecnológicamente y comercialmente en la actualidad no pueden considerarse como un medio energético principal de propulsión, pero sí como un medio auxiliar.

En sistemas de propulsión eléctrica, una instalación de paneles fotovoltaicos puede suministrar corriente directamente al motor, reduciendo el aporte del generador principal, y con ello el consumo y las emisiones de contaminantes atmosféricos. Independientemente de que un buque posea o no sistema de propulsión eléctrica, la energía producida por una instalación de paneles fotovoltaicos puede emplearse en la alimentación de sistemas auxiliares.

Una instalación de colectores térmicos puede proporcionar la energía térmica necesaria para calentar los sistemas de calefacción del buque, así como los de agua caliente de las instalaciones sanitarias o cocinas.

La captación de la radiación solar está condicionada por el clima imperante así como por las horas diurnas, lo que requiere de un sistema de almacenamiento de la energía captada (baterías) o de un sistema de apoyo que supla la energía producida por los paneles solares.

Wartsilä estima en su último informe sobre la eficiencia energética en buques [22], un ahorro en el consumo de combustible de aproximadamente el 3.5% en buques tanque, 2.5% en buques PCTC (Pure car/truck carrier) y un 1% en buques ferry, basándose únicamente en la instalación de paneles fotovoltaicos en la cubierta principal.

3.1.3 Ventajas y desventajas del aprovechamiento de la energía solar

La principal ventaja del aprovechamiento de la energía solar es su naturaleza completamente renovable y energéticamente limpia, ya que en su empleo no se emite ningún contaminante atmosférico.

En un hipotético buque alimentado únicamente por energía eléctrica generada por paneles fotovoltaicos se eliminarían todas las vibraciones producidas en la maquinaria principal así como todo ruido de la misma debido a su aprovechamiento de la misma en motores eléctricos. El empleo de motores eléctricos conlleva una serie de ventajas, especialmente los de tipo superconductor, comentados en el posterior capítulo.

La única desventaja que presenta el aprovechamiento de la energía solar es el residuo generado por un panel solar tras completar su vida útil, contaminante y difícilmente reciclable en la actualidad. Es de esperar sin embargo, que dicho aspecto sea mejorado con la evolución en los procesos de reciclaje de residuos y en los materiales empleados en la construcción de paneles solares.

3.1.4 Estado del arte

La mayor aplicación de paneles solares en el ámbito marítimo tiene lugar en el sector de la náutica deportiva, ya que su instalación es sencilla (Figura 73), y su aporte energético a la embarcación suficiente como para alimentar los sistemas auxiliares de navegación y otros dispositivos de a bordo.



Figura 73 – Instalaciones de paneles fotovoltaicos en veleros (Fuente: Wikipedia, Sailmiami)

No obstante, es también en este sector donde han visto la luz algunos prototipos alimentados *totalmente* por energía solar: tal es el caso del *Solar Proa* (Figura 74), embarcación de carácter deportivo completamente autosuficiente con capacidad de hasta seis pasajeros.

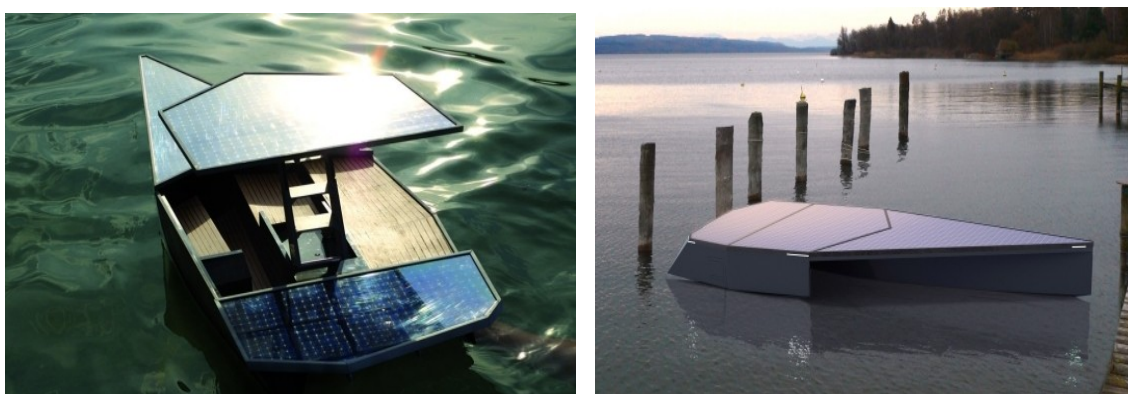


Figura 74 – Solar Proa (Fuente: Ecofriend)

Otro prototipo, el *M/S Turanor Planet Solar* (Figura 75), es el primer catamarán autosuficiente e impulsado únicamente por la energía eléctrica generada en sus 537 m² de

paneles solares. El barco se encuentra desde el 30 de diciembre del año 2010 dando la vuelta al mundo y hasta la fecha su travesía ha sido exitosa.

En el ámbito de la marina mercante, el primer buque equipado con paneles solares, el *M/V Auriga Leader* (Figura 76) fue botado a la mar en el año 2008. El buque en cuestión, un Ro-Ro con capacidad para 6400 vehículos, está equipado con 328 paneles solares instalados en la cubierta principal del buque capaces de beneficiar al buque con un ahorro de hasta el 10% en el consumo de combustible.



Figura 75 – M/V Tûranor Planet Solar (Fuente: Yatchingmonthly)

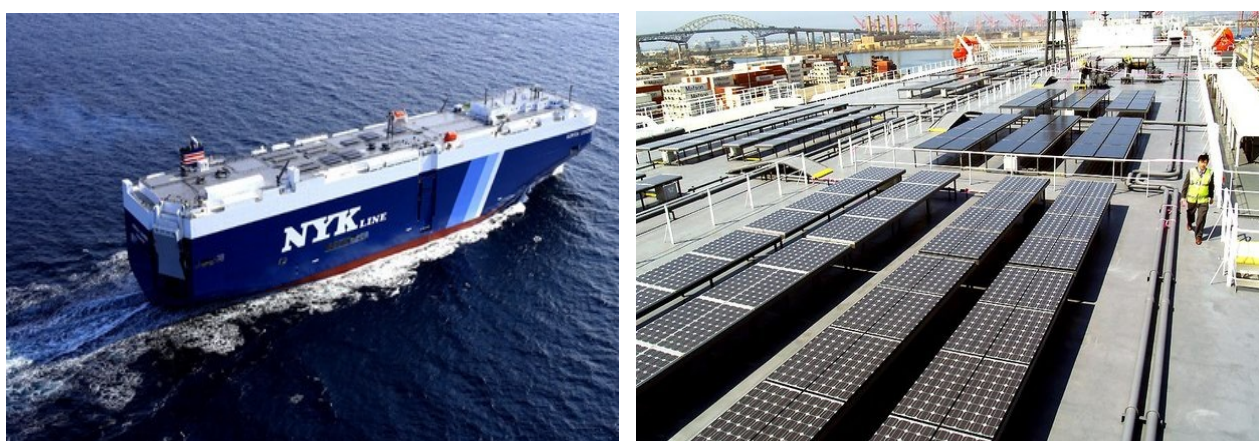


Figura 76 – M/S Auriga Leader (Fuente: Debatescoches)

Comercialmente son varias las compañías que manufacturan paneles solares instalables en buque, de estas cabe destacar la australiana Solar Sailor. Dicha compañía ofrece

paneles solares de eficiencias cercanas al 20% conectados a baterías de almacenamiento para sacar el máximo partido energético de los mismos. Sin embargo, su producto más innovador consiste en la tecnología de las velas solares (Solar Sailor).

Una vela solar consiste en una vela tradicional rígida dotada de paneles solares instalados en su superficie y montada sobre un dispositivo giratorio que permite su orientación en diferentes direcciones. Su orientación, manejada a través de una consola en el puente, permite aumentar la exposición de los paneles solares a la radiación del sol, lo que permite una captación de energía un 40% mayor que los mismos paneles fijos. La vela solar está diseñada para capturar tanto la radiación directa como indirecta y actuar como una vela sencilla, aumentando la velocidad del buque o reduciendo su consumo de combustible y por tanto emisiones atmosféricas.

Solar Sailor ha desarrollado y construido varios diseños (Figura 77) que emplean su tecnología de paneles solares combinada con otras medidas de reducción de consumo y emisiones atmosféricas (biodiésel, motores eléctricos). Estos prototipos están pensados para el transporte de personas o automóviles.

Solar Sailor también estudia la posibilidad de incorporar su vela solar a buques mercantes, en concreto a buques tanque (Figura 77).

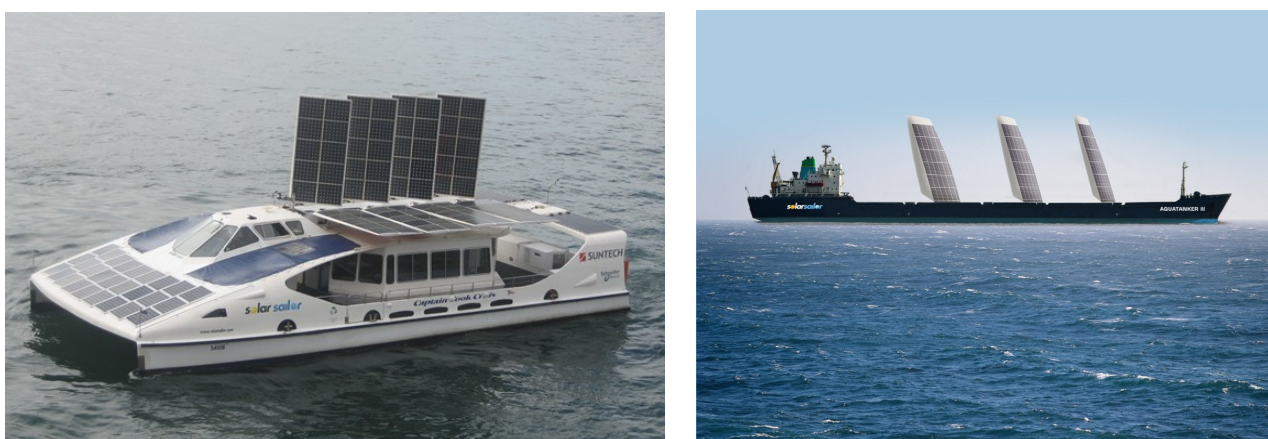


Figura 77 – Prototipo de buque de pasaje de Solar Sailor (imagen de la izquierda) y de buque tanque (imagen de la derecha) (Fuente: Solarsailor)

El prototipo todavía no desarrollado M/V Orcelle, buque cuya pretensión es la de navegar únicamente empleando fuentes energéticas renovables, incorpora en su diseño velas solares (Figura 78).

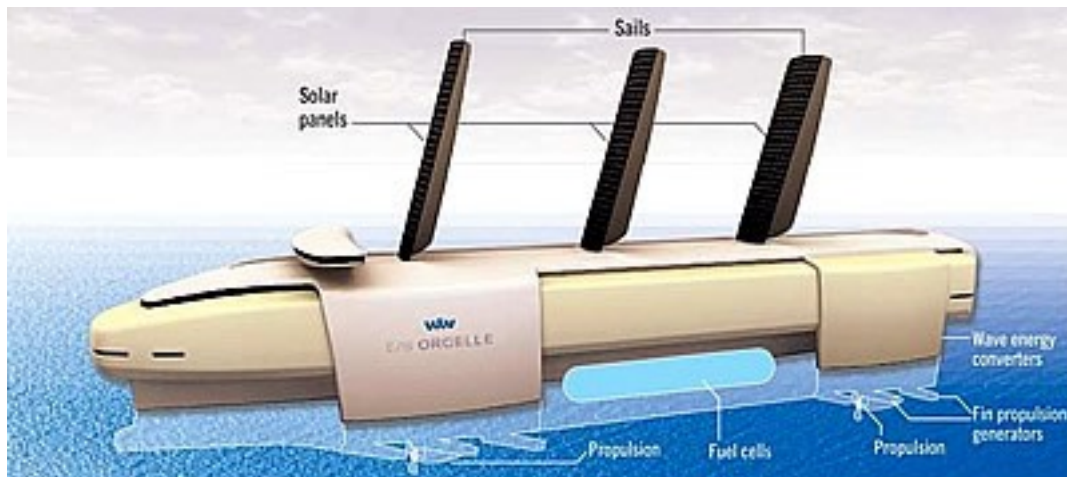


Figura 78 – Prototipo M/V Orcelle (Fuente: Buch-der-synergie)

3.2 Aprovechamiento del viento

3.2.1 Introducción

Ya desde los primeros tiempos de la navegación marítima en época de los Fenicios, el aprovechamiento del viento constituyó el principal medio de propulsión de los navíos mercantes. No sería hasta la llegada de los primeros motores de vapor a principios del siglo XIX que su empleo comenzaría a verse limitado al sector deportivo y de placer.

Los primeros motores de vapor y sus posteriores versiones ofrecen un medio de propulsión mucho más efectivo y seguro que el proporcionado por la velas de los antiguos buques mercantes, lo que, sumado a las exigencias de un mercado en constante crecimiento y la aparición de nuevos sectores de transporte competitivos (la aviación en el siglo XX), propició la desaparición de los antiguos aparejos de navegación en el sector de la marina mercante. Sin embargo, a día de hoy, y con causa de la contaminación atmosférica del planeta y el aumento del efecto invernadero, el empleo de motores que operan con combustibles fósiles se ve cuestionado y comprometido, por lo que se hace necesario la búsqueda de nuevas alternativas de propulsión para los navíos mercantes. Es por eso que el aprovechamiento del viento, debido a su naturaleza de energía renovable y limpia, vuelve a ser considerada como forma de propulsión. Ahora bien, los actuales barcos mercantes no poseen las características que los antiguos modelos tenían; son tecnológicamente más complejos, sofisticados, y de un tamaño varias veces mayor, lo que significa que para su normal funcionamiento requieren constantemente grandes cantidades de energía. Es por esto que actualmente no es posible considerar un dispositivo de aprovechamiento del viento como único medio propulsor principal, pero sí como medio auxiliar. Esta característica dota a los susodichos dispositivos de un carácter muy útil, no solo por su capacidad de reducir el consumo en buques equipados con motores diésel convencionales, si no por la potencial combinación con otras tecnologías emergentes de naturaleza más respetuosa con el medio ambiente.

En el presente capítulo se expondrán los principales dispositivos existente y proyectados para el aprovechamiento del viento en buques mercantes.

3.2.2 Cometa tractora/SkySail

Una cometa tractora es un dispositivo de aprovechamiento de viento en forma de paracaídas independiente que va firme a la cubierta de castillo del buque y a varios metros de altura de esta, describiendo un movimiento de remolque impulsado por el viento respecto al buque. El primer modelo que salió al mercado pertenece a la empresa alemana SkySails GmbH & Co. KG, fundada en 2001 y los datos expuestos en este capítulo son los pertenecientes a este modelo.

3.2.2.1 Componentes de un dispositivo de cometa tractora



Figura 79 – Componentes del dispositivo (Fuente: Skysail; imagen adaptada por el autor)

- **Cometa tractora:** En lugar de una vela tradicional firme a un mástil, la superficie encargada de aprovechar la fuerza del viento y generar el empuje consiste en una cometa con forma de paracaídas independiente, hecha de fibras resistentes y a prueba de agua. Un conjunto de cables permite modificar y definir la forma de la cometa según se desee mediante la expansión de los mismos a través de un controlador situado entre estos y el cable de remolque. Sea cual sea la forma adoptada, el diseño de la cometa cumple con un perfil totalmente aerodinámico, similar al de un ala de avión, capaz de lograr un eficiente aprovechamiento del viento. Gracias a ello, la cometa puede operar no solo si el buque recibe el viento de popa o de costado, si no incluso recibiendo el viento abierto por cualquiera de

sus amuras. La mayor potencia no obstante, es alcanzada recibiendo el viento de costado o de popa. En caso de vientos muy fuertes, la fuerza ejercida por la cometa tractora puede verse limitada cambiando su orientación sin necesidad de reducir la superficie de la misma, como sucedería en una vela ordinaria.

- **Conjunto transmisor de fuerza:** Consiste en los dispositivos de transmisión y recepción del empuje generador por la cometa tractora, a saber, el cable de remolque, el punto de remolque y el cabrestante.



Figura 80 – Cabo y punto de remolque (izquierda) y compartimento (exterior) del cabrestante (Fuente: Skysail)

- **Cabo de remolque:** El empuje es transmitido de la cometa tractora al buque a través de un cabo sintético de alta resistencia. Integrado en él transcurre un cable para aportar energía al controlador del conjunto de cables.
- **Punto de remolque:** Se define cómo el punto donde el cabo de remolque se hace firme al buque. La situación de éste en la cubierta de castillo de proa garantiza el alineamiento óptimo de la cometa tractora para cualquier rumbo y dirección del viento. La fuerza tractora de la cometa es transmitida a este punto a través del cabo de remolque y es comparable con la ejercida por un remolcador.
- **Cabrestante:** La cometa tractora y el cabo son lanzados y recogidos utilizando un cabestrante dispuesto en un compartimento para el almacenamiento de los

mismos, situado bajo la cubierta de castillo. El cabrestante lleva instalado un medidor de la fuerza tractora y puede funcionar a distintas velocidades, lo que permite que la cometa tractora pueda ser estabilizada en cualquier momento, incluso cuando predominan condiciones de viento inestable.



Figura 81 – Cabrestante en operación de recogida del cabo y la cometa tractora (Fuente: *Skysail*)

- **Sistema de control:** El sistema de control del dispositivo SkySail opera de forma automática: la cometa tractora se alinea en función de la dirección e intensidad relativa del viento, y del rumbo del buque y su velocidad para conseguir el máximo aprovechamiento posible. Está formado por el controlador de la cometa tractora y el dispositivo de control integrado en el puente.
 - **Controlador de la cometa tractora:** El funcionamiento del controlador de la cometa tractora es similar al pilotaje que efectúa una persona en un parapente, expande o contrae el conjunto de cables de la cometa tractora modificando el perfil aerodinámico de la misma y por tanto la trayectoria que describe. Para ello lleva instalado una serie de dispositivos mecánicos y electrónicos, así como el software del piloto automático. Posee un recubrimiento aerodinámico que los protege los componente electrónicos de la humedad y los golpes y que va, a su vez, contenido en un estuche hecho de fibra de carbono junto a los dispositivos mecánicos y el motor.



Figura 82 – Controlador de la cometa tractora (izquierda) y dispositivo de control integrado en el puente (derecha) (Fuente: Skysail)

- **Dispositivo de control integrado en el puente:** Su función es dirigir y orientar la cometa tractora de forma automática. Se basa en la recolección de datos a través de los múltiples sensores equipados en el barco, su procesamiento, y la consecuente orden enviada al controlador de la cometa tractora. También permite efectuar la operación semiautomática del lanzado y recogido de la cometa tractora.
- **Sistema de lanzamiento y recuperación de la cometa tractora (SkySails Arrangement Module, SAM):** El sistema de lanzamiento y recuperación se encarga del izado y arriado de la cometa tractora. Está instalado en el castillo de proa y consiste en un mástil telescópico equipado con un sistema de enrollado y desenrollado. Un mecanismo emparejador conecta la cometa tractora con el adaptador del mástil acoplado al mástil telescópico. La cometa tractora se almacena en un compartimento que junto a al mástil y al punto de remolque constituyen el SAM (Figura 83). Durante el lanzamiento, el mástil telescópico eleva la cometa tractora, desenrollándola como si de un acordeón se tratase desde el compartimento donde está almacenada. La cometa tractora se despliega por sí

sola hasta alcanzar su expansión completa, momento en que es liberada. El cabrestante lasca cabo hasta que la cometa alcanza la altura de operación adecuada.

El proceso de recuperación se efectúa en el orden inverso: el cabrestante vira el cabo de remolque hasta que la cometa tractora alcanza el mástil y luego es enrollada. Después el mástil se retrae y la cometa es almacenada en su compartimento junto con el controlador. El proceso de lanzamiento y recuperación de la cometa tractora dura en su totalidad entre 10 y 20 min.

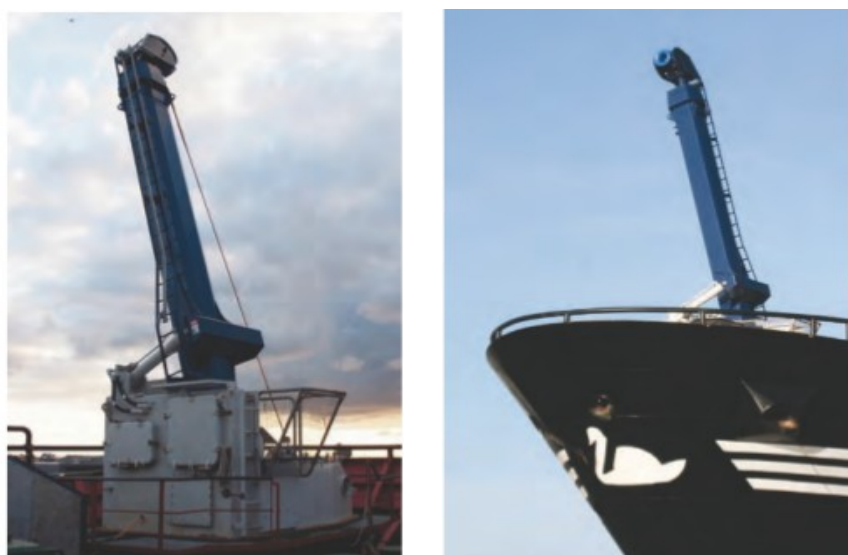


Figura 83 – SAM (Fuente: Skysail)

3.2.2.2 Operatividad y seguridad

Condiciones de operatividad y clasificación

El dispositivo SkySail complementa la propulsión principal del buque, por lo que es considerado y tratado según las sociedades de clasificación como sistema de propulsión auxiliar. Su uso no está limitado por ninguna regulación. La cometa tractora puede operar con vientos de fuerza entre 3 y 8 de la escala Beaufort, pero nunca podrá ser lanzada, aunque sí recogida, por debajo de vientos de fuerza 3.

Sistema de seguridad

Un sistema redundante de múltiples capa de seguridad garantiza una operatividad segura del dispositivo SkySail:

- La fuerza tractora y su dirección pueden ser modificados y reducidos cambiando la posición relativa de la cometa respecto al buque.
- En caso de sobrecarga el cabrestante cobrará del cabo de la cometa tractora.
- En caso de situaciones extremas, la cometa tractora tiene un dispositivo de liberación.

3.2.2.3 Ventajas del dispositivo SkySail

- **Alta capacidad de propulsión:** Las posibilidades de aprovechamiento del viento resultantes de la separación espacial entre el buque y la cometa tractora proporcionan al dispositivo un espectro de operación completamente nuevo y diferente en comparación con las velas convencionales. De este modo, la cometa tractora puede generar 25 veces más propulsión que éstas. La cometa tractora puede ser operada por el piloto automático de forma dinámica, es decir, ejecutando maniobras de vuelo que permitan aprovechar de forma más eficiente la velocidad del viento. La clave para la generación de un mayor empuje es la velocidad del aire en el perfil aerodinámico de la cometa tractora **(8)**:

$$F_a = c_l \cdot \rho / 2 \cdot v^2 \cdot A \quad (8)$$

donde:

F_a = Empuje/ fuerza tractora

c_l = Coeficiente de elevación de la cometa tractora

ρ = Densidad del aire

v = Velocidad del aire en el perfil aerodinámico de la cometa tractora

A = Área de la cometa tractora

- Si la velocidad de la masa de aire se dobla, la cometa tractora cuadruplica su velocidad. En la práctica, la cometa tractora puede alcanzar fácilmente velocidades de hasta tres veces la del presente viento e incluso más.

Otra de las ventajas de la cometa tractora es que puede operar a altitudes de entre 100 y 300m, donde soplan vientos más fuertes y estables. A una altitud de 150m, la velocidad media del viento es un 25% mayor que a una altitud de 10m debido a la ausencia de fricción del viento con la superficie terrestre y el agua. Ya que la energía cinética de una masa de aire se incrementa de forma exponencial hasta potencias al cubo con la velocidad del viento, se puede generar más del doble de energía a la altitud de operación de la cometa tractora que a una altura de 10m.

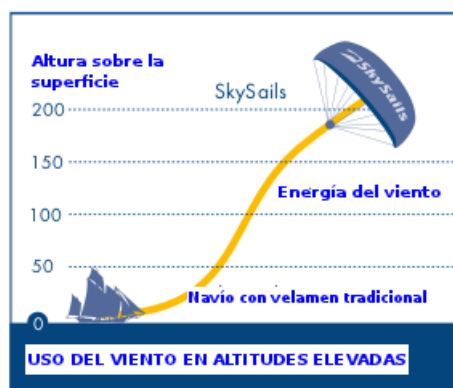


Figura 84 – Energía potencial del viento en función de la altura (Fuente: Skysail; imagen adaptada por el autor)

- **Escora mínima:** A diferencia de los aparejos tradicionales, la escora producida por la cometa tractora es mínima y virtualmente despreciable en términos de la seguridad del buque y su operatividad.

Las fuerzas escorante causada por la cometa tractora es transmitida al buque al nivel de cubierta, lo que implica que el brazo escorante del buque sea menor que el producido por un aparejo convencional (Figura 85).

- **Control de empuje dinámico:** A través de este control, se puede variar la posición de la cometa tractora respecto al horizonte y, con ayuda del cabrestante, lascar o

virar el cabo de la misma según se necesite. Esto asegura el control completo sobre la cometa y le permite adaptarse a los distintos vientos que puedan soplar.

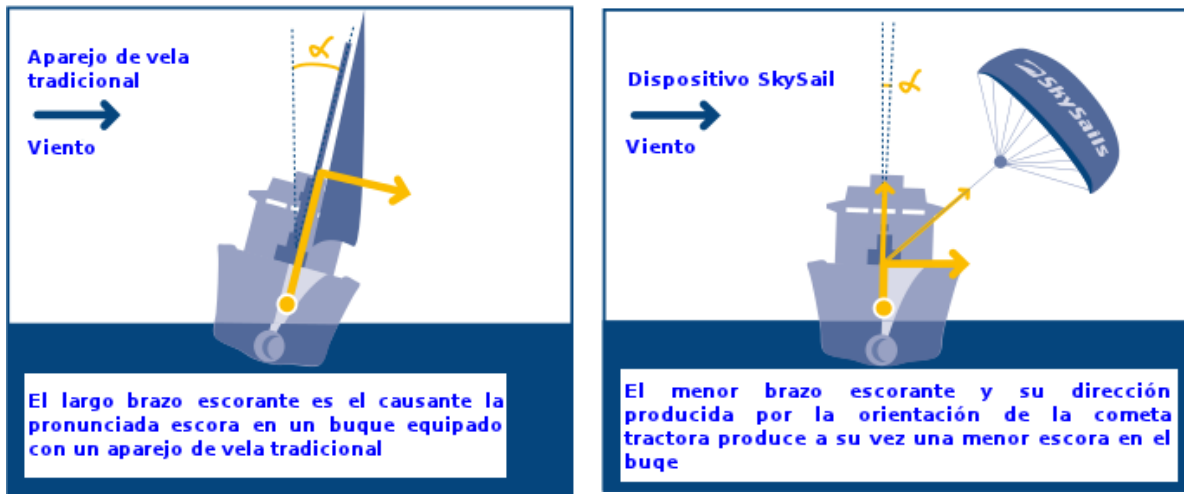


Figura 85 – Comparación entre la escora producida por un aparejo de vela tradicional y el dispositivo SkySail (Fuente: Skysail; imagen adaptada por el autor)

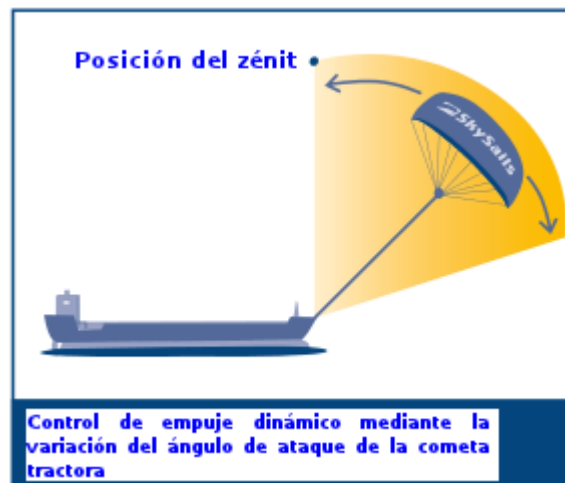


Figura 86 – Control de empuje dinámico (Fuente: Skysail; imagen adaptada por el autor)

- **Funcionamiento automático:** Durante su funcionamiento normal, el piloto automático del sistema controla la cometa tractora. El proceso de lanzamiento y recuperación de la cometa se lleva a cabo de forma semiautomática. No es necesaria tripulación adicional a la del buque para el manejo del dispositivo SkySail.

- **Espacio requerido para su instalación mínimo:** El espacio ocupada por el SAM y el cabrestante y las condiciones de operación de la cometa tractora minimizan el área necesaria para el funcionamiento del dispositivo, convirtiendo la pérdida de espacio en el buque en económicamente irrelevante. Además tampoco compromete la navegación del buque entre zonas portuarias o bajo puentes ya que ninguna de las estructuras del dispositivo es lo suficientemente grande como para ello.
- **Empleo de energía completamente renovable y no generación de emisiones de gases contaminantes ni de efecto invernadero:** La mayor virtud del dispositivo SkySail es su funcionamiento limpio y totalmente renovable.

3.2.2.4 Desventajas del dispositivo SkySail

- **Irregularidad de los vientos:** Debido al carácter irregular y variable de los vientos, así como su distinta distribución en la atmósfera terrestre, el dispositivo SkySail presenta un funcionamiento no constante y su eficacia dependerá de la zona y época del año en que navegue, lo que hace que su aplicación se vea limitada.
- **Restricción de empleo:** El dispositivo SkySail se ve limitado, por sus condiciones operativas, a su empleo únicamente en régimen de navegación.
- **Modelos limitados:** Actualmente existen pocos modelos (Tabla 15) comercialmente disponibles. Sin embargo la única limitación relativa a este aspecto es una cuestión comercial y no técnica, lo que hace pensar que en el futuro se comercializarán más modelos.

Modelo	Carga de diseño (Tm)	Carga efectiva** (Tm)	Tipo de buques que lo emplean	Eslora (m)
SK 160	16	8	Balizador	54
			Multi propósito	88
SK 320	32	16	Multi propósito	88
			Multi propósito (mercancías pesadas)	133
SK 640*	64	32	Multi propósito (mercancías pesadas)	133
			Tanque	167

* La SK 640 estará disponible a partir del año 2014

** Carga efectiva: Fuerza tractora ejercida por la cometa tractora en la dirección del rumbo del buque bajo condiciones estándar: Velocidad del buque=10 nudos, Velocidad y rumbo del viento=25 nudos y 130 ° respectivamente.

Tabla 15 – Modelos SkySail disponibles

3.2.3 Rotor flettner

3.2.3.1 Historia del rotor flettner y su empleo en la marina mercante

Un rotor Flettner consiste en un cilindro vertical giratorio que yendo instalados en la cubierta de un buque contribuye a su empuje propulsor mediante el aprovechamiento de un fenómeno físico conocido como efecto Magnus. Deben su a nombre al inventor Anton Flettner.

Al principio Flettner pensaba hacer rotar los cilindros a través de un solo motor acoplado a uno de ellos y transmitir el movimiento a los demás a través de correas de transmisión. Posteriormente, y de forma definitiva, Flettner decidió dotar a cada uno de los rotores con un motor individual. En el año 1922, solicitaría la patente para el primer barco propulsado por rotores, diseñado con la ayuda de Albert Beltz, Jacob Ackeret y Ludwig Prantl. En 1924 los astilleros Germania werf terminarían la construcción del mismo y le llamarían

Buckau (Figura 87).

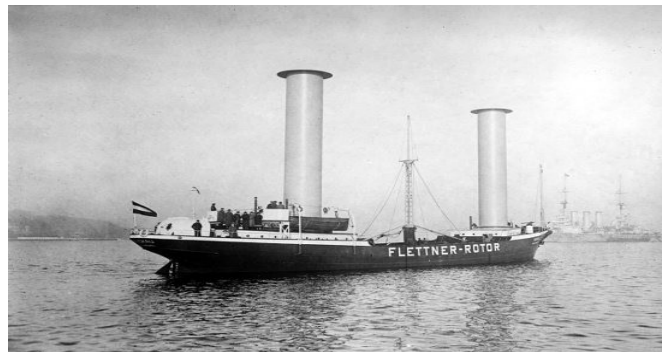


Figura 87 – MS Buckau (Fuente: Wikipedia)

El *Buckau* era una goleta reformada equipada con dos rotores Flettner de 15 metros de altura y 3 metros de diámetro y un sistema de propulsión eléctrica de 37 kW de potencia. Tras completar sus pruebas, el *Buckau* partió en su primer viaje en Febrero de 1925, cubriendo la ruta entre Danzig y Escocia a través del mar del Norte.

Los rotores no comprometieron en ningún momento ni la integridad del buque ni la de su navegación, aún incluso en las tormentas más fuertes que sobrepasaron, y pudo navegar abierto a vientos de entre 25 y 30 nudos cuando la goleta original no habría podido mantenerse por debajo de los 45 nudos.

En Marzo del año 1926 el *Buckau*, renombrado entonces *Baden-Baden* (Figura 88) en honor a la ciudad Alemana del mismo nombre, navegó hasta Nueva York costeadando Sur América.

El único otro modelo equipado con rotores Flettner fue el *Barbara*, construido por Los astilleros A.G. Weswe de Bremen para el armador hamburgués Rob. M. Sloman. Fue puesto en servicio el 28 de julio de 1926.

A pesar del éxito de su funcionamiento, los rotores Flettner no consiguieron ser ni económicamente ni tecnológicamente competitivos, por los que nunca se aplicaron a buques con fines comerciales. El sistema de rotores fue abandonado definitivamente en el año 1930 por causa de la mayor rentabilidad obtenida por los navíos impulsados a motor

e incluso a vela y motor auxiliar, ya que los costes del combustible eran por aquel entonces muy bajos.



Figura 88 – MS Baden-Baden (Fuente: Windagain)

A día de hoy sin embargo, podemos encontrarnos con algunos proyectos innovadores que tratan de dar un nuevo y renovado impulso a los rotores Flettner debido a su contribución un menor consumo de combustible y por tanto a una reducción en la cantidad de emisiones atmosféricas fruto de la actividad de un buque.

La universidad de Flensburg desarrolla actualmente el catamarán Uni-Kat Flensburg equipado con rotores Flettner (Figura 89). La empresa alemana de fabricación de turbinas eólicas diseño y puso en activo el buque E Ship 1 (Figura 89) en el año 2008, destinado al transporte de turbinas eólicas y maquinaria similar y equipado con cuatro rotores Flettner.



Figura 89 – Catamarán Uni-Kat Flensbur y MS E-Ship 1 (Fuente: Wikipedia)

3.2.3.2 El efecto Magnus y el funcionamiento del rotor flettner

El efecto Magnus, denominado así en honor al físico y químico alemán Heinrich Gustav

Magnus (1802 – 1870), quién lo descubrió en 1853, es el fenómeno físico por el que la rotación de un objeto afecta a la trayectoria del mismo a través de un fluido, que en el caso de los rotores, será el aire. Tiene lugar de la siguiente manera: cuando un objeto gira en el seno de una masa de aire, el sentido de giro del mismo será favorable al sentido de desplazamiento de los filetes de la masa de aire en un punto (A) e inverso en el punto diametralmente opuesto (B). Esto da lugar a una diferencia de velocidades en los filetes del aire circundante a esos puntos, lo que en aplicación del teorema de Bernoulli supone una diferencia de presiones que genera una fuerza F_M que desplaza al objeto hacia la zona de menor presión.

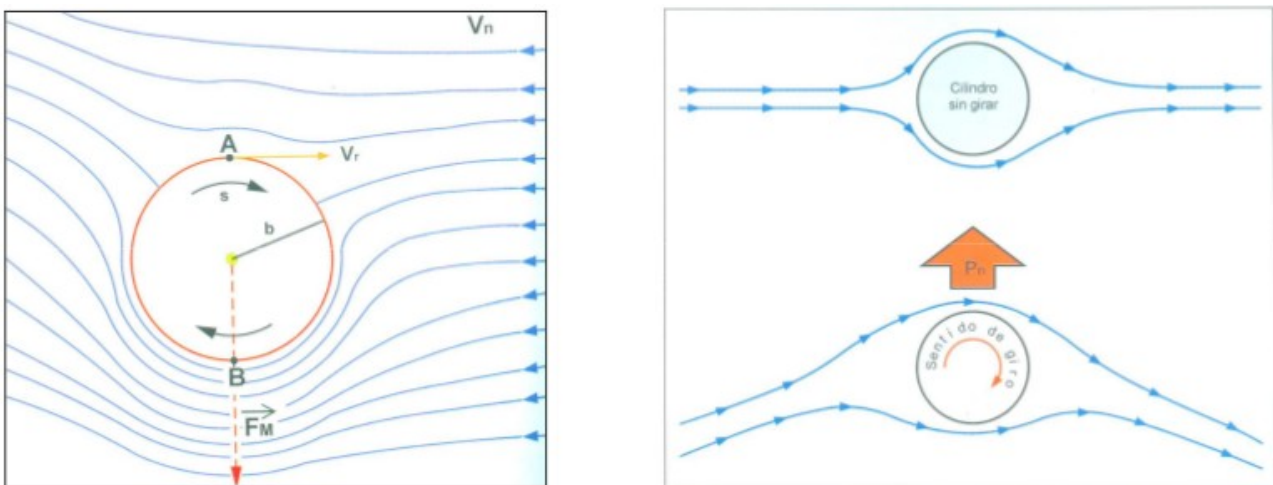


Figura 90 - Efecto Flettner (Fuente: UPC)

La velocidad del cilindro al atravesar el fluido puede calcularse de acuerdo a la ecuación (9).

$$V_r = 2\pi \cdot r \cdot v_c \quad (9)$$

donde:

V_r = Velocidad de rotación del cilindro al atravesar el fluido

r = Radio del cilindro

v_c = Velocidad de rotación del cilindro sobre su eje en revolución

En la Figura 91 puede apreciarse la dirección del movimiento descrito por el buque equipado con dos rotores Flettner al recibir el viento por el costado de babor. La misma

Figura muestra la dirección del movimiento descrito por el buque en función de la dirección del viento.

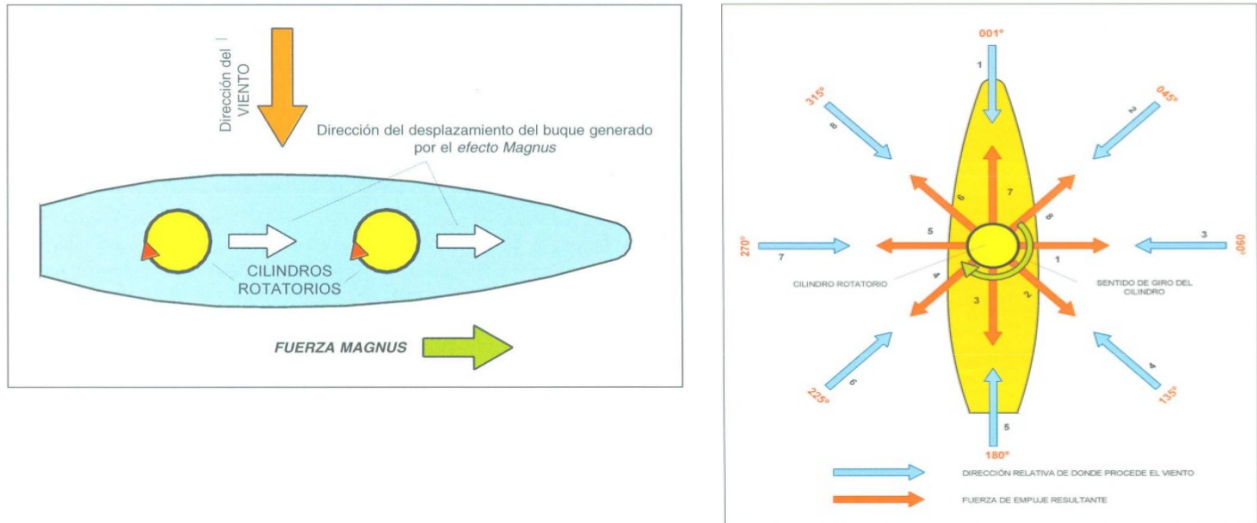


Figura 91 - Dirección del viento y del empuje resultante (Fuente: UPC)

3.2.3.3 Recuperación del rotor Flettner, empleo en la actualidad.

El empleo de los rotores Flettner en la actualidad se reduce a ejemplos prácticamente anecdóticos, pero ya existe sin embargo, una aplicación comercial destinada a su instalación y funcionamiento en buques mercantes. Este diseño particular cuenta con todas las ventajas de los rotores Flettner clásicos y contrarresta sus principales inconvenientes. Se trata de los rotores Flettner plegables, consistentes en un rotor Flettner tradicional y un sistema automático que facilita su plegado sobre la cubierta principal (Figura 92)



Figura 92 – Diagrama de un rotor Flettner plegable (Fuente: Windagain)

Gran parte de los tipos de buques existentes podrían equiparse con este tipo de rotores Flettner y gracias a su capacidad de plegado, podrían operar en cualquier puerto, ya que ninguno vería comprometida la operatividad de su maquinaria de carga y descarga. Tampoco tendrían dificultades en pasar bajo obstáculos que pudieran suponer una dificultad para la navegación de un buque equipado con rotores flettner convencionales, como pueden ser puentes o pasos elevados.

El sistema de plegado y alzado del rotor no requiere tripulación adicional, es controlado automáticamente y monitorizado desde el puente de navegación.

El sistema puede instalarse en buques tanto existentes como de nueva construcción.

Respecto a su rendimiento, en la Figura 93 puede verse en detalle de los distintos tipos de rotor Flettner diseñados por la compañía Windagain y su rendimiento en función del buque en el que estén instalados y el viento reinante.

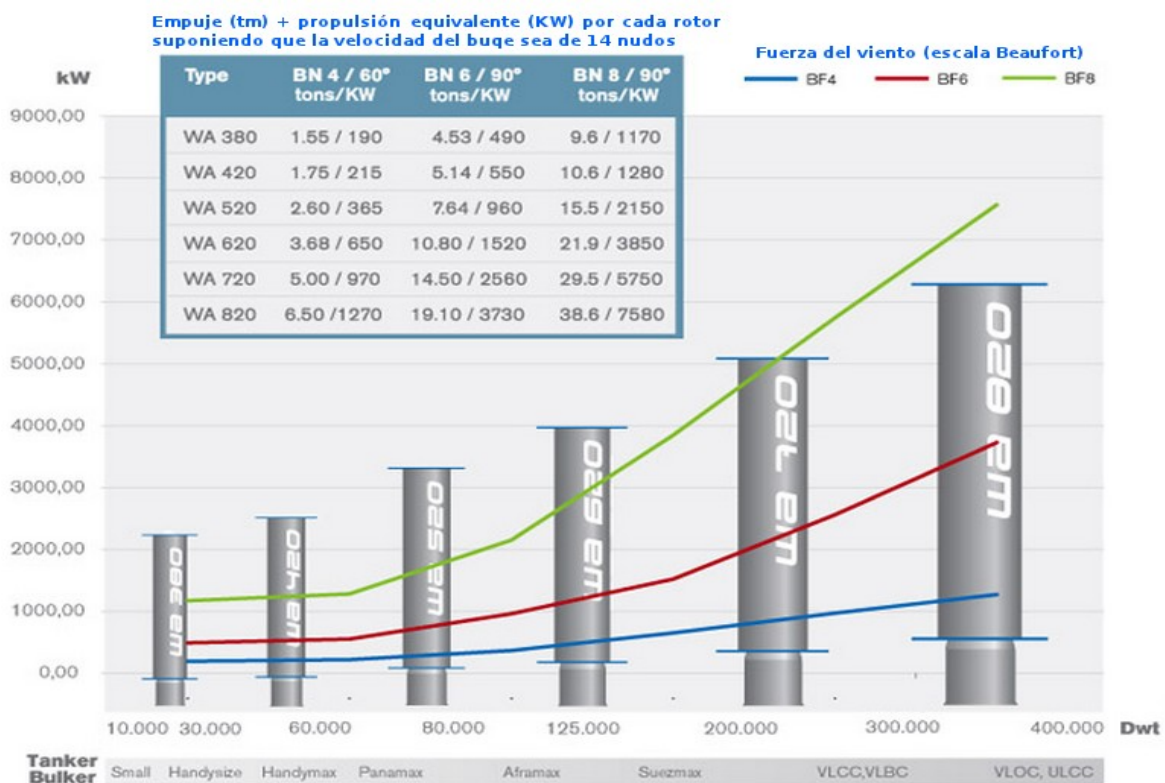


Figura 93 – Rendimiento de los rotores flettner (Fuente: Windagain; imagen adaptada por el autor)

3.2.3.4 Ventajas y desventajas de los rotores Flettner

- Pueden ser plegados sobre la cubierta principal, quedando estibados firmemente y dejando libres las tapas de escotilla de las bodegas, permitiendo operaciones de carga y descarga y la navegación segura bajo obstáculos que de otra forma impedirían la misma.
- Puede operar hasta con vientos de fuerza 10 en la escala Beaufort.
- Su funcionamiento es seguro y ha sido probado con éxito. Un mayor desarrollo de los rotores está siendo llevado a cabo por otras organizaciones técnicas que tratan de optimizar el diseño del rotor Flettner plegable y su aplicación.
- Su eficiencia es aproximadamente 10 veces superior a la del velamen tradicional.
- El empuje adicional creado por los rotores supone un ahorro de propulsión en el buque, y por tanto menor trabajo realizado por el motor principal, lo que se traduce en un consumo de combustible menor y por tanto una reducción en la cantidad de emisiones atmosféricas.
- Los rotores Flettner pueden usarse para detener el buque de manera más rápida y asistir al buque en maniobras sin necesidad de emplear el motor principal.
- Los rotores Flettner giran gracias a unos motores eléctricos accionados por la energía producida por el motor principal del buque lo que supone que no posean autonomía de operación.
- En buques que cargan en cubierta, comprometen el espacio disponible en la misma, reduciendo la capacidad de carga del buque o imposibilitando el transporte de mercancías de mucha longitud.
- Debido al carácter irregular y variable de los vientos, así como su distinta distribución en la atmósfera terrestre, los rotores Flettner presentan un funcionamiento no constante y su eficacia dependerá de la zona y época del año en que navegue, lo que hace que su aplicación sea limitada.

3.2.4 Velas rígidas

Las velas rígidas (wingsails) son velas inspiradas en los aparejos tradicionales, pero que a diferencia de estas, consisten en una superficie rígida con un perfil similar al de un ala, lo que produce una mayor relación empuje – arrastre. Están fabricadas con materiales rígidos y son sostenidas en mástiles orientables mecánicamente.

Las velas rígidas fueron concebidas a partir de las velas tradicionales empleadas en navegación, y debido a su sencillez y fácil operación se han considerado para su aplicación en buques mercantes. Su instalación a bordo de los mismos está limitada por el espacio disponible en cubierta, lo que vendrá dictaminado por la naturaleza de la actividad del buque y su diseño estructural, esto imposibilita su instalación en buques de cubierta reducida y en aquellos que carguen sobre ella. Otro de los factores que imposibilitan su disposición a bordo es su naturaleza de obstáculo a efectos de operaciones de carga y descarga y la altura añadida al puntal del buque, que puede llegar a comprometer el avance del mismo por debajo de puentes o pasos elevados.

Las velas rígidas emplean el viento como fuerza motriz para impulsar al buque, lo que conlleva una reducción en la potencia empleada por su propulsor y por tanto una reducción en el consumo del buque y en las emisiones atmosféricas producidas por el mismo. En condiciones de viento favorable se han llegado a alcanzar reducciones en el consumo del buque de un 40% [23]. No obstante, el rendimiento de las velas rígidas depende del viento imperante lo que a su vez se verá condicionado por factores como la zona de navegación y estación y la derrota efectuada por el buque. Se establece debido a estos una reducción media en el consumo de entre el 20% y 30% [22] [23], dependiendo también del tipo de buque. Existen diferentes distintos diseños y configuraciones de velas rígidas aplicables a buques de la marina mercante, los cuales son expuestos a continuación.

- **Walker Wingsail:** Consiste en un conjunto de velas rectangulares soportadas cada una en un tubo vertical individual que a su vez va unido a un eje central. Pueden orientarse mecánicamente. Poseen la ventaja de poder ser instaladas en otras zonas del buque como la cubierta magistral, pero su estructura y características aerodinámicas hacen que sean ineficaces a altas velocidades, lo que lo excluye de ciertos tipos de buque. En 1986 el buque *M/V Ashington* (Figura 94) fue dotado de unos de estos dispositivo exitosamente, reportando una media de ahorro en el consumo de combustible de un 20%. A pesar de ello, y aún sin recibir ninguna crítica técnica, las velas tipo Walker no resultaron comercialmente exitosas en su día, debido, en términos generales, a una nefasta gestión comercial y publicitaria por parte de las empresas interesadas [23]. No obstante, la empresa responsable de su facturación y comercialización, Shadotec, ha perpetuado su mejora y evolución técnica y actualmente estudia en conjunción con otras empresas como Wilhelm Wilhelmsen (“WW”) y Petroleum Geo-Services (“PGS”) la instalación de su dispositivo en buques de nueva generación, lo que sumado a una mayor y creciente preocupación medioambiental, puede revitalizar la comercialización de este dispositivo.



Figura 94 – M/V Ashington (Fuente: Shadotec)

- **Modular sailing rigs:** Se trata de un dispositivo propulsor auxiliar consistente en una vela semi-rígida inspirada en la forma del ala de un murciélago, capaz de plegarse de forma automática y estibarse en un compartimento instalado en cubierta destinado a tal efecto (Figura 95). Su principal ventaja radica precisamente en la capacidad de plegarse y recogerse, lo que permitiría al buque efectuar operaciones de carga y descarga de la forma convencional así como realizar navegaciones bajo obstáculos sin ninguna limitación.

Si bien todavía no se encuentran disponibles comercialmente, y su rendimiento no ha sido comprobado todavía ni experimentalmente ni empíricamente, son consideradas como una posible opción a largo plazo para la reducción en el consumo de combustible y emisiones atmosféricas de los buques mercantes. En la Figura 96 puede apreciarse uno de los diseños propuestos para la aplicación de este tipo de dispositivos en un buque tanque.

El dispositivo en su conjunto puede instalarse de manera temporal o para realizar viajes concretos ya que posee un sistema de instalación que permite su trincaje y destrincaje con facilidad.

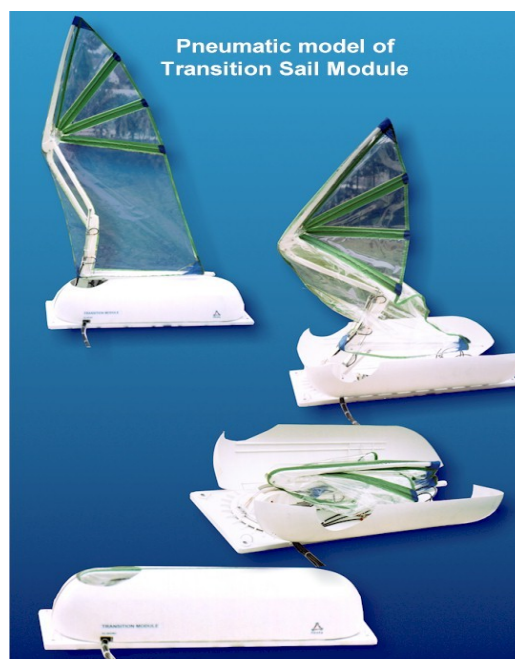


Figura 95 – Modular sailing rig (Fuente: Transitionrig)

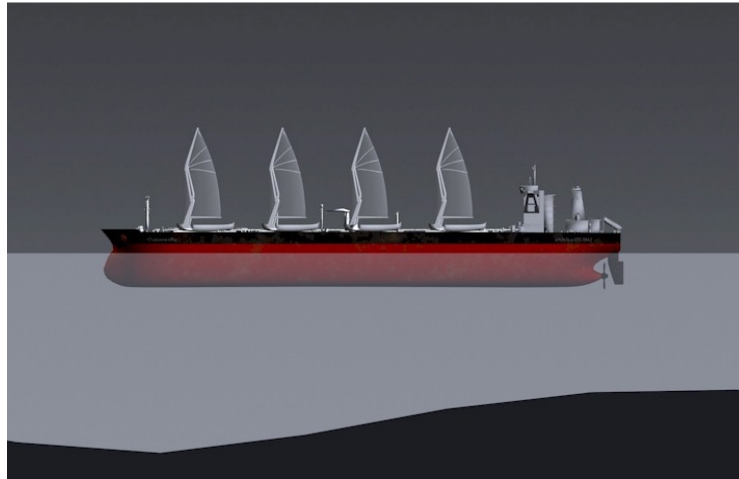


Figura 96 – Modelo de buque tanque equipado con dispositivo Modular sailing rigs (Fuente: *Transitionrig*)

- **Velas rígidas:** Fueron los primeros diseños en aplicarse a buques mercantes como el *M/V Shin Aitoku Maru* (Figura 97) en los años 70. Se trata del modelo de vela rígida más sencillo, del que si bien existen distintos diseños y materiales, en esencia es configuración más básica y simple; una superficie alar compuesta de un material rígido, firme a un mástil orientable mecánicamente. Uno de los estudios más recientes llevado a cabo [24], demuestra que su aplicación en un buque tipo bulk-carrier de 150000 TM (Figura 97) de peso muerto puede beneficiar al buque con un ahorro en su consumo de combustible de hasta el 50%.

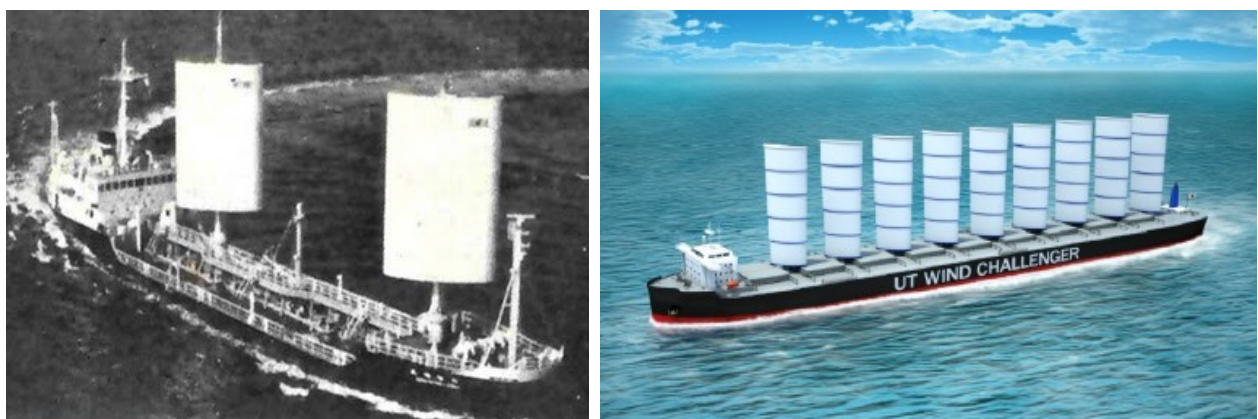


Figura 97 – M/V Shin Aitoku Maru (imagen de la izquierda), modelo de buque bulkcarrier equipado con 9 velas rígidas (imagen de la derecha) (Fuente: *Ouchi et al; 2011*)

Otro proyecto, el del buque Modern Windship [25], llevado a cabo por el ministerio Danés de Medio Ambiente y energía, expone el diseño y ensayo con un prototipo de velas rígidas en un buque tipo bulkcarrier de 50000 TM de peso muerto (Figura 98), logrando ahorros en el consumo de combustible de hasta un 27%.



Figura 98 – Diseño conceptual del buque bulkcarrier de 50000 TM de peso muerto del proyecto Modern Windship (Fuente: *Marinetalk*)

Este tipo de velas solo se encuentran comercialmente disponibles para embarcaciones de recreo o deportivas. No hay ninguna empresa todavía que las facture o comercialice, sin embargo, son una de las opciones más a tener en cuenta en el diseño de barcos futuros debido a sus considerable reducción en el consumo de combustible de un buque.

- **Velas solares:** Una vela solar consiste en una vela rígida dotada de paneles solares instalados en su superficie y montada sobre un dispositivo giratorio que permite su orientación en diferentes direcciones. El dispositivo giratorio es manejado a través de una consola en el puente y permite aumentar la exposición de los paneles solares a la radiación del sol, lo que propicia una captación de energía un 40% mayor que los mismos paneles fijos. La vela solar está diseñada para capturar tanto la radiación directa como indirecta y actuar como una vela sencilla, aumentando la velocidad del buque o reduciendo su consumo de

combustible y por tanto emisiones atmosféricas.

Han sido patentadas y comercializadas por la empresa australiana Solar Sail y han se han instalado en pequeños buques de pasaje. También se considera su aplicación modelos como el buque Orcelle (Capítulo 3.1) o buques tanque como el mostrado en el mismo capítulo, si bien no existen todavía ni estudios ni experiencias conclusivas sobre su rendimiento a bordo de los mismos.

3.2.4.1 Estado del arte

A parte de lo mencionado en el apartado anterior, pueden identificarse una serie de barreras que impiden un mejor y más extenso desarrollo de las velas rígidas:

Barreras técnicas

- En vientos desfavorables, los largos mástiles en conjunción con la superficie de la vela pueden causar escoras indeseadas en el buque.
- Las operaciones de carga y descarga pueden verse dificultadas, lo que puede llegar a impedir su realización o incrementar sus costes.
- Resulta necesaria una optimización de la derrota efectuada por un buque equipado con velas rígidas para hacer mejor uso de los vientos favorables. Las rutas ideales deberían ser comprobadas y contrastadas cada 24 horas con el último parte meteorológico disponible.

Barreras económicas

- Coste de inversión adicional en buques de nueva construcción y en la explotación de buques de vieja construcción equipados con velas rígidas.
- Dependiendo del dispositivo puede hacerse necesaria la intervención adicional de personal de a bordo para el manejo del mismo.
- Bajo condiciones de viento no favorables al avance del buque, las velas pueden suponer un incremento de la resistencia aerodinámica del mismo, aumentado la

potencia necesaria para su avance, lo que resulta en un mayor consumo de combustible y mayor cantidad de emisiones atmosféricas.

Barreras legislativas

- Límites en la altura de los mástiles: algunas zonas como el canal de Panamá restringen la altura de los mástiles a 60 m.
- Falta de legislación en el apoyo y fomentación de estos medios y en la restricción de emisiones de CO₂.

3.3 Aprovechamiento de la energía undeomotriz

3.3.1 Introducción

El fenómeno físico de las olas supone, cuando se produce, un impedimento al desplazamiento del buque; aumenta la resistencia al avance, se producen balances que pueden resultar molestos a los pasajeros y tripulantes e incluso pueden comprometer la integridad de la carga y el buque ya que aumentan los momentos flectores en la estructura del buque y se incrementan los esfuerzos sufridos por el casco. Todas estas consecuencias convierten a las olas en un factor indeseado en la derrota de un buque mercante. Ahora bien, también se puede obtener de las olas beneficio mediante la transformación de su energía cinética en un empuje adicional para el buque, lo que podría permitir hacer menos uso de la potencia de la máquina, logrando de este modo una reducción en el consumo de combustible y por tanto en la cantidad de emisiones liberadas a la atmósfera. También podría aprovecharse su energía para la generación de energía eléctrica.

El primer y único prototipo de dispositivo aprovechador de las olas de tamaño real fue el instalado en la embarcación tipo catamarán *Suntory Mermaid II* (Figura 99), diseñado por Yutaka Terao, ingeniero del departamento de arquitectura naval e ingeniería oceánica de la Universidad de Tokai, en Japón. La embarcación se hizo a la mar a mediados de marzo del año 2008 en Japón y llegó, tras recorrer 6000 km, a Hawái, impulsado únicamente por el empuje generado por las olas y alimentando los sistemas de navegación con energía eléctrica obtenida por medio de unos paneles solares.

3.3.2 Descripción de medios de aprovechamiento de las olas.

- **Suntory Mermaid II:** Tal y como se menciona en el apartado anterior el *Suntory Mermaid II* es la única embarcación diseñada a tamaño real dotada de un dispositivo de aprovechamiento de olas. Se trata de un buque tipo catamarán que lleva instalado a proa el mecanismo de captación de las olas. Este consiste en un

par de aletas horizontales unidas a un eje que permite su libre movimiento siguiendo el perfil de las olas (Figura 100) en un movimiento oscilatorio que hace que la embarcación avance. El eje vertical es soportado por tres apéndice verticales fijos al casco del barco.



Figura 99 – Suntory Mermaid II (arriba), movimiento de las aletas siguiendo el perfil de las olas (Fuente: *Inhabitat; Tokio University, School of Marine Science and Technology*)

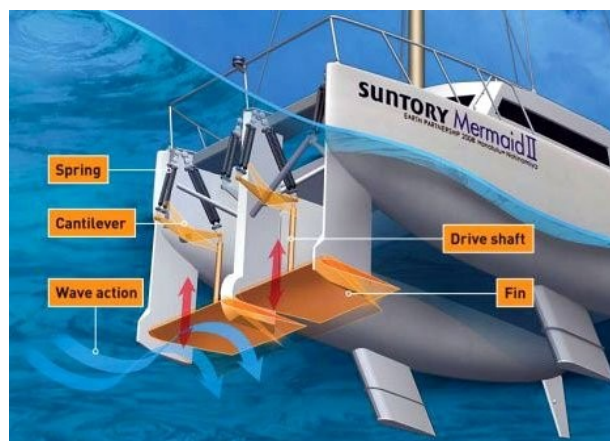


Figura 100 – Esquema de funcionamiento del dispositivo de captación de olas del Suntory Mermaid II (Fuente: *www.es.ubergizmo.com*)

Este tipo de propulsor ha sido únicamente probado en la susodicha embarcación. Todavía no se ha construido un dispositivo similar para buques mercantes.

- **E/S Orcelle:** El buque E/S Orcelle (Capítulo 3.1) es un prototipo de buque cuya actividad se basa en criterios de sostenibilidad y respeto con el medio ambiente, siendo propulsado únicamente por medios basados en energías renovables.

Entre sus múltiples dispositivos de captación de energía (velas rígidas, paneles solares) se encuentra un conjunto de aletas destinadas al aprovechamiento de la energía de las olas tanto como para generar empuje como para la generación de electricidad. En esencia se trata del mismo tipo de principio y dispositivo que el empleado por el Suntory Mermaid II, pero a diferencia de este, se emplearía no solo para la propulsión si no para la generación de electricidad. Además, su disposición es distinta, ya que los ejes de las aletas del E/S Orcelle van unidos directamente a la quilla (Figura 101).

El E/S Orcelle es un proyecto todavía en fase de diseño, con muchas simulaciones numéricas y experimentales por llevar a cabo todavía. No se espera la construcción del primero prototipo hasta dentro de aproximadamente 20 años [26].

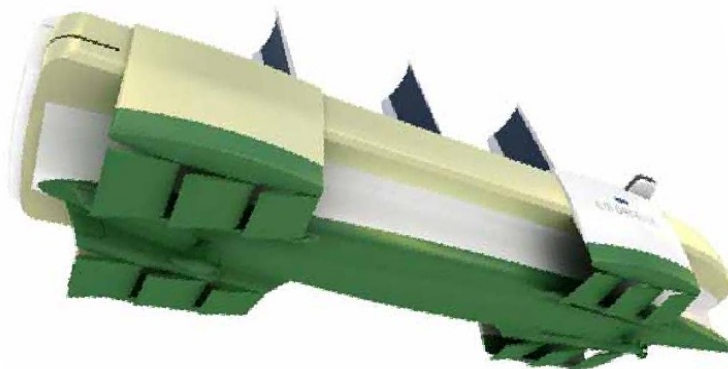


Figura 101 – Disposición de las aletas captadoras de olas del E/S Orcelle (Fuente: Wallenius Wilhemsen)

- **Active foil propeller:** Un propulsor laminar activo consiste en un apéndice de perfil alar (Figura 102) instalado en la quilla de un buque. El calificativo activo hace referencia a la posibilidad de modificar el ángulo de ataque de los mismos respecto a la superficie del mar para lograr el máximo empuje posible. Su principio de funcionamiento se basa en aprovechar la energía cinética oscilatoria de las olas y la deflectarla hacia atrás generando un empuje que desplace el buque.

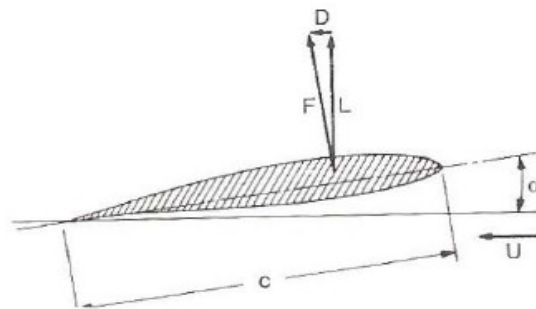


Figura 102– Apéndice de perfil alar (Fuente: Borgen; 2010)

En el estudio más reciente realizado hasta la fecha [27], se consideraron tres buques distintos (un buque supply, un buque tanque costero y un pesquero cerquero) dotados de propulsores laminares activos en 9 configuraciones distintas, navegando a velocidades de 10, 12, 15 y 18 nudos bajo olas de periodos regulares e irregulares de distintas direcciones.

Los resultados, obtenidos en base a un programa de simulación numérica, mostraron potenciales beneficios en la reducción de consumo de combustible. En concreto, en navegación con olas irregulares se obtuvieron reducciones superiores al 60% bajo velocidades entre 10 y 12 nudos. Se demostró que velocidades inferiores son menos eficientes.

La principal desventaja de este sistema es la longitud de los propulsores, cuando no se emplean suponen apéndices adicionales al casco, lo que aumenta su resistencia al avance e impedimentos en las operaciones de atraque o abarloadamiento, por lo que deben ser retractados y estibados en compartimentos

diseñados a tal efecto (Figura 103). Este sistema, sin embargo resulta ser complejo y costoso.

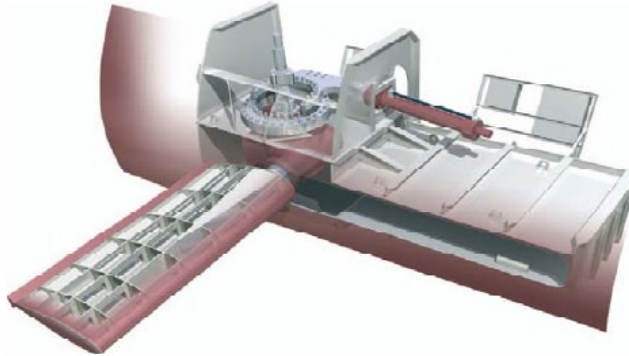


Figura 103 – Propulsor laminar activo retráctil con compartimento para su estiba (Fuente: *Rolls Royce*)

- **Sistema y método propulsor para barcos mediante olas de mar:** Este sistema ha sido patentado por Manuel Muñoz Saíz [28], ingeniero aeronáutico. En esencia es similar al comentado en el epígrafe anterior; aprovecha la energía cinética oscilatoria de las olas y la defleca hacia atrás para su aprovechamiento. Este sistema consiste en conjunto de parejas de conductos curvados o acodados que se colocan en los laterales del casco del buque, los cuales dirigen el flujo de agua ascendente y descendente de las olas hacia atrás, resultando en una reacción o propulsión positiva de la nave, independientemente de la dirección o procedencia de dichas olas (Figura 104). De cada pareja de conductos (Figura 105), uno de ellos tiene la entrada en la zona inferior desviando el flujo ascendente hacia atrás, mientras que el otro posee la entrada en la zona superior, desviando el flujo descendente igualmente hacia atrás.

Este sistema todavía no ha sido probado experimentalmente, ni existen modelos numéricos que permitan predecir su comportamiento por lo que su eficacia aún no ha sido plenamente demostrada. Se hace necesario cuantificar el empuje adicional que puede aportar al buque así como el incremento de la resistencia al avance.

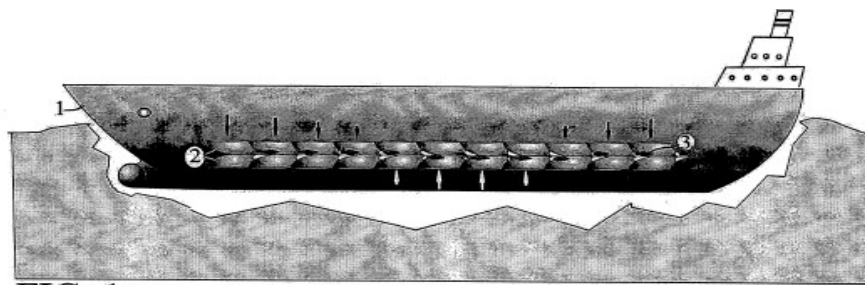


FIG. 1

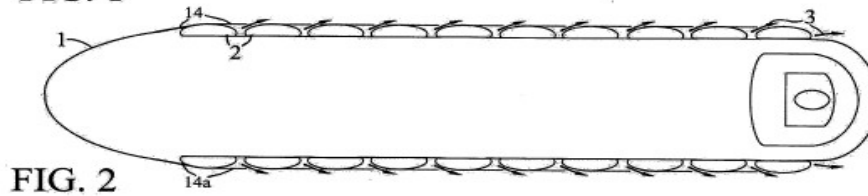


FIG. 2

Figura 104 – Sistema y método propulsor para barcos mediante olas de mar

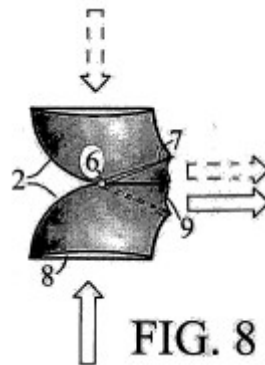


FIG. 8

Figura 105– Pareja de conductos curvados superior e inferior

Capítulo 4 - Propulsores

4.1 Propulsión eléctrica y motores marinos superconductores

4.1.1 Introducción

La propulsión eléctrica es aquel tipo de propulsión en el que el propulsor resulta directamente accionado por un motor eléctrico que a su vez es alimentado por uno o varios motores diésel, (propulsión diésel-eléctrica), turbinas de gas (turbo-diésel) o pilas de combustible. Su introducción en la marina mercante tuvo comienzo a principios del siglo XX, cuando en el año 1903 el petrolero ruso Vandal (Figura 106), dotado del primero sistema de propulsión diésel-eléctrica, fue botado a la mar.



Figura 106 – Petrolero M/S Vandal (Fuente:Wikipedia)

Desde entonces se ha aplicado en todo tipo de buques ya que presenta ciertas propiedades y ventajas que lo hacen susceptible de ser empleado en distintas situaciones con mejor rendimiento que otros motores convencionales. Estas características propiedades y ventajas pueden resumirse en las siguientes:

- **Menor consumo de combustible**, debido principalmente a:
 - Control de la velocidad variable de la hélice, que reduce al mínimo las pérdidas sin cargas de las hélices en comparación con las hélices clásicas de paso variable y velocidad fija. Este se debe a su vez a la adaptación directa de la velocidad de giro de los motores de explosión o turbinas de velocidad media

(300 a 900 revoluciones por minuto) o alta (más de 900 revoluciones por minuto) a la velocidad de giro óptima de las hélices, que está por debajo de las 300 rpm, sin la necesidad de utilizar cajas de cambios y embragues, ya que sólo los motores de velocidad lenta, con regímenes de funcionamiento por debajo de las 300 rpm, se adaptan directamente a las velocidades adecuadas de las hélices.

- Puesta en marcha y parada automática de los motores diésel, lo que garantiza que la carga del motor se mantenga lo más próxima posible a su punto de trabajo óptimo dentro de los límites de funcionamiento.
- **Optimización del espacio del buque:** La propulsión eléctrica ofrece una mayor libertad a la hora de disponer el emplazamiento de los grupos generadores y los motores propulsores ya que no se hace necesario disponer ejes de transmisión intermedios ni tuberías de alimentación, ya que el motor eléctrico va acoplado directamente al propulsor y la transmisión eléctrica se realiza por medio de cables.
- **Disposición de toda la potencia en marcha atrás:** El motor eléctrico al invertir la marcha puede disponer de la misma potencia que tenía cuando iba avante mediante la inversión eléctrica del motor. La manipulación de controles de accionamiento eléctrico es muy sencilla y por su naturaleza puede adaptarse al control a distancia desde el puente cuando se desee.
- **Reducción de ruido y de las vibraciones:** Es debido a la ausencia de engranajes reductores y líneas de transmisión intermedias.
- **Flexibilidad de diseño:** Al poder ir instalados en las inmediaciones del propulsor, los motores eléctricos permiten configuraciones de mayor flexibilidad como las conseguidas con los motores azimutales.
- **Mayor reserva de potencia en caso de avería en un grupo generador:** En caso de disponer de más de un grupo generador, el mal funcionamiento o avería de uno

de ellos no compromete la navegación del buque.

No obstante, y a pesar de las mencionadas, los sistemas de propulsión eléctricos cuentan con algunas desventajas que los hacen reacios a ser instalados en todo tipo de buques como son el coste de los equipos y la instalación y el mayor volumen que suelen ocupar.

4.1.2 Introducción a los motores eléctricos superconductores

Los motores eléctricos superconductores son motores eléctricos que disponen en su diseño materiales superconductores en lugar de materiales convencionales. Los materiales superconductores son materiales que participan del fenómeno de la superconductividad, capacidad intrínseca que poseen ciertos materiales para conducir corriente eléctrica sin resistencia y pérdida de energía en determinadas condiciones. La resistividad eléctrica de un conductor metálico disminuye gradualmente a medida que su temperatura se reduce, sin embargo, en los conductores ordinarios, como el cobre y la plata, las impurezas y otros defectos producen un valor límite. Incluso estando próximo al cero absoluto una muestra de cobre experimenta una resistencia no nula. La resistencia de un superconductor, en cambio, desciende bruscamente a cero cuando el material se enfría por debajo de cierta temperatura crítica o temperatura de superconductividad. Dicha temperatura de superconductividad suele ser muy elevada y se consigue generalmente manteniendo al superconductor refrigerado con helio. Sin embargo, el descubrimiento en 1986 del fenómeno de la superconductividad en el sistema Bario-Lantano-Cobre-Oxígeno (Ba-La-Cu-O) a una temperatura superior a los 40 K por Kar Alexander Müller y Johannes Georg Bednorz, motivó una nueva búsqueda de materiales superconductores que concluyó de manera exitosa con el descubrimiento de materiales cuya temperatura de superconductividad se hallaba por encima de los 77 K, temperatura de ebullición del nitrógeno. A esta nueva familia de superconductores se le conoció con el nombre de superconductores de alta temperatura (High Temperature Superconductor – HTS) y han supuesto un incremento en las expectativas de aplicación de materiales

superconductores, mostrando un enorme potencial en el campo de la industria y en los mercados de la electricidad, la electrónica y el magnetismo.

Los motores eléctricos basan su funcionamiento en la interacción de campos magnéticos y corrientes eléctricas para producir energía mecánica. El empleo de materiales superconductores permite crear grandes campos magnéticos y conducir fuertes densidades de corriente con pocas pérdidas, lo que les hace susceptibles de convertirse de emplearse en motores eléctricos de mayor rendimiento que los actuales. Además, su capacidad de levitar de forma estable interactuando con un imán permanente, invita a pensar en rotores sin cojinetes mecánicos que producen pérdidas, limitan la velocidad de los motores y son causa de frecuentes intervenciones de mantenimiento.

La potencia desarrollada por un motor superconductor puede deducirse de las ecuaciones de Maxwell. De forma general se acepta la expresión **(10)** para el cálculo industrial de la potencia rotatoria de un motor eléctrico [29]:

$$P_{\text{SALIDA}} = K \cdot n \cdot V \cdot B_{\text{GMAX}} \cdot J_{\text{MAX}} \quad \mathbf{(10)}$$

donde:

P_{SALIDA} = Potencia de salida

V = Volumen activo del motor

n = Velocidad de rotación del motor

B_{GMAX} = Inducción máxima en el entrehierro

J_{MAX} = Densidad máxima de corriente

En los motores eléctricos convencionales se emplea material ferromagnético para incrementar el campo magnético entre el entrehierro y conseguir grandes conversiones de potencia. Sin embargo, la inducción máxima alcanzable en un motor eléctrico convencional nunca será superior a 2T ya que la chapa magnética se satura con densidades menores a ésta. Al incrementar B_{GMAX} , lo hará igualmente la potencia de salida de la máquina con el mismo volumen y densidad de corriente, o reducir volumen o

cobre con la misma potencia de salida. Es en este aspecto en el que los superconductores pueden aportar su gran capacidad de conducir corrientes muy intensas con reducidas pérdidas y generar grandes campos magnéticos prescindiendo del hierro que limita la inducción de los motores eléctricos convencionales. El hecho de eliminar las pérdidas permite tener motores de mayor potencia que los actuales para una misma corriente aportada por el generador. Por ejemplo, un transformador que trabaje con una densidad de corriente de 3 A/mm^2 , con un potencia nominal de 2MVA, si se bobinara con un material superconductor con una densidad de corriente de 500 A/mm^2 , pasaría a tener una potencia de 330 MVA.

4.1.3 Estado de la técnica – Prototipos de motores superconductores para buques

4.1.3.1 Motor superconductor de 5 MW y 36 MW

En el año 2004 la Navy's Office of Naval Research (ONR) demostró con éxito [30] en el centro Advanced Power Systems (CAPS) el funcionamiento a máxima potencia de un motor superconductor de 5 MW a 230 rpm desarrollado por la compañía American Superconductor Corporation (AMSC). Posteriormente, la misma compañía desarrolló una nueva versión del motor de mayor potencia (36 MW) que sería entregada a la Marina Americana a finales del año 2006 para su integración en el destructor DD(X) y probado, satisfactoriamente, en Febrero de 2009 [31].

En los siguientes apartados se muestran las particularidades de los mencionados motores.

Configuración y características técnicas del motor.

Los componentes principales del motor superconductor desarrollado por la compañía AMSC se ilustran en la Figura , donde se muestra el corte longitudinal del motor superconductor de 5 MW. El conjunto del rotor incluye una bobina superconductora de alta temperatura que opera a una temperatura de 32 K, la estructura de soporte, el circuito de enfriamiento y el escudo electromagnético y criostático. El conjunto del estator incluye

una bobina AC, el entrehierro, la estructura de soporte de la bobina, los rodamientos y la carcasa. En el exterior del motor se encuentra un módulo de enfriamiento criogénico empleado para mantener la temperatura crítica de superconductividad de las bobinas superconductoras.

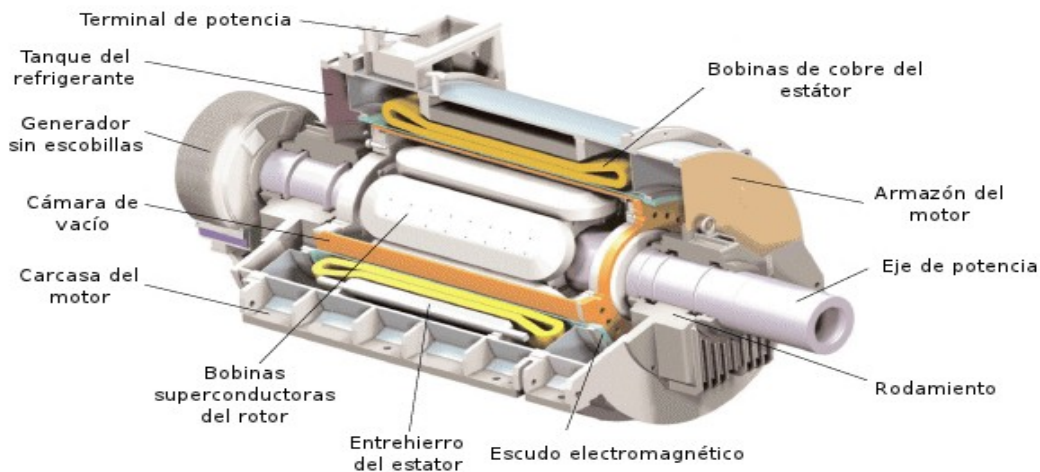


Figura 107 - Corte longitudinal del motor superconductor de 5 MW de AMSC (Fuente: AMSC; imagen adaptada por el autor)

El conjunto de la bobina superconductor del rotor contiene seis bobinas fabricadas con cable HTS de primera generación (1G), diseñado para soportar el intenso campo magnético y las fuerzas mecánicas experimentadas por el rotor. Estas bobinas van incorporadas a una estructura de soporte metálica la cual sirve tanto de soporte para los esfuerzos mecánicos como provee un hueco para el conducto de enfriamiento.

La estructura de soporte de las bobinas se encuentra encerrada en un criostato cerrado al vacío que minimiza el paso de calor radiado a su interior y proporciona el ambiente aislante necesario para la operación de las bobinas superconductoras. El criostato está rodeado por un escudo electromagnético que cumple las siguientes funciones:

- Proteger el campo magnético producido por las bobinas superconductoras mediante la atenuación de los campos asíncronos producidos por las bobinas del estátor.
- Proveer amortiguamiento para bajas frecuencias oscilatorias.

- Conducir pares de torsión elevados durante un fallo de funcionamiento.

El sistema de refrigeración emplea helio en un circuito cerrado y mantiene las bobinas superconductoras a temperatura criogénica, por encima de su temperatura crítica de superconductividad.

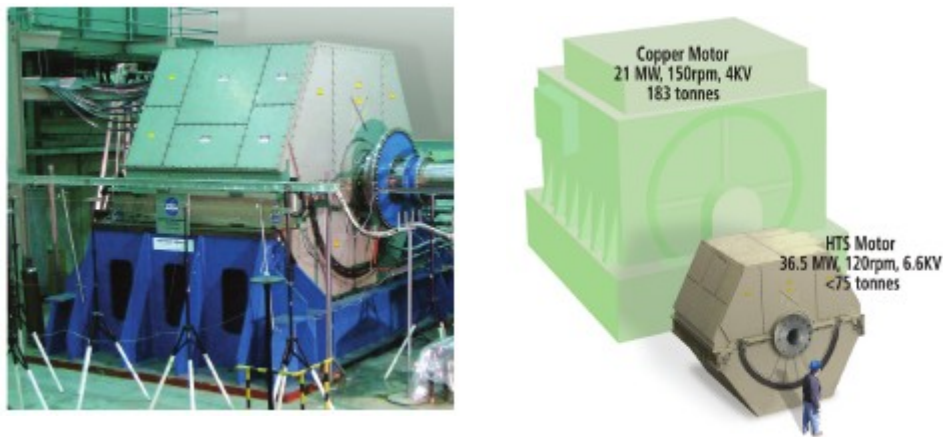


Figura 108 – Motor HTS de 36.5 MW (izquierda) y comparación visual entre un motor de cobre de 21 MW y 183 Tm de peso y un motor HTS de 36.5 MW y 75 Tm de peso (derecha), motor HTS de 5 MW (debajo) (Fuente: AMSC (imágenes superiores); Kalsi)

4.1.3.2 Motor de superconductor de imanes permanentes de 400 kW montado en propulsor azimutal

Un grupo de investigación de colaboración entre la universidad y el sector industrial de Japón [32] ha desarrollado un motor superconductor para propulsión mediante propulsores azimutales capaz de proveer una potencia mayor a la entregada por un motor eléctrico convencional de cobre de las mismas dimensiones. El motor en cuestión tiene

una salida de 400 kW, siendo perfectamente aplicables a buques costeros como cementeros o ferrys. Las características son expuestas a continuación

Configuración y características técnicas del motor

En la Figura se muestra el motor superconductor de 400 kW y la configuración de sus imanes permanentes y bobinas superconductoras.

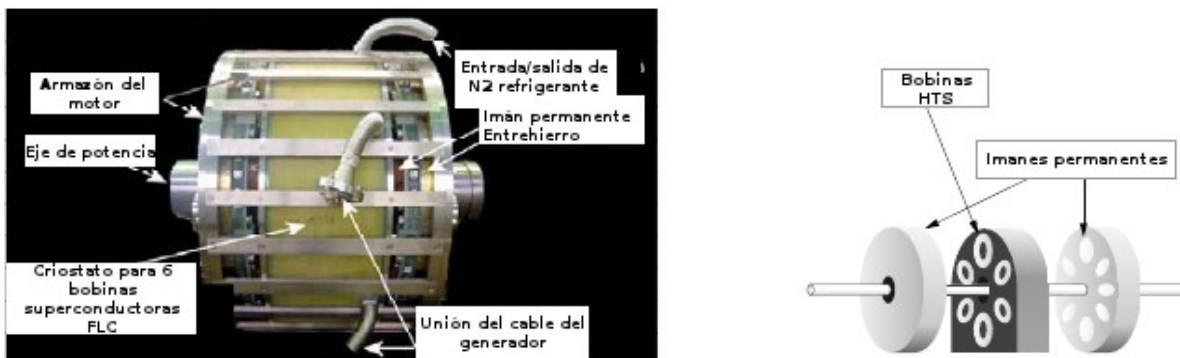


Figura 109 – Motor de 400 kW PM-HTS (izquierda) diagrama esquemático de la disposición del imán permanente y bobinas superconductoras (Fuente: Fujino et al, 2007; imágenes adaptadas por el autor)

Este motor es de tipo hueco axial y consiste en un campo magnético generado por imanes permanentes y una armadura hecha de bobinas superconductoras situado entre los imanes permanentes. Las bobinas superconductoras se mantienen a una temperatura de 68K, umbral por encima del cual alcanzan su estado de superconductividad, refrigeradas por un sistema de circulación de nitrógeno líquido. El eje del rotor va fijo a los imanes permanentes y no a las bobinas superconductoras.

4.1.4 Ventajas de los motores superconductores

Las principales ventajas de los anteriores motores superconductores son, a parte de las mencionadas para los motores eléctricos, pueden resumirse en las enumeradas a continuación:

- **Mayor potencia desarrollada para una misma potencia de generador:** Tal y como se explica en el apartado 4.1.2, para una misma intensidad de corriente suministrada por un generador, un motor superconductor de las mismas dimensiones que un motor eléctrico convencional, desarrollará una potencia considerablemente mayor, aumentando así la eficiencia total del sistema.
- **Menor peso para una misma salida de potencia que un motor eléctrico convencional:** Los motores superconductores son aproximadamente un 35%-50% más pequeños que los motores eléctricos convencionales de misma potencia. Esto permite que el espacio del buque sea mayormente aprovechado para los espacios destinados al transporte de bienes.
- **Menor volumen y mayor densidad de potencia:** Las bobinas superconductoras mencionadas en el epígrafe anterior conducen intensidades de corriente 150 veces mayor que las bobinas convencionales de cobre, lo que facilita una reducción en el tamaño de los motores superconductores que desarrollan la misma potencia que los motores convencionales y una densidad de potencia dos o tres veces mayor que la de los motores convencionales.
- **Mayor eficiencia:** Las bobinas superconductoras empleadas en el motor conducen la electricidad con pérdidas energéticas despreciables, alcanzando su eficiencia valores de hasta el 97%. Esto supone una reducción en el consumo de combustible del generador con respecto a los motores eléctricos convencionales.
- **Tecnología comercialmente disponible:** Los motores superconductores desarrollados por AMS se encuentran a día de hoy disponibles comercialmente.

La principal desventaja de un motor superconductor reside en su alto coste y limitada disponibilidad, sin embargo es de esperar que esta barrera tecnológica y económica se solventa con el progreso tecnológico de los superconductores y su mayor empleo y producción.

4.2 Propulsor magneto-hidrodinámico

4.2.1 Introducción

El propulsor magneto-hidrodinámico es un tipo de dispositivo donde el empuje es generado por agua impulsada a reacción debido a la interacción entre un campo magnético y un campo eléctrico. Se caracteriza por ser un propulsor silencioso, sin partes móviles y ausente de vibraciones.

La aplicación de la magneto-hidrodinámica tuvo lugar en el ámbito marítimo por primera vez en el año 1961, cuando el americano W.A. Rice obtuvo una patente por un modelo de propulsor basado en una bomba electromagnética de transmisión de metal líquido generado en reactores nucleares. La comunidad científica se vio motivada ante tal invención, dando comienzo a los estudios en el campo de la magneto-hidrodinámica aplicada a la propulsión de buques. En 1962, O.M. Philips introdujo la idea de utilizar imanes conductores en el dispositivo propulsor y al año siguiente, en 1963, el Teniente R.A. Doragh propuso usar materiales superconductores para conseguir campos electromagnéticos 10 Tesla, y predijo que a través de su empleo podrían conseguirse rendimientos de hasta el 60%. En el año 1965 S.Way concibió un propulsor MHD externo de imanes superconductores con una eficiencia teórica del 50% y posteriormente en 1966, demostraría en California el funcionamiento de un propulsor MHD de imanes ordinarios de 0.015 Tesla, instalados en un submarino prototipo.

En China, China Ship Research & Development Academy desarrollaron, construyeron y probaron exitosamente un propulsor MHD externo para un submarino con imanes ordinarios de 0.075 Tesla.

Todo estas experiencias sirvieron para demostrar el principio de la propulsión magneto-hidrodinámica en buques sin hélice pero a pesar de éstas, su baja eficiencia debido al débil campo magnético generado por los magnetos impidió su aplicación comercial.

Esta situación se mantuvo hasta diez años después, momento en que la tecnología de

superconductores alcanza un importante desarrollo, impulsando a la comunidad científica a retomar la investigación en el propulsor MHD. El profesor Y.Saji y su grupo de investigación de la universidad Kobe de la marina mercante fueron los primeros en emplear materiales superconductores en un propulsor MHD, construyendo dos buques modelos, el SEMD-1 en 1976 y el ST-500 en 1979 [33]. Fue la primera vez que se demostró la alta potencia conseguida por este tipo de propulsores en un buque. Los Estados Unidos retomaron las investigaciones en el campo a finales de los años 80 y la Unión Soviética por su parte, comenzó en los años 70 un programa de I+D para el empleo de propulsores MHD en submarinos, construyendo un modelo helicoidal a escala con el que experimentaron en un canal de experiencias. Otros países como Francia, Gran Bretaña, Alemania y Korea, también realizaron y publicaron estudios sobre el diseño de propulsores MHD.

Basado en la experiencias tenidas y los recientes logros conseguidos en con la tecnología superconductora, la Japonesa Ship & Ocean Foundation estableció un comité de I+D en propulsores MHD aplicados a buques en el año 1985. A raíz de ello, el primer buque equipado con un propulsor MHD, el prototipo M/S Yamato (Figura 110) vio la luz en el año 1992. Éste tenía 30 metros de eslora, 10.4 de manga, una desplazamiento de 185 Tm y una capacidad de transporte de 10 personas. Estaba equipado con dos propulsores MHD, cada uno de ellos formado por seis bobinas superconductoras dispuestas en geometría hexagonal. La corriente que se hacía pasar por ellos era de 11 KA y generaba 8000 Newtons de fuerza Lorentz, dotando a la masa de agua de una flujo de 2.4 Ton/seg y dotando al buque de una velocidad de 6 nudos con una eficiencia propulsora del 1.7%.

En China, se efectuó un estudio para la proyección y construcción de un propulsor helicoidal MHD con magnetos selenoidales superconductores de 5 Tesla y su instalación en un buque modelo, el HEMS-1. El proyecto se dio por finalizado exitosamente a finales del año 1998 en las pruebas llevadas a cabo en un canal de experiencias por el modelo

construido, de 3.2 metros de eslora y 0.85 de manga, operado bajo una corriente eléctrica de 270A. El modelo alcanzó la velocidad de 0.68 m/s.

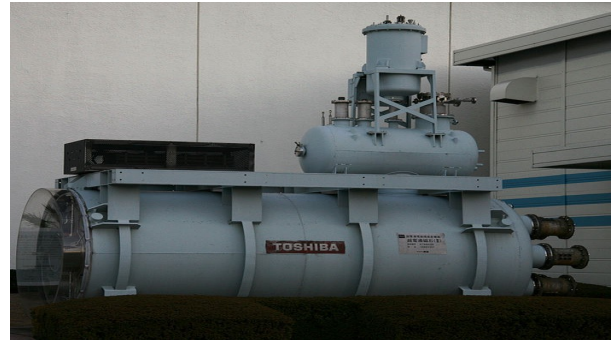


Figura 110 – M/S Yamato I (derecha) propulsor MHD del Yamato I (Fuente: Wikipedia)

Los propulsores magneto-hidrodinámicos nunca han sido ni militarmente ni comercialmente desarrollados, debido principalmente a las limitaciones técnicas existentes, a su elevado coste, y a su gran tamaño. Solamente un buque experimental, el Yamato I, llegó a estar equipado con dos propulsores magneto-hidrodinámicos prototipo. A pesar de que se demostró su funcionamiento satisfactoriamente en el año 1992, el Yamato I nunca llegó a estar comercialmente operativo.

A pesar de sus limitaciones, recientes estudios demuestran la actual viabilidad de este dispositivo de propulsión debido a una mejora de la tecnología, especialmente en lo que a superconductores se refiere.

En este capítulo se expondrá el funcionamiento de los propulsores magneto-hidrodinámicos, se comentarán sus ventajas y desventajas, y su posibilidad aplicación a buques mercantes.

4.2.2 Principios físicos básicos del funcionamiento de un propulsor MHD

- **Fuerza Lorentz:** En un campo eléctrico, la definición de intensidad de campo eléctrico muestra que la fuerza sobre una partícula cargada viene dada por la ecuación (11).

$$F = Q \cdot E \quad (11)$$

donde:

F = fuerza resultante

Q = valor de una carga eléctrica puntual

E = intensidad del campo eléctrico

La fuerza estará en la misma dirección que la intensidad del campo eléctrico para una carga positiva, y será directamente proporcional a E y Q. Si la carga está en movimiento, la fuerza en cualquier punto de su trayectoria estará dada también por la ecuación anterior.

En un campo magnético de densidad de flujo B, se encuentra experimentalmente que una partícula cargada y en movimiento experimenta una fuerza **(12)** cuya magnitud es proporcional al producto de las magnitudes de la carga Q, su velocidad v, la densidad de flujo B y el seno del ángulo comprendido entre los dos vectores. La dirección de la fuerza es perpendicular a v y B, y está dada por un vector unitario en la dirección de $v \times B$.

$$F = Q \cdot v \cdot B \quad (12)$$

donde:

F = fuerza resultante

Q = valor de una carga eléctrica puntual

v = velocidad de la carga

B = inducción magnética del campo magnético

La fuerza sobre una partícula en movimiento debido a campos eléctricos y magnéticos combinados se obtiene fácilmente por superposición **(13)** y será normal al vector velocidad de la partícula cargada.

$$F = Q (E + v \cdot B) \quad (13)$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de la fuerza de Lorentz, y su empleo se requiere para la determinación de las órbitas del electrón en el magnetrón, las trayectorias del protón en el ciclotrón, las características del fluido en el generador magnetohidrodinámico (MHD), ó, en general, en el movimiento de partículas cargadas encampos eléctricos y magnéticos combinados.

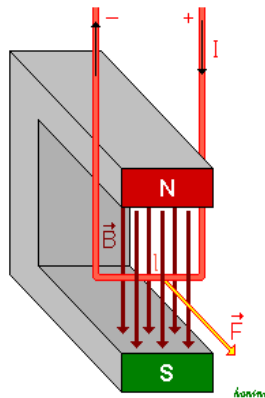


Figura 111– Fuerza Lorentz resultante sobre un partículas cargada sometida a un campo eléctrico y magnético (Fuente: Wikipedia)

- **Superconductividad:** Se denomina superconductividad a la capacidad intrínseca que poseen ciertos materiales para conducir corriente eléctrica sin resistencia y pérdida de energía en determinadas condiciones. La resistividad eléctrica de un conductor metálico disminuye gradualmente a medida que su temperatura se reduce, sin embargo, en los conductores ordinarios, como el cobre y la plata, las impurezas y otros defectos producen un valor límite. Incluso estando próximo al cero absoluto una muestra de cobre experimenta una resistencia no nula. La resistencia de un superconductor, en cambio, desciende bruscamente a cero cuando el material se enfría por debajo de cierta temperatura crítica o temperatura de superconductividad. La superconductividad es un fenómeno de la mecánica cuántica. En vista de la ausencia de resistencia, los superconductores han sido usados para hacer electroimanes que generan grandes campos magnéticos sin pérdida de energía, de ahí su aplicación en los propulsores MHD.

4.2.3 Funcionamiento y tipos de propulsores MHD

El funcionamiento del propulsor MHD (Figura) está basado en el efecto Lorentz descrito en el apartado anterior. Unas bobinas superconductoras rodean un par de electrodos y en la separación existente entre estos se hace circular agua del mar por un tubo. Las bobinas se mantienen en un estado de superconductividad refrigeradas por un gas a muy baja temperatura. Los primeros diseños utilizaban helio, pero los nuevos avances en materiales superconductores han permitido desarrollar superconductores de alta temperatura, que son aquellos cuya temperatura de superconductividad está por encima del punto de ebullición del nitrógeno, pudiendo ser refrigerados por este último gas. A través de las bobinas se hace circular una corriente eléctrica generada por el motor del buque, creando así un poderoso campo magnético. Entre los electrodos, a través del agua del mar, se creará una corriente eléctrica en perpendicular a la del agua del mar. Al verse sometidas a la interacción del campo eléctrico y el campo magnético, las partículas de agua saldrán expulsadas a reacción en una dirección perpendicular a la de la corriente eléctrica, proporcionando así empuje al buque. El agua del mar tiene acceso al interior del tubo por una abertura practicada en el fondo del casco, tal y como se puede apreciar en el diagrama del M/S Yamoto I (Figura) Dentro de cada propulsor el agua fluye por el interior de tubos dispuestos como si se tratara de la tobera de un cohete. Los tubos se encuentran envueltos por las bobinas superconductoras hechas de una aleación especial.

Los diseños teóricos de un propulsor MHD pueden aplicarse a buques convencionales o buques de alta velocidad del tipo hydrofoil. En ambos casos el agua será acelerada por la fuerza Lorentz resultando en el empuje del buque y en el caso del hydrofoil, también en su elevación.

El campo magnético puede ser generado en las bobinas superconductoras de dos formas distintas, mediante corriente continua (DC) o corriente alterna (AC), distinguiéndose así entre propulsores MHD de tipo DC y de tipo AC. En los de primer tipo, la corriente se

aplica entre los electrodos a través del agua del mar mientras que en los de segundo tipo, la corriente es inducida por el campo magnético de la propia bobina, por lo que no se hace necesario ningún electrodo.

Un propulsor MHD puede estar dispuesto de dos formas, en el interior o en el exterior del buque. Para el primer tipo de configuración, el campo magnético está limitado en el interior del buque.

En función del tipo de superconductor, imán dipolo o solenoide, la configuración del propulsor variará: para el primero se empleará un canal de admisión y salida lineal, mientras que para el segundo se utilizará un canal helicoidal más complejo. Las distintas configuraciones teóricas de propulsores MHD pueden observarse en la Figura 112.

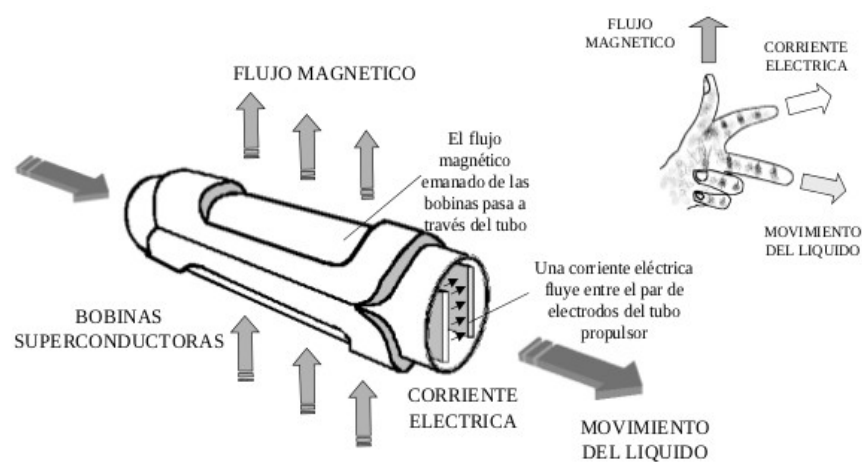
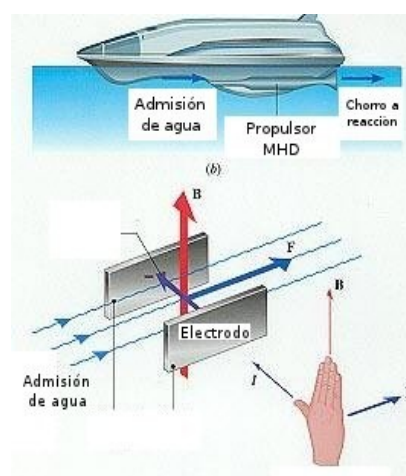


Figura 112 – Funcionamiento de un propulsor MHD (Fuente: (imagen superior) Robalino;

Skewsme; imagen adaptada por el autor)



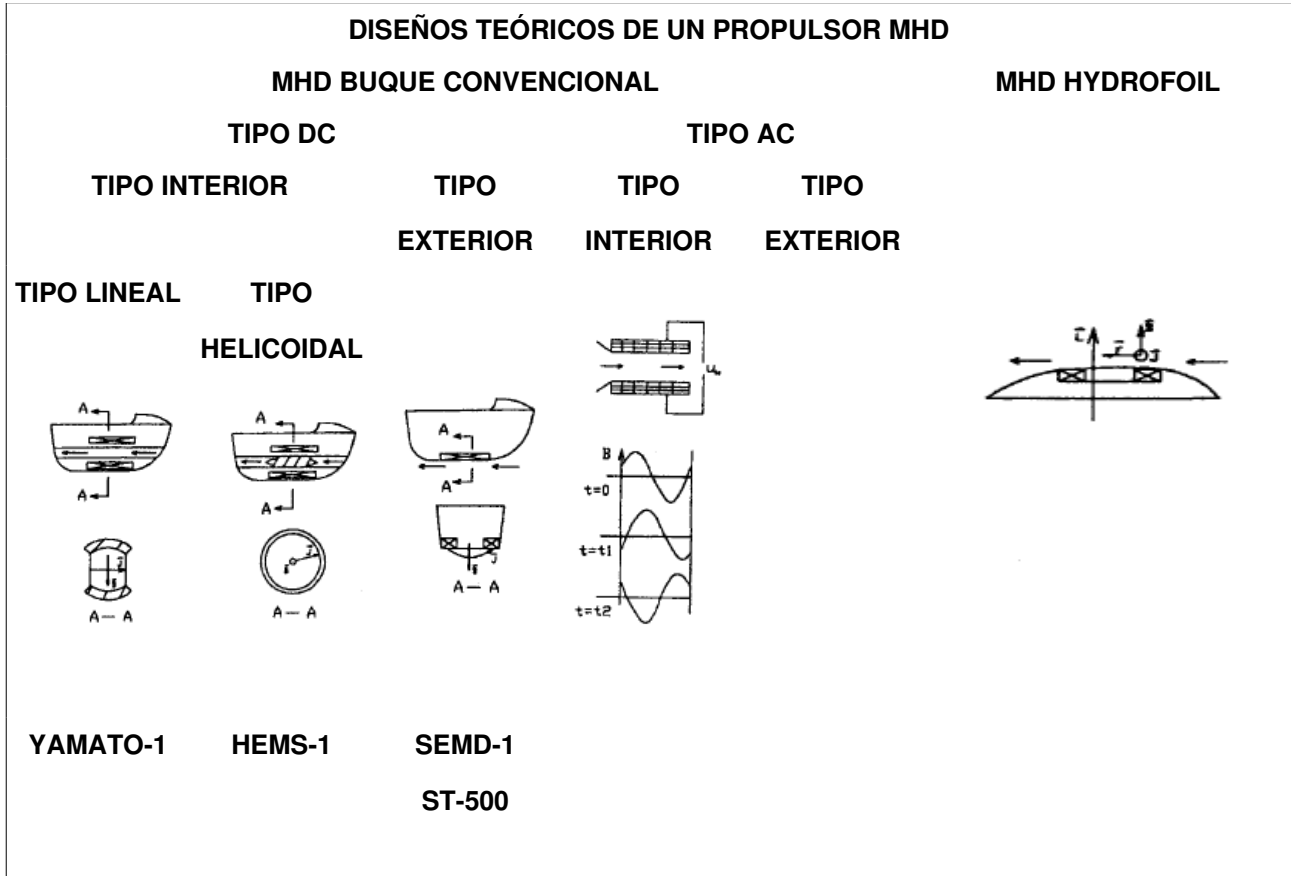


Figura 113 – Diseños teóricos propulsor MHD (Fuente imágenes: Sha; tabla elaborada por el autor)

4.2.4 Rendimiento de un propulsor MHD

- **Rendimiento teórico:** El rendimiento total del propulsor, η , queda definido de acuerdo a la ecuación (14):

$$\eta = \frac{\text{potencia del propulsor}}{\text{potencia indicada}} \quad (14)$$

Este rendimiento será a su vez producto de la eficiencia del chorro de agua expulsado y de la eficiencia eléctrica del propulsor, de acuerdo a la ecuación (15):

$$\eta = \eta_j \cdot \eta_e \quad (15)$$

- **Eficiencia del propulsor (η_j):** Queda definida de acuerdo a la ecuación (16). En ella influye de manera determinante el área de la toma de agua [39] ya que cuanto mayor sean estas mayor serán las pérdidas producidas por la fricción del fluido, tal y como se puede apreciar en la Figura 114.

$$\eta_H = \frac{\text{Potencia del chorro de agua}}{\text{Potencia del propulsor}} \quad (16)$$

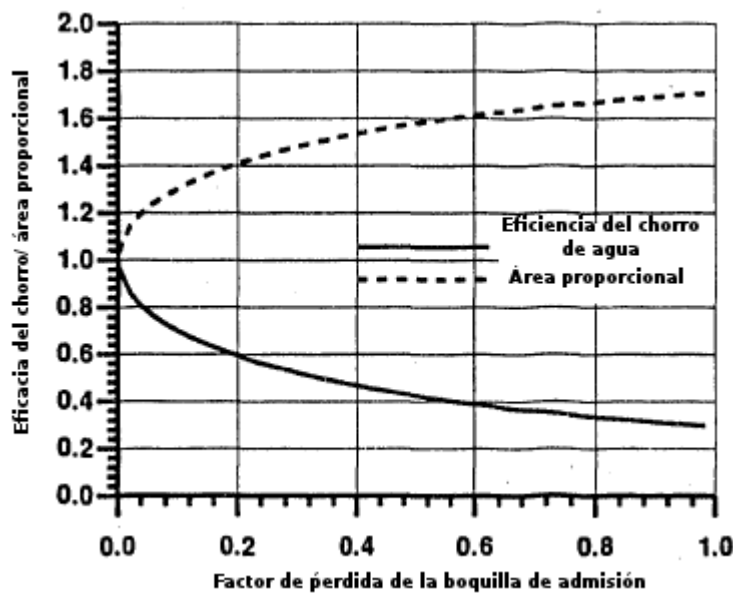


Figura 114- Variación del área óptima de la boquilla de admisión y eficiencia del chorro de agua (Fuente: Doss et al, 2001; gráfica adaptada por el autor)

- **Eficiencia eléctrica:** Se define de acuerdo a la ecuación (17). En ella influyen la intensidad del campo magnético, del diámetro del propulsor y el grueso de sus paredes, la velocidad del flujo a través del mismo y su conductividad. Está condicionada por las pérdidas por fricción conjuntamente con las pérdidas eléctricas. Las pérdidas eléctricas se producen debido a la interacción entre los bordes del campo magnético y los de los electrodos, lo que afecta a la circulación del flujo de agua de forma negativa. Puede cuantificarse de forma más exacta tal y como se muestra en (18) [34].

$$\eta_E = \frac{\text{Potencia del propulsor}}{\text{Potencia eléctrica}} \quad (17)$$

$$\eta_E = \frac{\rho g H Q}{P_e} = \frac{1}{\frac{J}{\sigma U_w B} + 1} \quad (18)$$

donde:

J = densidad de la corriente eléctrica

B = densidad del campo magnético

U_w = velocidad del flujo de agua

σ = conductividad del agua

De esta ecuación se deduce que la intensidad del campo magnético es fundamental en la potencia eléctrica desarrollada, ya que la conductividad eléctrica del agua salada es baja. Se hace completamente necesario disponer de un potente imán, que se conseguirá tan solo con materiales superconductores. En la Figura 115 se muestra la eficiencia teórica de un propulsor MHD en función de la intensidad del campo magnético generado.

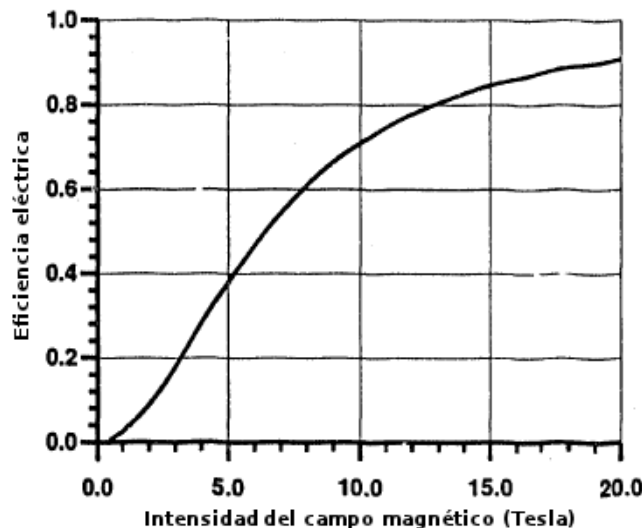


Figura 115 – Eficiencia eléctrica en función de la densidad del campo magnético (Fuente: Doss et al, 2001; gráfica adaptada por el autor)

Tal y como se puede deducir de la imagen, la eficiencia teórica eléctrica de un propulsor MHD podría ser de hasta el 95% y según algunos modelos podría alcanzar una eficiencia propulsora de hasta un 60%. Sin embargo, los cálculos y simulaciones experimentales, así como los prototipos construidos hasta la fecha no sobrepasan en ningún caso el 20%.

- **Rendimiento experimental:** En este apartado se muestran algunos de los resultados de cálculos y simulaciones experimentales realizados hasta la fecha.

Shinsuke Akagi, Kikuo Fujita y Kazuo SOGA, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Osaka en Japón realizaron un diseño óptimo [35] de forma analítica de un buque equipado con propulsores MHD y la mejor configuración de los mismos. El modelo diseñado tenía 24 metros de eslora, 180 toneladas de desplazamiento y su velocidad se consideró de 20 nudos. En el estudio se valoraron tres tipos de configuración DC adaptados a la forma del casco tal y como muestra la Figura 116. Como se puede observar en los resultados de la simulación de la Figura , los rendimientos son muy inferiores a los obtenidos en propulsores convencionales. La corriente empleada en la simulación es la máxima soportada por los superconductores de los propulsores, hechos de una aleación de niobio y titanio y refrigerados por helio. Su valor es 183.2 A. En la Figura se muestran los resultados de la simulación considerando una mejora en los materiales superconductores que permita aplicar corrientes de hasta 200 A de intensidad.

El Yamato I, obtuvo los parámetros de rendimiento mostrados en la Tabla 18 [36].

La configuración de sus propulsores MHD era tipo lineal, tal y como se puede apreciar en la Figura .

El último experimento llevado a cabo por Sha Ciwen, Peng Yan, Zhou Kuo, Yang Aihua y Qing Junqing del instituto de ingeniería Eléctrica de la Academia China de

las Ciencias en Beijing [37] ,mostró mediante análisis numérico la eficiencia total de propulsión más elevada hasta la fecha: 23%.

Tal y como se puede apreciar, ninguno de los rendimientos totales de propulsión puede rivalizar con cualquiera de los métodos convencionales empleados actualmente en la marina mercante. Si bien es una tecnología prometedora, la principal limitación radica en la generación de un campo magnético lo suficientemente intenso como para incrementar la potencia obtenida y el rendimiento. Es de esperar que con el avance y desarrollo de la tecnología de superconductores, esos motores alcancen mayor protagonismo en el futuro.

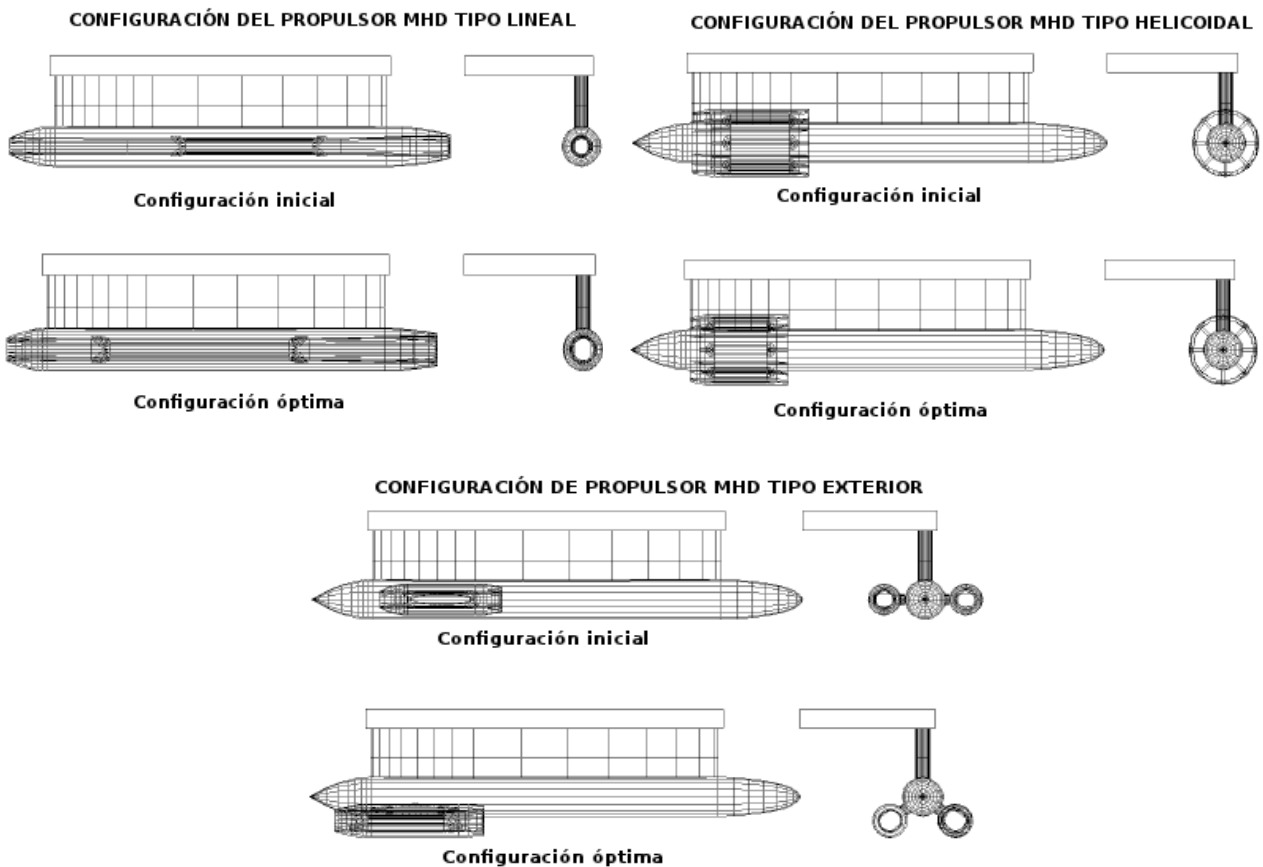


Figura 116 – Configuraciones de los propulsores MHD (Fuente: Akagy et al, 1994; imágenes adaptadas por el autor)

MODELO/ EQUIPADO CON →	PROPULSOR MHD TIPO LINEAL	PROPULSOR MHD TIPO HELICOIDAL	PROPULSOR MHD TIPO EXTERIOR
DESPLAZAMIENTO [Tm]	180.000	177.571	192.715
NÚMERO DE FROUDE	0.69109	0.66380	0.66380
RESISTENCIA [kN]	101.442	113.931	133.920
FLUJO DEL AGUA EN EL TUBO PROPULSOR [m ³ /s]	12.9496	49.1956	12.0017
DENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO [T]	8.61197	5.92690	5.54785
POTENCIA INDICADA (MOTOR) [MW]	9.01758	36.4682	31.5004
EFICIENCIA DEL PROPULSOR [%]	44.1086	39.6917	55.7128
EFICIENCIA ELÉCTRICA [%]	13.1203	8.09834	7.85133
EFICIENCIA TOTAL [%]	5.78718	3.21437	4.37420

Tablas 16 y 17 – Resultados de la simulación [I] (Imáx = 183.2 A) y [II] (Imáx = 200 A)

MODELO/ EQUIPADO CON →	PROPULSOR MHD TIPO LINEAL	PROPULSOR MHD TIPO HELICOIDAL	PROPULSOR MHD TIPO EXTERIOR
DESPLAZAMIENTO [Tm]	137.165	201.272	187.079
NÚMERO DE FROUDE	0.68296	0.66380	0.66380
RESISTENCIA [kN]	79.4967	115.074	126.985
FLUJO DEL AGUA EN EL TUBO PROPULSOR [m ³ /s]	4.74659	57.5368	6.75501
DENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO [T]	17.7398	7.82446	18.4579
POTENCIA INDICADA (MOTOR) [MW]	6.36749	18.3538	6.97988
EFICIENCIA DEL PROPULSOR [%]	47.8732	29.8980	54.4317
EFICIENCIA ELÉCTRICA [%]	39.4655	21.5762	34.3891
EFICIENCIA TOTAL [%]	18.893		

YAMATO-1/ EQUIPADO CON →	PROPULSOR MHD TIPO LINEAL
DESPLAZAMIENTO [Tm]	185
DENSIDAD DEL CAMPO MAGNÉTICO [T]	4
POTENCIA INDICADA (MOTOR) [MW]	3.240
EFICIENCIA TOTAL DEL PROPULSOR [%]	1.7

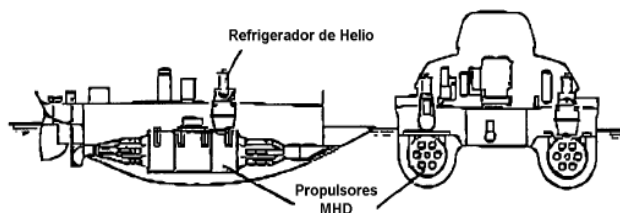


Tabla 18 – Parámetros de funcionamiento del Yamato-I (izquierda) y configuración de sus propulsores MHD (derecha) (Fuente: Massagués, 2001)

4.2.5 Ventajas y desventajas de los propulsores MHD:

- **Muy baja contaminación acústica y vibraciones:** Suprimiendo la hélice, la línea del árbol y el reductor, se disminuyen las emisiones acústicas debidas a la excitación de los modos de resonancia del casco.
- **Estanqueidad:** Se elimina la necesidad de realizar juntas estancas giratorias sometidas a presiones elevadas al suprimir el paso del árbol (las alimentaciones eléctricas y criogénicas de propulsión atraviesan el casco con juntas fijas).
- **Maniobrabilidad:** La marcha hacia delante o hacia atrás se puede obtener cambiando la dirección del campo eléctrico o la inducción magnética, sin necesidad de parar y arrancar el motor para ello.
- **Diseño del buque:** El emplazamiento de la central de energía puede ser optimizado sin las condiciones que impone la línea del árbol.
- **Bajo mantenimiento:** Al no poseer partes móviles, el mantenimiento de un propulsor MHD resulta menos costoso que el de los propulsores convencionales.
- **Eficiencia propulsora total muy baja:** La eficiencia de un propulsor MHD actualmente está muy por debajo de los propulsores convencionales, relegándolos

a la no competitividad comercial.

- **Costes de adquisición elevados:** Los materiales superconductores que forman las bobinas y el sistema de refrigeración de las mismas encarece el coste de un propulsor por encima del de uno convencional.
- **Bajo rendimiento en zonas de agua dulce:** El agua dulce, al tener una menor cantidad de sal disuelta posee una menor conductividad eléctrica, lo que repercute severamente en la potencia generada por el propulsor MHD.

4.3 Hélices CLT

4.3.1 Introducción y descripción

Las primeras investigaciones sobre hélices con cierres de placa en los extremos se realizaron en el año 1976 en Astilleros Españoles, en las que aquel entonces se denominaron hélices Tip vortex free (TVF). Sin embargo, la posibilidad de empleo de la hélice CLT frente a las hélices convencionales no sería introducida, por los profesores Gonzalo Pérez Gómez y Juan González-Adalid [38], hasta el año 1993, a raíz de la revisión de la teoría convencional de propulsión y el planteamiento de un nuevo teorema conocido como *Theorem of momentum*.

La empresa SISTEMAR, fundada por los mencionados en el año 1987, continuó desarrollos, realizando aplicaciones de forma más o menos puntual, hasta que en 1996 se realizaron las pruebas de mar de dos buques graneleros gemelos uno con hélice convencional y otro con hélice CLT. La hélice CLT fue claramente superior a la convencional, que era una hélice de máximo rendimiento en su tipo, hasta el punto de que el armador decidió sustituir la convencional del primer buque por otra CLT similar a la del segundo.

Las hélices CLT son hélices de forma convencional, pero que disponen en sus extremos de unas placas de cierre que facilitan la distribución radial del empuje, coincidiendo con la deseada, mejorando así su rendimiento.

Cuando una hélice gira, modifica mediante sus palas el campo de presiones del agua que la rodea, lo que, de acuerdo al teorema de Bernoulli, se traduce en un incremento de la velocidad de la misma. La componente axial de la velocidad inducida en el agua aumenta a lo largo de la vena líquida desde la circunferencia descrita por la acción de la hélice sobre el agua hasta el infinito por debajo de ella. Este incremento de velocidad produce una reducción progresiva de la sección transversal de la vena líquida (ecuación de continuidad). Las placas de cierre de la hélice CLT se adaptan a la contracción de la vena

líquida para reducir tanto como sea posible su resistencia viscosa. Por ello estas hélices se denominan CLT, que significa Contracted and Loaded Tip Propeller.



Figura 117 – Hélice CLT (Fuente: *Studio di Ingegneria Navale e Meccanica, 2003*)

4.3.2 Ventajas y desventajas del empleo de hélices CLT

De las experiencias en pruebas de mar realizadas por buques dotados de hélices CLT y previamente de hélices convencionales [39] se han obtenido las siguientes ventajas:

- **Mayor rendimiento propulsivo:** Permite reducir la potencia propulsora necesaria para alcanzar una determinada velocidad, lo que se traduce en un considerable ahorro de combustible, (aproximadamente entre un 7% y 12% menos a igualdad de velocidad) y por tanto una reducción de emisiones contaminantes. De igual modo, a igualdad de potencia propulsora, las hélices CLT permiten aumentar la velocidad del buque entre 0,3 y 0,6 nudos.
- **Mayor maniobrabilidad:** A igualdad de potencia propulsora, se obtiene una mejor respuesta del buque a la acción del timón, y por consiguiente mejores características de maniobrabilidad, con círculos de evolución de menor radio y menor distancia de frenado requerida.
- **Menor nivel de vibraciones y ruidos:** Los niveles de vibraciones producidos sobre el casco por las hélices CLT son considerablemente inferiores a los correspondientes de las hélices convencionales, debido a la menor depresión en la cara pasiva de las palas, con una extensión de cavitación reducida y menores

fluctuaciones de presión.

- **Menor diámetro:** Debido al mejor aprovechamiento de las fluctuaciones de presión por las palas de una hélice CLT, su diámetro óptimo es entre un 10% y un 15% menor que el de una hélice convencional de las mismas características. Esta ventaja es especialmente significativa en buques de pequeño calado o aquellos cuyo propulsor ha de ceñirse a unas medidas máximas.

El empleo de hélices CLT no supone ninguna desventaja frente a las hélices convencionales, salvo en el ámbito económico, donde su precio puede ser superior al de las hélices convencionales debido a su menor producción y por tanto mayor costo. Sin embargo, ha de considerarse la posterior compensación de esta inversión debido al ahorro de combustible derivado del empleo de un hélice CLT.

Uno de los principales motivos de dudas de un armador cuando se le propone la instalación de una hélice CLT es pues, el extra coste inicial. En el caso de buques de nueva construcción, este se debe únicamente a la diferencia de coste de diseño y fabricación con respecto a una hélice convencional. Cuando se trata de buques en servicio, al coste de diseño y fabricación hay que añadir el de desmontaje de la hélice existente y el de transporte e instalación de la nueva. La reducción de la factura anual de combustible conseguida mediante la hélice CLT se estima en función del tipo de buque (horas de navegación al año, consumo específico de combustible, porcentaje de ahorro estimado) y del precio de combustible. En función de estos parámetros, se tiene que en el caso de buques de nueva construcción, el retorno de la inversión se produce en aproximadamente 3 a 6 meses, mientras que en el caso de buques en servicio suele oscilar entre 2 y 3 años.

4.3.3 Estado de la técnica

Experiencias de servicio

En el año 2003 más de 250 buques tenían ya instaladas hélices CLT [39]. De ellos,

alrededor de 60 poseen palas CLT instaladas en hélices de paso regulable sobre equipos de diferentes fabricantes. Las hélices o palas CLT se han instalado en buques de todo tipo: petroleros, quimiqueros, bulkcarriers, pesqueros de arrastre y de cerco, ro-ros, cruceros, yates, buques patrulleros, hidrofoils, etc. Las potencias propulsoras que accionan las hélices CLT cubren una amplísima gama que oscila entre los 36.000 bhp a 90 rpm y los 300 bhp a 2.400 rpm.

Entre las aplicaciones más relevantes en buques de empresas navieras españolas se tienen:

- 4 bulkcarriers de ERSHIP, que han obtenido una reducción en el consumo de combustible de entre el 13 y el 16%, la eliminación completa de las vibraciones del casco así como una reducción del 20% en el diámetro de giro.
- 3 ro-ros de Compañía Trasmediterránea, que obtuvieron un aumento de su velocidad operativa de 0,6 nudos, desaparición total de las vibraciones y reducción en un 20% del diámetro de giro.
- 2 hidrofoils también de a Compañía Trasmediterránea. El objetivo fundamental de la instalación de hélices CLT en estos buques era reducir la sobrecarga del motor principal en el despegue así como la longitud del periodo de aceleración. Los 2 hidrofoils pertenecen en la actualidad a Ustica Lines (Italia), que está instalando hélices CLT en varios de sus buques.

En el caso de buques de nueva construcción, se tiene un ro-ro de Compañía Trasmediterránea y 3 petroleros de productos de W.W. Marpetrol construidos todos en Unión Naval de Levante.

Otras empresas españolas como Flota Suardíaz, Petrogás, Trans-Balear y Repsol-Naviera Vizcaina, también han instalado hélices CLT en algunos de sus buques.

Proyectos de investigación

Una de las mayores dificultades que se encuentra un astillero al instalar hélices CLT en sus buques es la dificultad para comprobar de forma fiable mediante ensayos el comportamiento del buque con estas hélices instaladas. Por esta razón IZAR, en colaboración con el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo y la empresa Sistemar, han llevado a cabo varios proyectos de investigación [40] encaminados a establecer procedimientos de extrapolación especialmente ideados para este tipo de hélices. Dichos proyectos son resumidos a continuación:

- **Proyecto para la optimización de la propulsión de los buques mediante soluciones innovadoras:** A través de este programa de investigación, se ha conseguido un procedimiento de extrapolación que permite predecir el comportamiento a plena escala a partir de los resultados de los ensayos de canal con hélices CLT y con el mismo grado de exactitud que se consigue con hélices convencionales.

Además, SISTEMAR ha desarrollado unas nuevas líneas de espesores medios para las hélices CLT con las que se están consiguiendo a plena escala resultados aún mejores que los que cabría obtener con hélices CLT con líneas medias estándar. Se definen como hélices CLT de segunda generación las que incorporan estas nuevas líneas medias, que aportan las siguientes mejoras:

- Se reduce la depresión en la cara de succión de la hélice, por lo que se minimiza la extensión de cavitación tipo lámina y por tanto los niveles de las fluctuaciones de presión.
 - Se aumenta la sobrepresión en la cara de presión de la hélice, aumentando de esta forma el rendimiento de propulsor aislado.
- **Proyecto de investigación sobre el comportamiento en cavitación de hélices CLT:** Este proyecto trata la predicción, con mayor precisión, del comportamiento en

cavitación de las hélices CLT.

Disponibilidad comercial

Las hélices CLT se encuentran en la actualidad disponibles comercialmente, y son manufacturadas por cinco empresas, las cuales han sido homologadas y licenciadas por SISTEMAR. Estas son:

- Fundiciones Adrio (Vigo, España)
- Casuso propellers (Entrambasaguas, España)
- Mecklenburger metalguss (Rostock, Alemania)
- Wärtsila Ibérica (Maliaño, España)
- Wärtsila Netherlands (Drunen, Holanda)

4.4 Hélices contra-rotativas en dispositivo azimutal

4.4.1 Introducción y descripción

Un dispositivo propulsor tradicional de hélice contra-rotativas consiste en un par de hélices acopladas al mismo eje pero enfrentadas una a la otra y con un sentido de giro opuesto. La hélice dispuesta más en el exterior del casco recupera parte de la energía del flujo rotacional provocada por la hélice inmediata al codaste y la convierte en empuje, lo que se traduce en una mayor eficiencia propulsora y una reducción en el diámetro de los propulsores.

Las hélices contra-rotativas son conocidas desde el año 1836 y se han empleado desde entonces en torpedos y botes rápidos así como en el ámbito de la aviación civil y militar. El principal motivo de su desarrollo son sus ventajosas propiedades hidrodinámicas, pero su empleo no llegó a proliferar debido a la complejidad mecánica asociada a los ejes largos, rodamientos y sellados.

Fue la introducción de los propulsores azimutales lo que aportó un nuevo enfoque sobre el empleo de hélice contra-rotativas; las dificultades mecánicas de las hélices contra-rotativas fijas se veían reducidas o eliminadas en su totalidad al acoplarlas a un apéndice azimutal.

Desde la invención de los propulsores azimutales, su empleo se ha extendido exitosamente por diversos tipos de buques civiles y militares. El desarrollo de estos propulsores comenzó con su instalación en buques rompehielos y ha sido seguido por su amplia aplicación en otros tipos de buques, especialmente en buques de pasajeros. El desarrollo del propulsor azimutal ha propiciado el empleo de hélices contra-rotativas en buques de gran porte y rápidos.

La configuración de una hélice contra-rotativa dispuesta en un apéndice azimutal puede tener dos formas:

- **Propulsión híbrida:** Consiste en una hélice de paso fijo convencional acoplada al

eje y un apéndice azimutal situada a popa de esta donde va instalada la hélice contra-rotativa, enfrentadas la una contra la otra y disponiendo de transmisión de potencia individual e independiente.

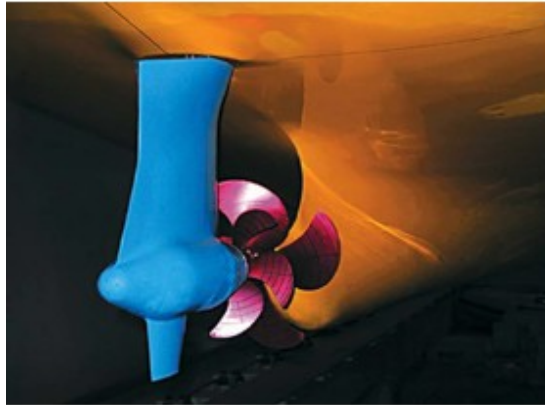


Figura 118 – Hélice contra-rotativa híbrida (Fuente: *Revista ingeniería naval*, Mayo 2004)

- **Propulsor azimutal contra-rotativo:** Consiste en un apéndice azimutal donde van instaladas un par de hélices, cada una en uno de sus extremos, enfrentadas entre si y girando en direcciones opuestas.

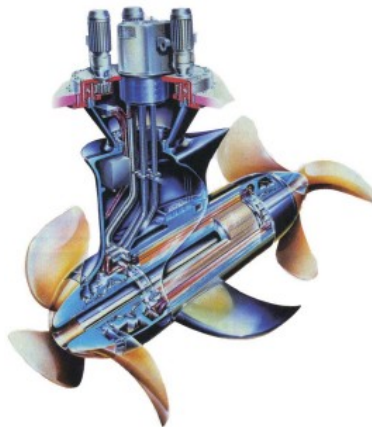


Figura 119 – Propulsor azimutal contra-rotativo (Fuente: *Revista ingeniería naval*, Mayo 2004)

Hay diversas razones para usar las hélices contra-rotativas en su configuración híbrida. La más importante es un buen rendimiento de potencia. No obstante, cuando se evalúa el rendimiento propulsivo total hay que considerar tres factores por separado; el rendimiento del propulsor híbrido, la resistencia al avance del casco y el rendimiento propulsivo del casco.

- **Rendimiento del propulsor:** La idea básica detrás de la disposición de una hélice contra-rotativa es recuperar la energía rotacional del flujo de la hélice delantera. Las pérdidas axiales hidrodinámicas de la hélice CRP son similares a las de una disposición tradicional de una sola hélice. Sin embargo, gracias a la menor carga de la hélice, el diámetro puede ser aumentado ya que el nivel del pulso de presión disminuirá. Esto tendrá un efecto beneficioso en las pérdidas axiales de la hélice CRP y dará lugar a un aumento del rendimiento propulsivo. Por otra parte, al dividir la carga entre dos hélices se consiguen beneficios adicionales en el rendimiento del propulsor. El área de pala de las hélices puede ser menor que la de una disposición de una sola hélice. La relación de aspecto de las palas aumenta y como resultado también lo hace el rendimiento de la hélice. Una menor carga en las palas también da lugar a un mejor comportamiento de cavitación.

Los inconvenientes pueden provenir de la resistencia del apéndice azimutal (el alojamiento del motor y el arbotante). Sin embargo, estos inconvenientes son inferiores en comparación con los beneficios.

El concepto híbrido es especialmente atractivo cuando la propulsión principal está muy cargada debido a unos requisitos de alta velocidad del buque y potencia muy elevada. La adición de un apéndice a la propulsión principal aumentará la velocidad y potencia total. El diseño de ambas unidades requiere una especial atención para optimizar la cavitación y el ruido, aspecto que requiere un desarrollo adicional.

- **Resistencia del casco y rendimiento propulsivo:** Cuando se compara una unidad de propulsión híbrida con hélice CRP con una disposición tradicional de dos líneas de ejes y hélices, se observa que no existe la resistencia al avance de los apéndices (ejes de las hélices, arbotantes, quillotes, timones, etc.). Esto reduce de modo significativo la resistencia al avance del buque, ya que el propulsor está situado en la región en la que el flujo reduce su velocidad. Como resultado, el

coeficiente de estela es alto y también lo es el rendimiento del casco. Por tanto, tanto la resistencia al avance del casco como el rendimiento del casco son ligeramente superiores a los correspondientes a una disposición con una sola hélice. En la Figura 120 puede apreciarse los resultados de las pruebas llevadas a cabo [41] en el buque tipo Ro-pax Aksahia (Tabla 18) al que se le ha instalado un propulsor CRP de configuración híbrida, en lo concerniente a la cuantificación del coeficiente de resistencia residual del casco, frente a un buque Ro-Ro de 200 m de eslora equipado con un propulsor convencional. Los resultados de la simulación muestran una disminución en el coeficiente de un 22%.

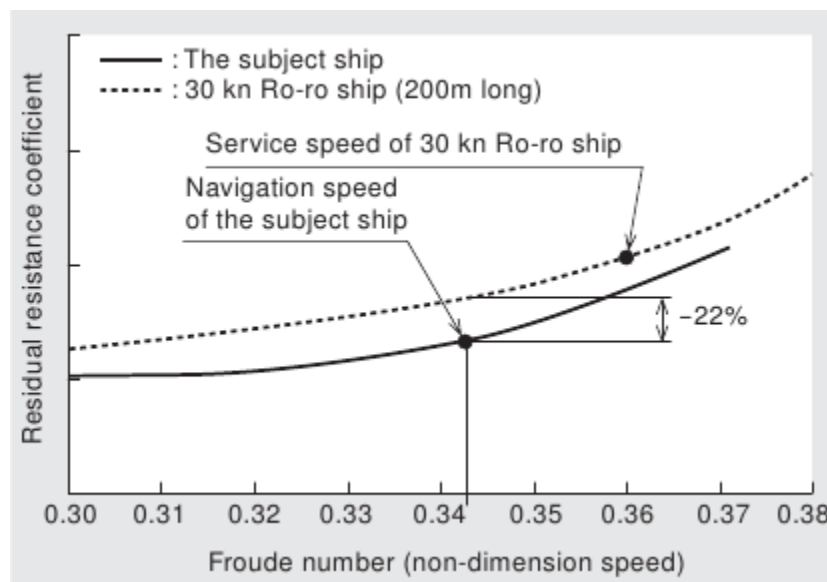


Figura 120 – Diferencia del coeficiente de resistencia residual en función del número de Froude entre un buque tipo Ro-Ro de 200 metros de eslora equipado con un propulsor convencional instalado en el buque Ro-pax Akashia (Fuente: Ueda et al; 2004)

4.4.2 Ventajas y desventajas de las hélices contra-rotativas en dispositivo azimutal

- Mayor rendimiento propulsivo:** Tal y como se explica en el apartado anterior, el empleo de hélices CRP en dispositivos azimutales proporciona un mayor rendimiento propulsivo al buque, lo que se traduce en un menor consumo de combustible y por tanto una reducción en la cantidad de emisiones atmosféricas. En la Figura 121 puede apreciarse la diferencia de potencia necesaria y consumo de combustible en un buque ro-pax, equipado con un propulsor convencional y una hélice CRP montada en un dispositivo azimutal de configuración híbrida.

En la Figura 122 se muestran los resultados de las pruebas llevadas a cabo [42] en un buque modelo tipo supply costero. En las figuras puede apreciarse la diferencia de consumo entre el buque equipado con distintos tipos de propulsores [propulsor convencional abierto, propulsores en tobera (19-A y HJ3), y propulsor azimutal contra-rotativo], en navegación y en modo posicionamiento dinámico, al 50% de carga (Figura -A) y al 90% de carga (Figura -B).

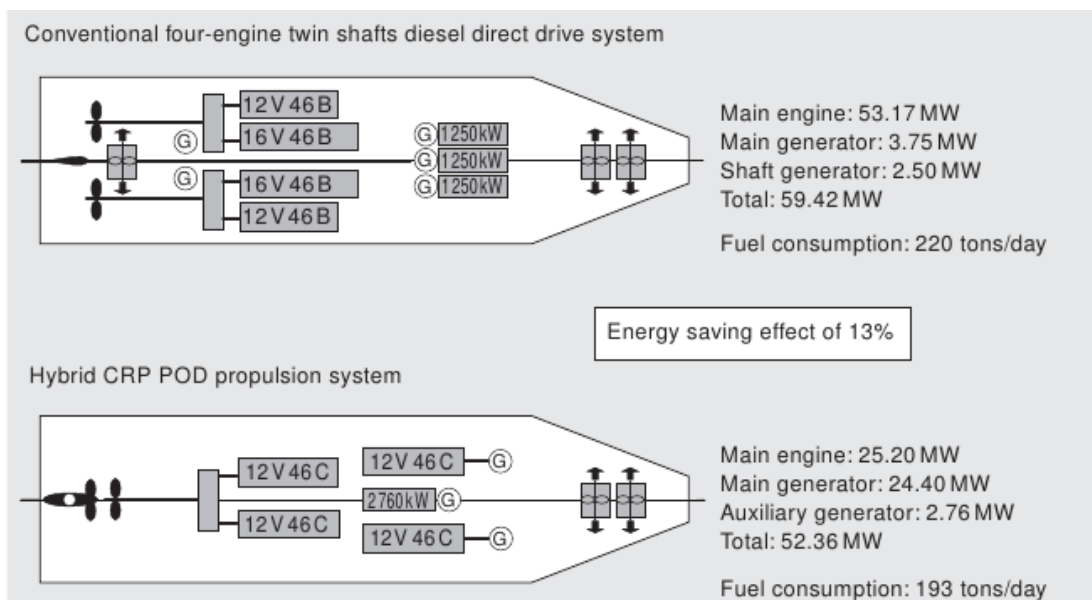


Figura 121 – Diferencia entre el consumo de combustible y potencia requerida en un buque Ro-pax dotado de un propulsor convencional y una hélice CRP montada en un dispositivo azimutal de configuración híbrida (Fuente: Ueda et al; 2004)

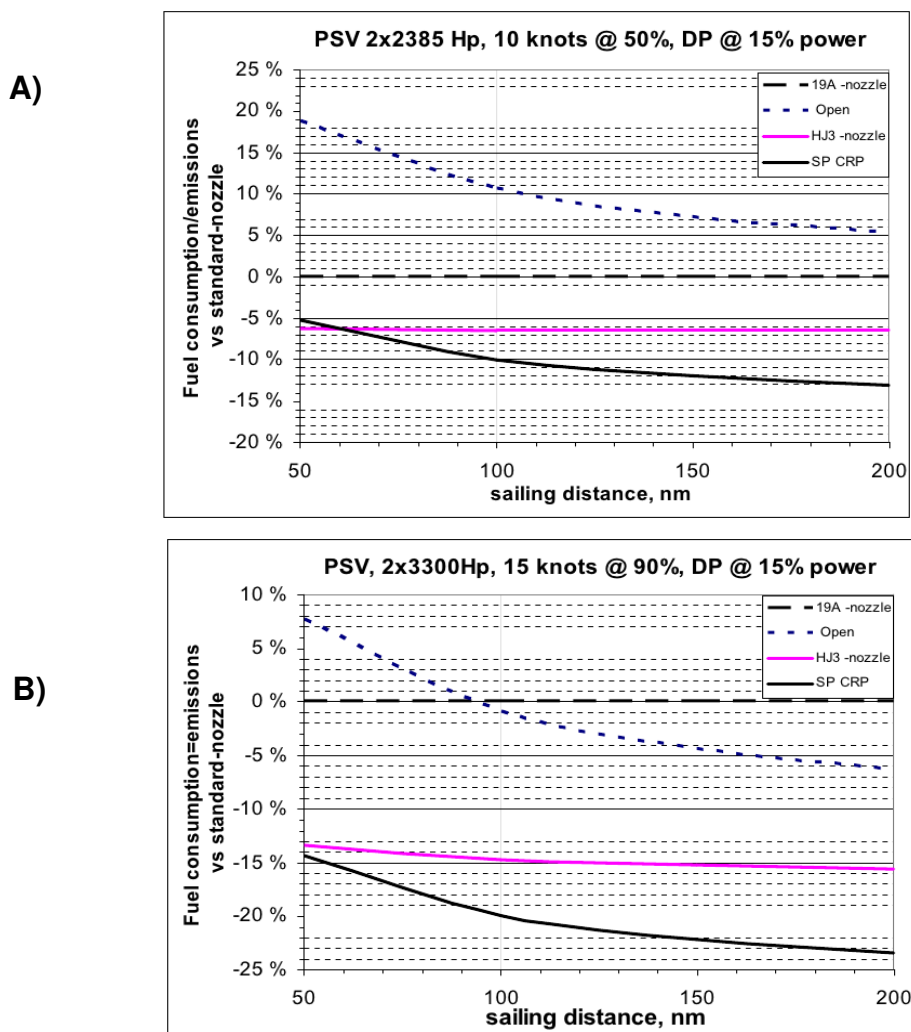


Figura 122 A y B- Diferencia de consumo de un buque supply costero en función del tipo de propulsor empleado (Fuente: Jukola and Ronkainen, 2006)

- **Menor diámetro del propulsor**
- **Menor nivel de vibraciones y ruidos**
- **Mayor maniobrabilidad:** Tanto la configuración de propulsión híbrida con hélice como el propulsor azimutal contra-rotativo mantienen el excelente comportamiento de los propulsores azimutales convencionales en la maniobra del buque. La fuerza de gobierno generada por un dispositivo azimutal es entre un 100 % y un 200 % mayor que la producida por un timón, lo que significa que normalmente sólo se necesitan pequeños ángulos de giro de los mismo para gobernar el buque.

Para grandes ángulos de giro, superiores a 20° , la hélice del dispositivo azimutal cavita fuertemente y el flujo se separa del arbotante del dispositivo. La fuerza resultante en la dirección de proa del dispositivo disminuye rápidamente.

Cuanto mayor sea la velocidad del buque menor será el ángulo crítico de giro al que esta fuerza pasa a ser negativa, lo que significa que el dispositivo azimutal empieza a frenar al buque.

El ángulo crítico de giro desde el punto de vista de separación del flujo depende de la carga del dispositivo azimutal. Cargas altas sobre éste desplazan la separación del flujo hacia ángulos de giro más grandes. Si es necesario, la hélice principal puede compensar la caída de velocidad producida por un giro del dispositivo azimutal superior al ángulo crítico. Para un buque equipado con dos propulsores CRP, la capacidad de parada del buque mejora significativamente. La disminución del empuje debida a un ángulo de giro superior al ángulo crítico puede utilizarse en esta maniobra. Girando gradualmente los dispositivos azimutales hacia el exterior hasta un ángulo de 180° y manteniendo la hélice principal sin accionamiento (girando libremente), o en la posición de marcha atrás, se consigue una parada del buque más efectiva que invirtiendo la rotación de la hélice o cambiando el paso de la hélice a uno negativo. Con ello también se logran mejoras en el comportamiento del buque cuando se debe ser consciente de la elevada eficiencia de gobierno del propulsor azimutal y de su efecto sobre la escora del buque. Las altas fuerzas de gobierno del dispositivo establecen unos requisitos mayores sobre la estabilidad del buque. Si ésta no es suficientemente alta, puede dar lugar a grandes ángulos de escora dinámica.

La mayor capacidad de maniobra proporcionada por un dispositivo azimutal CRP en configuración híbrida puede apreciarse en las Figuras 123 y 124, donde se muestran las simulaciones llevadas a cabo en el buque tipo Ro-Pax mencionado

anteriormente, en lo concerniente a la curva de evolución y distancia de parada. La primera imagen muestra la curva de evolución del buque maniobrando con la hélice convencional y el dispositivo azimuthal CRP. La segunda muestra la curva de evolución del buque maniobrando únicamente con el propulsor azimuthal y la tercera solamente con la hélice convencional y el dispositivo azimuthal actuando exclusivamente como timón.

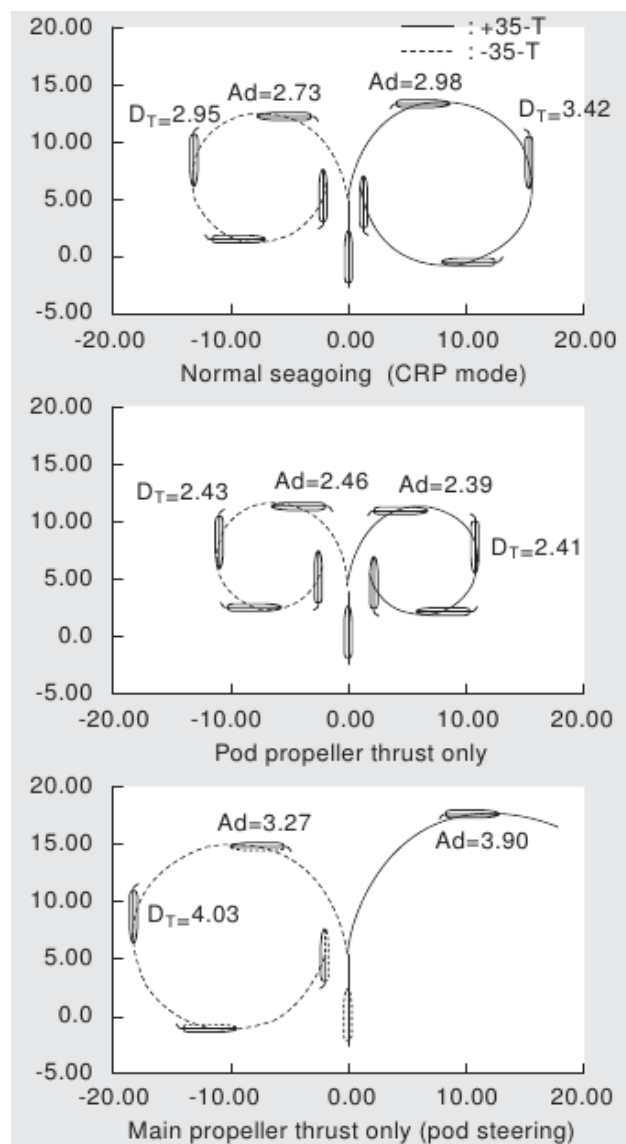


Figura 123 – Curvas de evolución en función del propulsor empleado (Fuente: Ueda et al; 2004)

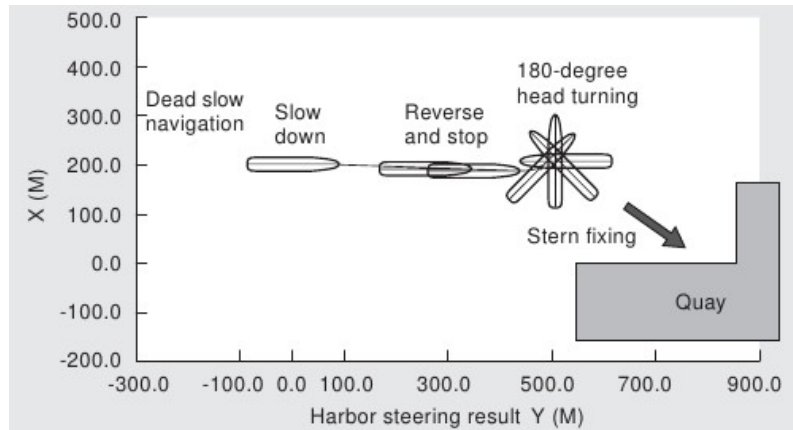


Figura 124 – Distancia de parada de un buque Ro-Pax (Figura) actuando con el propulsor azimutal CRP de configuración híbrida (Fuente: Ueda et al; 2004)

Eslora máxima (m)	224.82	Motor principal	Wärtsilä 12V46C x 2 unidades
Manga (m)	26.00	Potencia máxima	12600 kW x 500 min ⁻¹
Puntal (m)	20.4	Generador principal del motor	Wärtsilä 12V46C x 2 unidades
Calado (m)	7.40	Potencia máxima	12600 kW x 514 min ⁻¹
Tonelaje bruto	34181	Generador auxiliar del motor	Daihatsu 8DK32C x 1 unidad
Máxima velocidad (ensayos) (kn)	32.04	Potencia máxima	2910 kW x 720 min ⁻¹
Capacidad de pasajeros	820	Dispositivo AZIMUTAL	AZIPOD Tipo 21
Capacidad de vehículos	158 vehículos de 12 m de longitud, 65 coches de pasajeros	Potencia normal (kW)	17600

Tabla 18 – Características principales del buque Ro-Pax Akashia (Fuente: Ueda et al; 2004)

4.4.3 Estado de la técnica

Disponibilidad comercial: Actualmente los propulsores CRP son comercializados por las siguientes compañías:

- **Dispositivo azimutal CRP de configuración híbrida:** Los dispositivos azimutales CRP de configuración híbrida son desarrollados y comercializados por la compañía ABB bajo la marca Azipod CRP®.
- **Propulsor azimutal contra-rotativo:** Los propulsores azimutales contra-rotativos son desarrollados y comercializados por la compañía finesa Steerprop.

Experiencias de servicio

- **Dispositivo azimutal CRP de configuración híbrida:** Los dispositivos azimutales CRP de configuración híbrida Azipod CRP®, han sido instalados satisfactoriamente en dos buques japoneses tipo Ro-pax, en servicio desde el año 2004: el Akashia y el Hamanasu, de la naviera nipona SNF. Tras su exitosa operación, Mitsubishi Heavy Industries, constructores del Akashia y el Hamanasu, estudian actualmente la posibilidad de instalar este tipo de propulsores en buques portacontenedores y buques LNG.
- **Propulsor azimutal contra-rotativo:** El propulsor azimutal contra-rotativo de la compañía finesa Steerprop ha sido satisfactoriamente instalado en 8 buques tipo *supply* operativos actualmente. Entre el actual y próximo año se espera la entrega de 8 buques más del mismo tipo con igual dispositivo de propulsión.

Proyectos de investigación

- **Instalación de Azipod CRP® en buques porta-contenedores:** Este estudio [43] se demuestra como la propulsión Azipod CRP® empleada en buques portacontenedores de 12000 o más TEUS podría presentar mayores beneficios que el empleo de hélices convencionales. Las pruebas realizadas con modelos

demuestran una eficiencia propulsiva un 11.4% superior, lo que se traduce en la instalación de un motor de menor potencia, menor consumo de combustible y por tanto menor cantidad de emisiones atmosféricas. El estudio sugiere que de igual forma, este tipo de propulsión podría emplearse satisfactoriamente y con iguales beneficios en buques R-Pax y buques tanque.

4.5 Otros propulsores

4.5.1 Hélice de paletas de Grim (Grim Vane Wheel)

La hélice de paletas de Grim (Figura 125) consiste en un dispositivo helicoidal dotado de 6 o más palas alrededor de su núcleo que gira libremente sobre un pequeño eje situado a popa de un propulsor convencional. Deben su nombre al profesor Grim, inventor de las mismas. Los primeros diseños disponían su eje de rotación unido al eje porta-hélice, posteriores diseños lo incorporaban en el codaste proel del timón (Figura 126).

El objeto de una hélice de paletas de Grim es el de extraer energía de la corriente producida por el propulsor convencional y convertirla en empuje adicional. La parte interior de las paletas de la hélice de Grim actúan como una turbina, mientras que la exterior como una hélice convencional. Suele disponer de un mayor número de palas que la hélice propulsora, generalmente del orden de seis o más y su diámetro suele ser entre un 15 y 20% mayor.

Una hélice de paletas de Grim gira a una velocidad inferior a la del propulsor principal, aproximadamente a un número de revoluciones por minuto entre un 30 y 50% inferior. Consecuentemente, la frecuencia de paso de la hélice ha de ser correctamente estudiada, con el fin de evitar averías.

La hélice de paletas de Grim no obtuvo popularidad, tras reportarse varios fallos mecánicos en su comportamiento, entre los que destacan los experimentados por el M/S Queen Mary 2, donde tras una exitosa instalación tuvieron que ser retiradas tras dos años de servicio [44].

A día de hoy su comercialización es muy escasa y no existen modelos precisos de predicción de su comportamiento, por lo que suponen una opción poco considerable en el diseño y construcción de buques de nueva generación.



Figura 125 – Hélice de paletas de Grim (Fuente: Marineblogspot)

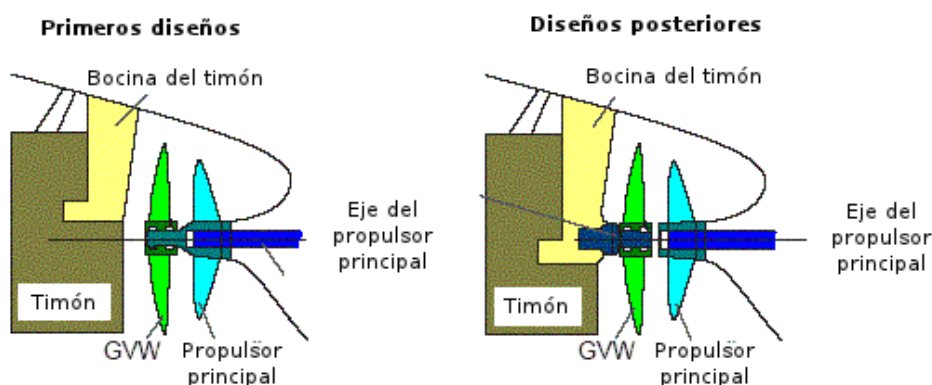


Figura 126 – Posibles configuraciones de la hélice de paletas de Grim (Fuente: Marineblogspot, imagen modificada por el autor)

4.5.2 Wale tail wheel®

El propulsor Wale Tail Wheel® (Figura 127) se trata de un dispositivo de propulsión cicloidal de eje horizontal con palas dispuestas paralelamente a su eje de rotación.

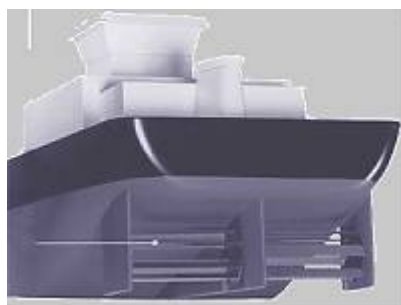


Figura 127 – Wale Tail Wheel® (Fuente: Gestenaval.)

Debido a su disposición, el ángulo de ataque de las palas respecto al agua que rodea el

propulsor varía a lo largo de cada revolución completa del mismo, describiendo así un movimiento similar al que haría una ballena con su cola (Figura 128), motivo por el que este propulsor recibe el nombre de Wale Tail Wheel[®] (rueda cola de ballena).

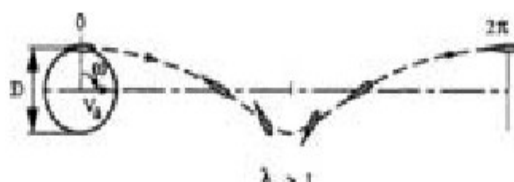


Figura 128 – Descripción del movimiento de un propulsor cicloidal de eje horizontal y sus palas (Fuente: www.nap.edu)

El propulsor Wale Tail Wheel[®] va instalado en el codaste de popa, como si se tratase de un propulsor convencional, a lo largo de la mayor parte de su manga. Las palas horizontales del propulsor son una de sus principales características; disponen de una gran superficie de ataque y están cerradas en sus extremos. El ángulo de ataque de cada una de las hojas viene determinada por la evolución de la revolución del propulsor en su conjunto. A lo ancho del propulsor van distribuidos una serie de soportes para garantizar la rigidez de las palas (Figura 129).

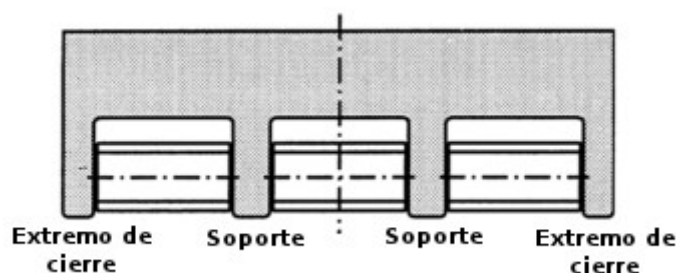


Figura 129 – Vista desde popa de un propulsor Wale Tail Wheel[®] instalado en un buque

(Fuente: National Academic Press; imagen adaptada por el autor)

La configuración y dimensiones de un propulsor Wale Tail Wheel[®], propician una carga mínima de empuje por unidad de área, lo que se traduce una mayor eficiencia del propulsor. Por otra parte, un codaste adaptado y en conjunción con la forma del propulsor

Wale Tail Wheel[®], puede presentar un mayor control en la cavitación del propulsor y las vibraciones.

El estudio numérico más reciente [45] sobre el comportamiento de un propulsor Wale Tail Wheel[®] demuestra que este tiene un gran potencial como propulsor de alta eficiencia para una amplia variedad de embarcaciones. Sus estimaciones sobre la eficacia en aguas abiertas aplicado en cuatro buques de distintas características (una gabarra, un ferry de distancias cortas, un buque de navegación costera y un catamarán) muestran valores de eficiencia propulsiva de alrededor del 80%, superiores a cualquier propulsor convencional. No obstante ha de considerarse que el estudio no considera todas los fenómenos que puedan sucederse en un escenario real, por lo que su eficiencia en este caso podría ser ligeramente inferior, así como tampoco considera las pérdidas mecánicas de los ejes de transmisión. Es por esto que dicho valores han de considerarse como el máximo límite de eficiencia del propulsor.

La eficiencia relativamente alta se obtiene principalmente por dos razones:

- La baja carga del propulsor, debido al hecho de que pueda extenderse por la mayor parte de la manga del buque.
- La relación de aspecto de cada hoja se acerca al infinito, causa de que la relación sustentación/resistencia de cada una de las palas se mucho mayor que en los propulsores con relación sustentación/resistencia finita, como el propulsor cicloidal convencional (Voith Schneider) o la hélice convencional.

No obstante, a corto plazo, y a pesar de los resultados del citado estudio, el propulsor Wale Tail Wheel[®] no ofrece una sólida alternativa de propulsión; son escasas las experiencias en buques reales, y no hay suficientes modelos de predicción de su comportamiento. Por otra parte su comercialización actual es inexistente.

4.5.3 Propulsores oscilatorios/ondulantes

Los propulsores oscilatorios/ondulantes basan su concepción y diseño en los apéndices y formas hidrodinámicas que distintas especies marinas emplean para su desplazamiento a través de las aguas. Las distintas especies marinas han ido evolucionando a lo largo de millones de años, llegando a desarrollar habilidades para su desplazamiento por el agua difícilmente imitables por la ingeniería y tecnología naval actual. Las distintas especies marinas obtienen grandes eficiencias en su propulsión, aceleración y maniobrabilidad al explotar mediante sus formas hidrodinámicas principios de la mecánica de fluidos de una manera tal que los ingenieros navales apenas pueden establecer como ideales en la actualidad.

Durante parte del pasado siglo y con mayor intensidad a partir de los primeros años noventa, un gran número de grupos de investigación de universidades en Europa, Asia y Estados Unidos han invertido grandes recursos en investigar formas de propulsión marina de inspiración biológica. Las investigaciones han sido perpetuadas hasta hoy en día, ya que es uno de los campos con mayor potencial en el desarrollo de mejores y más eficientes propulsores marinos. Algunas de las más recientes, como la llevada a cabo en la Universidade da Coruña entre los años 2006 y 2011 [46] han logrado de forma exitosa el diseño, construcción y desarrollo tanto de un propulsor ondulante como de un método de predicción de comportamiento mediante CFD (Figura 131). La idea de este propulsor esta basada en el movimiento ondulatorio descrito por especies como la anguila, aplicado a una membrana movida mediante un eje de excéntricas accionada por un motor (Figura 132). Otras investigaciones recientes como la comentada en el apartado X del capítulo 2, aprovechan la energía de las olas para generación de empuje contribuyente al desplazamiento del buque.

Diseños previos, como el construido y probado en un buque modelo en el año 1997 por el MIT (Figura 130), basado en las aletas de los pingüinos, dieron eficiencias de hasta el

70%, considerablemente superiores a las de los propulsores convencionales.

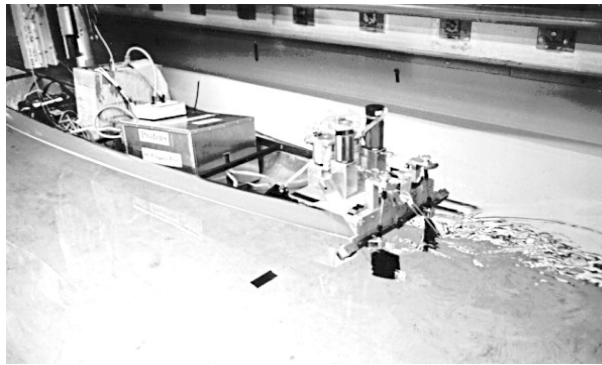


Figura 130 – Proteus, el barco pingüino (Fuente: Massachusetts institute of technology)

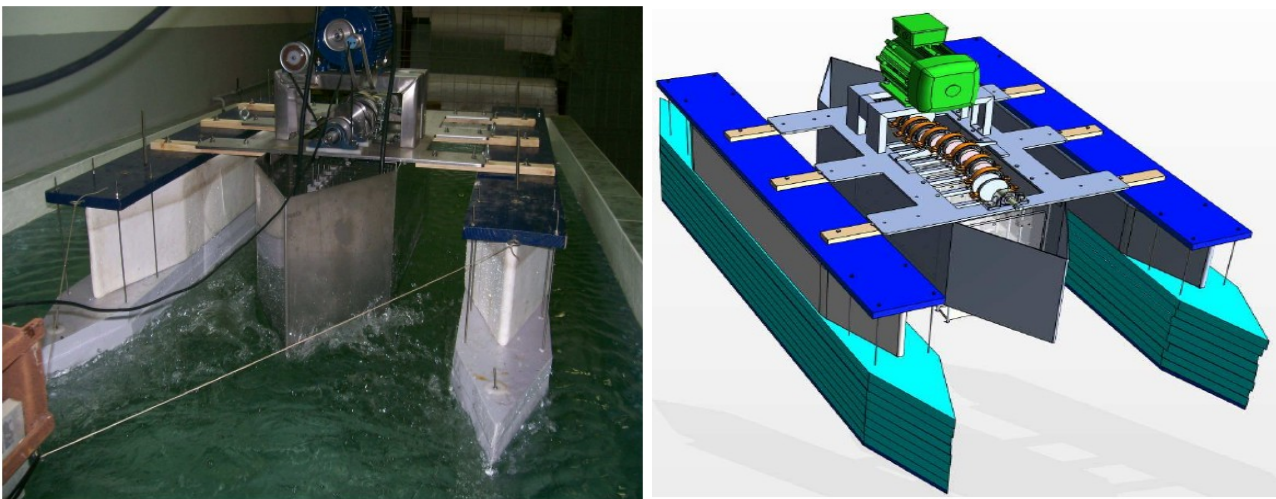


Figura 131 – Propulsor ondulante instalado en buque modelo (Fuente: Rodriguez,2010)

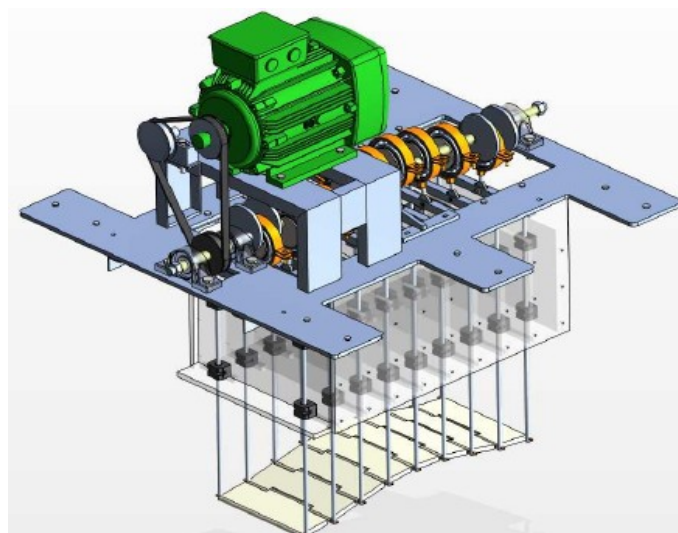


Figura 132 – Diseño de propulsor ondulante con motor de transmisión (Fuente: Rodriguez, 2010)

A pesar de su gran potencial, el diseño y desarrollo de propulsores oscilatorios/ondulantes no dispone todavía de la madurez empírica y técnica suficiente como para pensar en su aplicación a corto plazo en buques de la marina mercante. No obstante es una de las opciones más a tener en cuenta para buques futuros por su virtud de mayor respeto con el medio ambiente que los propulsores actuales convencionales.

4.5.4 Eyector de onda de choque/ Pursuit Marine Drive®

El eyector de onda de choque es un dispositivo de propulsión consiste en una tobera situada en el exterior del casco y bajo el agua, por esta se expulsa vapor generado en la cámara de máquinas, lo que produce, al mezclarse con el agua (fluido de trabajo) que transcurre a través de la misma, un chorro eyectado similar al producido por los propulsores ordinarios de propulsión a chorro. Su principio de actuación es el mismo que el de estos.

El primer eyector de onda de choque vio luz pública en el año 2002 [47], bajo el nombre comercial de Pursuit Marine Drive®, sin embargo existen también otras patentes y diseños, que si bien no han sido todavía comercializados, merecen igual atención, como el prototipo construido y probado en la Universidad Politécnica de Catalunya en el año 2004 [48].

El propulsor Pursuit Marine Drive® fue comercialmente planteado como aplicación a embarcaciones de náutica deportiva o embarcaciones ligeras equipadas con hasta motores de hasta 300 CV de potencia, no obstante, su aplicación como propulsor auxiliar en buques mercantes de mayor porte no queda teóricamente descartada, si bien requeriría mayores y más complejos estudios así como diseños de prototipos y modelos de predicción.

El eyector de onda de choque presenta ciertas ventajas que lo convierten en ser susceptible de dicha aplicación, entre las que destacan:

- **Reaprovechamiento de recursos:** Al funcionar con vapor, la energía empleada

para la generación del mismo puede obtenerse de medios en los que normalmente se desperdiciaría (p.e el calor de los gases de escape de una turbomáquina), lo que exige al propulsor de tener un generador con alimentación independiente y conduce al aumento de la eficiencia energética de la maquinaria principal, una reducción en su consumo y una menor cantidad de emisiones atmosféricas.

- **Eficiencia superior:** Según los ensayos realizados por Pursuit Dynamics[®], la eficiencia del propulsor Pursuit Marine Drive[®] es superior a la de otros propulsores convencionales, por lo que su consumo será menor y de igual modo se reducirán las emisiones atmosféricas.
- **Coste de fabricación y mantenimiento reducido:** Debido a la sencillez del propulsor (Figura) y a la ausencia de engranajes o ejes en el mecanismo, su coste tanto de fabricación como de mantenimiento es menor que el de un propulsor convencional de misma potencia en un 50% y 30% respectivamente.

El principal factor límite en su aplicación a corto plazo en buques de la marina mercante es su diseño y desarrollo, ya que este tipo de propulsores no disponen todavía de la madurez empírica ni técnica suficiente. En cuanto a su aplicación comercial, el único intento realizado hasta la fecha fue el ya mencionado, relativo a la empresa Pursuit Dynamics, que concluyó sin éxito.

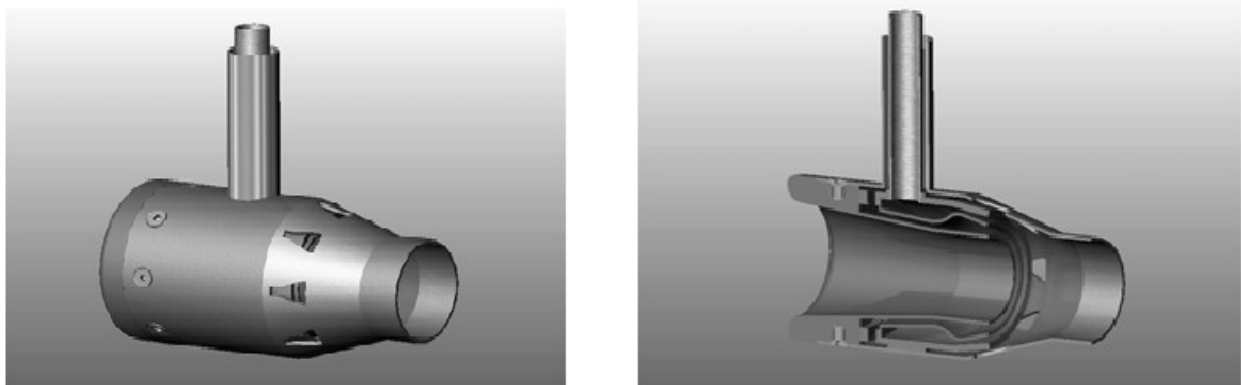


Figura 133 – Pursuit Marine Drive[®] (Fuente: Chalmers)

Capítulo 5 - Mejoras estructurales

5.1 Lubricación con aire

La lubricación con aire consiste en el cubrimiento de parte de la obra viva del buque con una corriente de aire que transcurre paralela al casco, con el objeto de formar una cavidad que reduzca la resistencia por fricción existente entre el casco y el agua y de este modo, reducir la demanda de propulsión necesaria para el avance del buque.



Figura 134 – Diseño conceptual de un buque lubricado con aire (Fuente: Wärtsilä, 2009)

El concepto de la disminución de la resistencia al avance en un buque mediante la administración de un gas bajo el casco de un buque fue primeramente introducido por el famoso científico Froude and Laval en el siglo XIX. No obstante, los intentos prácticos de aplicación de este principio llevados a cabo desde entonces resultaron fallidos, ya que el proceso no es tan sencillo como parece. Para su exitosa aplicación se requiere una profunda comprensión y conocimiento del comportamiento de fluidos multifase. Basado en los resultados de sistemáticas investigaciones llevadas a cabo desde los años 70, se han creado varios buques tipo Air Cavity Ship, buque con cavidad de aire/lubricado por aire, (ACS) de forma exitosa durante la última década.

El concepto de los buques tipo ACS se basa en la exitosa aplicación de ventilación en el pantoque o en la quilla de un buque. Un gas es suministrado alrededor de estas, las cuales responden a un perfil predeterminado para una correcta formación de una cavidad/capa de aire que separa la parte de contacto de la quilla/pantoque del agua, reduciendo así la resistencia hidrodinámica.

La reducción de la resistencia al avance obtenida en buques tipo ACS de tamaño real es de entre el 15%-40% [49], mientras que la potencia necesaria para mantener activa la cavidad de aire es menos del 3% de la potencia total de la maquinaria principal del buque. En buques de alta velocidad, se ha comprobado un aumento de la eficiencia total de entre el 15%-25% navegando en semi-desplazamiento. La presión del aire de la cavidad es mayor que la atmosférica, proporcionando sustentación adicional al buque.

Para usar de forma exitosa la lubricación con aire, la quilla y pantoque del buque deben de poseer un perfil adecuado que permita minimizar el gasto de energía necesaria para mantener la cavidad de aire activa. Existen tres importantes componentes en dicho perfil: la zona o etapa de formación de la cavidad, donde se instala un ventilador por el que se expulsa el aire presurizado; la zona de transcurso de la capa de aire, y una sección especial cerca del espejo de popa que proporciona un suave cierre de la zona de cavidad en el casco. La determinación de los parámetros geométricos de dichas zonas es la tarea más importante en el diseño de buques tipo ACS.

La actividad más extensa en actividades de investigación, desarrollo e innovación de buques tipo ACS se ha llevado a cabo en Rusia, donde en la últimas décadas se han desarrollado exitosamente varios barcos de tipo ACS de pequeño porte. No obstante, este conocimiento y experiencia no han sido suficiente como para conseguir la entrada de la tecnología ACS en el mercado. La falta de capital, los limitados esfuerzos de marketing así como escasa experiencia en el diseño de grandes buques dotados de lubricación ACS dificultan la inclusión de esta tecnología en los mercados mundiales desde Rusia en un futuro próximo. Los beneficios potenciales de la lubricación con aire siempre han sido de interés para la comunidad mundial de astilleros navales pero hasta la última década no se han logrado desarrollos lo suficientemente exitosos como para concluir resultados precisos.

En los últimos años ha tenido lugar una creciente actividad de los departamentos de

desarrollo e investigación europeos, americano, japoneses y coreanos en buques tipo ACS, pero debido a la naturaleza comercial de estos proyectos, no existe todavía información fiable disponible que permita estimar el progreso llevado a cabo. Si puede mencionarse no obstante, el que hasta la fecha es uno de los trabajos más exhaustivos realizados [50], llevado a cabo por el grupo holandés DK. En colaboración con compañías mundiales líderes en innovación marina como el instituto de investigación MARIN y la oficina de diseño Nevesbu, esta compañía ha realizado un extenso estudio de la potencial aplicación de lubricación con aire en buques tipo fast-ferry y de carga general. El programa de investigación llevado a cabo comprende evaluación numérica y experimental en canales de experiencia. Las pruebas y ensayos realizados demuestran un gran potencial para su aplicación en buques de gran tamaño y futura construcción con ahorros en el consumo de combustible de hasta un 15%. En términos comerciales, el sistema de lubricación por aire desarrollado por DK group (Figura 135) está pensado para buques de gran tamaño, con una eslora igual o superior a 275 metros.

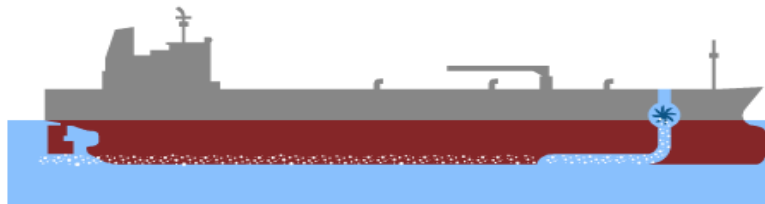


Figura 135 – Sistema de lubricación por aire diseñado por DK group (Fuente: Dkgroup)

Un concepto de reducción de la resistencia al avance de un buque mediante lubricación de aire consiste en la aplicación de micro burbujas en lugar de una corriente estable de aire. Resulta técnicamente más sencillo la creación de un flujo de micro-burbujas que la de una cavidad de aire, pero la eficiencia de tal aplicación es cuestionable. Los más recientes estudios, llevados a cabo por MARIN, concluyen con que la aplicación de micro-burbujas para reducir la resistencia al avance en buques no proporcionan ningún beneficio y invita a la comunidad científico-técnica a seguir adelante con el sistema de lubricación por aire.

5.2 Optimización de la forma y dimensiones del buque

5.2.1 Optimización de las líneas del casco

La resistencia al avance experimentada por un buque está estrechamente relacionada con la configuración y dimensión geométrica del casco. A tal efecto, dos de los parámetros más importantes son la eslora (E) del buque y el coeficiente de bloque (C_b), cuya relación determina una u otra disposición de la líneas del casco: una alto coeficiente E/C_b se traduce en un buque de líneas finas que ofrece poca resistencia al avance; si el coeficiente de bloque se mantiene constante y aumenta la eslora, se incrementará la superficie mojada, lo cual repercutirá en la resistencia al avance experimentada por el buque. En el último supuesto, un coeficiente de bloque demasiado elevado supone un casco de líneas romas, con una forma muy poco afinada próxima a la de una viga bruta, lo que conduce a una mayor resistencia al avance.

Incrementando la eslora de un buque tanque típico en un 10-15% puede conseguirse una reducción en la demanda de potencia cercana al 10% [22].

5.2.2 Optimización de las formas de proa (bulbo)

Optimizar la forma y configuración de los bulbos de proa puede resultar en una reducción en el consumo de combustible de hasta el 8% [51]. Una mayor longitud y ángulo de abertura respecto a la línea perpendicular de proa resulta en este beneficio (Figura 136). Es importante estudiar el comportamiento del buque con uno u otro tipo de bulbo y elegir de forma adecuada el que más se ajuste a las necesidades del buque.

5.2.3 Optimización de las formas de popa

Los diseños de las formas de la popa de un buque buscan proporcionar equilibrio entre la reducción de la resistencia al avance del buque y la separación del flujo de agua para su mejor aprovechamiento en el propulsor, de forma que aumente su eficiencia; ya que ambos parámetros suelen entrar en conflicto y se acostumbra a dar prioridad al segundo.

Existen varias alternativas de afinamiento de las formas de popa de forma que pueden

aplicar con éxito ambos parámetros. Una de ellas consiste en la incorporación de *ribetes interceptores planos* (interceptor trim plates), placas verticales de metal situadas verticalmente bajo el espejo de popa del buque a lo largo de su manga (Figura 137).

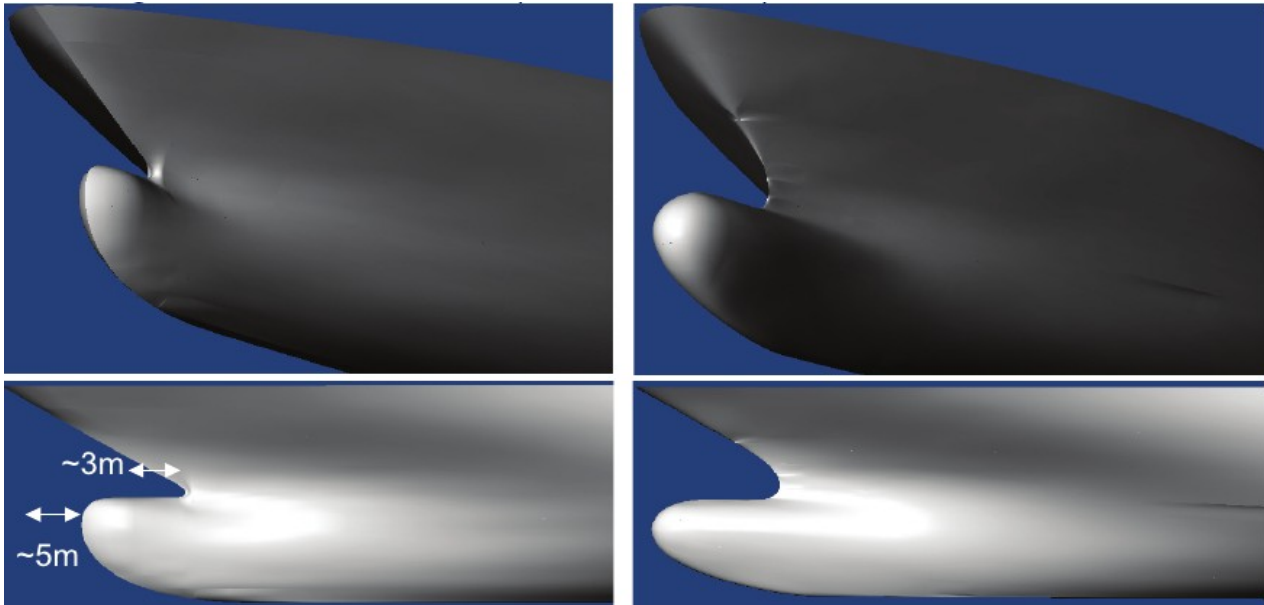


Figura 136 – Diseño de bulbo de proa convencional (imágenes superiores) y diseño modificado (imágenes inferiores) (Fuente: DELTA/MARIN)

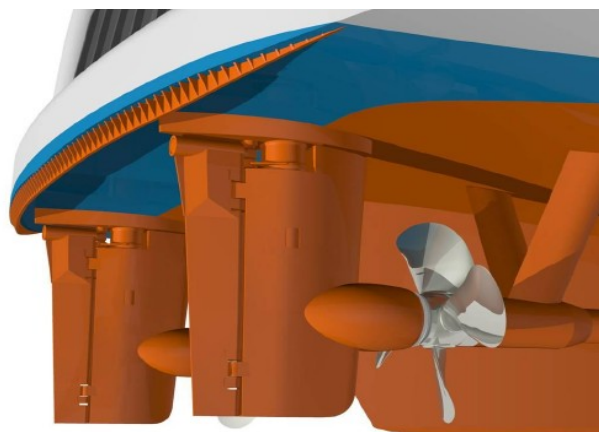


Figura 137 – Ribete interceptor plano (Fuente: Wärtsilä, 2009)

Estas crean un efecto de empuje sobre la popa del buque (Figura 138) al impulsar hacia abajo el agua proveniente de proa. El interceptor ha resultado ser más efectivo que los

acabados de popa convencionales, pero solo ha sido probado en cruceros y buques tipo Ro-Ro, con reducciones en la demanda de potencia del buque de entre el 1 y 5% [22].

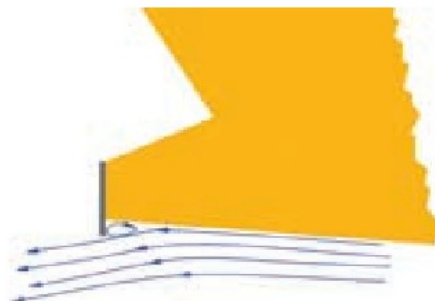


Figura 138 – Efecto de un interceptor en el flujo de agua proa-popa (Fuente: MARIN)

La aplicación de interceptores se llevó a cabo inicialmente en buques pequeños, pero recientes estudios llevados a cabo por el instituto noruego MARIN, prueban su exitosa aplicación en grandes cruceros y buques tipo Ro-Ro [52].

Otra de las opciones en la optimización de las formas de popa de un buque es la conocida como *extensión de la línea de flotación cola de pato* (ducktail waterline extension, Figura 139). Consiste en una extensión de la línea de flotación del buque entre 3 y 6 metros más allá del espejo de popa mediante una superficie paralela a la superficie del mar. Pretende reducir la extensión de codaste popel normalmente en contacto con el agua, lo cual tiene un efecto positivo en la reducción de la resistencia al avance. Su aportación a la reducción de la demanda de potencia es del orden de entre el 4 y 10%, lo que supone una reducción en el consumo de combustible de entre el 3 y 7% [22]. Puede combinarse con el interceptor ofreciendo muy buenos resultados. Dicho dispositivo puede aplicarse en cruceros, buques tipo Ro-Ro y buques porta-contenedores y ya está comercialmente disponible.

Otra de las medidas aplicables de carácter beneficiosos en la modificación de las formas de popa de un buque es la optimización del talón de la quilla. El diseño del talón de la quilla debe hacerse logrando que dirija el flujo de agua de proa a popa directamente hacia el propulsor. En regímenes de bajas velocidades resulta beneficioso disponer de más

volumen de agua en la parte inferior del talón de la quilla y la mínima posible por encima de la línea del eje de cola. En el cierre del talón de la quilla el flujo debería discurrir lo más pegado que pueda a este, pero con la mínima velocidad posible.



Figura 139 – Diseño conceptual de un dispositivo de extensión de la línea de flotación cola de pato instalada en un crucero (Fuente: Wärtsilä, 2009)

Una adecuada configuración puede suponer una reducción del 1.5%-2% en la demanda de potencia de un buque. En un buque porta-contenedores se estima una reducción en el consumo de combustible de aproximadamente el 2%.

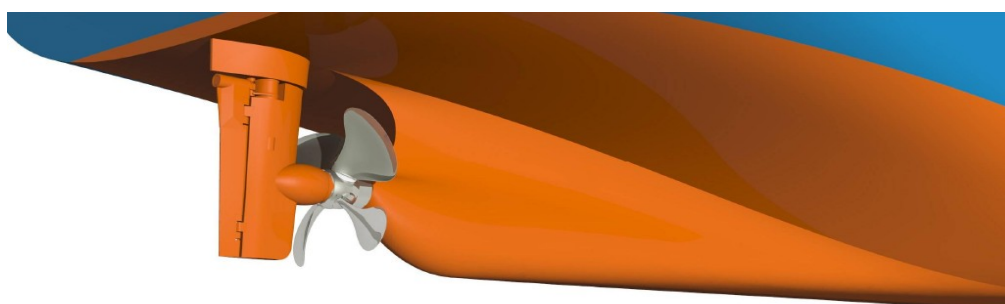


Figura 140– Diseño conceptual del talón de la quilla optimizado (Fuente: Wärtsilä, 2009)

5.2.4 Adecuación de la situación de la línea de ejes

En aquellos buques equipados con hélices convencionales situadas en líneas de eje externas, su disposición siguiendo el transcurso del flujo de agua de proa a popa resulta en una menor resistencia al avance y propicia un flujo sin distorsiones al propulsor. Para

favorecer este flujo sin perturbaciones también se hace necesaria la instalación de arbotantes adaptados a la forma de la corriente.

Una buena configuración de la línea de ejes y sus arbotantes pueden resultar en una disminución del consumo de combustible de aproximadamente el 2% en un ferry típico.

5.3 Empleo de materiales más ligeros

El empleo de estructuras compuestas por materiales ligeros puede reducir el peso el buque. Un material adecuado en este contexto resulta ser el aluminio o cualquier otro que ofreciendo propiedades similares sea incluso más ligero. Su aplicación es más que adecuada en aquellas estructura que no contribuyen a la resistencia estructural del buque o no están destinadas a soportar esfuerzos. Su empleo en frente a otros materiales más convencionales supone un disminución del desplazamiento del buque y de la resistencia al avance experimentada por el mismo.

5.4 Reducción del incremento de resistencia debido a aberturas practicadas en el casco

La distorsión en el flujo de agua de proa a popa debida a aberturas en el casco como túneles para las hélices de proa o tomas de agua puede llegar a ser elevada, incrementando la resistencia al avance del buque y restando eficiencia al propulsor. Una buena forma de paliar este indeseado efecto es practicando una muesca en la carena justo detrás del túnel/abertura (Figura 141) y añadir una rejilla cubriendo la entrada del mismo (Figura 142) que sea perpendicular al flujo de agua. Buscar de forma precisa el lugar adecuado para la realización de las aperturas en el casco es también importante.

El diseño y la correcta situación de las aberturas practicadas en el casco puede disminuir la demanda de potencia en un 5% en comparación con diseños pobres. En un buque porta-contenedores puede darse una disminución en el consumo de combustible de aproximadamente el 5% [51].

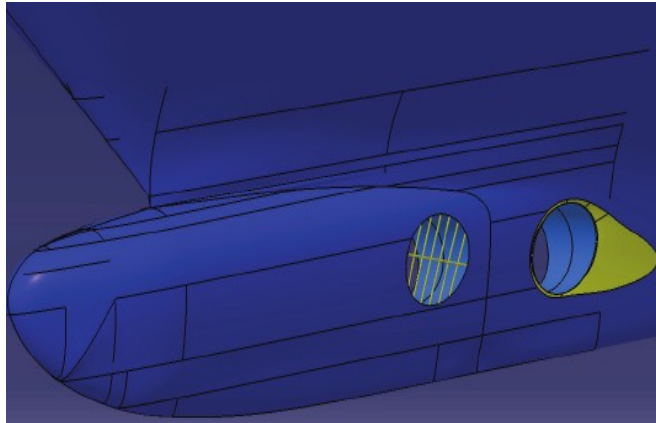


Figura 141 – Rejilla instalada en un túnel de hélice de proa (abertura más a proa) y muesca (abertura más a popa) (Fuente: DELTA/MARIN)

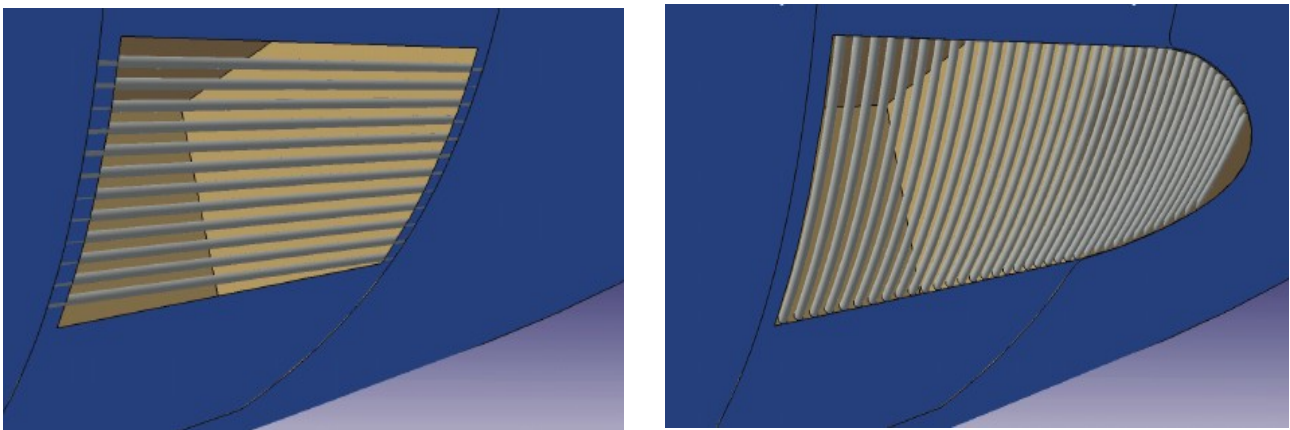


Figura 142 – Toma de agua de forma convencional con rejilla no perpendicular al flujo de agua (izquierda) y toma de agua con muesca y rejilla perpendicular al flujo de agua (derecha) (Fuente: DELTA/MARIN)

Capítulo 6 - Sistemas auxiliares y complementarios

6.1 Sistema de recuperación de calor residual

Se trata de un sistema encargado de recuperar la energía térmica de los gases de escape del motor o generador y aprovecharlos convirtiéndolos en energía eléctrica aprovechable para la alimentación de los servicios eléctricos del buque. Puede consistir en una caldera, una turbina de potencia y una turbina de vapor con alternador incorporado para la generación de electricidad.

El aprovechamiento de los gases de escape puede proporcionar entre el 10% y 20% de la potencia suministrada por el motor, lo que puede suponer un ahorro de combustible de aproximadamente el 10%.

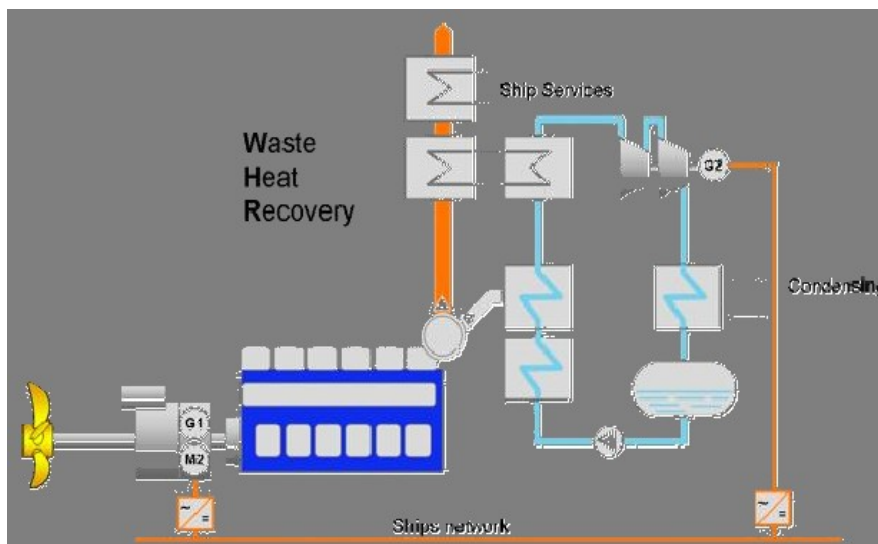


Figura 143 – Diagrama de un sistema de recuperación de calor residual (Fuente: Wärtsilä, 2009)

6.2 Torre de lavado

Una de torre de lavado es un dispositivo a través del cual circulan los gases de escape de un motor o generador con el fin de reducir su contenido en SO_x y material en partículas. Consiste en un elemento cilíndrico dotado de un conjunto de aspersores que vaporizan agua sobre los gases de escape. Al mezclarse el agua con los gases de escape aproximadamente el 98% de SO_x y el 80% del material en partículas son llevados por el

agua, la cual es devuelta al mar, donde los SO_x se transforman en sulfatos no dañinos. El agua empleada en las torres de lavado es agua marina y es transportada hasta ella mediante una bomba eléctrica.

Una torre de lavado típica puede ser como la dispuesta en la Figura 144. Este modelo pertenece a Aalborg Industries e incorpora adicionalmente un conducto calefactor para calentar los gases de escape mediante vapor una vez han pasado por la torre de lavado, evitando así la formación de gotas que puedan escapar al conjunto de aspersores.

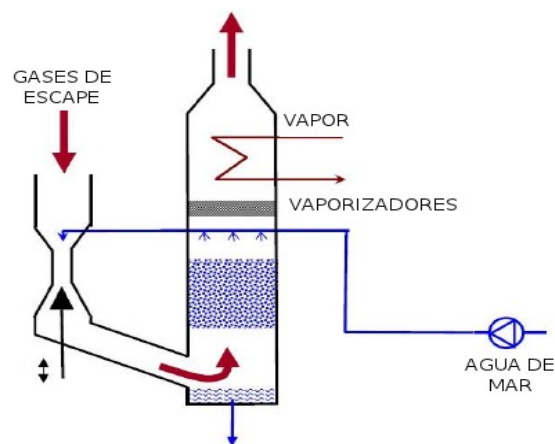


Figura 144 – Diagrama de torre de lavado (Fuente: Grontmij/Carbro; imagen adaptada por el autor)

6.3 Sistema de recirculación de los gases de escape

Este es un método para reducir la emisiones de NO_x en motores de combustión interna. Consiste en la reducción de la temperatura de combustión a fin de mantenerla por debajo del umbral térmico de formación de NO_x . Dicha reducción se obtiene haciendo recircular el aire de escape por el motor mezclado con aire ambiente, actuando así de comburente pero con mayor capacidad calorífica y menor cantidad de oxígeno, lo que impide alcanzar el umbral térmico para la formación de NO_x ya que disminuye la temperatura de la combustión.

Pueden existir distintas configuraciones para un sistema de recirculación de los gases de

escape más o menos complejas y eficientes. A modo de ejemplo, se comenta a continuación uno de los diseñados por la compañía MAN para su instalación en un buque tipo bulk-carrier de última generación [53].

El mencionado sistema consiste principalmente en una conexión desde el motor/generador principal dirigida a la unidad de recirculación de gases con salida a la toma de aire del motor. La unidad de recirculación de gases está compuesta por tres partes:

- Una torre de lavado dispuesta para la eliminación de los SO_x y materiales particulados de los gases de escape del motor para prevenir daños al mismo. Para ello emplea agua fresca recirculada limpiada continuamente y neutralizada con NaHO en una unidad especial de limpieza de agua.
- Un enfriador dispuesto para enfriar los gases de escape e impedir que al mezclarse con el aire de admisión aumente su temperatura.
- Un calentador controlado por frecuencias dispuesto para superar la diferencia de presión entre el conducto de admisión de aire y el de los gases de escape.

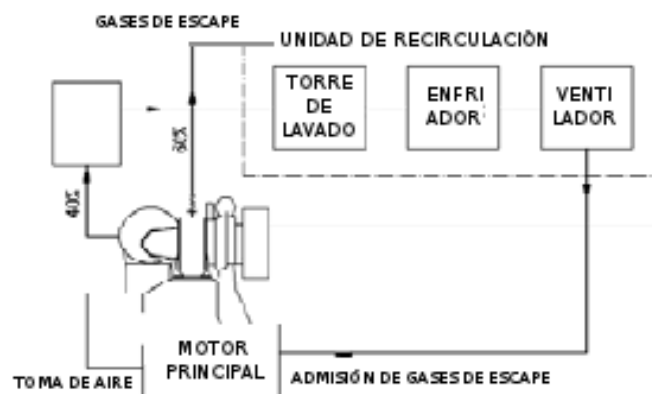


Figura 145 – Diagrama de sistema de recirculación de gases (Fuente: Schnack and Søren, 2009; imagen adaptada por el autor)

La tasa de recirculación es igual a 0.3 con el motor en máxima carga, aumentando a 0.4 para cargas inferiores al 75%. El consumo de agua de la torre de lavado corresponde al

agua condensada formada a partir de los gases de escape, por lo que no existe necesidad de una fuente distinta de agua.

6.4 Sistema de agua en combustible

Mezclar agua con el combustible gasóleo del buque posibilita la reducción de emisiones de NO_x . Se ha comprobado que añadiendo un 50% de agua a una cantidad determinada de combustible gasóleo estas emisiones pueden reducirse entre un 30% y 35%, pero con la desventaja de incrementar las emisiones de CO_2 entre un 1% y 2 más y aumentar el índice de consumo de combustible del motor. Es una forma alternativa de conseguir reducciones en las emisiones de NO_x sin la necesidad de efectuar modificaciones en o ajustes mecánicos en el motor principal, lo que permitiría al buque cumplir con el límite IMO Tier II.

El agua mezclada con el combustible reduce las emisiones de NO_x debido a que el umbral térmico de formación de los óxidos se reduce debido a la alta capacidad calorífica del vapor del agua y la absorción de calor por su vaporización.

Se ha observado experimentalmente que la formación de material en partículas disminuye cuando se mezcla agua con el combustible gasóleo de a bordo debido a una segunda atomización experimentada por las partículas del combustible, el cual ocurre por que el punto de ebullición del agua es inferior al del combustible.

Las emisiones de CO y THC son también reducidas debido a que la presencia de agua en el combustible supone un aumento de radicales hidróxilos, los cuales son esenciales para la oxidación de CO y THC.

Capítulo 7 – Valoración económica

7.1 Metodología

Para la valoración económica de los distintos medios de propulsión o generación energética auxiliar, así como de los propulsores considerados, se ha escogido el método propuesto por la OMI del cálculo de los costes marginales de reducción y su efectividad [54], mientras que para la valoración económica del empleo de combustibles alternativos y sus medios de aprovechamiento se ha propuesto un método basado en el anterior pero con ciertas modificaciones para adecuarse al cálculo de los costes y efectividad de los combustibles alternativos.

El método propuesto por la OMI sugiere para el análisis de la relación coste-efectividad de una medida de reducción de emisiones atmosféricas la Ecuación (14) MAC (Marginal Abatement Costs):

$$(14) \quad \boxed{MAC = \frac{\Delta C_j}{\alpha_j \times CF \times F} = \frac{K_j + S_j - E_j + \sum O_j}{\alpha_j \times CF \times F}}$$

donde:

ΔC_j = coste anual de la medida, siendo a su vez producto de las siguientes variables (Eq. 15)

$$\boxed{\Delta C_j = K_j + S_j - E_j + \sum O_j} \quad (15)$$

donde:

K_j = coste capital de la medida dividido entre los años para la reintegración del préstamo bancario más los intereses bancarios anuales. Los precios considerados, así como los años estimados para la devolución del préstamo bancario se muestran en la Tablas A, B, C, D, E, F y G del Anexo II. Como intereses bancarios se han considerado los estimados por el Banco Central Europeo [55] (Tabla 19). Por otra parte, los años de duración del préstamos utilizados en la valoración se

exponen en la Tabla 20

S_j = costes derivados de emplear la medida, a saber; mantenimiento, consumo adicional de combustible, tripulación adicional etc. Dichos costes se muestran en la Tabla del Anexo II.

ΣO_j = costes y pérdidas económicas causadas al buque por su instalación, es decir, por el tiempo y servicio perdido y/o la posible pérdida de espacio en el buque. No se han tenido en cuenta estos costes debido a falta de datos.

Meses	Intereses
3	0,16%
6	0,147%
12	0,174%
24	0,382%
36	0,701%
60	1,409%
84	2,02%
120	2,638%
240	3,179%
360	3,147%

Tabla 19 – Intereses bancarios en función de la duración del plazo del préstamo (Fuente: *European Central Bank*)

Medida	Duración del préstamo
Optimización de las aperturas en el casco	2 años
Lubricación con aire	5 años
Cometa tractora	6 años
Sistema de aprovechamiento de gases de escape	8 años
Paneles solares	3 años
Sistema de aprovechamiento de LNG (Motor de combustión interna y sistema de manejo y almacenamiento del combustible)	10 años
Hélice CLT	2 años

Tabla 20 – Duración de los préstamos

- E_j = representa el ahorro de combustible producido por la medida reductora, es producto del potencial reductor de la medida (α_j) por el combustible anual consumido (F) y el precio del mismo (P), tal y como muestra la Ecuación (16). Estos valores se muestran en la Tabla del Anexo II. Los consumos son los estimados por la OMI en su informe de las emisiones atmosféricas originadas por la actividad de la marina mercante [1].

$$E_j = \alpha_j \times F \times P \quad (16)$$

- CF = factor de emisión. En el trabajo original de la OMI [54] expresa la cantidad, en toneladas métricas, del CO_2 generado por la combustión de un tonelada de HFO o MDO. No obstante, y a diferencia del documento de la OMI, en este trabajo se ha valorado no solo el potencial reductor de CO_2 de las medidas si no también el de NO_x , SO_2 y PM con el objeto de lograr una comparación más amplia del potencial reductor entre los medios de propulsión y generación y el empleo de combustibles alternativos en sus respectivos sistemas de aprovechamiento. Los factores empleados son los estimados por la OMI en su informe de las emisiones atmosféricas originadas por la actividad de la marina mercante [1]; pueden apreciarse en la Tabla 21.

Tipo de emisión	Factor de emisión HFO (2,7% S)	Factor de emisión MDO (0,5%)	Unidades
CO_2	3,13	3,19	Tm de contaminante/Tm de combustible consumido
SO_2	0,054	0,01	
NO_x (motores de baja velocidad)	0,085		
NO_x (motores de velocidad media)	0,056		
PM_{10}	0,0067	0,0011	

Tabla 21 – Factores de emisión (Fuente: OMI)

Para la valoración de los combustibles alternativos y sus métodos de aprovechamiento se ha empleado la misma fórmula, pero se han tenido en cuenta las siguientes modificaciones a sus parámetros:

- E_j y F : El ahorro o gasto adicional por el consumo de combustible se ha determinado de acuerdo a la ecuación . Es decir, será la diferencia entre el precio de la cantidad de combustible consumida originalmente y el precio de la nueva cantidad de combustible alternativo consumido. Por otra parte, para el cálculo de la nueva cantidad de combustible consumido (F_k) se ha propuesto la siguiente Ecuación (17)

$$F_k = F_j - (F_j \cdot C_f) \quad (17)$$

donde:

F_j = cantidad de combustible originalmente consumido

C_f = Coeficiente de diferencia de consumo entre el sistema de aprovechamiento original y el nuevo sistema de aprovechamiento. Se obtiene de acuerdo a la Ecuación (18)

$$C_f = \frac{SFC_j - SFC_k}{SFC_j} \quad (18)$$

donde:

SFC_j = Consumo específico de combustible original. Se ha considerado un valor medio de 185 g/kw-hora de acuerdo a los estimado por diversos fabricantes de motores de combustión interna (Wärtsila, Rolls-Royce, MAN).

SFC_k = Consumo específico de combustible alternativo. Se ha calculado en base a la ecuación dada en el Capítulo 2, apartado 2.2.3. Para el cálculo del consumo de LNG se tomó como eficiencia térmica del motor un 45%, en base a las estimaciones de Wärtsila y Rolls Royce [12][13], mientras que como poder calorífico se utilizó el valor mostrado en el Capítulo 2 apartado 2.5.1 (48,71 kJ/kg) . Para el consumo específico de biodiésel se consideró una eficiencia térmica del

45% en los motores de media velocidad y del 50% en los de baja velocidad. El poder calorífico utilizado es el mostrado en el Capítulo 2 apartado 2.5.2 (37,3 kJ/kg). Los resultados de los cálculos del consumo específico de combustible pueden apreciarse en detalle en la Tabla del Anexo II. Para la valoración económica se ha empleado un valor medio de los mismos reflejado en la Tabla 22 junto con los coeficientes de diferencia de consumo.

Combustible	SFC (g/kw·h)	Cf
HFO/MDO	185	
Gas natural	160	0,1351
Biodiésel	215	-0,1621

Tabla 22 – Consumo específico de combustible y coeficiente de diferencia de consumo

- α_j y CF : Se ha considerado que los combustibles alternativos tienen un potencial reductor (α_j) del 100%, ya que sustituyen en su totalidad al combustible originalmente utilizado en el buque. No obstante, esta consideración en la determinación de las emisiones atmosféricas solo sería válida si se emplease un combustible ideal cuya combustión no generase emisiones atmosféricas. Por tanto, para solventar este problema, se considera una reducción en el factor de emisión equivalente al potencial reductor de esa emisión del combustible alternativo. A modo de ejemplo, se estimaría que para el cálculo de la efectividad ($\alpha_j \cdot CF \cdot F$) del LNG como reductor de emisiones de CO₂ (potencial reductor del 30%), el factor de emisión será un 70% inferior al factor de emisión original, representando de esta forma, la verdadera cantidad de CO₂ que el empleo de LNG reduce.

Para el cálculo concreto de la efectividad reductora de CO₂ del biodiésel se ha considerado no solo una reducción en el factor de emisión si no también un incremento debido al mayor consumo de biodiesel que de combustible original. El incremento en el factor (ΔCF) se ha calculado de acuerdo a la Ecuación (19).

$$\Delta CF = \frac{CO_2extra}{F_j} \quad (19)$$

donde:

$CO_2 extra$ = cantidad adicional de CO_2 generada por la mayor cantidad de biodiesel consumido. Este es el resultado de multiplicar la diferencia entre el consumo original y el nuevo consumo por el factor de emisión de CO_2 multiplicado a su vez por el potencial reductor del biodiesel. Los factores de emisión modificados según el combustible alternativo (LNG y Biodiésel) se muestran en la Tabla 23 y 24 respectivamente.

Tipo de emisión	Factor de emisión HFO (2,7% S)	Factor de emisión MDO (0,5%)	Unidades
CO_2	0,939	0,957	Tm de contaminante/Tm de combustible consumido
SO_2	0,054	0,01	
NO_x (motores de baja velocidad)	0,0731		
NO_x (motores de velocidad media)	0,0486		
PM_{10}	0,006566	0,001078	

Tabla 23 – Factores de emisión basados en el empleo de LNG

Tipo de emisión	Factor de emisión HFO (2,7% S)	Factor de emisión MDO (0,5%)	Unidades
CO_2	1,9938	2,0394	Tm de contaminante/Tm de combustible consumido
SO_2	0,054	0,01	
NO_x (motores de baja velocidad)	-0,0085		
NO_x (motores de velocidad media)	-0056		
PM_{10}	0,002245	0,00044	

Tabla 24 – Factores de emisión basados en el empleo de biodiesel

En lo concerniente a los costes se han empleado diversas fuentes para su obtención. Los costes de las medidas de propulsión y generación energética auxiliar son los estimados por la OMI en su informe [54]. De los costes empleados en los combustibles alternativos y sus sistemas de aprovechamiento, así como de los sistemas propulsores cabe destacar lo siguiente:

- **LNG:** Los costes de adquisición los motores de combustión interna duales o de gas se han determinado en base a los precios aproximados ofrecidos por los departamentos comerciales de las compañías Wärtsilä y Rolls-Royce; se ha considerado por tanto un precio medio de 350€/Kw. Respecto a los costes del sistema de manipulación y almacenamiento de LNG, se han utilizado los propuestos por Verbeek *et al* [56] para sistemas de almacenamiento de 610 m³. Estos incluyen el vaporizador, detectores de gas y demás dispositivos integrantes del sistema completo. Hay que tener en cuenta que este precio podría variar en la realidad de un que a otro en función de su tamaño y características.

Los costes de mantenimiento se han considerado nulos ya que se estiman iguales a los de un buque de funcionamiento con HFO o MDO [56].

El precio del combustible se ha determinado en base a la información suministrada por el Departamento de Energía de los Estados Unidos. Es quizá el coste más controvertido y difícil de estimar debido a las fluctuaciones del mercado energético y a la no existencia de una red de distribución de LNG, lo que, llegado a existir, podría alterar el costo del mismo. Pueden apreciarse en la Tabla del Anexo II.

- **Biodiesel:** El precio de biodiesel se ha determinado en base al coste del biodiesel B100 en Estados Unidos [57]. Al igual que el precio del LNG este puede diferir del real ya actualmente tampoco existe una red de distribución de biodiesel para buques mercantes.

Respecto al coste de las modificaciones y mantenimiento, estos se han

considerado nulos [19].

- **Hélices CLT:** Determinar el precio concreto de una hélice depende de diversas variables como la potencia del motor que la acciona, su velocidad de giro y las características del buque; lo que dificulta enormemente la obtención de un precio medio para un conjunto de buques, ya variar enormemente de unos a otros. Por este motivo, en la valoración económica de las hélice CLT se han considerado solamente 7 modelos de buque concretos de distinto tamaño. Sus características pueden verse en la Tabla 25. Los costes de la hélice han sido proporcionados por el departamento comercial de la empresa Sistemar.

Refer.	Tipo de buque	Eslora máxima	Manga	GT	DW (Calado Ver.)	Potencia (MP)	RPM Hélice	Tipo de hélice
1A	Gasero/ Ocean ⁷	284,4	42,5	90835	77217	28000	83	Paso fijo
1B	Gasero/ SSS ⁸	95,2	15,5	3827	3700	2380	146	Paso variable ⁹
2A	Petrolero/ Ocean	333,3	58	159990	302982,3	33274	76	Paso fijo
2B	Petrolero/ SSS	102,9	15,6	3408	4823	3360	160	Paso variable
3A	Granelero/ Ocean	291,8	45	91971	175800	16860	91	Paso fijo
3B	Carga general/ SSS	118	16,5	5574	7126,44	3500	142	Paso variable

7 Por tipo "Ocean" se entiende aquel buque que realiza viajes de tipo oceánico.

8 Por tipo "SSS" se entiende "Short Sea Shipping".

9 No se ha contabilizado el coste del motor en la hélice de paso variable. No obstante, se estima que el coste del motor puede ser aproximadamente el mismo que para una hélice convencional por lo que no se ha considerado un gasto adicional.

4A	Portacontenedores (Ocean)	397,7	56,4	170794	158200	89080	102	Paso fijo
4B	Portacontenedores (SSS)	148,53	22,7	9978	7700	12300	127	Paso variable
5A	Ferry (Ropax)/SSS	150,75	23	17729	1852,6	4500 x 2	136	Paso fijo

Tabla 25 – Buques considerados para la valoración de las hélices CLT

7.2 Valoraciones económicas, análisis de cálculos MAC y comentarios

7.2.1 Aprovechamiento de combustible nuclear en un reactor modular de helio con turbina de gas

Es todavía muy difícil precisar el coste exacto que podría tener un reactor modular de helio con turbina de gas, no solo por su inexistente comercialización si no por lo mucho que podría variar de un tipo de buque a otro debido a sus diferentes características y mayor o menor facilidad de instalación. Sin embargo, si podemos hacernos una idea aproximada a raíz de los costes adelantados por Vergara y Mckesson [7]. Su estimación de una planta compuesta por dos reactores y cuatro turbinas de gas ascendía a un total de 650 millones de dólares, correspondiendo el 96,9% al reactor y el restante a las turbina de gas (Tabla 26).

Elemento	Coste (Millones de dólares)
Estructuras y armazón del reactor	125
Reactor y primera carga de combustible	138
Controlador de combustible y protección contra la radiación	12
Instrumentación y control	18
Planta de tratamiento del gas	12
Vasijas de conversión de potencia e intercambiadores de calor	183
Misceláneos	32
Diseño	65
Construcción	45
Turbinas de gas	20
Coste total	680

Tabla 26 – Costes de una planta propulsora compuesta por dos reactores modulares de helio y cuatro turbinas de gas

En base a esta estimación se obtiene un coste aproximado de 3400 € por kw, valor claramente muy superior al coste medio de un motor diésel convencional (250 € kw). En

cuanto al combustible, el coste de recarga¹⁰ de un reactor típico BWR o PWR de 1000 MWe, es de 40 millones de dólares [58], incluido en esta cifra el coste de transporte y tratamiento de los residuos. Por otra parte, el coste de mantenimiento estimado para una planta de estas mismas características es de 0,65 céntimos de dólar por kw/h. Estos costes no obstante, pueden diferir considerablemente del de un reactor GT-MHR instalado en un buque, ya que, cómo se ha visto en el capítulo 2.1, son plantas de naturaleza distinta y operando en condiciones muy diferentes, pero ofrecen una idea aproximada de los costes reales. A esta cantidades habría además que añadir el coste formación y preparación de personal así como el incremento en el seguro del buque.

Haciendo balance se pueden predecir costes muy elevados de adquisición de la planta, mantenimiento y operatividad anual. El combustible sin embargo, sí puede suponer una diferencia e incluso un proporcionar margen de rentabilidad en función del consumo original de HFO o MDO del buque pero no lo suficiente como para considerarlo una opción rentable.

Todos los factores expuestos hacen pensar en la opción de un reactor nuclear con turbina de gas como una alternativa de eficacia cuestionable¹¹ y de coste muy elevado.

7.2.2 Aprovechamiento de hidrógeno en turbinas de gas

Debido a la escasez de diseños y falta de comercialización de sistemas para aprovechamiento del hidrógeno en turbinas de gas (en especial en lo concerniente a los dispositivos de manejo y almacenamiento) se hace difícil estimar los costes derivados de su empleo y por tanto hacer una valoración precisa coste/eficacia. No obstante, se puede hacer una estimación aproximada de este valor en base a precios y estudios actuales.

10 Por coste de recarga se entiende, en base a lo estipulado por el Instituto de energía nuclear, el coste concerniente a la reposición de un tercio del combustible del núcleo del reactor cada 18 meses.

11 Es innegable que el empleo de energía nuclear reduce completamente las emisiones atmosféricas sin importar del tipo que sean, pero en su lugar produce una cantidad de residuos nucleares difícilmente gestionable de forma definitiva y sostenible hoy en día.

En primer lugar, Veldhius [59] estima el coste del combustible del hidrógeno licuado en 1446 €/Tm. Este valor es claramente muy superior al de la tonelada métrica de MDO (724,28 €/Tm)¹², pero considerando su superior contenido energético y mejores propiedades de combustión, lo que se traduce en un menor consumo¹³, se concluye con que el empleo de hidrógeno ofrece un cierto margen de beneficio frente al empleo de MDO. Este margen se puede cuantificar en un beneficio aproximado del 38% sobre el coste de consumo original de MDO en una turbina de gas.

Respecto al precio del sistema de almacenamiento y manejo del hidrógeno licuado a bordo de un buque, Veldhius establece en 11,306 millones de euros el coste de una planta de 15267,2 m³ capaz de otorgar una autonomía de 5300 millas a un buque equipado con cuatro turbinas de gas LM 6000 sprint de 49220 MW de potencia. De esto se deduce entonces un coste aproximado de 740 € el m³. Este un precio claramente superior al coste medio de un sistema de almacenamiento de MDO, pero que, gracias al margen de beneficio del consumo, podría amortizarse en pocos años.

Teniendo en cuenta que el aprovechamiento de hidrógeno licuado en una turbina de gas tiene una capacidad reductora de emisiones atmosféricas muy elevada¹⁴, se puede estimar entonces una relación coste/eficacia baja, lo que económicamente le convierte en una buena medida de reducción de emisiones en aquellos buques donde ya se empleen turbinas de gas. Sin embargo, en buques que emplean motores de combustión interna, su relación coste/eficacia resultará superior, ya que el consumo y precio del combustible (HFO) serán considerablemente inferiores mientras que el coste de una turbina de gas se mantiene por encima del de un motor de combustión interna.

12 Valores en Singapur el día 5 de Febrero de 2012 con una cotización de 0,76 €/\\$.

13 En un turbina de gas aeroderivada LM 6000 Sprint con una eficiencia térmica del 42.5%, la combustión de hidrógeno licuado añade un incremento a esta del 1,92% y un incremento del 3,8% a la potencia de salida. Considerando el contenido energético del hidrógeno licuado (120,65 kJ/kg), el consumo específico será de 66,872 g/kw-hora [59] frente a los 201,681 g/kw-hora del MDO.

14 Capacidad condicionada por la fuente energética empleada para la obtención del hidrógeno.

7.2.3 Aprovechamiento de LNG en motores de combustión interna

De la Figura O del Anexo II se deduce que el aprovechamiento de gas natural en motores de combustión interna:

- Presenta la relación coste/efectividad de reducción de emisiones de CO₂ más elevada de todos los medios evaluados en buques de más de 10000 toneladas (salvo buques de carga general) y gaseros de menos de 50000 metros cúbicos dotados de motores de combustión interna de media velocidad. En todo tipo de buques de carga general, petroleros de entre 5000 y 9999 toneladas de peso muerto, portacontenedores de hasta 1999 TEUs de capacidad, cargueros de vehículos, Ro-Ros de menos de 1999 Im, cualquier tipo de ferry y cruceros de entre 2000 y 10000 GT empleen motores de combustión interna de media velocidad presenta la segunda mejor relación coste/efectividad. En el resto de buques presentan la tercera mejor relación coste/efectividad de reducción de emisiones de CO₂.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad de reducción de emisiones de SO₂ en petroleros de menos de 60000 toneladas de peso muerto, quimiqueros de entre 10000 y 20000 toneladas y menores de 5000 toneladas, gaseros con capacidad menor a 50000 metros cúbicos, graneleros de más de 10000 toneladas, cualquier buques de carga general, todos los buques portacontenedores, cualquier cargueros de vehículos, ferry y cruceros de menos de 10000 GT equipados con motores de combustión interna de media velocidad. En el resto de buques presenta la tercera mejor relación de coste/efectividad.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad de reducción de emisiones de NO_x en petroleros de menos de 60000 toneladas de peso muerto, quimiqueros de entre 10000 y 20000 toneladas y menores de 5000 toneladas, gaseros con capacidad menor a 50000 metros cúbicos, graneleros de más de 10000 toneladas,

cualquier buques de carga general, todos los buques portacontenedores, cualquier cargueros de vehículos, ferry y cruceros de menos de 10000 GT equipados con motores de combustión interna de media velocidad. En el resto de buques presenta la tercera mejor relación de coste/efectividad.

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad de reducción de emisiones de PM_{10} en petroleros de menos de 60000 toneladas de peso muerto, quimiqueros de entre 10000 y 20000 toneladas y menores de 5000 toneladas, gaseros con capacidad menor a 50000 metros cúbicos, graneleros de más de 10000 toneladas, cualquier buques de carga general, todos los buques portacontenedores, cualquier cargueros de vehículos, ferry y cruceros de menos de 10000 GT equipados con motores de combustión interna de media velocidad. En el resto de buques presenta la tercera mejor relación de coste/efectividad.

7.2.4 Aprovechamiento de gas natural e hidrógeno en pilas de combustible

Debido a que no existen ni prototipos ni diseños de pilas de combustible adaptadas a buques mercantes, resulta muy difícil realizar una valoración precisa de su relación coste/efectividad. El único prototipo, y no de carácter marino si no industrial, cuyo valor puede conocerse [60] y cuya aplicación podría ser la de medio principal de proulsión, es el de una pila de combustible de óxido solo en conjunción con una turbina de gas realizado para Siemens Westinghouse, Rolls-Royce Allison y el departamento de energía de Estados Unidos. El presupuesto estimado para este modelo, de 20 MWe de potencia, fue de 20 millones de dólares, lo que resulta en un coste de 1000 €/kW. Este, aunque todavía orientativo, ya que el coste variará al aplicarse a un buque mercante, es un coste elevado; sin embargo hace pensar que su relación coste/efectividad sería bastante favorable a su empleo, debido prncialmente a su menor consumo y al coste inferior del combustible (LNG).

En lo que respecta a pilas de menor potencia actualmente comercializadas y

potencialmente aplicables a buques, las de tipo PEM de 250 kw de potencia presentan un coste de entre 400 y 1000 dólares por unidad [61]. Este coste es elevado si lo comparamos con los costes de un generador eléctrico habitual, lo que, considerando su superior consumo, baja densidad energética, y aun teniendo en cuenta el inferior coste del combustible, llevan a pensar en una elevada relación coste/efectividad.

En potencias inferiores, del orden de 80 kw, el coste es sensiblemente inferior; de acuerdo al departamento de energía de los Estados Unidos [62] una pila de esta potencia del tipo PEM funcionando directamente con hidrógeno tendría un coste de unos 49\$/kw¹⁵. Este podría presentarse como un coste muy competitivo que lleva a pensar, aun teniendo en cuenta el coste superior del combustible, en una baja relación coste/efectividad.

7.2.5 Aprovechamiento de biodiésel en motores de combustión interna

De la Figura P del Anexo II se deduce que el aprovechamiento de biodiésel en motores de combustión interna:

- Presenta la segunda relación coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de CO₂.
- Presenta la segunda relación coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de SO₂.
- Presenta la segunda relación coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de PM₁₀.

7.2.6 Cometa tractora

De la Figura M del Anexo II se deduce que el empleo de una cometa tractora como medio de propulsión auxiliar:

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de CO₂ en petroleros de crudo de entre 10000 y 60000 toneladas de peso muerto y aquellos menores de 10000 toneladas, petroleros de productos mayores de 60000

¹⁵ Considerando una facturación anual de 500000 unidades.

toneladas y menores de 5000 toneladas, quimiqueros de entre 5000 y 10000 toneladas y aquellos menores de 5000 toneladas, graneleros de más de 200000 toneladas y aquellos menores de 9999 toneladas. En petroleros de crudo de entre 60000 y 200000 toneladas de peso muerto, petroleros de productos de entre 5000 y 60000 toneladas, quimiqueros de entre 10000 y más de 120000 toneladas y aquellos menores de 5000 toneladas, gaseros de LPG, graneleros de de hasta 200000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad. En petroleros de entre 120000 y 200000 y gaseros LNG presentan la cuarta mejor relación coste/efectividad.

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de SO_2 en petroleros de crudo de entre 10000 y 60000 toneladas de peso muerto, petroleros de productos mayores de 60000 toneladas, quimiqueros de entre 5000 y 10000 toneladas, graneleros de más de 200000 toneladas y aquellos menores de 9999 toneladas. En petroleros de crudo de entre 60000 y 80000, aquellos de más de 200000 toneladas de peso muerto y aquellos menores de 10000 toneladas, petroleros de productos menores de 60000 toneladas, quimiqueros de entre 10000 y más de 20000 toneladas y aquellos menores de 5000 toneladas, gaseros de LPG y graneleros de de entre 100000 y 200000 y hasta 60000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad. En petroleros de entre 120000 y 200000 toneladas de peso muerto, graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas y gaseros LNG presentan la cuarta mejor relación coste/efectividad.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de NO_x en petroleros de crudo de entre 10000 y 60000 toneladas de peso muerto, petroleros de productos mayores de 60000 toneladas, quimiqueros de entre 5000 y 10000 toneladas, graneleros de más de 200000 toneladas y aquellos menores de 9999 toneladas. En petroleros de crudo de entre 60000 y 80000, aquellos de más

de 200000 toneladas de peso muerto y aquellos menores de 10000 toneladas, petroleros de productos menores de 60000 toneladas, quimiqueros de entre 10000 y más de 20000 toneladas y aquellos menores de 5000 toneladas, gaseros de LPG y graneleros de de entre 100000 y 200000 y hasta 60000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad. En petroleros de entre 120000 y 200000 toneladas de peso muerto, graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas y gaseros LNG presentan la cuarta mejor relación coste/efectividad.

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de PM_{10} en petroleros de crudo de entre 10000 y 60000 toneladas de peso muerto, petroleros de productos mayores de 60000 toneladas, quimiqueros de entre 5000 y 10000 toneladas, graneleros de más de 200000 toneladas y aquellos menores de 9999 toneladas. En petroleros de crudo de entre 60000 y 80000, aquellos de más de 200000 toneladas de peso muerto y aquellos menores de 10000 toneladas, petroleros de productos menores de 60000 toneladas, quimiqueros de entre 10000 y más de 20000 toneladas y aquellos menores de 5000 toneladas, gaseros de LPG y graneleros de de entre 100000 y 200000 y hasta 60000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad. En petroleros de entre 120000 y 200000 toneladas de peso muerto, graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas y gaseros LNG presentan la cuarta mejor relación coste/efectividad.

7.2.7 Paneles solares

De la Figura N del Anexo II se deduce que el empleo de paneles solares en buques:

- Presenta la relación coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de CO_2 .
- Presenta la relación coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de SO_2 .
- Presenta la relación coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de NO_x .
- Presenta la segunda coste/efectividad más baja en reducción de emisiones de PM_{10} .

7.2.8 Lubricación con aire

De la Figura K del Anexo II se deduce que el empleo de lubricación con aire:

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de CO_2 en petroleros de crudo de entre 10000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, en gaseros LPG de más de 50000 metros cúbicos, gaseros LNG de cualquier capacidad, graneleros de entre 100000 y más de 200000 toneladas de peso muerto y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEU. En graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad más alta.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de SO_2 en petroleros de crudo de entre 10000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, en gaseros LPG de más de 50000 metros cúbicos, gaseros LNG de cualquier capacidad, graneleros de entre 100000 y más de 200000 toneladas de peso muerto y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEU. En graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad más alta.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de NO_x en petroleros de crudo de entre 10000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, en gaseros LPG de más de 50000 metros cúbicos, gaseros LNG de cualquier capacidad, graneleros de entre 100000 y más de 200000 toneladas de peso muerto y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEU. En graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad más alta.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de PM_{10} en petroleros de crudo de entre 10000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, en gaseros LPG de más de 50000 metros cúbicos, gaseros LNG de

cualquier capacidad, graneleros de entre 100000 y más de 200000 toneladas de peso muerto y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEU. En graneleros de entre 60000 y 100000 toneladas presenta la tercera mejor relación coste/efectividad más alta.

7.2.9 Optimización de las aberturas practicadas en el casco

De la Figura J del Anexo II se deduce que de la optimización de las aberturas practicadas en el casco:

- Presenta la relación coste/efectividad más alta en reducción de emisiones de CO₂.
- Presenta la relación coste/efectividad más alta en reducción de emisiones de SO₂.
- Presenta la relación coste/efectividad más alta en reducción de emisiones de NO_x.
- Presenta la segunda coste/efectividad más alta en reducción de emisiones de PM₁₀.

7.2.10 Aprovechamiento del calor de los gases de escape

De la Figura L del Anexo II se deduce que el aprovechamiento del calor de los gases de escape:

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de CO₂ en Ro-Ros de más de 2000 lm y cruceros de entre 10000 y 100000 GT. En petroleros de crudo de entre 120000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, gaseros LNG y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEUs presenta la tercera mejor relación coste/efectividad mientras que petroleros de crudo de más de 200000 toneladas de peso muerto presenta la cuarta mejor relación.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de SO₂ en Ro-Ros de más de 2000 lm y cruceros de entre 10000 y 100000 GT. En petroleros de crudo de entre 120000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, gaseros LNG y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEUs presenta la tercera mejor relación coste/efectividad mientras que petroleros de crudo de más

de 200000 toneladas de peso muerto presenta la cuarta mejor relación.

- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de NO_x en Ro-Ros de más de 2000 lm y cruceros de entre 10000 y 100000 GT. En petroleros de crudo de entre 120000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, gaseros LNG y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEUs presenta la tercera mejor relación coste/efectividad mientras que petroleros de crudo de más de 200000 toneladas de peso muerto presenta la cuarta mejor relación.
- Presenta la segunda mejor relación coste/efectividad en reducción de emisiones de PM_{10} en Ro-Ros de más de 2000 lm y cruceros de entre 10000 y 100000 GT. En petroleros de crudo de entre 120000 y más de 200000 toneladas de peso muerto, gaseros LNG y portacontenedores de entre 2000 y más de 8000 TEUs presenta la tercera mejor relación coste/efectividad mientras que petroleros de crudo de más de 200000 toneladas de peso muerto presenta la cuarta mejor relación.

Capítulo 8 - Revisión de la regulación actual de emisiones atmosféricas

En el año 1973, la Organización de las Naciones Unidas aprobaba el Convenio para la prevención de la contaminación por buques en la mar, Maritime Pollution (MARPOL), pero no sería hasta el año 1983 cuando entrase en vigor junto con el Protocolo 1978, activándose así el que se conocería como convenio MARPOL 73/78.

A lo largo de los años, se han incorporado al convenio diversos anexos que actualizan y adaptan el convenio al transporte marítimo vigente. El último anexo en incorporarse fue precisamente el Anexo VI, que lleva por título *Reglas para prevenir la contaminación Atmosférica ocasionada por los Buques*. Se aceptó el 26 de Septiembre del año 1997 con la condición para su entrada en vigor de la ratificación de 15 Estados miembros cuyo registro de flota superase en conjunto el 50% del tonelaje bruto mundial. El Anexo VI entró en vigor el 19 de mayo del año 2005, después de que Samoa se convirtiese en el año 2004 en el decimoquinto país en ratificar el convenio.

El Anexo VI establece límites para las emisiones de SO_x y NO_x, y prohíbe la emisión deliberada de sustancias reductoras de la capa de Ozono (incluyendo los halones y CFCs¹⁵).

Los límites establecidos por el Anexo VI se aplican con carácter retroactivo a los nuevos motores de potencia superior a 130 kW instalados en buques construidos el 1 de Enero del 2000 o después de esta fecha o a buques expuestos a grandes reparaciones. La regulación también se aplica a plataformas fijas y flotantes, tanto petrolíferas como perforadoras¹⁶.

Los límites definidos por el Anexo VI de MARPOL se conocen como estándares Tier I, Tier II y Tier III. Los estándares Tier I fueron definidos en la versión de 1997 del Anexo VI,

15 Se prohíbe la instalación de sistemas que empleen dicho tipo de sustancias en buques de nueva construcción, salvo aquellos que empleen HFCFs, los cuales están permitidos hasta el 1 de Enero del año 2020.

16 No se aplica la regulación de las plataformas a aquellas actividades de exploración y/o manipulación de minerales del lecho marino.

mientras que los estándares Tier II i Tier III fueron introducidos por las amendas adoptadas por el Anexo VI en el año 2008.

Las amendas adoptadas por el Anexo VI en 2008 establecen nuevos requisitos en la calidad de los combustibles marinos desde el año 2010, mientras que los estándares Tier II/III establecen nuevos límites en la cantidad de NO_x emitido a la atmósfera por los buques.

La revisión del Anexo VI entró en vigor el 1 de Julio del año 2010. En Octubre del año 2008 el anexo VI y había sido ratificado por 53 países, incluido los Estados Unidos, representando el 81.88% del tonelaje mundial.

El Anexo VI de MARPOL introduce el concepto de Áreas de Control de Emisiones (Emission Control Areas, ECAs), las cuales quedan definidas como lugares donde los límites de emisiones y son más estrictos. Estas áreas pueden ser designadas en función de una sola emisión (p.e Sulphur Emission Control Area, SECA) o de los tres tipos de emisión posible (SO_x , NO_x y PM). Las áreas definidas en el anexo VI son:

- Mar Báltico (SECA; adoptada en 1997, en vigor desde el año 2005)
- Mar del Norte (SECA; adoptada en 2005, en vigor desde el año 2006)
- Norteamérica, incluida la mayor parte de la costa Estadounidense y Canadiense (NO_x , SO_x ; adoptada en 2010, entrada en vigor en el año 2012).
- ECA del Caribe, incluyendo Puerto Rico y las islas Virginia (NO_x , SO_x ; adoptada en 2011, entrada en vigor en el año 2014).

Las regulaciones del Anexo VI de MARPOL incluyen límites en el contenido de azufre en combustible para limitar las emisiones de SO_x e indirectamente las emisiones de material en partículas (no existen límites específicos para las emisiones de material en partículas). Las SECA contienen límites más estrictos. En la Tabla 27 y Figura 146 pueden verse los límites en el contenido de azufre y las fechas de implementación de los mismos.

Fecha	Límite de azufre en combustible (% m/m)	
	SO _x ECA	Global
2000	1.5%	4.5%
2010	1.0%	
2012		3.5%
2015	0.1%	
2020 ¹⁷		0.5%

Tabla 27 – Límites de azufre en combustible (Fuente: Dieselnet; elaboración propia)

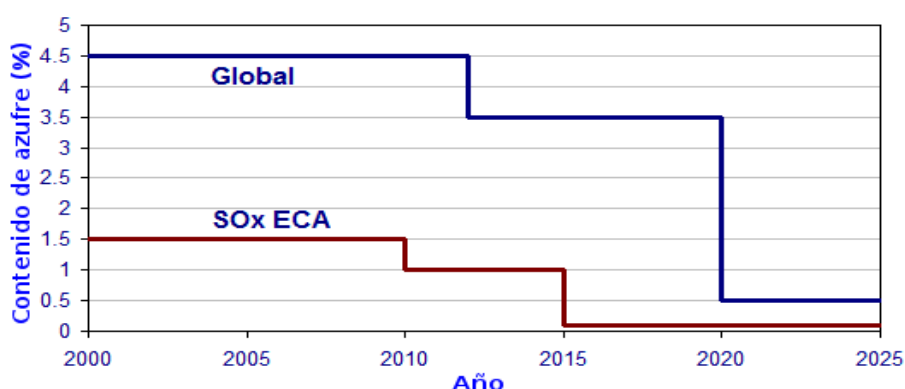


Figura 146 – Límites de azufre en combustible (Fuente: Dieselnet; modificación propia)

El Anexo VI de MARPOL contempla y permite el uso de combustibles pesados (HFO) siempre que cumplan con los límites de azufre en combustible marcados por la regulación.

También se permiten medidas alternativas para reducir las emisiones de SO_x tanto en áreas globales como aquellas de control de emisiones.

Los límites de emisión de NO_x han sido establecidos para motores diésel en función de su máxima velocidad de funcionamiento (n, rpm), tal y como se puede apreciar en las Figuras 147 y 148. Los estándares Tier I y Tier II son de aplicación global, mientras que los estándares Tier III se aplican única y exclusivamente en las áreas de control de emisiones de NO_x.

¹⁷ Existe como fecha alternativa el año 2025. Dicha cuestión será decidida en la revisión del Anexo VI planeada para el año 2018.

Estándar	Fecha	Límite de NO _x , g/kWh		
		n<130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
Tier II	2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7
Tier III	2016 ¹⁸	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	1.96

Figura 147 – Límites de emisiones de NO_x (Fuente: Dieselnets; elaboración propia)

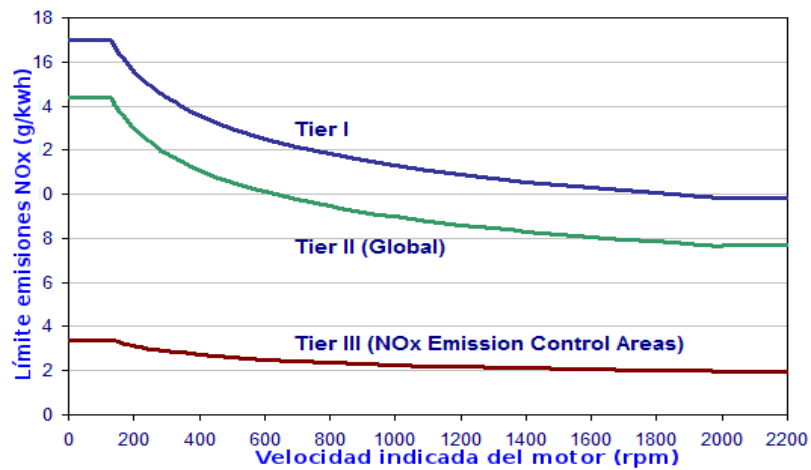


Figura 148 – Límites de emisiones de NO_x (Fuente: Dieselnets; elaboración propia)

18 Solo en áreas de control de emisiones de NO_x (El estándar Tier II se aplica en el exterior de ECAs).

Capítulo 9 - Ventajas y desventajas de las alternativas estudiadas

APROVECHAMIENTO DE COMBUSTIBLE NUCLEAR EN REACTOR MODULAR DE HELIO CON TURBINAS DE GAS		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>No genera emisiones de GEI/Cumple con OMI Tier II y Tier III</i>	<i>Emisión de residuos radioactivos</i>	<i>Persistencia de actos de piratería y terrorismo</i>
<i>Menor peso estructural que una instalación de igual potencia</i>	<i>Relación coste/efectividad muy elevada</i>	<i>Estado de la técnica</i>
<i>Renovación de combustible en grandes intervalos de tiempo (12/18 meses)</i>	<i>Limitado a aplicaciones con elevadas demandas de potencia</i>	
<i>Existencia de grandes reservas de combustible nuclear</i>		

APROVECHAMIENTO DE HIDRÓGENO EN TURBINAS DE GAS		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>No genera emisiones ni de CO₂ ni SO_x o PM/Cumple con OMI Tier II</i>	<i>Emisión NO_x/ No cumple IMO Tier III</i>	<i>Estado de la técnica</i>
<i>Energía renovable (aspecto condicionado a la fuente de su origen)</i>	<i>Relación coste/efectividad elevada como alternativa a motores de combustión interna</i>	<i>Producción y obtención del H₂</i>
<i>Relación coste/efectividad baja como alternativa a la turbinas de gas convencionales que operan con MDO</i>		

APROVECHAMIENTO DE GAS NATURAL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Muy elevado potencial de reducción en las emisiones de CO₂, SO_x, NO_x, PM/Cumple con OMI Tier II y Tier III</i>	<i>Energía no renovable</i>	<i>Falta de una infraestructura de distribución de gas natural licuado</i>
<i>Muy baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones de CO₂</i>	<i>Persiste las emisiones de CO₂</i>	<i>Alternativa únicamente aplicable a buques de nueva construcción</i>
<i>Baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones SO₂, NO_x, PM₁₀</i>		
<i>Estado de la técnica desarrollado en motores de combustión interna de media velocidad</i>		
<i>Disponibilidad comercial de motores de combustión interna de media velocidad</i>		

APROVECHAMIENTO DE GAS NATURAL EN PILAS DE COMBUSTIBLE

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Muy elevado potencial de reducción en las emisiones de CO₂, SO_x, NO_x, PM/Cumple con OMI Tier II y Tier III</i>	<i>Energía no renovable</i>	<i>Falta de una infraestructura de distribución de gas natural licuado</i>
<i>Relación coste/efectividad moderada en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>	<i>Persiste las emisiones de CO₂</i>	<i>Alternativa únicamente aplicable a buques de nueva construcción</i>
		<i>Estado de la técnica</i>

APROVECHAMIENTO DE BIODIESEL EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en las emisiones de CO₂, SO_x Y PM/Cumple con OMI Tier II</i>	<i>Aumenta las emisiones de NO_x/No cumple IMO Tier III</i>	<i>Falta de una infraestructura de distribución de biodiesel</i>
<i>Altamente biodegradable</i>	<i>Persiste las emisiones de CO₂</i>	<i>Sue empleo no ofrece ninguna ventaja económica al naviero</i>
<i>Aplicable inmediatamente a todos los tipo de buques</i>	<i>Relación coste/efectividad elevada en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>	
<i>Aprovechamiento de residuos¹⁹</i>	<i>Poder calorífico inferior/Mayor consumo</i>	
<i>Desarrollo agrícola²⁰</i>		
<i>Origen renovable</i>		

APROVECHAMIENTO DE COMBUSTIBLES EN TURBINAS DE GAS DE CICLO AVANZADO/TURBINA VORTICIAL JIRNOV		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Eficiencia térmica elevada</i>		<i>Estado de la técnica</i>
<i>Puede emplear cualquier tipo de combustible</i>		
<i>Aplicable a cualquier tipo de buque</i>		

19 La manipulación, tratamiento y evacuación de residuos supone un coste energético y económico a las empresas que lo producen y a la sociedad. Éste también es el caso de los residuos de aceites vegetales. Si éstos son empleados en la elaboración de biodiesel, se consiguen dos objetivos: reducción de los costes por el tratamiento o evacuación del residuo y minimización de los costes relacionados con la posible contaminación ambiental.

20 Una fuente renovable de producción de combustibles alternativos con origen en la agricultura, permite a la sociedad disponer de una fuente de empleo adicional y de un aprovechamiento de terrenos que, en algunos casos, no pueden ser usados para otros cultivos por restricciones políticas o condiciones del terreno.

APROVECHAMIENTO DEL VIENTO – COMETA TRACTORA

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicación limitada a cierto tipo de buques</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones de CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>		
<i>Aplicable inmediatamente a buques existentes y de nueva construcción</i>		

APROVECHAMIENTO DEL VIENTO – ROTORES FLETTNER ABATIBLES

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicación limitada a cierto tipo de buques</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Aplicable i a buques existentes y de nueva construcción</i>		<i>Estado de la técnica</i>
		<i>Falta de estudios y demostraciones sobre su funcionamiento</i>

APROVECHAMIENTO DEL VIENTO – VELAS RÍGIDAS

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicación limitada a cierto tipo de buques</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Aplicable a buques existentes y de nueva construcción</i>	<i>Obstrucción de los espacios y operaciones de carga</i>	<i>Disponibilidad comercial</i>

APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Energía totalmente limpia - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicación limitada a cierto tipo de buques</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Reducción en el consumo de combustible</i>		<i>Relación coste/efectividad muy elevada en reducción de emisiones de CO₂, SO₂, NO_x y PM₁₀</i>
<i>Aplicable a buques existentes y de nueva construcción</i>		
<i>Energía completamente renovable</i>		

APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA UNDEOMOTRIZ		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicación limitada a cierto tipo de buques</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
	<i>Aplicable solamente a buques de nueva construcción</i>	<i>Estado de la técnica</i>
		<i>Falta de estudios y demostraciones sobre su funcionamiento</i>
		<i>Falta de estándares sobre su diseño y empleo</i>

MOTORES ELÉCTRICOS SUPERCONDUCTORES

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Elevada reducción de consumo debido a la superior eficiencia frente a un motor de combustión interna - Reducción de emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Optimización de espacios del buque</i>		<i>Disponibilidad comercial limitada</i>
<i>Aplicable a todo tipo de buques de vieja y nueva construcción</i>		
<i>Mayor maniobrabilidad al emplear hélices de paso fijo</i>		

PROPULSOR MAGNETO HIDRODINÁMICO

Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Baja contaminación acústica</i>	<i>Aplicable solo a cierto tipo de buques</i>	<i>Baja eficiencia energética</i>
<i>Optimización de espacios del buque</i>	<i>Aplicable solo a buques de nueva construcción</i>	<i>Estado de la técnica</i>
<i>Mayor maniobrabilidad en comparación con hélices de paso fija</i>		

HÉLICES CLT		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Muy baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>		
<i>Mayor maniobrabilidad en comparación con hélices de paso fija convencionales</i>		
<i>Aplicable a todo tipo de buques, existentes y de nueva construcción</i>		

PROPULSORES CONTRARROTATIVOS EN APÉNDICE AZIMUTAL		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Muy baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>		
<i>Mayor maniobrabilidad en comparación con hélices de paso fija convencionales</i>		
<i>Aplicable a todo tipo de buques, existentes y de nueva construcción</i>		

PROPULSORES OSCILATORIOS		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Potencial reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Tecnología muy poco desarrollada</i>
<i>Mayor maniobrabilidad en comparación con hélices de paso fija convencionales</i>		

EYECTOR DE CHORRO DE VAPOR		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Potencial reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Tecnología muy poco desarrollada</i>
<i>Aumento de la maniobrabilidad del buque</i>		

RUEDA DE PALETAS DE GREEM		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Potencial reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Falta de estudios y demostraciones sobre su funcionamiento</i>

LUBRICACIÓN CON AIRE		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicable solo a ciertos tipos de buque</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Muy baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀/ en buques de gran tonelaje</i>		
<i>Aplicable a buques existentes y de nueva construcción</i>		

OPTIMIZACIÓN DE LAS ABERTURAS PRACTICADAS EN EL CASCO		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>		<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Muy baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>		
<i>Aplicable a todo tipo de buques, existentes y de nueva construcción</i>		

APROVECHAMIENTO DEL CALOR RESIDUAL DE LOS GASES DE ESCAPE		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicable a buques solo de nueva construcción</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀ en buques de gran tonelaje</i>	<i>Aplicable solo a ciertos tipos de buques</i>	

OPTIMIZACIÓN DE LAS FORMAS DEL BUQUE		
Ventajas	Desventajas/inconvenientes	Factores límites en su empleo actualmente
<i>Reducción en el consumo de combustible - Reducción en las emisiones de CO₂, NO_x, SO_x Y PM/</i>	<i>Aplicable a buques solo de nueva construcción</i>	<i>Falta de información y estándares sobre eficiencia energética</i>
<i>Baja relación coste/efectividad en reducción de emisiones CO₂, SO₂, NO_x, PM₁₀</i>	<i>Aplicable solo a ciertos tipos de buques</i>	

Conclusiones

En este capítulo se ha expuesto una cuantificación de las emisiones atmosféricas originadas por la actividad del transporte marítimo así como su impacto en el medio ambiente y la salud humana. En el apartado final se hace una pequeña reseña sobre el posible agotamiento del petróleo así como a la vasta dependencia que de él tiene el transporte marítimo. Del estudio de ambas, se deduce que:

- Las emisiones de CO₂ producidas por la actividad del transporte marítimo, aun sin llegar a representar en la actualidad un gran porcentaje (3,3%) en comparación con las emisiones globales, repercuten de manera significativa en el incremento del efecto invernadero del planeta tierra y por tanto en la temperatura media del mismo. No obstante, dicho efecto es especialmente notorio y más pernicioso a largo plazo, perjudicando a generaciones futuras; hecho especialmente relevante en la motivación para la búsqueda inmediata e inminente de alternativas al consumo de fuel y medidas para reducir dichas emisiones. De igual importancia es destacar, que, de forma paradójica, emisiones perniciosas como las de compuestos sulfurados (SO_x) contribuyen a la atenuación del efecto del CO₂ en la atmósfera, por lo que, al reducirse la emisiones de éstos, incrementará el impacto del CO₂ en la atmósfera. Todos estos motivos, son, a juicio del autor, suficientes para considerar de máxima prioridad la reducción de la cantidad de CO₂ emitido a la atmósfera por la actividad de los buques mercantes.
- Las emisiones de óxidos sulfurados (SO_x) y óxidos nitrosos (NO_x) producidas por la actividad de la marina mercante son muy cuantiosas, especialmente las de óxidos sulfurados, siendo las más altas originadas entre todos los medios de transporte. El efecto de ambas es además, más inmediatamente pernicioso que el producido por la liberación de CO₂ a la atmósfera, ya que afectan directamente a la salud humana, biodiversidad y equilibrio ecológico; los óxidos nitrosos son los

compuestos que mayormente contribuyen a la formación de ozono troposférico y eutrofización y los óxidos sulfurosos contribuyen a la acidificación de los ecosistemas y son origen de enfermedades y muertes por trastornos cardiorespiratorios. El aumento del ozono troposférico es, además, y tan solo después del CO₂, un pernicioso benefactor al incremento del efecto invernadero y por tanto, al aumento de la temperatura media del planeta, y cuyo efecto se mantiene de forma residual por lo menos durante 90 años.

- Las emisiones de materia en partículas, teniendo en cuenta las cantidades derivadas de la actividad del transporte marítimo (1,5 MMTm) y la repercusión que puede llegar a tener en la salud de las personas, merecen una especial atención desde el punto de vista de la reducción de emisiones.
- Considerando el impacto que puede tener la formación de monóxido de carbono y el carbono negro, se sugiere la reducción, en la medida de lo posible, del empleo de combustibles con alto contenido en carbono.
- Las emisiones de VOC y CH₄, si bien son de menor impacto, han de tratar de reducirse en la medida de lo posible.

Si bien no hay un dato exacto sobre el momento en que pueda producirse el agotamiento del petróleo ni la llegada al cénit de producción, todos los estudios realizados hasta la fecha coinciden en que entre este y el próximo siglo se alcanzará dicho punto; es decir, la sociedad, y en lo que a este estudio atañe, la actividad del transporte marítimo, sufrirán de forma inminente las consecuencias del agotamiento del petróleo o llegada al cénit de producción. Resulta entonces evidente la necesidad de entranar una búsqueda de nuevos compuestos o fuentes energéticas que puedan suplir a la actual o hacer un uso más restringido y controlado de los mismos, si bien esta segunda opción, no evitará alcanzar el cénit de producción del petróleo ni el agotamiento de sus reservas.

La reducción de emisiones atmosféricas originadas en la actividad del transporte marítimo

es, actualmente, y considerando las alternativas técnicas estudiadas en el presente trabajo, limitada, y en ningún caso, sostenible. Se identifican diversos factores que contribuyen a este hecho así como al incumplimiento de la condición de sostenibilidad:

- La ausencia de una regulación internacional que obligue a la reducción de emisiones de CO₂.
- La falta de estándares internacionales de eficiencia energética y su imposición legislativa.
- La falta de publicidad y fomento del empleo de medidas que contribuyan a disminuir las emisiones atmosféricas.
- La no existencia de ningún medio que permita aprovechar fuentes de energía renovable como la eólica, solar o undeomotriz como único medio de propulsión y/o generación energética y por tanto renunciar al empleo de combustibles fósiles.
- La no existencia de combustible alguno, teniendo en cuenta su modo de obtención y generación de emisiones u otros residuos, capaz de satisfacer la demanda energética de la flota mundial de la marina mercante atendiendo a criterios de sostenibilidad. Esto es debe entenderse de la siguiente manera: sí puede identificarse un combustible cuya combustión sea limpia y cuyo origen sea renovable, el hidrógeno. Sin embargo, la tecnología de obtención del mismo no cumple con estos criterios, ya que los procesos limpios y renovables de obtención del mismo²¹ son incapaces de generarlo en cantidad suficiente como para suplir la demanda de combustible de la flota mercante. Esto puede interpretarse no tanto como una carencia tecnológica sino como un consumo de la flota mercante demasiado alto. En cualquier caso, la tecnología actual para su aprovechamiento en buques es insuficiente²². Sin embargo, si se lograra equilibrar el consumo y la

21 Procesos electrolíticos que empleen fuentes energéticas renovables como la eólica, solar o mareomotriz.

22 No existen todavía motores marinos de combustión interna cuyo funcionamiento sea con hidrógeno ni tampoco pilas de combustible. Las turbinas de gas aeroderivadas, aun pudiendo emplearse, se ciñen a aquellas aplicaciones

generación de hidrógeno de forma limpia y renovable, y siempre que la tecnología de aprovechamiento de éste en buques haya madurado lo suficiente, podría pensarse objetivamente en el hidrógeno como el combustible de buques de futuras generaciones.

A pesar de esta limitación, es innegable que sí existen métodos para reducir las emisiones atmosféricas y que pueden contribuir en el futuro a lograr una condición de sostenibilidad en la actividad de la flota de la marina mercante. De los expuestos en el presente trabajo se extrapolan las siguientes conclusiones:

- La forma más eficaz de reducir las emisiones atmosféricas es el reemplazo del combustible primario empleado en la propulsión y generación energética de buques mercantes por otros cuya combustión produzca una menor cantidad de emisiones. De los estudiados, el gas natural licuado aprovechado en motores de combustión interna se presenta como el mejor sustituto a corto plazo, no solo por su naturaleza más limpia si no por que presenta ventajas económicas al naviero y es aplicable a la gran mayoría de buques de tonelaje medio nueva construcción de forma casi inmediata y a buques de gran tonelaje en un corto periodo de tiempo. A largo plazo, el hidrógeno, tal y como se comenta en el apartado anterior, es el combustible que ofrece el mayor potencial reductor y cuya naturaleza puede llegar a ser completamente renovable, ya sea aprovechado en motores de combustión interna, turbina de gas o pilas de combustible. Por otra parte, en el futuro es de esperar que su empleo ofrezca provechosos beneficios económicos al naviero, no solo por el aumento progresivo que experimentarán los costes de combustibles fósiles como el petróleo y gas natural, si no por la posible instauración de una economía energética basada en el hidrógeno, lo que claramente supondrá un inferior precio de adquisición respecto al actual.

El biodiésel, a pesar de su capacidad para reducir las emisiones de CO₂ y SO_x, su

concretas que demanden grandes potencias.

naturaleza biodegradable y renovable y su aplicación inmediata en todo tipo de buques y sin necesidad de grandes modificaciones; no puede competir económicamente con el combustible actual ni con otras alternativas como el LNG. Este aspecto podría mejorar a medida que aumente la producción de biodiésel y esta se haga menos costosa pero su empleo siempre se verá frenado por el incremento que su combustión supone en las emisiones de NO_x.

El combustible nuclear no parece representar una alternativa atractiva al empleo de combustibles fósiles. Su coste es muy elevado, su aplicación reducida; su potencial capacidad de convertirse en objeto de actos de piratería, difícilmente asumible tanto económicamente²³ como socialmente; y el tratamiento de sus residuos, un problema resuelto teóricamente, pero no en la práctica.

- De otros medios alternativos como la cometa tractora o la lubricación por aire, aun considerando su limitada eficacia, es innegable su contribución a la reducción de la cantidad de emisiones atmosféricas generadas por la actividad de la marina mercante y el hecho de que, aplicados a ciertos tipos de buque, presentan beneficios económicos al naviero. Su instalación además, puede realizarse en buques tanto existentes como de nueva construcción. Lo mismo ocurre con las hélices CLT y los propulsores contrarrotativos en cualquiera de sus configuraciones en dispositivo azimutal. Considerando entonces las ventajas de los mencionados, su falta de aplicación puede atribuirse a la ya mencionada ausencia tanto de una regulación internacional que obligue a la reducción de emisiones de CO₂ como a la ausencia de estándares internacionales de eficiencia energética y su imposición legislativa así como a una publicidad insuficiente sobre nuevos medios de propulsión.
- Las velas rígidas como dispositivo capaz de aprovechar la fuerza eólica presentan

23 El coste del seguro de un buque equipado con un reactor nuclear que navegue por aguas de marcada actividad pirata podría convertirse en un valor muy elevado dado el riesgo que entraña.

considerables dificultades a su empleo y su uso se ve reducido solo a ciertos tipos de buque. Su aporte teórico a la propulsión de un buque es, en teoría, más que considerable, pero se hace necesario profundizar más en su rendimiento así como en posteriores diseños que permitan vencer las dificultades propias de su naturaleza.

- Los rotores flettner abatibles presentan un considerable aporte teórico a la propulsión de un buque, y su sistema de abatimiento soluciona las principales dificultades impuestas por su diseño original o el de otros dispositivos de aprovechamiento del viento como las velas rígidas. No obstante, su comercialización es inexistente²⁴ y todavía no hay un número fiable de experiencias que garanticen los rendimientos teóricos.
- El aprovechamiento de la energía solar a bordo de un buque mercante es actualmente muy costoso mientras que el potencial reductor en el consumo de combustible, y por tanto en las emisiones atmosféricas, es muy bajo. Presenta la ventaja de poder aplicarse a varios tipos de buques tanto existentes como de nueva construcción y de ser la energía limpia con mayor potencial; la radiación anual recibida por la tierra es de aproximadamente 3850000 EJ [62], cantidad que, de aprovecharse totalmente, podría emplearse en la generación de energía eléctrica para abastecer 67900²⁵ veces el consumo de nuestra civilización. Su procedencia, y la vida de su fuente, la convierten en una energía inagotable a efectos prácticos y que no implica ninguna emisión atmosférica ni creación de residuo contaminante, salvo los derivados de la fabricación y reciclaje de los paneles solares. Actualmente el principal freno en su aplicación a bordo de buques mercantes es su elevado coste, pero también la ausencia de una regulación

24 La página web de la empresa Windagain, que supuestamente comercializaba los rotores flettner abatibles referidos en el Capítulo 3 del presente trabajo, ha dejado de existir en internet.

25 Considerando el consumo eléctrico anual de 57.6 EJ en el año 2005 [63].

internacional que obligue a la reducción de emisiones de CO₂ y la falta de estándares internacionales de eficiencia energética y su imposición legislativa.

- Los motores eléctricos, especialmente los motores eléctricos superconductores, ofrecen considerables ventajas medioambientales, y es de esperar que, con la mejora de la técnica de la superconductividad, en un futuro próximo ofrezcan también considerables ventajas económicas gracias al ahorro de consumo y espacio que proporciona al buque. Estas ventajas, en conjunción con la sinergia de los mismos con propulsores eléctricos como las hélices CRP en dispositivo azimutal, el propulsor MHD o medios de generación energética alternativa como las pilas de combustible o los paneles solares, los convierte en una de las medidas de reducción de emisiones atmosféricas más a tener en cuenta para su instalación en cualquier tipo de buque mercante.
- Las alternativas al diseño del buque, mejoras estructurales y mejoras en la maquinaria principal son fácilmente instalables en buques de nueva construcción. Su eficacia no es muy elevada pero tampoco lo es su coste (salvo en el caso del sistema de reaprovechamiento del calor de los gases de escape) y no son excluyentes respecto al empleo de otros medios alternativos.

Bibliografía

Citas

- [1] IMO MARINE ENVIRONMENT PROTECTION COMMITTEE; PREVENTION OF AIR POLLUTION FROM SHIPS Second IMO GHG Study 2009 Update of the 2000 IMO GHG Study ; Abril 2009
- [2] Corbett *et al*; Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment ; Environment Science and Technology, 2007
- [3] Eyring *et al*; Brief summary of the impact of ship emissions on atmospheric composition, climate, and human health ; Document submitted to the Health and Environment sub-group of the International Maritime Organization on 6 November 2007
- [4] Dalsøren *et al*; Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships. The contribution from major ship types and ports ; Atmospheric Chemistry and Physics Discussions; 2008
- [5] Ozono troposférico, Artículo online <http://www.eea.europa.eu/es/publications/92-828-3351-8/page005.html>); Agencia Europea de Medio Ambiente
- [6] Ritcher *et al*; Satellite measurements of NO₂ from international shipping emissions ; GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, 2004
- [7] Julio A. Vergara and Chris B. McKesson; Nuclear Propulsion in High-Performance Cargo Vessels ; 2002
- [8] Oskar Levander ; Turning the page in ship propulsion, by switching to LNG ; Gas as fuel for propulsion of ships - status and perspectives ; Copenhagen, March 3rd, 2008
- [9] Jürgen Harperscheidt ; Bunkering, infrastructure, storage, and processing of LNG ; Shipandoffshore N°1; 2011
- [10] BP Statistical Review of World Energy; June 2010
- [11] Der Norske Veritas; Greener shipping in the baltic sea; June 2010
- [12] Oskar Levander ; Turning the page in ship propulsion, by switching to LNG ; Gas as

fuel for propulsion of ships - status and perspectives ; Copenhagen, March 3rd, 2008

[13] Marco Andreola, The use of LNG as fuel for propulsion on board merchant ships , European Fuels Conference , Paris, March 8-11, 2011

[14] MAN Diesel & Turbo Readies ME-GI Gas Engine for Full-Scale Testing , Press release MAN Diesel & Turbo, 2010

[15] C. Bourne *et al*, APPLICATION OF FUEL CELLS IN SURFACE SHIPS , Rolls Royce Strategic Systems Engineering, 2001

[16] Anatoli A. Borissov, Dr., *et al*, HIGH EFFICIENCY ENERGY CONVERSION SYSTEM BASED ON MODIFIED BRAYTON CYCLE , ASME Internal Combustion Engine Division 2005 Spring Technical Conference ; Chicago, April 2005.

[17] Zhang X, Peterson C, Reece D, Haws R, Moller G; Biodegradability of biodiesel in aquatic environment, Transactions of the American Society of Engineers, St. Joseph, Mich. 1998

[18] Las microalgas oleaginosas como fuente de biodiesel: retos y oportunidades, Rev Latinoam Biotecnol Amb Algal 1(1):91-116; Loera-Quezada y Olguín; 2010.

[19] Richar Sadler; Biofuels and their impact on shipping industry, exposition at The Institute of Marine Engineering, Science and Technology; April 23, 2008

[20] Bunkerspot; June-July, 2008

[21] Schultz, O.; *et al*; Silicon Solar Cells with Screen-Printed Front Side Metallization Exceeding 19% Efficiency; 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2007.

[22] Wärtsilä; Energy Efficiency Catalogue, Ship Power R&D ; 2009.

[23] Melanie Hobson , *et al*; Low carbon commercial shipping , Report for the departament of transport, AEA Energy Departament; Newcastle Univesity, 2007.

[24] Kazuyuki Ouchi *et al*; Huge Hard Wing Sails for the Propulsor of Next Generation Sailing Vessel; Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Germany, June 2011.

- [25] Martin Rosander og Jens O. V. Bloch , Pelmatic Knud E. Hansen; Modern Windship; 2000.
- [26] Wallenius Wilhensem, Green Flagship; 2008
- [27] Christian Toman Borgen; Application of an active foil propeller; Norwegian University of Science and Technology, Department of Marine Technology, 2010.
- [28] WO 2009/07469 A1
- [29] Miquel Joan Pallarès Viña ; Hacia el motor superconductor: estudio de las interacciones entre un rotor superconductor y un estator convencional ; UPC, 2002
- [30] G. Snitchler, B. Gamble and S. Kalsi, “The Performance of a 5 MW High Temperature Superconductor Ship Propulsion Motor”, presented at the Applied Superconductivity Conference, Jacksonville, Florida, 7 October 2004.
- [31] Sonal Patel; Superconductor Motor for Navy Passes Full-Power Test; Press release; Power Business and technology for the global generation industry; March, 2009.
- [32] Development of Superconducting Coil for Ship Pod-Propulsion Motors; Koso FUJINO, Toshihiro HAYASHI, Takeshi SANAMI, Koji HISADA, Kazuya OHMATSU and Toru OKAZAKI, 1997
- [33] Ciwen Sha; MHD Marine Application; Institute of electrical engineering, Academia Sinica, China
- [34] E. D. Doss *et al*; MHD Undersea Propulsion: A Novel Concept with Renewed Interest; 1990
- [35] Optimal Design of Thruster System for Superconducting Electromagnetic Propulsion Ship, Proceedings of the 5th International Marine Design Conference May 24-27, 1994, Delft, the Netherlands.
- [36] LLUIS MASSAGUÉS VIDAL ; APORTACIONES AL ESTUDIO DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN MAGNETOHIDRODINÁMICA ; Departament d’Enginyeria Elèctrica Universitat Politècnica de Catalunya ; 2001.

- [37] Experimental Study of Performance on Helical Channel MHD Thruster with a Strong Magnetic Field, 2003
- [38] Gonzalo Pérez Gómez y Juan González-Adalid. Tip Loaded Propellers (CLT), Justification of their advantages over conventional propellers using the momentum theory; [International Shipbuilding Progress, Vol. 42, nº 429, 1995](#)
- [39] PROGRESO TECNOLÓGICO DE LAS HÉLICES CLT Y NUEVAS VÍAS PARA SU FINANCIACIÓN ; ANAVE - B.I.A. No 417 ; Agosto 2003
- [40] G. Pérez Gómez et al; Un hito español en la propulsión naval, rentabilidad de un amplio programa de I+D+i , Artículo técnico 75 aniversario, Ingenieros navales, p. 79-114, 2006.
- [41] Naoki Ueda, et al; The First Hybrid CRP-POD Driven Fast ROPAX Ferry in the World; Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol. 41 No. 6; 2004.
- [42] Hannu Jukola, Teuvo Ronkainen; Contra-Rotating Propellers – Combination of DP Capability, Fuel Economy and Environment; DYNAMIC POSITIONING CONFERENCE, October 17-18, 2006
- [43] Petteri Ämmälä Msc; CRP Azipod® for Ultra Large Container Ships, An Advanced Cost-Effective Solution;ABB Industry Oy, Marine Group Helsinki, Finland.
- [44] Mazher Mahmood, Nick Rufford; QE2 returns to west germany for more repairs; Press release
- [45] J.Van Manen, T.van Terwisga; A New Way of Simulating Whale Tail Propulsion; Twenty-First Symposium on Naval Hydrodynamics, Naval Studies Board, National Research Council; 1997.
- [46] Rodriguez García, Juan de Dios; Desarrollo de un sistema experimental de propulsión ondulante y del método de predicción de su comportamiento mediante CFD; Grupo Innovacións Mariñas, Departamento de construcción navais, Universidade da Coruña; Ferrol, Octubre de 2010.

- [47] Todman Mike, Wallis Alex; Jet age steam power for marine propulsion; Ship Design and Operation for Environmental Sustainability; The Royal Institution of Naval Architects, London, UK, 2002.
- [48] Passola Parcerissa, Jaume; El eyector de onda de choque como propulsor; Facultat de Náutica de Barcelona, Universidad
- [49] Konstantin Matveev ; Air Cavity Ships; Speed at sea; February 2003
- [50] E.J. Foeth et al; The efficacy of air-bubble lubrication for decreasing frictional resistance; International conference on ship-drag reduction, SMOOTH ships; 20-21 May, 2010, Istanbul, Turkey .
- [51] Markku Kanerva ; Energy saving in ships; Deltamarin Ltd ; Espoo, December 2005
- [52] Jaap Alema; Intercepting the interceptor; MARIN Report 86; 2005.
- [53] Schnack, Søren; 35.000 dwt bulk carrier exhaust gas emission reduction concept study; 2009.
- [54] The society of naval architects and marine engineers (SNAME) technical and research program Panel AHP 20: Greenhouse gases and economics; Marginal Abatement costs and cost effectiveness of energy-efficiency measures; March 2011
- [55] Euro area yield curve, European Central Bank
- [56] Ruud Veerbek et al; Environmental and Economic aspects of using LNG as a fuel for shipping in The Netherlands ; March 2011
- [57] Alternative fuels index; Energy Management institute; September 8, 2011 Volume 9 Issue 36
- [58] Nuclear Energy institute, Resources & Stats, 2010
- [59] Ivo Veldhuis ; Application of Hydrogen Marine Systems in High-speed Sea Container Transport; UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON , April 2007.
- [60] Lundberg *et al*; Pressurized Solid Oxide Fuel Cell/ Gas Turbine Power System ; February 2000

[61] Lipman et al; FUEL CELL SYSTEM ECONOMICS: COMPARING THE COSTS OF GENERATING POWER WITH STATIONARY AND MOTOR VEHICLE PEM FUEL CELL SYSTEMS , April 2004

[62] mil, V. 2006. *Energy: A Beginner's Guide*. Oneworld Publishers, Oxford, x + 181 pp

[63] Energy Information Administration; World Total Net Electricity Consumption, 1980-2005

Publicaciones consultadas

Arias Pereiras, José; Alternativa nuclear a la combustion de fosiles y su adecuacion a la marina mercante; Barcelona, 2010

Arnau Santasusana Suñé ; ESTUDI SOBRE LES EMISIONS DE CO2 D'UN VAIXELL MERCANT: PROPOSTES DE REDUCCIÓ ; Universitat Politècnica de Catalunya, 2011

Ayhan Demirbas; Biodiesel – A realistic fuel alternatives for diesel engines; Springer, 2008

B. Gupta & K. Prasad ; The future of LNG transportation: Various Propulsion Alternatives

Bertram *et al*; Intelligent Engineering Options for Highly Fuel-Efficient Fishing Vessels; First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency E-Fishing, Vigo, Spain, May 2010

Bridget C. Brett ; Potential Market for LNG-Fueled Marine Vessels in the United States; Massachusetts Institute of Technology , June 2008

Daniel Guasch Murillo ; Modelado y análisis de sistemas fotovoltaicos; Universitat Politècnica de Catalunya, 2003

David E. Baldwin ; The Gen IV Modular Helium Reactor ...and its Potential for Small and Medium Grids ; January 2007

General atomics; Energy Multiplier Module Technical Fact Sheet

Gonzalo Pérez Gómez y Juan González-Adalid; Influencia del lanzamiento de la generatriz base en el comportamiento de una hélice , Ingeniería Naval, Noviembre 2003

Grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático; Informe especial del IPCC, Escenarios de emisiones, 2000

Ingeniería naval, Febrero 2004

Ingeniería naval, pags. 31-36; Enero 2006

J. A. Ciesar ; Hybrid Systems Development by The Siemens Westinghouse Power Corporation ; August 2001

Jan O. de Kat ; Innovative developments for energy efficient shipping ; May 2009

Juan Manuel García Camús y José Ángel García Laborda ; Biocarburantes líquidos: biodiésel y bioetanol ; Informe de vigilancia tecnológica

Katagi *et al*; Photovoltaic Generating System on Ships to Reduce Fossil Fuel Dependence; Bulletin of the M.E.S.J., Vol. 24, No.2 ; 1996

Kerry-Ann Adamson ; Fuel Cells and Marine Applications ; Fuel cell today, 2005

Kevil Pleiss, Integrating Life-Cycle Solutions for Maximum Return on Investment , New Orleans, May 2011

M. P. LaBar *et al*; The Gas-Turbine Modular Helium Reactor

Olav Andreas Opdal and Johannes Fjell Hojem ; Biofuels in ships - A project report and feasibility study into the use of biofuels in the Norwegian domestic fleet ; 2007

Panos Coroyannakis ; HYDROGEN: Fuel of Choice for Marine Transport ; Gran Canaria, December 2008

Rodolfo J. Larosa ; Proceso para la producción de BIODIESEL(metilester o esteres metílicos de ácidos grasos) Refinación de glicerina

Ronald O'Rourke , Navy Ship Propulsion Technologies: Options for Reducing Oil Use —
Background for Congress ; 2006

Solar Sailor; Technology Solutions

The Propulsion Committee ; Final Report and Recommendations to the 21st ITTC

The Propulsion Committee ; Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC

The Propulsion Committee ; Final Report and Recommendations to the 25th ITTC

Tor Svensen ; The age of LNG is here Most cost efficient solution for ECAs , June 2010

University-national oceanographic laboratory system; Green ships and blue waters –
environmental considerations for the future UNOLS fleet

Y. B. Choi ; Energy Saving Devices , 2008

Páginas web

[Http://www.imo.org](http://www.imo.org)

[Http://www.wikipedia.es/en](http://www.wikipedia.es/en)

[Http://www.trendlines.ca](http://www.trendlines.ca)

[Http://www.rolls-royce.com/marine](http://www.rolls-royce.com/marine)

[Http://www.wartsila.com](http://www.wartsila.com)

[Http://www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com)

[Http://www.energy.siemens.com](http://www.energy.siemens.com)

[Http://www.ipfenergynouvelles.fre](http://www.ipfenergynouvelles.fre)

[Http://www.epa.gov](http://www.epa.gov)

[Http://www.eia.gov](http://www.eia.gov)

[Http://www.shipsandoffshore.net](http://www.shipsandoffshore.net)

[Http://www.generalvortex.com](http://www.generalvortex.com)

[Http://www.iie.org.mx](http://www.iie.org.mx)

[Http://www.ecofriend.com](http://www.ecofriend.com)

[Http://www.yatchingmonthly.com](http://www.yatchingmonthly.com)

[Http://www.debatescoches.com](http://www.debatescoches.com)

[Http://www.buch-der-synergie.de](http://www.buch-der-synergie.de)

[Http://www.solarsailor.com](http://www.solarsailor.com)

[Http://www.skysails.com](http://www.skysails.com)

[Http://www.ga.com](http://www.ga.com)

[Http://www.windagain.com](http://www.windagain.com)

[Http://www.shadotec.com](http://www.shadotec.com)

[Http://www.transistionrig.com](http://www.transistionrig.com)

[Http://www.marinetalk.com](http://www.marinetalk.com)

[Http://web.mit.edu](http://web.mit.edu)

[Http://www.dkgroup.com](http://www.dkgroup.com)

[Http://www.marineblogspot.com](http://www.marineblogspot.com)

[Http://www.marinetalk.com](http://www.marinetalk.com)

[Http://www.inhabitat.com](http://www.inhabitat.com)

[Http://www.2wglobal.com](http://www.2wglobal.com)

[Http://www.es.ubergizmo.com](http://www.es.ubergizmo.com)

[Http://www.amsc.com](http://www.amsc.com)

[Http://www.skewsme.com](http://www.skewsme.com)

[Http://www.sistemar.com](http://www.sistemar.com)

[Http://www.tfd.chalmers.se](http://www.tfd.chalmers.se)

[Http://www.gestenaival.com](http://www.gestenaival.com)

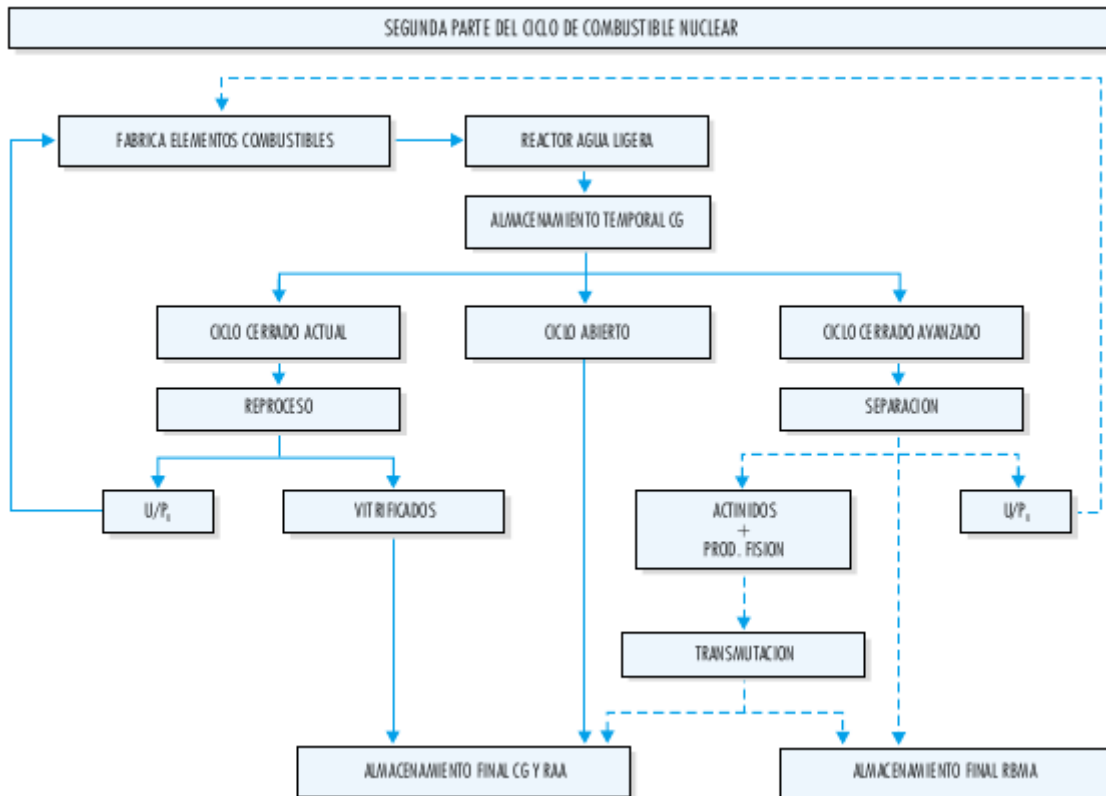
[Http://www.nap.edu](http://www.nap.edu)

[Http://www.deltamarin.com](http://www.deltamarin.com)

[Http://www.burbuja.info](http://www.burbuja.info)

ANEXO I – GESTIÓN DE RESIDUOS RADIOACTIVOS DE ALTA ACTIVIDAD

I.1 Esquema general de la gestión de los residuos nucleares de alta actividad y explicación de sus pasos



I.1.1 Almacenamiento temporal de combustible gastado

El objetivo del almacenamiento temporal es permitir que la radiactividad, y por tanto, el calor residual de los elementos combustibles, decaiga a niveles aceptables para su gestión posterior, pudiendo asimismo mantener una vigilancia directa de dichos elementos en su período de mayor actividad y procurar el tiempo suficiente para el perfeccionamiento de las técnicas de tratamiento final. Para ello, el combustible gastado se almacena en dos tipos de instalaciones: piscinas de centrales nucleares e instalaciones secas. En ambos casos, las características de las instalaciones vienen condicionadas por la alta radiactividad de los materiales a manejar, la emisión de calor y

la posibilidad de formar un conjunto crítico. Estos principios básicos son, junto con la economía del método utilizado, los que habrá que considerar en el momento de elegir uno u otro tipo de almacenamiento:

- **Almacenamiento en piscinas:** El almacenamiento en piscinas consiste en almacenar los elementos combustibles bajo el agua, que actúa como refrigerante y como blindaje biológico, en piscinas de hormigón cubierto de materiales sintéticos o acero inoxidable. Esta es la forma de almacenamiento más extendida en el mundo. Todas las centrales nucleares disponen de una piscina de almacenamiento de combustible gastado. Existen además piscinas centralizadas fuera de los emplazamientos de las centrales como es el caso de la instalación CLAB en Suecia, en operación desde 1985, en la que las piscinas están construidas en una excavación en roca granítica a poca profundidad más adecuada al combustible. El combustible TRISO sin embargo, debido a la menor cantidad de calor irradiado respecto al combustible convencional de reactores de agua ligera, no requiere dicho almacenamiento, pudiendo ser almacenado en instalaciones con sistemas refrigerantes basados en aire acondicionado, conocido como almacenamiento seco.
- **Almacenamiento en seco:** El almacenamiento en seco sólo tiene lugar tras un período de enfriamiento en las piscinas de las centrales nucleares y utiliza como refrigerante un gas que puede ser el aire o un gas inerte. Existen varias modalidades de almacenamiento en seco, como son el almacenamiento en cámaras, el almacenamiento en cofres de hormigón y el almacenamiento en contenedores metálicos.
- **Almacenamiento en cámaras:** En este sistema, el combustible gastado es almacenado, normalmente ya encapsulado, en bastidores que posteriormente se tapan con unas losas de hormigón. Estos bastidores están situados en el interior de

bóvedas construidas con hormigón armado, que actúan como protección contra la radiación (blindaje) y contra posibles agentes exteriores, como terremotos, caída de proyectiles, etc. Aunque este diseño es sencillo en sí mismo, requiere instalaciones adicionales para la recepción del combustible y su manejo.

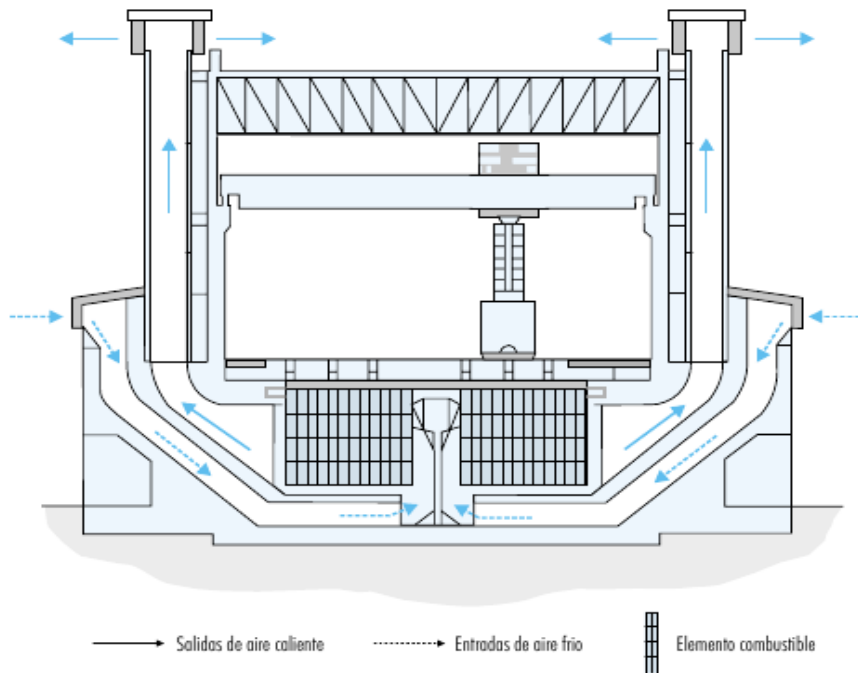


Figura I.I – Cámaras de almacenamiento temporal del combustible gastado

- **Almacenamiento en cofres de hormigón:** El almacenamiento en cofres de hormigón consiste en la deposición del combustible gastado en estructuras de hormigón armado de forma cilíndrica para uno o varios elementos combustibles, colocados en posiciones fijas en superficie. En su centro existe una cavidad forrada de acero al carbono, dentro de la cual se encuentra un recipiente metálico sellado de acero inoxidable, que alberga a los elementos combustibles gastados en el interior de una atmósfera de helio. La hermeticidad de la cavidad se consigue con un tapón de blindaje.

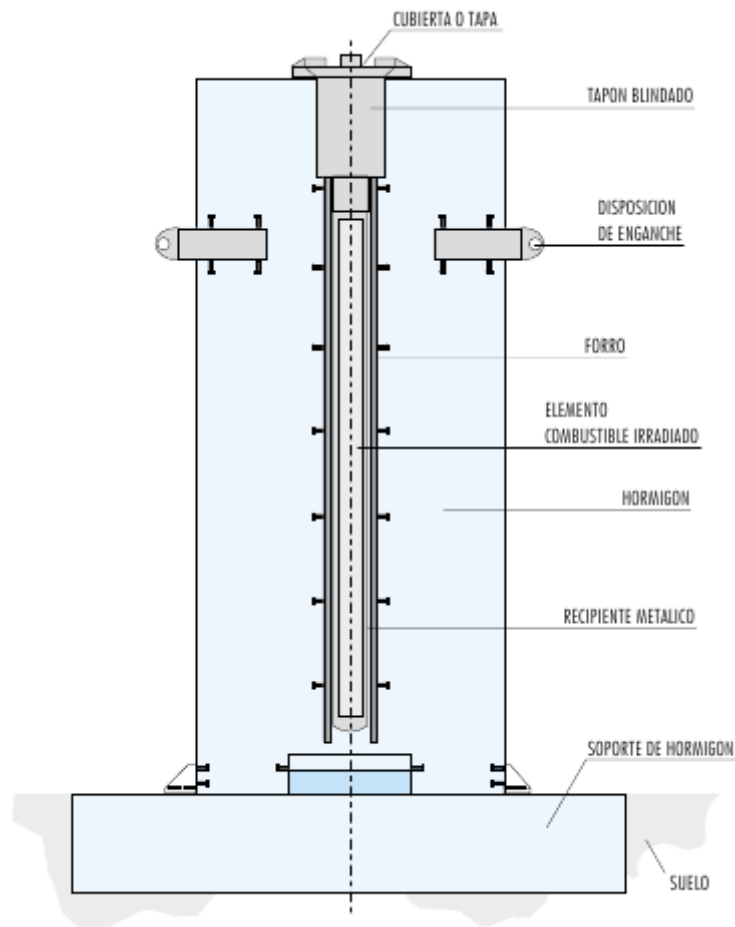


Figura I.II – Cofres de hormigón de almacenamiento temporal de combustible gastado

- **Almacenamiento en contenedores metálicos:** El combustible gastado puede ser almacenado en seco, en contenedores metálicos cilíndricos, que disponen en su interior de bastidores para la ubicación directa del mismo. En estos contenedores se introducen los elementos combustibles directamente en las celdillas interiores o bastidores provistos a tal fin. El material de construcción puede estar constituido por fundición modular o por acero inoxidable. Ambos tienen buenas características de resistencia mecánica, tenacidad, etc. Un contenedor debe tener unas paredes de espesor considerable (alrededor de 40 cm) como blindaje radiológico. La parte externa del contenedor debe tener aletas longitudinales robustas, con el fin de facilitar, si es necesario, la refrigeración que se realiza por convección natural.

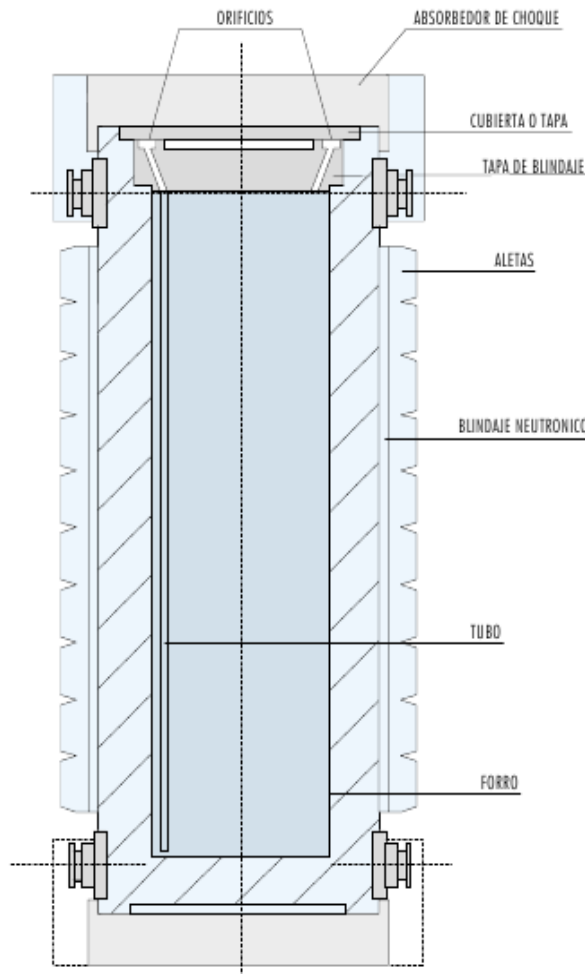


Figura I.III – Contenedores metálicos de almacenamiento temporal de combustible gastado

- **Encapsulamiento del combustible gastado:** Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento conveniente en el almacenamiento temporal, el combustible gastado se introduce en una cápsula constituida por un material metálico con buenas características de estabilidad frente a la corrosión, transmisión del calor y que sea compatible con el medio geológico en el que va a estar ubicado en el almacenamiento definitivo.

Atendiendo al tipo de refrigeración empleado, se presentan dos variantes: refrigeración por convección natural o por convección forzada. La convección natural, al eliminar la necesidad de impulsores y extractores, presenta las ventajas de costes menores y de una

mayor fiabilidad operacional del sistema.

I.I.II Ciclos de tratamiento: Una vez transcurrido el tiempo de enfriamiento conveniente en el almacenamiento temporal, puede optarse por tres vías distintas de actuación:

- **A) Ciclo abierto:** En la opción de ciclo abierto, los residuos de alta actividad son los elementos combustibles gastados, cuyo destino final, tras un encapsulamiento, es su evacuación definitiva.
- **B) Ciclo cerrado actual:** Consiste en la reelaboración o reproceso del combustible gastado y tiene por objeto recuperar los materiales fisibles presentes (uranio y plutonio), descontaminándolos de los productos de fisión y resto de transuránidos y purificándolos, de forma que cumplan con unas especificaciones admitidas internacionalmente y puedan volver a utilizarse.
- **C) Ciclo cerrado avanzado:** En un elemento combustible gastado podemos encontrar una compleja mezcla de isótopos radiactivos, compuesta principalmente por:
 - Actínidos que se generan cuando el U-238 captura los neutrones producidos en la desintegración del U-235. Los más importantes son el plutonio (Pu) y los llamados actínidos minoritarios: neptunio (Np), americio (Am) y curio (Cu).
 - Productos de fisión generados por la fisión del U-235 y sus correspondientes descendientes.
 - Productos de activación que se originan por la irradiación de neutrones sobre las vasijas de zircaloy que contienen el combustible y sobre el resto de materiales estructurales de los elementos combustibles y sus impurezas.

Estos últimos no contribuyen significativamente al inventario radiotóxico del combustible gastado, sin embargo el riesgo radiológico potencial viene determinado, principalmente, por los actínidos, y por los productos de fisión de vida larga.

Actualmente hay en marcha a nivel internacional actividades de I+D, tanto experimentales como de evaluación técnica y económica, sobre la viabilidad de llevar a cabo la transmutación de radionucleidos de vida larga, fundamentalmente actínidos, así como algunos productos de fisión presentes en los combustibles gastados, con el objetivo de transformarlos (transmutarlos) y así disminuir el inventario radiotóxico de los residuos radiactivos de alta actividad antes de su almacenamiento definitivo.

Cualquiera que sea su viabilidad futura, la transmutación requiere la realización de una serie de actividades previas, conocidas genéricamente como separación, que están basadas en una compleja serie de operaciones químicas y/o metalúrgicas, cuyo objetivo es separar de forma selectiva, individualmente o por grupos, los diversos radionucleidos de vida larga presentes en los elementos combustibles gastados que periódicamente son descargados de los reactores nucleares en operación.

La opción más viable ya que a día de hoy no existe tecnología capaz de separar el material fisible residual en un elemento de combustible TRISO, y la opción de ciclo cerrado avanzado es una opción todavía no puesta en práctica comercial, la modalidad de ciclo abierto.

I.I.III Almacenamiento final de combustible gastado y residuos de alta actividad:

Antes de proceder a su almacenamiento definitivo, el combustible gastado se introduce en una cápsula constituida por un material metálico con buenas características de estabilidad frente a la corrosión, transmisión del calor y que sea compatible con el medio geológico en el que va a estar ubicado. Los elementos de combustible TRISO, debido al sistema de contención de barreras del que disponen sus moléculas de combustible presentan una alta resistencia a la corrosión (Figura I.IV) y al aumento de presión a lo largo del tiempo los hace susceptible de la ausencia de encapsulamiento. Las bajas tasas de corrosión del

carbón pirolítico y el carburo de silicio han sido confirmadas experimentalmente en laboratorios de investigación.

La estrategia de gestión definitiva de los residuos de alta actividad (RAA) consiste en aislarlos de la biosfera durante períodos de tiempo muy prolongados, asegurando que las sustancias radiactivas residuales que lleguen a la biosfera estén en concentraciones admisibles, reduciendo a niveles aceptables el riesgo de la intrusión humana inadvertida. El almacenamiento definitivo en formaciones geológicas es el método más ampliamente propuesto para conseguir los métodos anteriores. El confinamiento geológico ofrece una gran estabilidad a largo plazo, asociada a la lentitud de los procesos naturales y el alejamiento de posibles procesos disruptivos asociados al hombre y a la inestabilidad histórica de sus estructuras sociales.

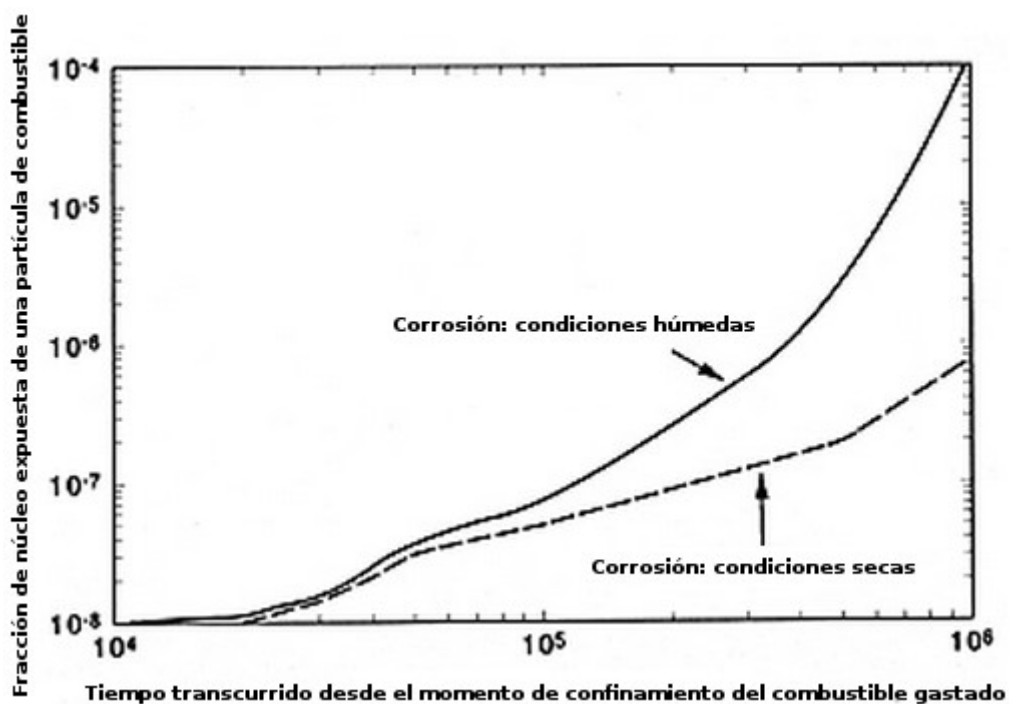


Figura I.IV - Resistencia de una partículas de combustible TRISO al paso del tiempo (Fuente: General Atomics, US Departament of energy, imágenes modificadas y adaptadas por el autor)

En un almacenamiento geológico profundo (AGP), el aislamiento de los residuos de la

biosfera se consigue mediante la interposición de una serie de barreras múltiples (Figura I-II), tanto naturales como artificiales y su seguridad a largo plazo se alcanza mediante la aplicación de tres principios básicos:

- **Contención y aislamiento**, que permite que los radionucleidos se desintegren antes de entrar en contacto con el hombre y su medio ambiente.
- **Retención y retardo**, que permite, una vez perdido el confinamiento, limitar las tasas de emisión de radionucleidos, mediante una muy baja disolución del combustible gastado, un transporte muy lento y una alta absorción en el sistema de barreras.
- **Condiciones favorables del receptor**, que permite limitar las dosis al hombre y al medio ambiente.

Los dos primeros principios básicos de seguridad se consiguen imponiendo criterios y requisitos funcionales al sistema de barreras artificiales y naturales, así como al diseño del almacenamiento profundo. El tercer principio se puede alcanzar mediante una situación y configuración adecuadas al almacenamiento.

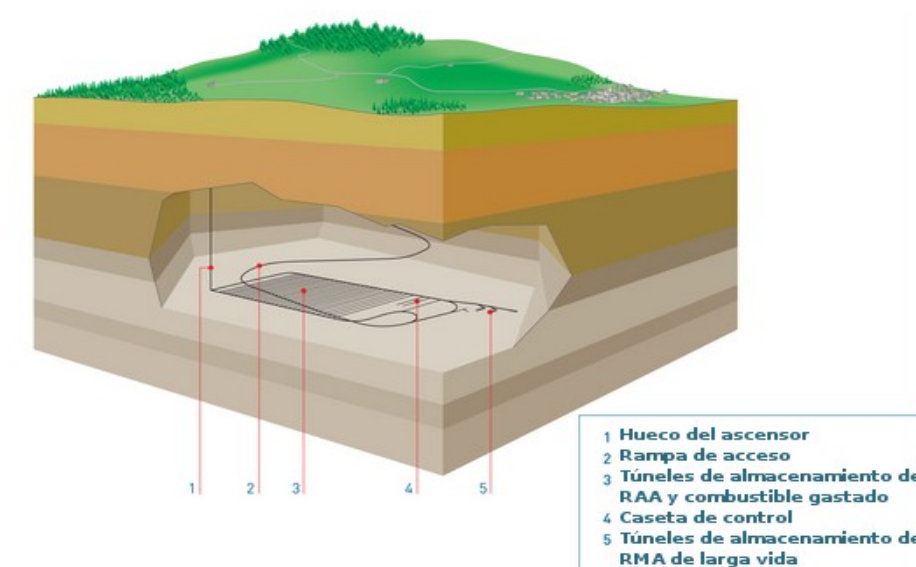


Figura I.V – Esquema conceptual de un almacén geológico profundo (AGP) (Fuente: Burbuja, imagen adaptada por el autor)

Los elementos que justifican el almacenamiento definitivo en formaciones geológicas son de cuatro tipos:

- **Tecnológicas:** existen soluciones técnicas viables para diseñar, construir, operar y clausurar un almacenamiento de este tipo con las tecnologías existentes.
- **Ambientales y de seguridad:** el nivel de protección para el hombre y el medio ambiente, proporcionando un almacenamiento geológico así concebido, es adecuado a corto y largo plazo.
- **Éticas:** este concepto es compatible con una estrategia de desarrollo sostenible, que requiere que la satisfacción de las necesidades del presente no comprometa la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas. Las generaciones presentes deben ser responsables de la gestión de los residuos que han generado. Las generaciones futuras podrán decidir cómo usar, extender o cambiar el sistema de gestión que les dejemos, ya que los sistemas de almacenamiento mencionados contemplan la posibilidad de recuperar los residuos, si fuera necesario, por razones técnicas, económicas o de seguridad.
- **De buena práctica internacional:** el almacenamiento geológico es la opción internacionalmente aceptada por los países inmersos en la problemática de la gestión de los RAA y recomendada por los organismos internacionales (OIEA y AEN/OCDE)

A día de hoy solamente existe un AGP en el mundo localizado en Nuevo Mexico pero es utilizado únicamente para el almacenamiento de los residuos nucleares producidos por el gobierno de los Estados Unidos. Existen no obstante estudios en curso que persiguen encontrar los emplazamientos más adecuados e incluso un proyecto ya en desarrollo en Finlandia conocido como proyecto Onkalo cuya conclusión se espera para el año 2012.

I.I.IV Reutilización del combustible

Como se viene comentando en los apartados anteriores, las últimas tendencias de investigación y desarrollo tecnológico del tratamiento de residuos nucleares realizan su trabajo en el campo de la transmutación, el reproceso y el almacenamiento definitivo del combustible gastado. A estos tres campos ha de añadirse uno más, el de la reutilización del combustible gastado sin reproceso, es decir, en ciclo cerrado. La vanguardia tecnológica en este campo la constituye principalmente un nuevo prototipo de reactor en desarrollo por General Atomics, el Energy Multiplier Module (EM²) (Figura I.VI) . El EM² es una versión modificada del GT-MHR y es capaz de convertir combustible gastado en electricidad sin la necesidad de reprocesarlo. Cada módulo produciría aproximadamente 240 MW de potencia a 850°C. La sección estérter del núcleo proporciona los neutrones necesarios para la conversión del combustible gastado o de uranio empobrecido en material fisible utilizable.

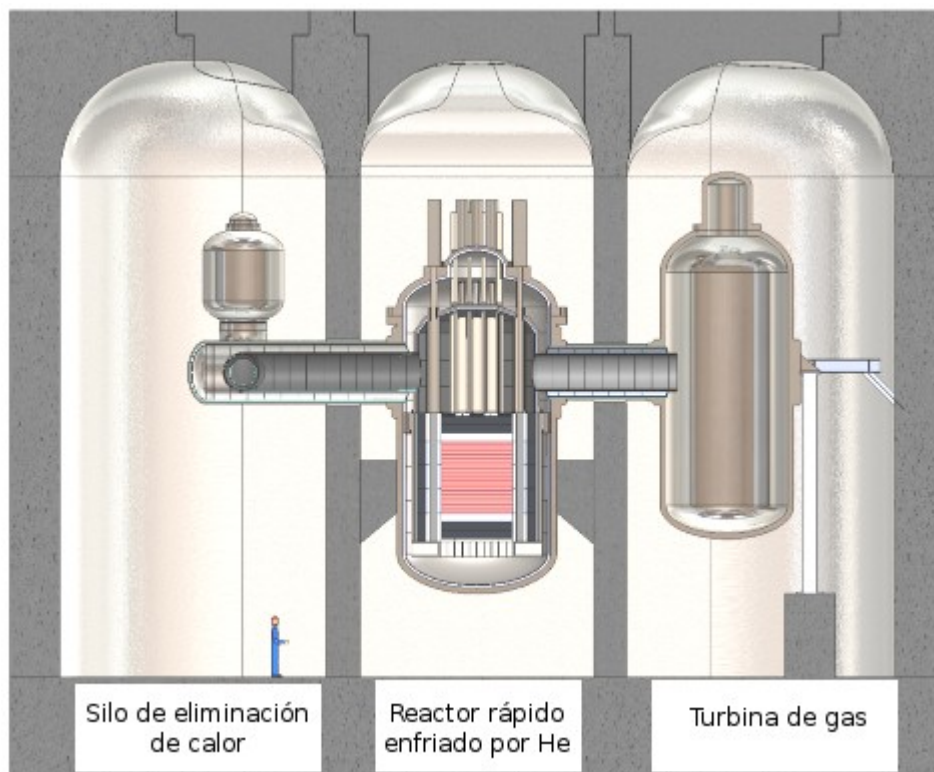


Figura I.VI - Reactor EM² (Fuente: General Atomics, US Department of energy, imágenes modificadas y adaptadas por el autor)

El plan de acción de estos reactores se basa en diversas generaciones de producción (Figura I.VII): la primera generación dispone de estárteres (con una cantidad aproximada del 12% de U-235) que inician el proceso de conversión; el estárter U-235 es consumido a medida que el combustible usado o uranio empobrecido se transforma en combustible fisible en un proceso cuya duración se estima en 30 años sin la necesidad de reemplazo de combustible. Tras este periodo de tiempo todavía persiste en el núcleo combustible suficiente como para ser utilizado como estárteres en una segunda generación sin necesidad de reproceso. No se requiere separación de metales pesados ni enriquecimiento del uranio, solo se retirarán y almacenarán los productos inservibles en la reacción de fisión nuclear.

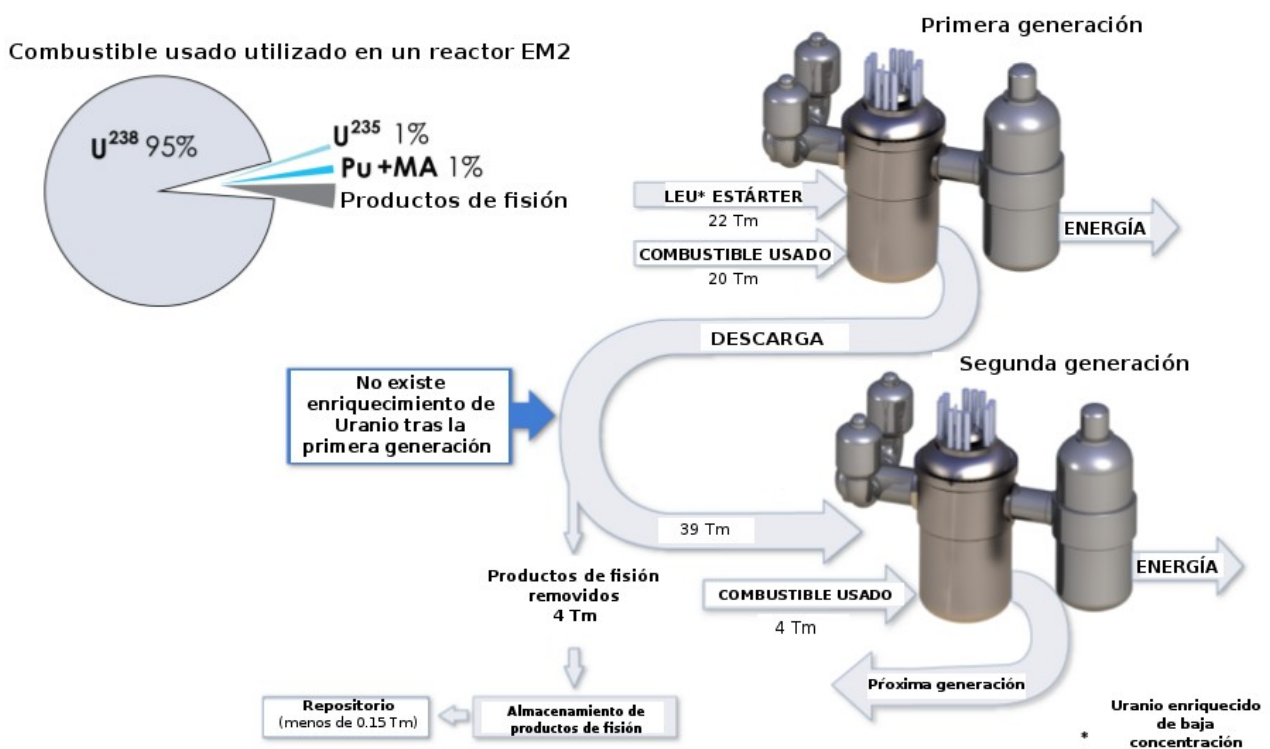


Figura I.VII - Plan de funcionamiento en generaciones de los reactores EM² (Fuente: General Atomics, US Department of energy, imagenes modificadas y adaptadas por el autor)

ANEXO II – TABLAS DE COSTES Y POTENCIAL REDUCTOR, CONSUMO Y PRECIOS DEL COMBUSTIBLE Y VALORACIONES ECONÓMICAS

II.I Tablas de costes y potencial reductor de los distintos medios de reducción de emisiones atmosféricas

- A) Costes y potencial reductor de la optimización de las aberturas en el casco
- B) Costes y potencial reductor de la lubricación con aire
- C) Costes y potencial reductor del sistema de aprovechamiento de los gases de escape
- D) Costes y potencial reductor de una cometa tractora
- E) Costes y potencial reductor de paneles solares
- F) Costes y potencial reductor de los motores de combustión interna y sistemas de aprovechamiento de LNG
- G) Costes y potencial reductor de las hélices CLT

II.II Tablas de consumo y precios de combustible

- H) Precios del combustible
- I) Consumos de combustible

II.III Cálculos MAC

- J) Optimización de las aberturas practicadas en el casco
- K) Lubricación por aire
- L) Sistema de aprovechamiento de los gases de escape
- M) Cometa tractora
- N) Paneles solares
- O) Aprovechamiento de gas natural en motores de combustión interna
- P) Aprovechamiento de biodiésel en motores de combustión interna
- Q) Hélices CLT

Optimización de las aberturas practicadas en el casco				
Tipo de buque	Tamaño	Costes no recurrentes	Costes anuales	Potencial reductor
Petrolero (crudo)	>200000 dwt	87118,8	0	5,00%
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	67602	0	5,00%
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt	57851,2	0	5,00%
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt	43198,4	0	5,00%
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt	30400	0	5,00%
Petrolero (crudo)	-9999 dwt	6528,4	0	5,00%
Petrolero (Productos)	>60000 dwt	43973,6	0	5,00%
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt	30217,6	0	5,00%
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt	19076	0	5,00%
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt	10716	0	5,00%
Petrolero (Productos)	-4999 dwt	3640,4	0	5,00%
Quimiquero	>20000 dwt	34070,8	0	5,00%
Quimiquero	10 – 19999 dwt	19509,2	0	5,00%
Quimiquero	5 – 9999 dwt	12410,8	0	5,00%
Quimiquero	-4999 dwt	3450,4	0	5,00%
Gasero LPG	>50000 cbm	47644,4	0	5,00%
Gasero LPG	-49999 cbm	8398	0	5,00%
Gasero LNG	>200000 cbm	116211,6	0	5,00%
Gasero LNG	<199999 cbm	121493,6	0	5,00%
Granelero	>20000 dwt	58900	0	5,00%
Granelero	100 – 199999 dwt	50752,8	0	5,00%
Granelero	60 – 99999 dwt	34549,6	0	5,00%
Granelero	35 – 59999 dwt	27975,6	0	5,00%
Granelero	10 – 34999 dwt	22047,6	0	5,00%
Granelero	<9999 dwt	4294	0	5,00%
Carga general	10000> dwt	22686	0	5,00%
Carga general	5000 – 9999 dwt	12426	0	5,00%
Carga general	<4999 dwt	2310,4	0	5,00%
Carga general	10000> dwt 100> TEU	23446	0	5,00%
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU	9203,6	0	5,00%
Carga general	-4999 dwt 100> TEU	50752,8	0	5,00%
Portacontenedores	8000> TEU	187811,2	0	5,00%
Portacontenedores	5 – 7999 TEU	151354	0	5,00%
Portacontenedores	3 – 4999 TEU	100563,2	0	5,00%
Portacontenedores	2 – 2999 TEU	63657,6	0	5,00%
Portacontenedores	1 – 1999 TEU	40014	0	5,00%
Portacontenedores	<999 TEU	14067,6	0	5,00%
Carguero vehículos	4000> CEU	51604	0	5,00%
Carguero vehículos	<3999 CEU	28743,2	0	5,00%
RoRo	2000> lm	40166	0	5,00%
RoRo	<1999 lm	7425,2	0	5,00%
Ferry	Solo pasajeros >25kn	9621,6	0	5,00%
Ferry	Solo pasajeros <25kn	4757,6	0	5,00%
Ferry	RoPax >25kn	69684,4	0	5,00%
Ferry	RoPax <25kn	18635,2	0	5,00%
Crucero	100000 GT	177900,8	0	5,00%
Crucero	60 – 99999 GT	132566,8	0	5,00%
Crucero	10 – 59999 GT	53253,2	0	5,00%
Crucero	2 – 9999 GT	15010	0	5,00%
Crucero	-1999 GT	2667,6	0	5,00%

Lubricación con aire					
Tipo de buque	Tamaño	Costes no recurrentes	Costes anuales	Potencial reductor	Días navegados
Petrolero (crudo)	>200000 dwt	1972846	60889,38	15,00%	274
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	1335730,4	60222,70	15,00%	271
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt	1057046	56444,90	15,00%	254
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt	940332,8	52889,31	15,00%	238
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt				
Petrolero (crudo)	-9999 dwt				
Petrolero (Productos)	>60000 dwt				
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt				
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt				
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt				
Petrolero (Productos)	-4999 dwt				
Quimiquero	>20000 dwt				
Quimiquero	10 – 19999 dwt				
Quimiquero	5 – 9999 dwt				
Quimiquero	-4999 dwt				
Gasero LPG	>50000 cbm	1436400	60667,15	15,00%	273
Gasero LPG	-49999 cbm				
Gasero LNG	>200000 cbm	3830400	57778,24	15,00%	260
Gasero LNG	<199999 cbm	2394000	60889,38	15,00%	274
Granelero	>20000 dwt	3411328,4	62444,94	15,00%	281
Granelero	100 – 199999 dwt	1362611,6	62000,50	15,00%	279
Granelero	60 – 99999 dwt	840636	62444,94	15,00%	281
Granelero	35 – 59999 dwt				
Granelero	10 – 34999 dwt				
Granelero	<9999 dwt				
Carga general	10000> dwt				
Carga general	5000 – 9999 dwt				
Carga general	<4999 dwt				
Carga general	10000> dwt 100> TEU				
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU				
Carga general	-4999 dwt 100> TEU				
Portacontenedores	8000> TEU	1879974	53555,98	9,00%	241
Portacontenedores	5 – 7999 TEU	1527083,2	54889,33	9,00%	247
Portacontenedores	3 – 4999 TEU	1284164,4	55556,00	9,00%	250
Portacontenedores	2 – 2999 TEU	1157381,2	55778,22	9,00%	251
Portacontenedores	1 – 1999 TEU				
Portacontenedores	<999 TEU				
Carguero vehículos	4000> CEU				
Carguero vehículos	<3999 CEU				
RoRo	2000> lm				
RoRo	<1999 lm				
Ferry	Solo pasajeros >25kn				
Ferry	Solo pasajeros <25kn				
Ferry	RoPax >25kn				
Ferry	RoPax <25kn				
Crucero	100000 GT				
Crucero	60 – 99999 GT				
Crucero	10 – 59999 GT				
Crucero	2 – 9999 GT				
Crucero	-1999 GT				

Sistema de recuperación de calor				
Tipo de buque	Tamaño	Costes no recurrentes	Costes anuales	Potencial reductor
Petrolero (crudo)	>200000 dwt	3531796	0	8,00%
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	2803016,8	0	8,00%
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt			
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt			
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt			
Petrolero (crudo)	-9999 dwt			
Petrolero (Productos)	>60000 dwt			
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt			
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt			
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt			
Petrolero (Productos)	-4999 dwt			
Quimiquero	>20000 dwt			
Quimiquero	10 – 19999 dwt			
Quimiquero	5 – 9999 dwt			
Quimiquero	-4999 dwt			
Gasero LPG	>50000 cbm			
Gasero LPG	-49999 cbm			
Gasero LNG	>200000 cbm	4617904,4	0	8,00%
Gasero LNG	<199999 cbm	4814926,8	0	8,00%
Granelero	>20000 dwt			
Granelero	100 – 199999 dwt			
Granelero	60 – 99999 dwt			
Granelero	35 – 59999 dwt			
Granelero	10 – 34999 dwt			
Granelero	<9999 dwt			
Carga general	10000> dwt			
Carga general	5000 – 9999 dwt			
Carga general	<4999 dwt			
Carga general	10000> dwt 100> TEU			
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU			
Carga general	-4999 dwt 100> TEU			
Portacontenedores	8000> TEU	7290786,4	0	8,00%
Portacontenedores	5 – 7999 TEU	5929884,8	0	8,00%
Portacontenedores	3 – 4999 TEU	4033738	0	8,00%
Portacontenedores	2 – 2999 TEU	2655713,6	0	8,00%
Portacontenedores	1 – 1999 TEU			
Portacontenedores	<999 TEU			
Carguero vehículos	4000> CEU			
Carguero vehículos	<3999 CEU			
RoRo	2000> lm	1778954,8	0	8,00%
RoRo	<1999 lm			
Ferry	Solo pasajeros >25kn			
Ferry	Solo pasajeros <25kn			
Ferry	RoPax >25kn			
Ferry	RoPax <25kn			
Crucero	100000 GT	6920924,8	0	8,00%
Crucero	60 – 99999 GT	5228427,6	0	8,00%
Crucero	10 – 59999 GT	2267422	0	8,00%
Crucero	2 – 9999 GT			
Crucero	-1999 GT			

Cometa tractora				
Tipo de buque	Tamaño	Costes no recurrentes	Costes anuales	Potencial reductor
Petrolero (crudo)	>200000 dwt	2799247,2	513940	17,00%
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	2116227,6	336730	10,90%
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt	2116227,6	336730	12,50%
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt	1433215,6	192970	8,10%
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt	750196	82640	5,70%
Petrolero (crudo)	-9999 dwt	391894	33580	10,60%
Petrolero (Productos)	>60000 dwt	1433215,6	192970	5,40%
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt	750196	82640	4,10%
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt	750196	82640	7,30%
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt	391825,6	33580	6,30%
Petrolero (Productos)	-4999 dwt	391825,6	33580	18,40%
Quimiquero	>20000 dwt	1433215,6	192970	10,80%
Quimiquero	10 – 19999 dwt	750196	82640	9,20%
Quimiquero	5 – 9999 dwt	391825,6	33580	7,60%
Quimiquero	-4999 dwt	391825,6	33580	20,00%
Gasero LPG	>50000 cbm	1433215,6	192970	8,40%
Gasero LPG	-49999 cbm	750196	82640	16,40%
Gasero LNG	>200000 cbm	2116227,6	336730	5,70%
Gasero LNG	<199999 cbm	1433215,6	192970	4,60%
Granelero	>20000 dwt	2799247,2	513940	25,80%
Granelero	100 – 199999 dwt	2116227,6	336730	14,90%
Granelero	60 – 99999 dwt	1433215,6	192970	11,40%
Granelero	35 – 59999 dwt	750196	82640	6,80%
Granelero	10 – 34999 dwt	750196	82640	8,50%
Granelero	<9999 dwt	391894	33580	16,50%
Carga general	10000> dwt			
Carga general	5000 – 9999 dwt			
Carga general	<4999 dwt			
Carga general	10000> dwt 100> TEU			
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU			
Carga general	-4999 dwt 100> TEU			
Portacontenedores	8000> TEU			
Portacontenedores	5 – 7999 TEU			
Portacontenedores	3 – 4999 TEU			
Portacontenedores	2 – 2999 TEU			
Portacontenedores	1 – 1999 TEU			
Portacontenedores	<999 TEU			
Carguero vehículos	4000> CEU			
Carguero vehículos	<3999 CEU			
RoRo	2000> lm			
RoRo	<1999 lm			
Ferry	Solo pasajeros >25kn			
Ferry	Solo pasajeros <25kn			
Ferry	RoPax >25kn			
Ferry	RoPax <25kn			
Crucero	100000 GT			
Crucero	60 – 99999 GT			
Crucero	10 – 59999 GT			
Crucero	2 – 9999 GT			
Crucero	-1999 GT			

Energía solar				
Tipo de buque	Tamaño	Costes no recurrentes	Costes anuales	Potencial reductor
Petrolero (crudo)	>200000 dwt	1010800		0,20%
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	1010800		0,30%
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt	1010800		0,30%
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt	1010800		0,40%
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt	1010800		0,50%
Petrolero (crudo)	-9999 dwt	1010800		2,00%
Petrolero (Productos)	>60000 dwt	1010800		0,30%
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt	1010800		0,40%
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt	1010800		0,70%
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt	1010800		1,20%
Petrolero (Productos)	-4999 dwt	1010800		3,50%
Quimiquero	>20000 dwt	1010800		0,50%
Quimiquero	10 – 19999 dwt	1010800		0,90%
Quimiquero	5 – 9999 dwt	1010800		1,40%
Quimiquero	-4999 dwt	1010800		3,70%
Gasero LPG	>50000 cbm	1010800		0,40%
Gasero LPG	-49999 cbm	1010800		1,50%
Gasero LNG	>200000 cbm	1010800		0,10%
Gasero LNG	<199999 cbm	1010800		0,20%
Granelero	>20000 dwt			
Granelero	100 – 199999 dwt			
Granelero	60 – 99999 dwt			
Granelero	35 – 59999 dwt			
Granelero	10 – 34999 dwt			
Granelero	<9999 dwt			
Carga general	10000> dwt			
Carga general	5000 – 9999 dwt			
Carga general	<4999 dwt			
Carga general	10000> dwt 100> TEU			
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU			
Carga general	-4999 dwt 100> TEU			
Portacontenedores	8000> TEU			
Portacontenedores	5 – 7999 TEU			
Portacontenedores	3 – 4999 TEU			
Portacontenedores	2 – 2999 TEU			
Portacontenedores	1 – 1999 TEU			
Portacontenedores	<999 TEU			
Carguero vehículos	4000> CEU	1010800		0,40%
Carguero vehículos	<3999 CEU	1010800		0,60%
RoRo	2000> lm	1010800		0,40%
RoRo	<1999 lm	1010800		1,70%
Ferry	Solo pasajeros >25kn			
Ferry	Solo pasajeros <25kn			
Ferry	RoPax >25kn			
Ferry	RoPax <25kn			
Crucero	100000 GT			
Crucero	60 – 99999 GT			
Crucero	10 – 59999 GT			
Crucero	2 – 9999 GT			
Crucero	-1999 GT			

LNG Motor de combustión interna						
Tipo de buque	Tamaño	Media kW Motor Principal	Velocidad motor principal	Costes no recurrentes	Costes anuales	Potencial reductor
Petrolero (crudo)	>200000 dwt		Baja			
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	17075	Baja			
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt	12726	Baja			
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt	10529	Baja			
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt	7889	Baja			
Petrolero (crudo)	-9999 dwt	1865	Media	2685550	0	1
Petrolero (Productos)	>60000 dwt	12644	Baja			
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt	8482	Media	6048700	0	1
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt	4640	Media	4704000	0	1
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt	2691	Media	2974650	0	1
Petrolero (Productos)	-4999 dwt	1032	Media	1377600	0	1
Quimiquero	>20000 dwt	9027	Media	6239450	0	1
Quimiquero	10 – 19999 dwt	5161	Media	4886350	0	1
Quimiquero	5 – 9999 dwt	3252	Media	3171000	0	1
Quimiquero	-4999 dwt	1257	Media	1456350	0	1
Gasero LPG	>50000 cbm	13494	Baja			
Gasero LPG	-49999 cbm	3252	Media	4218200	0	1
Gasero LNG	>200000 cbm	37322	Baja			
Gasero LNG	<199999 cbm	24592	Baja			
Granelero	>20000 dwt	17224	Baja			
Granelero	100 – 199999 dwt	15108	Baja			
Granelero	60 – 99999 dwt	9912	Media	6549200	0	1
Granelero	35 – 59999 dwt	8209	Media	5953150	0	1
Granelero	10 – 34999 dwt	6436	Media	5332600	0	1
Granelero	<9999 dwt	1532	Media	2569000	0	1
Carga general	10000> dwt	5914	Media	5149900	0	1
Carga general	5000 – 9999 dwt	2939	Media	3061450	0	1
Carga general	<4999 dwt	868	Media	1320200	0	1
Carga general	10000> dwt 100> TEU	7882	Media	5838700	0	1
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU	3720	Media	3334800	0	1
Carga general	-4999 dwt 100> TEU	1860	Media	2683800	0	1
Portacontenedores	8000> TEU	68477	Baja			
Portacontenedores	5 – 7999 TEU	55681	Baja			
Portacontenedores	3 – 4999 TEU	34934	Baja			
Portacontenedores	2 – 2999 TEU	21462	Baja			
Portacontenedores	1 – 1999 TEU	12364	Media	6360200	0	1
Portacontenedores	<999 TEU	5703	Media	4028850	0	1
Carguero vehículos	4000> CEU	13137	Media	7677950	0	1
Carguero vehículos	<3999 CEU	7971	Media	5869850	0	1
RoRo	2000> lm	15736	Media	8587600	0	1
RoRo	<1999 lm	2934	Media	3059700	0	1
Ferry	Solo pasajeros >25kn	3113	Media	4169550	0	1
Ferry	Solo pasajeros <25kn	1213	Media	2457350	0	1
Ferry	RoPax >25kn	27395	Baja			1
Ferry	RoPax <25kn	4891	Media	4791850	0	1
Crucero	100000 GT	66523	Baja			
Crucero	60 – 99999 GT	49779	Baja			
Crucero	10 – 59999 GT	19048	Media	9746800	0	1
Crucero	2 – 9999 GT	4026	Media	4489100	0	1
Crucero	-1999 GT	945	Media	2363550	0	1

Hélices CLT					
Tipo de buque	Tamaño (dw)	Costes no recurrentes	Costes anuales	Consumo anual	Potencial reductor
1A	77217	525000	0	31100	10,00%
1B	3700	76250	0	1900	10,00%
2A	302982,3	594000	0	21800	10,00%
2B	4823	69000	0	600	10,00%
3A	175800	351000	0	13100	10,00%
3B	7126,44	105100	0	3100	10,00%
4A	158200	810000	0	46400	10,00%
4B	7700	151400	0	9700	10,00%
5B	1852,6	270000	0	4500	10,00%

Precios combustibles				
Variable	Valor (\$/Tm)	Valor (€/Tm)	Fecha	Fuente
HFO	731	555,56	05/03/12	Bunkerworld, Singapur
MDO	953	724,28	05/03/12	Bunkerworld, Singapur
Gas natural	634,92	482,5392	Oct – 2011	[12]
B100	1685	1280,6	08/09/11	AFI EMI [62]
Cotización \$	0,76		05/03/12	/

Consumos por tipo de buque y combustible				
Tipo de buque	Tamaño	Consumo motor principal HFO	Consumo motor principal LNG	Consumo motor principal BD
Petrolero (crudo)	>200000 dwt	21800		25335,14
Petrolero (crudo)	120 – 199999 dwt	16500		19175,68
Petrolero (crudo)	80 – 119999 dwt	12200		14178,38
Petrolero (crudo)	60 – 79999 dwt	8200		9529,73
Petrolero (crudo)	10 – 59999 dwt	6200		7205,41
Petrolero (crudo)	-9999 dwt	1100	951,35	1278,38
Petrolero (Productos)	>60000 dwt	7700		8948,65
Petrolero (Productos)	20 – 59999 dwt	4500		5229,73
Petrolero (Productos)	10 – 19999 dwt	2900		3370,27
Petrolero (Productos)	5 – 9999 dwt	1800	1556,76	2091,89
Petrolero (Productos)	-4999 dwt	600	518,92	697,30
Quimiquero	>20000 dwt	8500		9878,38
Quimiquero	10 – 19999 dwt	4700		5462,16
Quimiquero	5 – 9999 dwt	3000	2594,59	3486,49
Quimiquero	-4999 dwt	700	605,41	813,51
Gasero LPG	>50000 cbm	12100		14062,16
Gasero LPG	-49999 cbm	1900		2208,11
Gasero LNG	>200000 cbm	28500		33121,62
Gasero LNG	<199999 cbm	31100		36143,24
Granelero	>20000 dwt	15200		17664,86
Granelero	100 – 199999 dwt	13100		15224,32
Granelero	60 – 99999 dwt	8800		10227,03
Granelero	35 – 59999 dwt	7000		8135,14
Granelero	10 – 34999 dwt	5400		6275,68
Granelero	<9999 dwt	900	778,38	1045,95
Carga general	10000> dwt	5800	5016,22	6740,54
Carga general	5000 – 9999 dwt	3100	2681,08	3602,70
Carga general	<4999 dwt	500	432,43	581,08
Carga general	10000> dwt 100> TEU	5800		6740,54
Carga general	5000 – 9999 dwt 100> TEU	2100	1816,22	2440,54
Carga general	-4999 dwt 100> TEU	1100	951,35	1278,38
Portacontenedores	8000> TEU	46400		53924,32
Portacontenedores	5 – 7999 TEU	37500		43581,08
Portacontenedores	3 – 4999 TEU	25200		29286,49
Portacontenedores	2 – 2999 TEU	15600		18129,73
Portacontenedores	1 – 1999 TEU	9700	8389,19	11272,97
Portacontenedores	<999 TEU	3100	2681,08	3602,70
Carguero vehículos	4000> CEU	13200	11416,22	15340,54
Carguero vehículos	<3999 CEU	7300	6313,51	8483,78
RoRo	2000> lm	10000	8648,65	11621,62
RoRo	<1999 lm	1700	1470,27	1975,68
Ferry	Solo pasajeros >25kn	2600	2248,65	3021,62
Ferry	Solo pasajeros <25kn	1200	1037,84	1394,59
Ferry	RoPax >25kn	18300	15827,03	21267,57
Ferry	RoPax <25kn	4500	3891,89	5229,73
Crucero	100000 GT	47500		55202,70
Crucero	60 – 99999 GT	32600		37886,49
Crucero	10 – 59999 GT	12500	10810,81	14527,03
Crucero	2 – 9999 GT	3200	2767,57	3718,92
Crucero	-1999 GT	500	432,43	581,08

MAC – Optimización de las aberturas practicadas en el casco									
Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NO _x	MAC PM
Petrolero (crudo) >200000 dwt	-561668,2	3411,7	58,9	92,7	7,3	-164,6	-95,4	-60,6	-76,9
Petrolero (crudo) 120 – 199999 dwt	-424277,8	2582,3	44,6	70,1	5,5	-164,3	-95,2	-60,5	-76,8
Petrolero (crudo) 80 – 119999 dwt	-309745,0	1909,3	32,9	51,9	4,1	-162,2	-94,0	-59,7	-75,8
Petrolero (crudo) 60 – 79999 dwt	-206015,4	1283,3	22,1	34,9	2,7	-160,5	-93,1	-59,1	-75,0
Petrolero (crudo) 10 – 59999 dwt	-156907,5	970,3	16,7	26,4	2,1	-161,7	-93,7	-59,5	-75,5
Petrolero (crudo) <9999 dwt	-27266,7	172,2	3,0	3,1	0,4	-158,4	-91,8	-88,5	-74,0
Petrolero (Productos) >60000 dwt	-191735,8	1205,1	20,8	32,7	2,6	-159,1	-92,2	-58,6	-74,3
Petrolero (Productos) 20 – 59999 dwt	-109776,8	704,3	12,2	12,6	1,5	-155,9	-90,4	-87,1	-72,8
Petrolero (Productos) 10 – 19999 dwt	-70945,3	453,9	7,8	8,1	1,0	-156,3	-90,6	-87,4	-73,0
Petrolero (Productos) 5 – 9999 dwt	-44601,5	281,7	4,9	5,0	0,6	-158,3	-91,8	-88,5	-74,0
Petrolero (Productos) <4999 dwt	-14832,7	93,9	1,6	1,7	0,2	-158,0	-91,6	-88,3	-73,8
Quimiquero >20000 dwt	-218947,4	1330,3	23,0	23,8	2,8	-164,6	-95,4	-60,6	-76,9
Quimiquero 10 – 19999 dwt	-120727,5	735,6	12,7	13,2	1,6	-164,1	-95,1	-61,7	-76,7
Quimiquero 5 – 9999 dwt	-77081,2	469,5	8,1	8,4	1,0	-164,2	-95,2	-61,8	-76,7
Quimiquero <4999 dwt	-17706,2	109,6	1,9	2,0	0,2	-161,6	-93,7	-60,3	-75,5
Gasero LPG >50000 cbm	-312109,6	1893,7	32,7	51,4	4,1	-164,8	-95,5	-60,7	-77,0
Gasero LPG <49999 cbm	-48547,1	297,4	5,1	5,3	0,6	-163,3	-94,6	-61,3	-76,3
Gasero LNG >200000 cbm	-733123,3	4460,3	77,0	121,1	9,5	-164,4	-95,3	-60,5	-76,8
Gasero LNG <199999 cbm	-802684,9	4867,2	84,0	132,2	10,4	-164,9	-95,6	-60,7	-77,0
Granelero >20000 dwt	-392550,6	2378,8	41,0	64,6	5,1	-165,0	-95,7	-60,8	-77,1
Granelero 100 – 199999 dwt	-338321,5	2050,2	35,4	55,7	4,4	-165,0	-95,7	-60,8	-77,1
Granelero 60 – 99999 dwt	-227039,6	1377,2	23,8	24,6	2,9	-164,9	-95,6	-60,8	-77,1
Granelero 35 – 59999 dwt	-180351,3	1095,5	18,9	19,6	2,3	-164,6	-95,4	-60,9	-76,9
Granelero 10 – 34999 dwt	-138893,2	845,1	14,6	15,1	1,8	-164,4	-95,3	-61,9	-76,8
Granelero <9999 dwt	-22836,8	140,9	2,4	2,5	0,3	-162,1	-94,0	-60,6	-75,7
Carga general 100000 > dwt	-149682,7	907,7	15,7	16,2	1,9	-164,9	-95,6	-60,8	-77,0
Carga general 5000 – 9999 dwt	-79851,3	485,2	8,4	8,7	1,0	-164,6	-95,4	-60,9	-76,9
Carga general <4999 dwt	-12725,0	78,3	1,4	1,4	0,2	-162,6	-94,3	-60,9	-76,8
Carga general 100000 < dwt 100 > TEU	-149299,8	907,7	15,7	16,2	1,9	-164,5	-95,3	-60,6	-76,8
Carga general 5000 – 9999 dwt 100 > TEU	-53696,8	328,7	5,7	5,9	0,7	-163,4	-94,7	-61,3	-76,3
Carga general <4999 dwt 100 > TEU	-4985,5	172,2	3,0	3,1	0,4	-29,0	-16,8	-16,2	-13,5
Portacontenedores 8000 > TEU	-1194276,2	7261,6	125,3	197,2	15,5	-164,5	-95,3	-60,6	-76,8
Portacontenedores 5 – 7999 TEU	-965419,8	5868,8	101,3	159,4	12,6	-164,5	-95,4	-60,6	-76,8
Portacontenedores 3 – 4999 TEU	-649339,8	3943,8	68,0	107,1	8,4	-164,6	-95,4	-60,6	-76,9
Portacontenedores 2 – 2999 TEU	-401264,8	2441,4	42,1	66,3	5,2	-164,4	-95,3	-60,5	-76,8
Portacontenedores 1 – 1999 TEU	-249286,7	1518,1	26,2	27,2	3,2	-164,2	-95,2	-61,8	-76,7
Portacontenedores <999 TEU	-79024,3	485,2	8,4	8,7	1,0	-162,9	-94,4	-61,0	-76,1
Carguero vehiculos 4000 > CEU	-340670,5	2065,8	35,6	37,0	4,4	-164,9	-95,6	-60,8	-76,7
Carguero vehiculos <3999 CEU	-188298,0	1142,5	19,7	20,4	2,4	-164,8	-95,5	-60,9	-76,8
RoRo 2000 > Im	-257543,6	1565,0	27,0	28,0	3,4	-164,6	-95,4	-60,9	-76,9
RoRo <1999 Im	-43481,6	266,1	4,6	4,8	0,6	-163,4	-94,7	-61,3	-76,4
Ferry Solo pasajeros >25kn	-67375,2	406,9	7,0	7,3	0,9	-165,6	-96,0	-62,5	-77,4
Ferry Solo pasajeros <25kn	-30936,6	187,8	3,2	3,4	0,4	-164,7	-95,5	-62,1	-77,0
Ferry RoPax >25kn	-473229,0	2864,0	49,4	77,8	6,1	-165,2	-95,8	-60,8	-77,2
Ferry RoPax <25kn	-115612,2	704,3	12,2	12,6	1,5	-164,2	-95,2	-61,8	-76,7
Crucero 100000 GT	-1229825,0	7433,8	128,3	201,9	15,9	-165,4	-95,9	-60,9	-77,3
Crucero 60 – 99999 GT	-838773,0	5101,9	88,0	138,6	10,9	-164,4	-95,3	-60,5	-76,8
Crucero 10 – 59999 GT	-320395,0	1956,3	33,8	35,0	4,2	-163,8	-94,9	-61,5	-76,5
Crucero 2 – 9999 GT	-81327,3	500,8	8,6	9,0	1,1	-162,4	-94,1	-60,8	-75,9
Crucero <1999 GT	-12545,0	79750,0	250,0	1,4	27,5	-0,2	-0,5	-89,6	-0,5



MAC - Lubricación con aire									
Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NO _x	MAC PM
Petrolero (crudo) >20000 dwt	-1333425,224	10235,10	176,58	277,95	21,91	-130,28	-75,51	-47,97	-60,86
Petrolero (crudo) 120 - 19999 dwt	-1028821,775	7746,75	133,65	210,38	16,58	-132,81	-76,98	-48,90	-62,04
Petrolero (crudo) 80 - 11999 dwt	-733926,9259	5727,90	98,82	155,55	12,26	-128,13	-74,27	-47,18	-59,86
Petrolero (crudo) 60 - 7999 dwt	-429133,6388	3849,90	66,42	104,55	8,24	-111,47	-64,61	-41,05	-52,07
Petrolero (crudo) 10 - 5999 dwt									
Petrolero (crudo) -9999 dwt									
Petrolero (Productos) >60000 dwt									
Petrolero (Productos) 20 - 59999 dwt									
Petrolero (Productos) 10 - 19999 dwt									
Petrolero (Productos) 5 - 9999 dwt									
Petrolero (Productos) -4999 dwt									
Quimiquero >20000 dwt									
Quimiquero 10 - 19999 dwt									
Quimiquero 5 - 9999 dwt									
Quimiquero -4999 dwt									
Gasero LPG >50000 cbm	-640155,372	5680,95	98,01	154,28	12,16	-112,68	-65,32	-41,49	-52,64
Gasero LPG -49999 cbm									
Gasero LNG >200000 cbm	-1497190,424	13380,75	230,85	363,38	28,64	-111,89	-64,86	-41,20	-52,27
Gasero LNG <199999 cbm	-2018266,564	14601,45	251,91	396,53	31,26	-138,22	-80,12	-50,90	-64,57
Granelero >20000 dwt	-473900,5588	7136,40	123,12	193,80	15,28	-66,41	-38,49	-24,45	-31,02
Granelero 100 - 199999 dwt	-737953,3866	6150,45	106,11	167,03	13,17	-119,98	-69,55	-44,18	-56,05
Granelero 60 - 99999 dwt	-490922,4948	4131,60	71,28	73,92	8,84	-118,82	-68,87	-66,41	-55,51
Granelero 35 - 59999 dwt									
Granelero 10 - 34999 dwt									
Granelero <9999 dwt									
Carga general 10000 > dwt									
Carga general 5000 - 9999 dwt									
Carga general <4999 dwt									
Carga general 10000 > dwt 100 > TEU									
Carga general 5000 - 9999 dwt 100 > TEU									
Carga general -4999 dwt 100 > TEU									
Portacontenedores 8000 > TEU	-1863978,942	13070,88	225,50	354,96	27,98	-142,61	-82,66	-52,51	-66,62
Portacontenedores 5 - 7999 TEU	-1493192,43	10563,75	182,25	286,88	22,61	-141,35	-81,93	-52,05	-66,03
Portacontenedores 3 - 4999 TEU	-929527,3236	7098,84	122,47	192,78	15,20	-130,94	-75,90	-48,22	-61,17
Portacontenedores 2 - 2999 TEU	-476444,2749	4394,52	75,82	119,34	9,41	-108,42	-62,84	-39,92	-50,65
Portacontenedores 1 - 1999 TEU									
Portacontenedores <999 TEU									
Carguero vehículos 4000 > CEU									
Carguero vehículos <3999 CEU									
RoRo 2000 > ltn									
RoRo <1999 ltn									
Ferry Solo pasajeros >25kn									
Ferry Solo pasajeros <25kn									
Ferry RoPax >25kn									
Ferry RoPax <25kn									
Crucero 100000 GT									
Crucero 60 - 99999 GT									
Crucero 10 - 59999 GT									
Crucero 2 - 9999 GT									
Crucero -1999 GT									

MAC – Recuperación del calor de los gases de escape										
Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NO _x	MAC PM	
Petrolero (crudo) >20000 dwt	-393012,0751	5458,72	94,18	148,24	11,68	-72,00	-41,73	-26,51	-33,63	
Petrolero (crudo) 120 – 19999 dwt	-276287,2892	4131,60	71,28	112,20	8,84	-66,87	-38,76	-24,62	-31,24	
Petrolero (crudo) 80 – 119999 dwt										
Petrolero (crudo) 60 – 79999 dwt										
Petrolero (crudo) 10 – 59999 dwt										
Petrolero (crudo) -9999 dwt										
Petrolero (Productos) >60000 dwt										
Petrolero (Productos) 20 – 59999 dwt										
Petrolero (Productos) 10 – 19999 dwt										
Petrolero (Productos) 5 – 9999 dwt										
Petrolero (Productos) -4999 dwt										
Quimiquero >20000 dwt										
Quimiquero 10 – 19999 dwt										
Quimiquero 5 – 9999 dwt										
Quimiquero -4999 dwt										
Gasero LPG >50000 cbm										
Gasero LPG -49999 cbm										
Gasero LNG >20000 cbm	-513694,5025	7136,40	123,12	193,80	15,28	-71,98	-41,72	-26,51	-33,63	
Gasero LNG <199999 cbm	-597125,0729	7787,44	134,35	211,48	16,67	-76,68	-44,44	-28,24	-35,82	
Granelero >20000 dwt										
Granelero 100 – 199999 dwt										
Granelero 60 – 99999 dwt										
Granelero 35 – 59999 dwt										
Granelero 10 – 34999 dwt										
Granelero <9999 dwt										
Carga general 10000> dwt										
Carga general 5000 – 9999 dwt										
Carga general <4999 dwt										
Carga general 10000> dwt 100> TEU										
Carga general 5000 – 9999 dwt 100> TEU										
Carga general -4999 dwt 100> TEU										
Portacontenedores 8000> TEU	-873423,9204	11618,56	200,45	315,52	24,87	-75,17	-43,57	-27,68	-35,12	
Portacontenedores 5 – 7999 TEU	-699769,927	9390,00	162,00	255,00	20,10	-74,52	-43,20	-27,44	-34,81	
Portacontenedores 3 – 4999 TEU	-462279,1667	6310,08	108,86	171,36	13,51	-73,26	-42,46	-26,98	-34,22	
Portacontenedores 2 – 2999 TEU	-260305,8081	3906,24	67,39	106,08	8,36	-66,64	-38,63	-24,54	-31,13	
Portacontenedores 1 – 1999 TEU										
Portacontenedores <999 TEU										
Carguero vehículos 4000> CEU										
Carguero vehículos <3999 CEU										
RoRo 2000> Im	-154376,713	2504,00	43,20	44,80	5,36	-61,65	-35,74	-34,46	-28,80	
RoRo <1999 Im										
Ferry Solo pasajeros >25kn										
Ferry Solo pasajeros <25kn										
Ferry RoPax >25kn										
Ferry RoPax <25kn										
Crucero 100000 GT	-982621,7762	11894,00	205,20	323,00	25,46	-82,61	-47,89	-30,42	-38,59	
Crucero 60 – 99999 GT	-596368,0139	8163,04	140,83	221,68	17,47	-73,06	-42,35	-26,90	-34,13	
Crucero 10 – 59999 GT	-185840,647	3130,00	54,00	56,00	6,70	-59,37	-34,41	-33,19	-27,74	
Crucero 2 – 9999 GT										
Crucero -1999 GT										



MAC - Cometa tractora									
Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NO _x	MAC PM
Petrolero (crudo) >20000 dwt	-945674,527	11599,78	200,12	315,01	24,83	-81,53	-47,25	-30,02	-38,09
Petrolero (crudo) 120 - 19999 dwt	-209381,4931	5629,31	97,12	152,87	12,05	-37,19	-21,56	-13,70	-17,38
Petrolero (crudo) 80 - 11999 dwt	-57435,83312	4773,25	82,35	129,63	10,22	-12,03	-6,97	-4,43	-5,62
Petrolero (crudo) 60 - 7999 dwt	130804,1758	2078,95	35,87	56,46	4,45	62,92	36,47	23,17	29,39
Petrolero (crudo) 10 - 5999 dwt	46914,55764	1106,14	19,08	30,04	2,37	42,41	24,58	15,62	19,81
Petrolero (crudo) -9999 dwt	52702,29046	364,96	6,30	6,53	0,78	144,41	83,70	80,71	67,46
Petrolero (Productos) >60000 dwt	268805,2798	1301,45	22,45	35,34	2,79	206,54	119,72	76,06	96,49
Petrolero (Productos) 20 - 59999 dwt	140748,64164	577,49	9,96	10,33	1,24	243,73	141,27	136,23	113,86
Petrolero (Productos) 10 - 19999 dwt	125637,40964	662,62	11,43	11,86	1,42	189,61	109,90	105,98	88,58
Petrolero (Productos) 5 - 9999 dwt	54465,438704	354,94	6,12	6,35	0,76	153,45	88,94	85,77	71,69
Petrolero (Productos) -4999 dwt	56132,118704	345,55	5,96	6,18	0,74	162,44	94,16	90,79	75,89
Quimiquero >20000 dwt	-10196,9522	2873,34	49,57	51,41	6,15	-3,55	-2,06	-1,98	-1,66
Quimiquero 10 - 19999 dwt	3025,31764	1353,41	23,35	24,21	2,90	2,24	1,30	1,25	1,04
Quimiquero 5 - 9999 dwt	-9201,737296	713,64	12,31	12,77	1,53	-12,89	-7,47	-7,21	-6,02
Quimiquero -4999 dwt	39687,542704	438,20	7,56	7,84	0,94	90,57	52,50	50,62	42,31
Gasero LPG >50000 cbm	-64864,0562	3181,33	54,89	86,39	6,81	-20,39	-11,82	-7,51	-9,52
Gasero LPG -49999 cbm	70136,96564	975,31	16,83	17,45	2,09	71,91	41,68	40,19	33,60
Gasero LNG >200000 cbm	-112714,0531	5084,69	87,72	138,08	10,88	-22,17	-12,85	-8,16	-10,36
Gasero LNG <199999 cbm	-294977,0082	4477,78	77,25	121,60	9,59	-65,88	-38,18	-24,26	-30,77
Granelero >20000 dwt	-1065453,263	12274,61	211,77	333,34	26,27	-86,80	-50,31	-31,96	-40,55
Granelero 100 - 199999 dwt	-294604,3971	6109,45	105,40	165,91	13,08	-48,22	-27,95	-17,76	-22,53
Granelero 60 - 99999 dwt	-57530,6642	3140,02	54,17	56,18	6,72	-18,32	-10,62	-10,24	-8,56
Granelero 35 - 59999 dwt	-21197,09836	1489,88	25,70	26,66	3,19	-14,23	-8,25	-7,95	-6,65
Granelero 10 - 34999 dwt	-11752,57836	1436,67	24,79	25,70	3,08	-8,18	-4,74	-4,57	-3,82
Granelero <9999 dwt	34979,92646	464,81	8,02	8,32	0,99	75,26	43,62	42,06	35,16
Carga general 10000> dwt									
Carga general 5000 - 9999 dwt									
Carga general <4999 dwt									
Carga general 10000> dwt 100> TEU									
Carga general 5000 - 9999 dwt 100> TEU									
Carga general -4999 dwt 100> TEU									
Portacontenedores 8000> TEU									
Portacontenedores 5 - 7999 TEU									
Portacontenedores 3 - 4999 TEU									
Portacontenedores 2 - 2999 TEU									
Portacontenedores 1 - 1999 TEU									
Portacontenedores <999 TEU									
Carguero vehiculos 4000> CEU									
Carguero vehiculos <3999 CEU									
RoRo 2000> Im									
RoRo <1999 Im									
Ferry Solo pasajeros >25kn									
Ferry Solo pasajeros <25kn									
Ferry RoPax >25kn									
Ferry RoPax <25kn									
Crucero 100000 GT									
Crucero 60 - 99999 GT									
Crucero 10 - 59999 GT									
Crucero 2 - 9999 GT									
Crucero -1999 GT									

MAC – Paneles solares									
Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NO _x	MAC PM
Petrolero (crudo) >200000 dwt	319796,62533	136,47	2,35	3,71	0,29	2343,38	1358,29	862,92	1094,74
Petrolero (crudo) 120 – 199999 dwt	316518,82133	154,94	2,67	4,21	0,33	2042,91	1184,13	752,27	954,38
Petrolero (crudo) 80 – 119999 dwt	323685,54533	114,56	1,98	3,11	0,25	2825,52	1637,75	1040,45	1319,98
Petrolero (crudo) 60 – 79999 dwt	325796,67333	102,66	1,77	2,79	0,22	3173,43	1839,41	1168,57	1482,51
Petrolero (crudo) 10 – 59999 dwt	326796,68133	97,03	1,67	2,64	0,21	3368,00	1952,19	1240,22	1573,41
Petrolero (crudo) -9999 dwt	331796,72133	68,86	1,19	1,23	0,15	4818,42	2792,90	2693,16	2251,00
Petrolero (Productos) >60000 dwt	331185,60533	72,30	1,25	1,96	0,15	4580,52	2655,01	1686,71	2139,86
Petrolero (Productos) 20 – 59999 dwt	334018,96133	56,34	0,97	1,01	0,12	5928,63	3436,41	3313,68	2769,64
Petrolero (Productos) 10 – 19999 dwt	332741,17333	63,54	1,10	1,14	0,14	5236,80	3035,41	2927,00	2446,45
Petrolero (Productos) 5 – 9999 dwt	332018,94533	67,61	1,17	1,21	0,14	4910,94	2846,53	2744,87	2294,22
Petrolero (Productos) -4999 dwt	332352,28133	65,73	1,13	1,18	0,14	5056,33	2930,80	2826,12	2362,13
Quimiquero >20000 dwt	320407,74133	133,03	2,30	2,38	0,28	2408,63	1396,11	1346,25	1125,22
Quimiquero 10 – 19999 dwt	320518,85333	132,40	2,28	2,37	0,28	2420,86	1403,20	1353,09	1130,94
Quimiquero 5 – 9999 dwt	320685,52133	131,46	2,27	2,35	0,28	2439,42	1413,96	1363,46	1139,61
Quimiquero -4999 dwt	329630,03733	81,07	1,40	1,45	0,17	4066,14	2356,86	2272,68	1899,56
Gasero LPG >50000 cbm	317129,93733	151,49	2,61	4,11	0,32	2093,38	1213,38	770,86	977,95
Gasero LPG -49999 cbm	328185,58133	89,21	1,54	1,60	0,19	3679,00	2132,46	2056,30	1718,70
Gasero LNG >200000 cbm	328185,58133	89,21	1,54	2,42	0,19	3679,00	2132,46	1354,74	1718,70
Gasero LNG <199999 cbm	309463,20933	194,69	3,36	5,29	0,42	1589,55	921,35	585,33	742,58
Granelero >20000 dwt									
Granelero 100 – 199999 dwt									
Granelero 60 – 99999 dwt									
Granelero 35 – 59999 dwt									
Granelero 10 – 34999 dwt									
Granelero <9999 dwt									
Carga general >10000 dwt									
Carga general 5000 – 9999 dwt									
Carga general <4999 dwt									
Carga general 10000 dwt >100 TEU									
Carga general 5000 – 9999 dwt >100 TEU									
Carga general -4999 dwt >100 TEU									
Portacontenedores 8000 TEU									
Portacontenedores 5 – 7999 TEU									
Portacontenedores 3 – 4999 TEU									
Portacontenedores 2 – 2999 TEU									
Portacontenedores 1 – 1999 TEU									
Portacontenedores <999 TEU									
Carguero vehiculos >4000 CEU	981466,432	165,26	2,85	2,96	0,35	5938,78	3442,29	3319,35	2774,38
Carguero vehiculos <3999 CEU	986466,472	137,09	2,37	2,45	0,29	7195,55	4170,75	4021,80	3361,50
RoRo 2000 > 1m	988577,6	125,20	2,16	2,24	0,27	7895,99	4576,75	4413,29	3688,72
RoRo <1999 1m	994744,316	90,46	1,56	1,62	0,19	10996,87	6374,11	6146,47	5137,35
Ferry Solo pasajeros >25kn									
Ferry Solo pasajeros <25kn									
Ferry RoPax >25kn									
Ferry RoPax <25kn									
Crucero 100000 GT									
Crucero 60 – 99999 GT									
Crucero 10 – 59999 GT									
Crucero 2 – 9999 GT									
Crucero -1999 GT									



MAC – Aprovechamiento de gas natural en motores de combustión interna										
Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NOx	MAC PM	
Petrolero (crudo) >200000 dwt										
Petrolero (crudo) 120 – 199999 dwt										
Petrolero (crudo) 80 – 119999 dwt										
Petrolero (crudo) 60 – 79999 dwt										
Petrolero (crudo) 10 – 59999 dwt										
Petrolero (crudo) -9999 dwt	285846,4	1032,9	59,4	61,6	7,4	276,7	48,1	46,4	38,8	
Petrolero (Productos) >60000 dwt	0,0									
Petrolero (Productos) 20 – 59999 dwt	-1513736,3	4225,5	243,0	252,0	30,2	-358,2	-62,3	-60,1	-50,2	
Petrolero (Productos) 10 – 19999 dwt	-844103,2	2723,1	156,6	162,4	19,4	-310,0	-53,9	-52,0	-43,4	
Petrolero (Productos) 5 – 9999 dwt	236226,1	1690,2	97,2	100,8	12,1	139,8	24,3	23,4	19,6	
Petrolero (Productos) -4999 dwt	141690,2	563,4	32,4	33,6	4,0	251,5	43,7	42,2	35,2	
Quimiquero >20000 dwt	-3704873,1	7981,5	459,0	476,0	57,0	-464,2	-80,7	-77,8	-65,1	
Quimiquero 10 – 19999 dwt	-1814377,7	4413,3	253,8	263,2	31,5	-411,1	-71,5	-68,9	-57,6	
Quimiquero 5 – 9999 dwt	102367,8	2817,0	162,0	168,0	20,1	36,3	6,3	6,1	5,1	
Quimiquero -4999 dwt	140708,1	657,3	37,8	39,2	4,7	214,1	37,2	35,9	30,0	
Gasero LPG >50000 cbm	0,0									
Gasero LPG -49999 cbm	-367756,4	1784,1	102,6	106,4	12,7	-206,1	-35,8	-34,6	-28,9	
Gasero LNG >20000 cbm	0,0									
Gasero LNG <199999 cbm	0,0									
Granelero >20000 dwt	0,0									
Granelero 100 – 199999 dwt	0,0									
Granelero 60 – 99999 dwt	-3821034,2	8263,2	475,2	492,8	59,0	-462,4	-80,4	-77,5	-64,8	
Granelero 35 – 59999 dwt	-2918216,4	6573,0	378,0	392,0	46,9	-444,0	-77,2	-74,4	-62,2	
Granelero 10 – 34999 dwt	-2130505,5	5070,6	291,6	302,4	36,2	-420,2	-73,1	-70,5	-58,9	
Granelero <9999 dwt	294487,9	845,1	48,6	50,4	6,0	348,5	60,6	58,4	48,8	
Carga general >10000 dwt	38000,9	5446,2	313,2	324,8	38,9	7,0	1,2	1,2	1,0	
Carga general 5000 – 9999 dwt	70682,0	2910,9	167,4	173,6	20,8	24,3	4,2	4,1	3,4	
Carga general <4999 dwt	146153,6	469,5	27,0	28,0	3,4	311,3	54,1	52,2	43,6	
Carga general 10000> dwt 100> TEU	-2270206,3	5446,2	313,2	324,8	38,9	-416,8	-72,5	-69,9	-58,4	
Carga general 5000 – 9999 dwt 100> TEU	253482,5	1971,9	113,4	117,6	14,1	128,5	22,4	21,6	18,0	
Carga general -4999 dwt 100> TEU	285561,1	1032,9	59,4	61,6	7,4	276,5	48,1	46,4	38,7	
Portacontenedores 8000> TEU	0,0									
Portacontenedores 5 – 7999 TEU	0,0									
Portacontenedores 3 – 4999 TEU	0,0									
Portacontenedores 2 – 2999 TEU	0,0									
Portacontenedores 1 – 1999 TEU	-303743,3	9108,3	523,8	543,2	65,0	-33,3	-5,8	-5,6	-4,7	
Portacontenedores <999 TEU	228423,5	2910,9	167,4	173,6	20,8	78,5	13,6	13,2	11,0	
Carguero vehículos >4000 CEU	-572675,6	12394,8	712,8	739,2	88,4	-46,2	-8,0	-7,7	-6,5	
Carguero vehículos <3999 CEU	-51949,3	6854,7	394,2	408,8	48,9	-7,6	-1,3	-1,3	-1,1	
RoRo >2000 Im	17981,5	9390,0	540,0	560,0	67,0	1,9	0,3	0,3	0,3	
RoRo <1999 Im	263917,0	1596,3	91,8	95,2	11,4	165,3	28,7	27,7	23,2	
Ferry Solo pasajeros >25kn	320480,0	2441,4	140,4	145,6	17,4	131,3	22,8	22,0	18,4	
Ferry Solo pasajeros <25kn	234813,9	1126,8	64,8	67,2	8,0	208,4	36,2	34,9	29,2	
Ferry RoPax >25kn	-2529587,0	17183,7	988,2	1024,8	122,6	-147,2	-25,6	-24,7	-20,6	
Ferry RoPax <25kn	159315,8	4225,5	243,0	252,0	30,2	37,7	6,6	6,3	5,3	
Crucero 100000 GT	0,0									
Crucero 60 – 99999 GT	0,0									
Crucero 10 – 59999 GT	-138574,6	11737,5	675,0	700,0	83,8	-11,8	-2,1	-2,0	-1,7	
Crucero 2 – 9999 GT	289647,7	3004,8	172,8	179,2	21,4	96,4	16,8	16,2	13,5	
Crucero -1999 GT	316279,3	469,5	27,0	28,0	3,4	673,7	117,1	113,0	94,4	

MAC – Aprovechamiento de biodiesel en motores de combustión interna

Tipo y tamaño de buque	Coste	Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM	MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NOx	MAC PM
Petrolero (crudo) >200000 dwt	20332966,1	50513,2	1368,1	NULA	67,9	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (crudo) 120 – 199999 dwt	15389630,3	38232,5	1035,5	NULA	51,4	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (crudo) 80 – 119999 dwt	11378999,4	28268,9	765,6	NULA	38,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (crudo) 60 – 79999 dwt	7648179,9	19000,4	514,6	NULA	25,5	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (crudo) 10 – 59999 dwt	5782770,2	14366,1	389,1	NULA	19,3	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (crudo) -9999 dwt	1025975,4	2548,8	69,0	NULA	3,4	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (Productos) >60000 dwt	7181827,5	17841,8	483,2	NULA	24,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (Productos) 20 – 59999 dwt	4197171,9	10427,0	282,4	NULA	14,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (Productos) 10 – 19999 dwt	2704844,1	6719,6	182,0	NULA	9,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (Productos) 5 – 9999 dwt	1678868,8	4170,8	113,0	NULA	5,6	402,5	148,6	NULA	299,5
Petrolero (Productos) -4999 dwt	559622,9	1390,3	37,7	NULA	1,9	402,5	148,6	NULA	299,5
Químico >20000 dwt	7927991,4	19695,5	533,4	NULA	26,5	402,5	148,6	NULA	299,5
Químico 10 – 19999 dwt	4383712,9	10890,5	295,0	NULA	14,6	402,5	148,6	NULA	299,5
Químico 5 – 9999 dwt	2798114,6	6951,4	188,3	NULA	9,3	402,5	148,6	NULA	299,5
Químico -4999 dwt	652893,4	1622,0	43,9	NULA	2,2	402,5	148,6	NULA	299,5
Gasero LPG >50000 cbm	11285728,9	28037,1	759,4	NULA	37,7	402,5	148,6	NULA	299,5
Gasero LPG -49999 cbm	1772139,2	4402,5	119,2	NULA	5,9	402,5	148,6	NULA	299,5
Gasero LNG >200000 cbm	26582088,6	66037,9	1788,6	NULA	88,8	402,5	148,6	NULA	299,5
Gasero LNG <199999 cbm	29007121,3	72062,4	1951,7	NULA	96,9	402,5	148,6	NULA	299,5
Granelero >20000 dwt	14177113,9	35220,2	953,9	NULA	47,3	402,5	148,6	NULA	299,5
Granelero 100 – 199999 dwt	12218433,7	30354,3	822,1	NULA	40,8	402,5	148,6	NULA	299,5
Granelero 60 – 99999 dwt	8207802,8	20390,6	552,3	NULA	27,4	402,5	148,6	NULA	299,5
Granelero 35 – 59999 dwt	6528934,1	16219,8	439,3	NULA	21,8	402,5	148,6	NULA	299,5
Granelero 10 – 34999 dwt	5036606,3	12512,4	338,9	NULA	16,8	402,5	148,6	NULA	299,5
Granelero <9999 dwt	839434,4	2085,4	56,5	NULA	2,8	402,5	148,6	NULA	299,5
Carga general 10000 > dwt	5409688,2	13439,3	364,0	NULA	18,1	402,5	148,6	NULA	299,5
Carga general 5000 – 9999 dwt	2891385,1	7183,1	194,5	NULA	9,7	402,5	148,6	NULA	299,5
Carga general <4999 dwt	466352,4	1158,6	31,4	NULA	1,6	402,5	148,6	NULA	299,5
Carga general 10000 > dwt 100 > TEU	5409688,2	13439,3	364,0	NULA	18,1	402,5	148,6	NULA	299,5
Carga general 5000 – 9999 dwt 100 > TEU	1958680,2	4865,9	131,8	NULA	6,5	402,5	148,6	NULA	299,5
Carga general -4999 dwt 100 > TEU	1025975,4	2548,8	69,0	NULA	3,4	402,5	148,6	NULA	299,5
Portacontenedores 8000 > TEU	43277505,7	107514,3	2911,9	NULA	144,5	402,5	148,6	NULA	299,5
Portacontenedores 5 – 7999 TEU	34976432,4	86892,0	2353,4	NULA	116,8	402,5	148,6	NULA	299,5
Portacontenedores 3 – 4999 TEU	23504162,6	58391,4	1581,5	NULA	78,5	402,5	148,6	NULA	299,5
Portacontenedores 2 – 2999 TEU	14550195,9	36147,1	979,0	NULA	48,6	402,5	148,6	NULA	299,5
Portacontenedores 1 – 1999 TEU	9047237,2	22476,1	608,7	NULA	30,2	402,5	148,6	NULA	299,5
Portacontenedores <999 TEU	2891385,1	7183,1	194,5	NULA	9,7	402,5	148,6	NULA	299,5
Carguero vehículos 4000 > CEU	12311704,2	30586,0	828,4	NULA	41,1	402,5	148,6	NULA	299,5
Carguero vehículos <3999 CEU	6808745,5	16915,0	458,1	NULA	22,7	402,5	148,6	NULA	299,5
RoRo 2000 > ltn	9327048,6	23171,2	627,6	NULA	31,1	402,5	148,6	NULA	299,5
RoRo <1999 ltn	1585598,3	3939,1	106,7	NULA	5,3	402,5	148,6	NULA	299,5
Ferry Solo pasajeros >25kn	2425032,6	6024,5	163,2	NULA	8,1	402,5	148,6	NULA	299,5
Ferry Solo pasajeros <25kn	1119245,8	2780,5	75,3	NULA	3,7	402,5	148,6	NULA	299,5
Ferry RoPax >25kn	17068499,0	42403,3	1148,4	NULA	57,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Ferry RoPax <25kn	4197171,9	10427,0	282,4	NULA	14,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Crucero 100000 GT	44303481,1	110063,1	2980,9	NULA	147,9	402,5	148,6	NULA	299,5
Crucero 60 – 99999 GT	30406178,6	75538,1	2045,9	NULA	101,5	402,5	148,6	NULA	299,5
Crucero 10 – 59999 GT	11658810,8	28964,0	784,5	NULA	38,9	402,5	148,6	NULA	299,5
Crucero 2 – 9999 GT	2984655,6	7414,8	200,8	NULA	10,0	402,5	148,6	NULA	299,5
Crucero -1999 GT	466352,4	1158,6	31,4	NULA	1,6	402,5	148,6	NULA	299,5



Tipo y tamaño de buque	Coste	MAC – HÉLICES CLT						MAC CO ₂	MAC SO ₂	MAC NOx	MAC PM
		Efectividad CO ₂	Efectividad SO ₂	Efectividad NO _x	Efectividad PM						
1A	-1463286,1	9734,3	167,9	264,4	20,8	-150,3	-87,1	-55,4	-70,2		
1B	-67140,1	594,7	10,3	16,2	1,3	-112,9	-65,4	-41,6	-52,7		
2A	-911851,7	6823,4	117,7	185,3	14,6	-133,6	-77,5	-49,2	-62,4		
2B	1430,0	187,8	3,2	5,1	0,4	7,6	4,4	2,8	3,6		
3A	-550942,8	4100,3	70,7	111,4	8,8	-134,4	-77,9	-49,5	-62,8		
3B	-119272,1	970,3	16,7	26,4	2,1	-122,9	-71,2	-45,3	-57,4		
4A	-2169704,2	14523,2	250,6	394,4	31,1	-149,4	-86,6	-55,0	-69,8		
4B	-462614,9	3036,1	52,4	82,5	6,5	-152,4	-88,3	-56,1	-71,2		
5B	-113970,6	1408,5	24,3	38,3	3,0	-80,9	-46,9	-29,8	-37,8		

ANEXO III – GRÁFICAS DE LOS CÁLCULOS MAC

III.I Leyenda

Tipo y tamaño de buque	Referencia
Petrolero (crudo) >200000 dwt	A1
Petrolero (crudo) 120 – 199999 dwt	A2
Petrolero (crudo) 80 – 119999 dwt	A3
Petrolero (crudo) 60 – 79999 dwt	A4
Petrolero (crudo) 10 – 59999 dwt	A5
Petrolero (crudo) -9999 dwt	A6
Petrolero (Productos) >60000 dwt	A7
Petrolero (Productos) 20 – 59999 dwt	A8
Petrolero (Productos) 10 – 19999 dwt	A9
Petrolero (Productos) 5 – 9999 dwt	A10
Petrolero (Productos) -4999 dwt	A11
Quimiquero >20000 dwt	B1
Quimiquero 10 – 19999 dwt	B2
Quimiquero 5 – 9999 dwt	B3
Quimiquero -4999 dwt	B4
Gasero LPG >50000 cbm	B5
Gasero LPG -49999 cbm	B6
Gasero LNG >200000 cbm	B7
Gasero LNG <199999 cbm	B8
Granelero >20000 dwt	C1
Granelero 100 – 199999 dwt	C2
Granelero 60 – 99999 dwt	C3
Granelero 35 – 59999 dwt	C4
Granelero 10 – 34999 dwt	C5
Granelero <9999 dwt	C6
Carga general 10000> dwt	C7
Carga general 5000 – 9999 dwt	C8
Carga general <4999 dwt	C9
Carga general 10000> dwt 100> TEU	C10
Carga general 5000 – 9999 dwt 100> TEU	C11
Carga general -4999 dwt 100> TEU	C12
Portacontenedores 8000> TEU	D1
Portacontenedores 5 – 7999 TEU	D2
Portacontenedores 3 – 4999 TEU	D3
Portacontenedores 2 – 2999 TEU	D4
Portacontenedores 1 – 1999 TEU	D5
Portacontenedores <999 TEU	D6
Carguero vehículos 4000> CEU	E1
Carguero vehículos <3999 CEU	E2
RoRo 2000> Im	E3
RoRo <1999 Im	E4
Ferry Solo pasajeros >25kn	E5
Ferry Solo pasajeros <25kn	E6
Ferry RoPax >25kn	E7
Ferry RoPax <25kn	E8
Crucero 100000 GT	E9
Crucero 60 – 99999 GT	E10
Crucero 10 – 59999 GT	E11
Crucero 2 – 9999 GT	E12
Crucero -1999 GT	E13

III.II Gráficas de los cálculos MAC – Reducción de CO₂

- A) Buques tanque
- B) Buques quimiqueros
- C) Graneleros y buques de carga general
- D) Buques portacontenedores
- E) Buques de pasaje y carga rodada

III.II Gráficas de los cálculos MAC – Reducción de SO₂

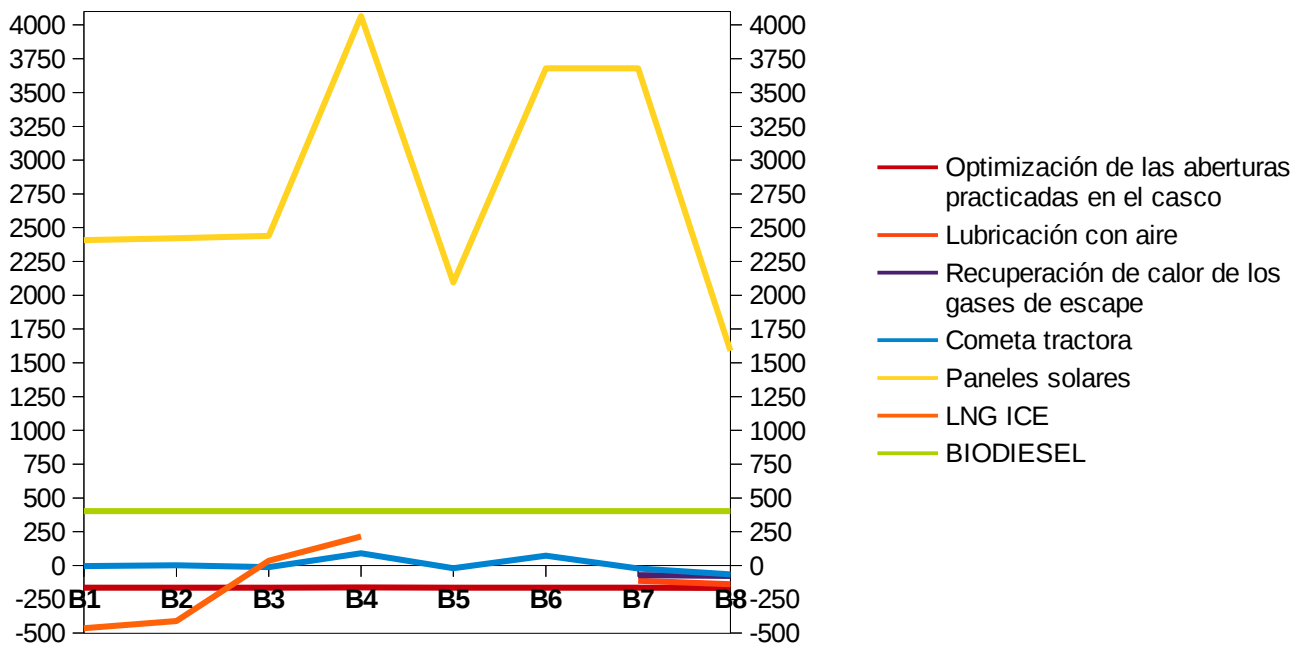
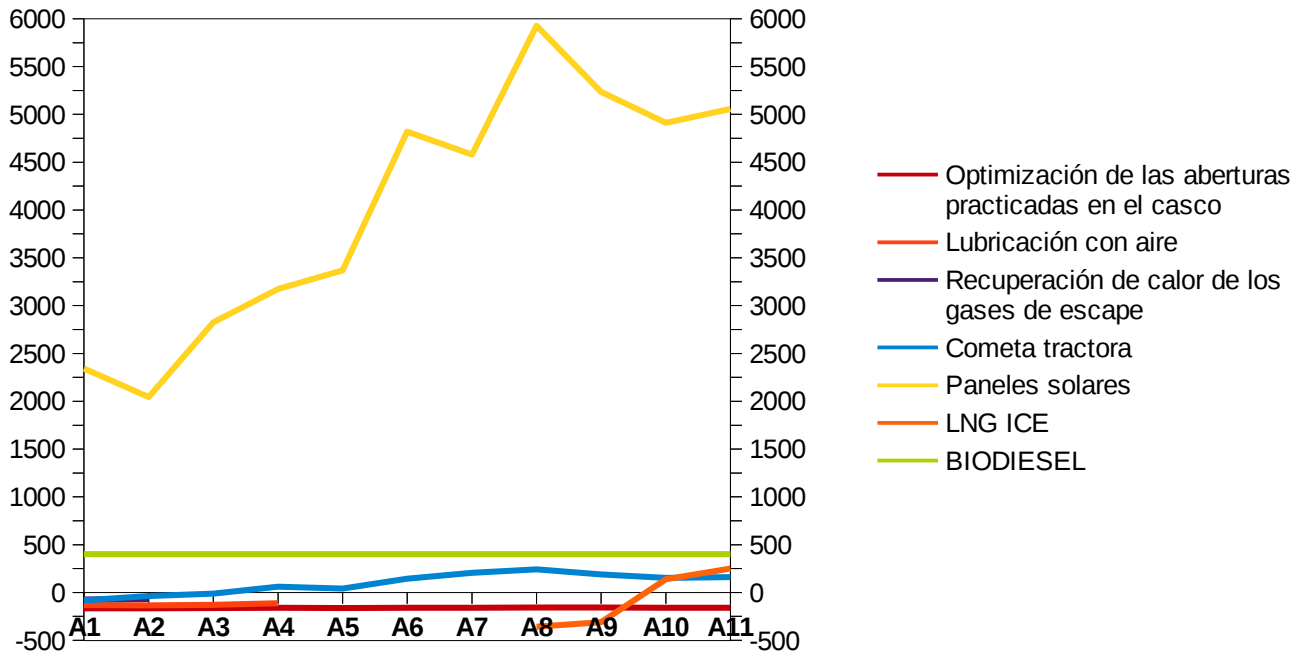
- F) Buques tanque
- G) Buques quimiqueros
- H) Graneleros y buques de carga general
- I) Buques portacontenedores
- J) Buques de pasaje y carga rodada

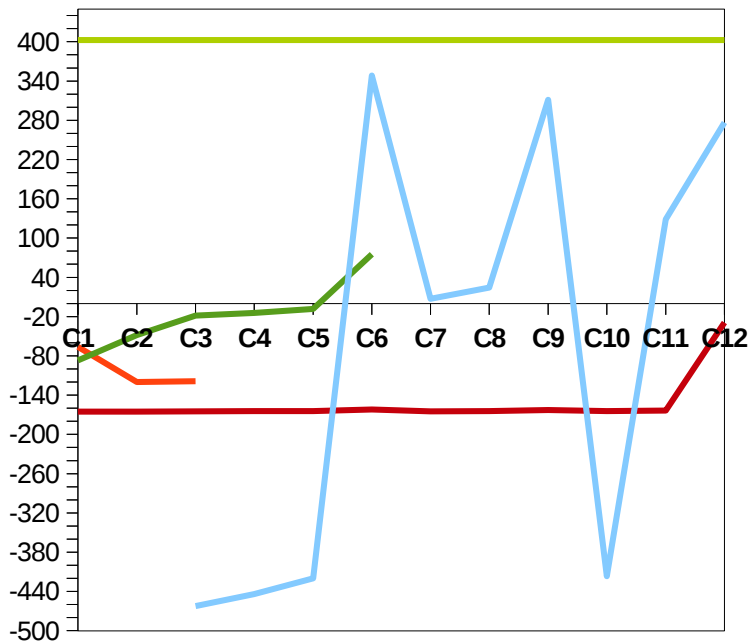
III.II Gráficas de los cálculos MAC – Reducción de NO_x

- K) Buques tanque
- L) Buques quimiqueros
- M) Graneleros y buques de carga general
- N) Buques portacontenedores
- O) Buques de pasaje y carga rodada

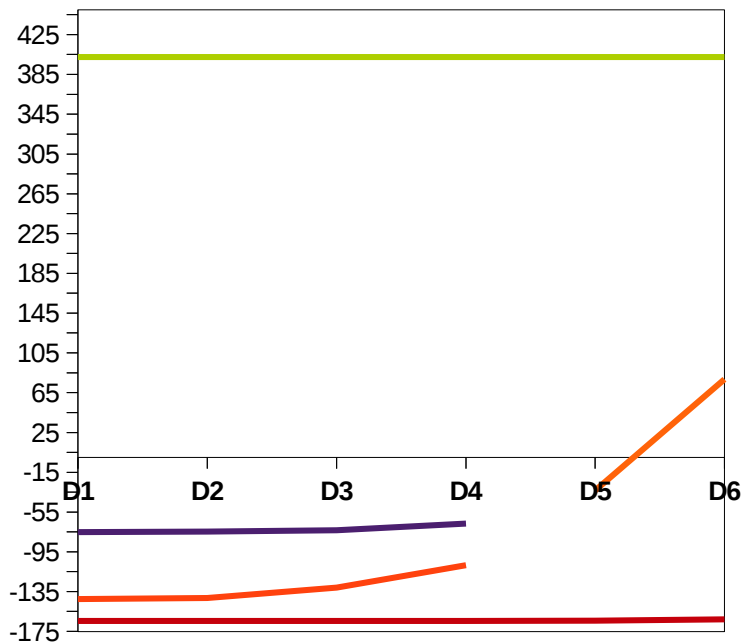
III.II Gráficas de los cálculos MAC – Reducción de PM₁₀

- P) Buques tanque
- Q) Buques quimiqueros
- R) Graneleros y buques de carga general
- S) Buques portacontenedores
- T) Buques de pasaje y carga rodada

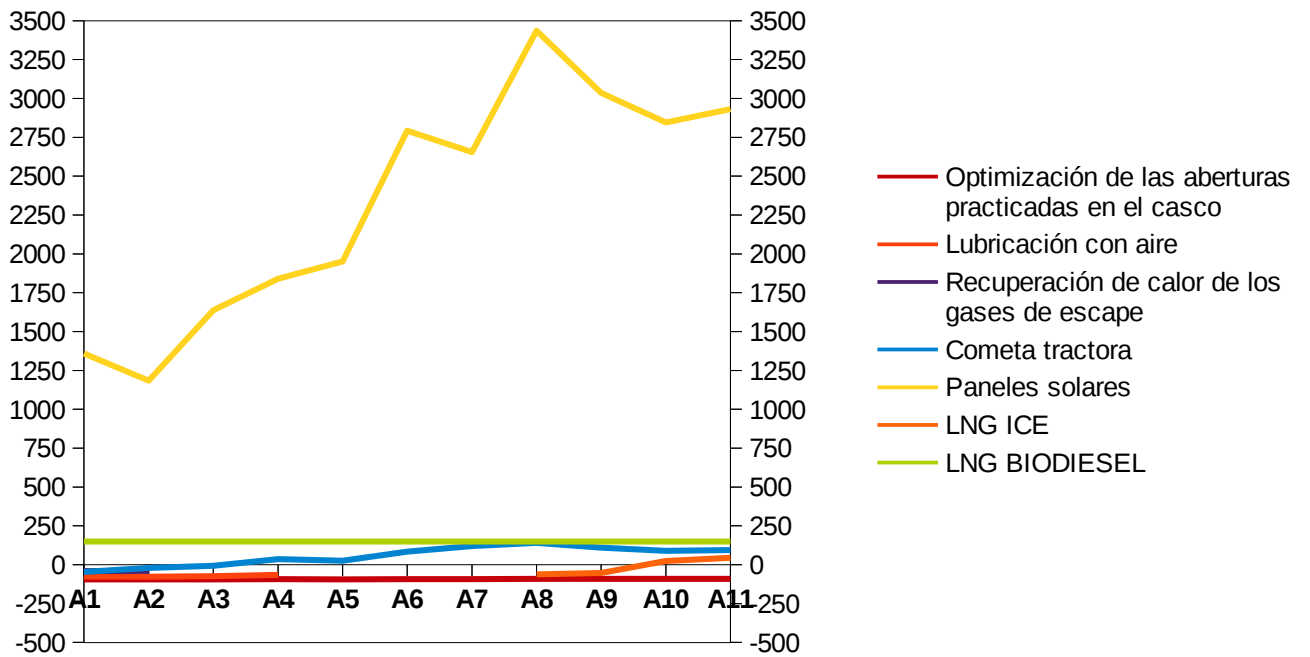
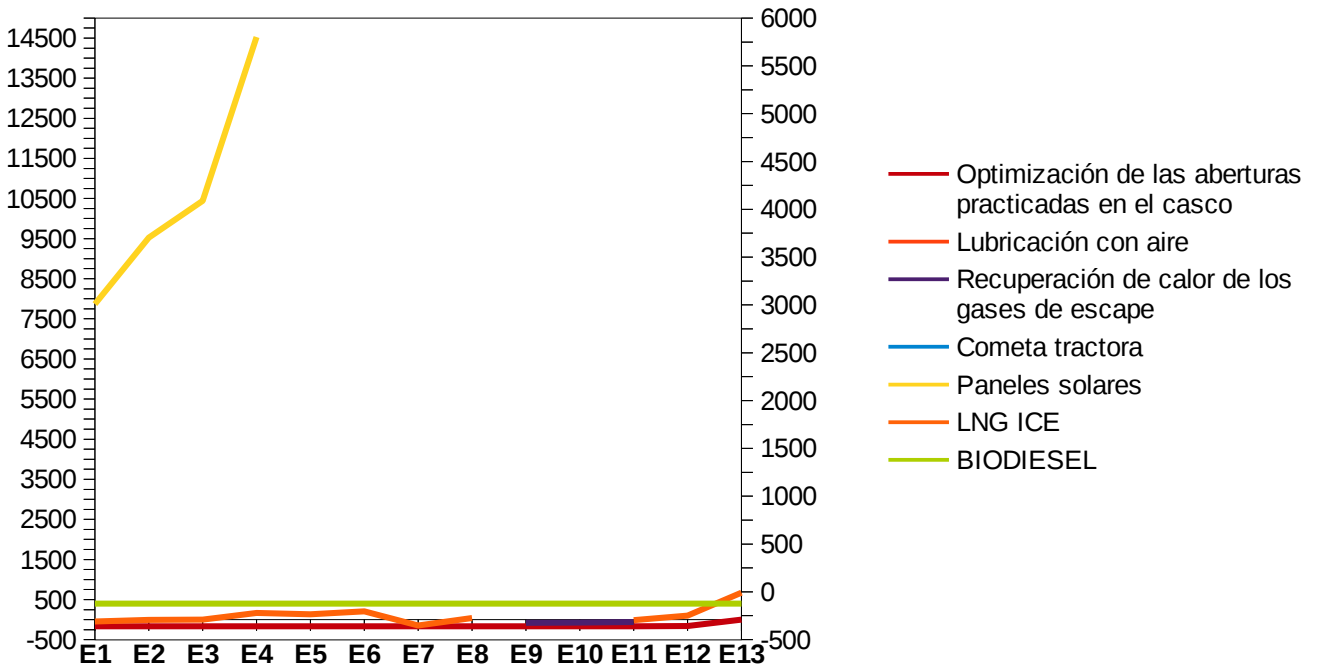


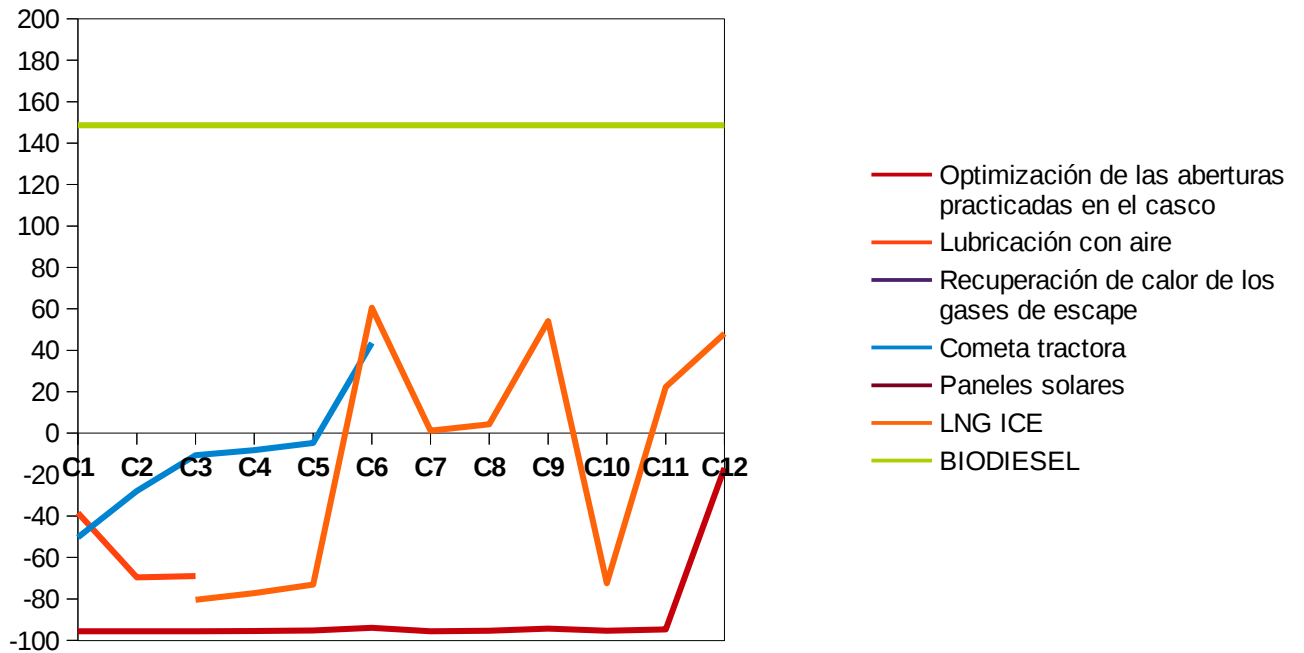
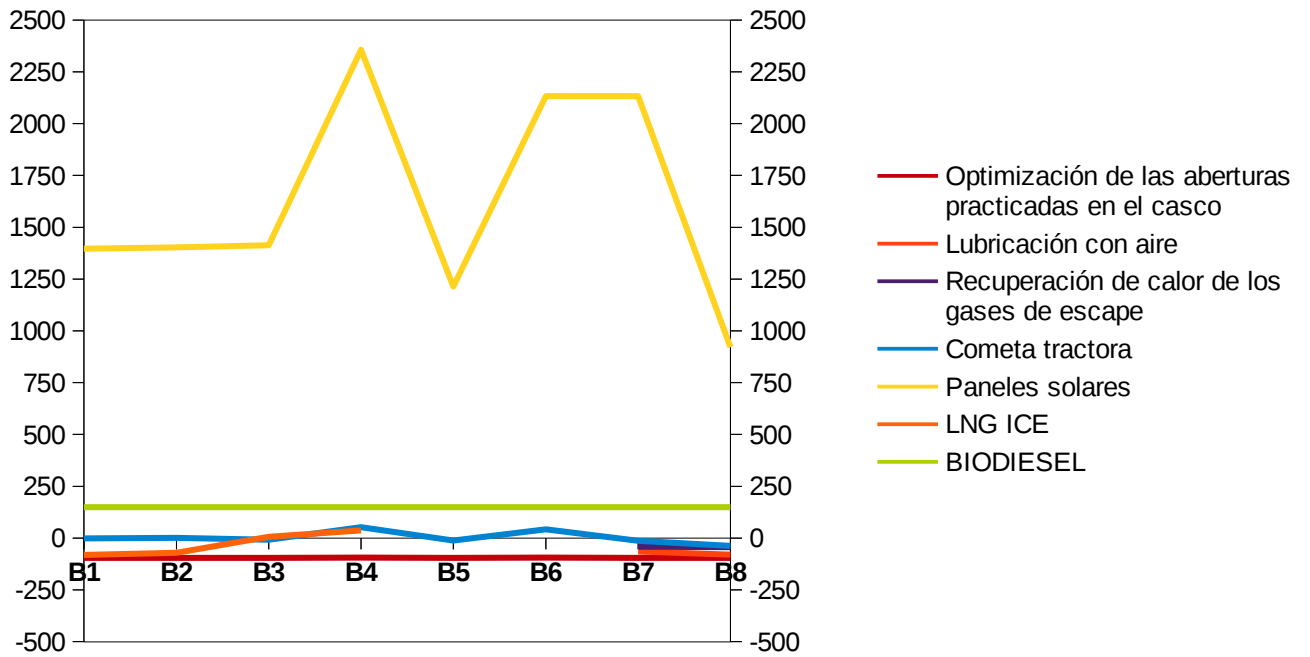


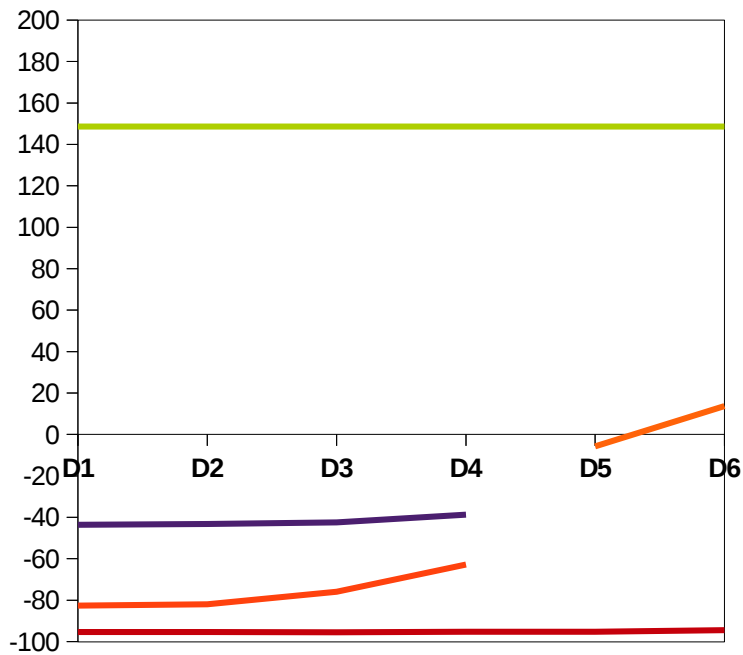
- Optimización de las aberturas practicadas en el casco
- Lubricación con aire
- Recuperación de calor de los gases de escape
- Cometa tractora
- Paneles solares
- LNG ICE
- BIODIESEL



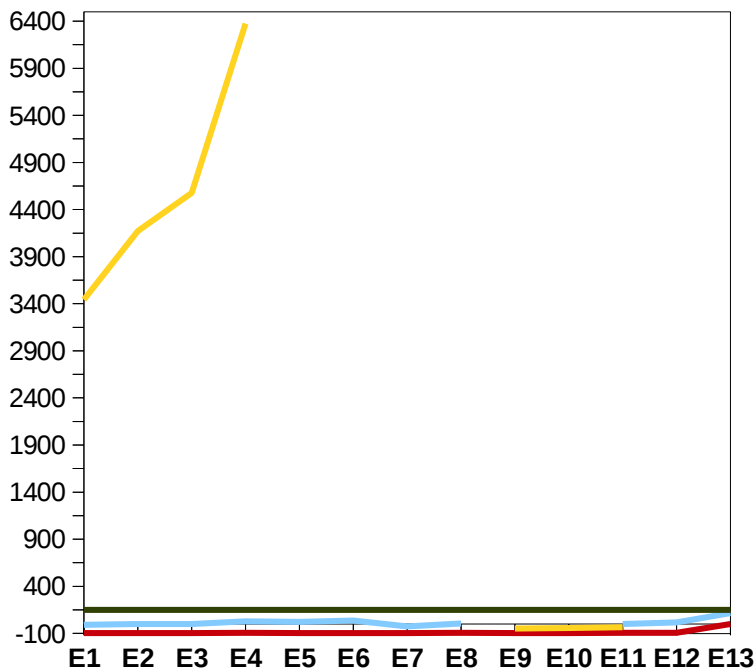
- Optimización de las aberturas practicadas en el casco
- Lubricación con aire
- Recuperación de calor de los gases de escape
- Cometa tractora
- Paneles solares
- LNG ICE
- BIODIESEL







- Optimización de las aberturas practicadas en el casco
- Lubricación con aire
- Recuperación de calor de los gases de escape
- Cometa tractora
- Paneles solares
- LNG ICE
- BIODIESEL



- Optimización de las aberturas practicadas en el casco
- Lubricación con aire
- Recuperación de calor de los gases de escape
- Cometa tractora
- Paneles solares
- LNG ICE
- BIODIESEL

