

# **Medidas presentes y futuras hacia las cero emisiones de gases de efecto invernadero producidas por los buques**

**Trabajo de fin de grado**



Facultad de Náutica de Barcelona  
Universidad Politécnica de Cataluña

Trabajo realizado por:  
**Rodrigo Martinez Garcia**

Dirigido por:  
**Dr. Germán de Melo Rodríguez**

Grado en Tecnologías Marinas

Barcelona, 10 mayo 2022

Departamento de Ciencias e Ingenierías Náuticas



Página en blanco

# Resumen

Existe un afán incansable en conseguir reducir al máximo el impacto de los gases contaminantes en nuestro ecosistema, y especialmente en el sector naval, puesto que es el encargado de mover cerca del 80% del volumen de mercancías a nivel mundial.

Con este proyecto se pretende mostrar las diferentes posibilidades de mejoras para reducir los gases de efecto invernadero producidos por los buques, Para ello, se realizará una explicación previa de convenios internacionales y normativa necesaria para la implementación de los sistemas de reducción de emisiones y poder entender conceptos posteriores. Además, se analizarán las normativas actuales aplicables a los buques en cuanto a contaminación, y se enumerarán las futuras perspectivas de reducción de emisiones a corto, medio y largo plazo. Para ello, se expondrán los sistemas actuales de reducción de emisiones y los diferentes tipos de combustibles alternativos.

Finalmente, se valorará según lo estudiado y expuesto hacia qué dirección se debe de seguir trabajando para lograr reducir al máximo las emisiones de gases contaminantes producidas por los buques.

# Abstract

There is a tireless desire to minimize the impact of polluting gases on our ecosystem, and especially in the naval sector, since it is responsible for moving about 80% of the volume of goods worldwide.

This project aims to show the different possibilities of improvements to reduce greenhouse gases produced by ships. For that, a prior explanation of international agreements and regulations necessary for the implementation of emission reduction systems and to be able to understand subsequent concepts will be made. In addition, the current pollution regulations applicable to ships will be analyzed, and future prospects for emission reductions in the short, medium and long term will be listed. To this end, the current emission reduction systems and the different types of alternative fuels will be exposed.

Finally, it will be assessed as studied and exposed in which direction should continue working to minimize the emissions of polluting gases produced by ships.

Página en blanco .....	2
Resumen.....	3
Abstract .....	4
Tabla de ilustraciones .....	9
Cambio climático .....	12
Calentamiento global .....	12
Efecto invernadero.....	14
Contaminación en el sector naval .....	17
Capítulo 1. Normativa aplicable a los buques .....	19
Convenio MARPOL 73/78 .....	20
Normativa internacional del convenio MARPOL .....	20
Protocolo de 1973 .....	21
Protocolo de 1978 .....	22
Normativa Española .....	23
Capítulo 2. Anexo VI.- Reglas para prevenir la contaminación Atmosférica ocasionada por los Buques. ....	25
Sustancias que agotan la capa de ozono. ....	27
Código técnico sobre los NO <sub>x</sub> .....	28
Aplicación. ....	28
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ).....	29
óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ).....	31
Zonas de control de emisiones (ECA) .....	32
Teoría física/química de la combustión .....	34
Capítulo 3 Medidas para la reducción de gases de efecto invernadero .....	37
Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP) .....	39
Medidas a corto y medio plazo.....	40
Índice de diseño de eficiencia energética (EEDI).....	40

Índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI).....	44
Indicador de la intensidad de carbono (CII) .....	45
Indicador de la intensidad de carbono (CII) operacional anual obtenido .....	46
Proyecto GLOMEEP .....	47
Cop26 .....	48
Capítulo 4. Métodos de aumento de eficiencia.....	50
Sistema propulsivo .....	52
Métodos de reducción directos. ....	53
Inyección directa de agua en la cámara de combustión. ....	53
Emulsión de agua de combustible. ....	54
Inyección de agua en el aire de admisión (HAM) .....	56
Sistema de inyección Cammon-rail.....	57
Recirculación de gases (EGR) .....	60
Métodos de reducción externos.....	61
Catalizador de gases. (SCR).....	62
Filtros de partículas.....	65
Scrubber (lavado de gases) .....	66
Torres de lavado seco.....	67
Torres de lavado húmedo .....	68
Medidas relativas al diseño Hidrodinámico .....	71
Resistencia por superficies curvas.....	72
Sistema de lubricación por aire .....	75
Velocidad de diseño .....	76
Diseño del casco.....	77
Dispositivos de ahorro de energía (ESD).....	79
PBCF (propeller boss cap fins) .....	81
Tobera Mewis ( pre-Swirl duct PSD) .....	84

Hélices contra rotantes (CRP).....	85
Flaps .....	86
Medidas operacionales .....	87
Indicador operacional de la eficiencia energética (EEOI).....	87
Navegación meteorológica:.....	88
Justo a tiempo (just in time) .....	90
Asiento y calado optimo .....	91
Gestión de la energía .....	92
Optimización de la velocidad.....	94
Capítulo 5 Combustibles Alternativos.....	96
Gas Natural Licuado (GNL) .....	99
Motores de combustión de GNL.....	100
Motores dual fuel.....	100
Motores de mezcla pobre (baja presión) .....	101
Gas Licuado del Petróleo(GLP) .....	102
Combustibles de cero emisiones de carbono .....	103
Amoniaco.....	103
Motores de combustión de NH <sub>3</sub> .....	104
Hidrogeno .....	106
Pilas de combustible.....	108
Nuevas pilas de combustible PEM.....	110
Biocombustibles.....	110
El biodiesel o Éster metílico de ácido graso (FAME). .....	110
Aceite vegetal Hidrotratado (HVO).....	111
Bioetanol (BTL) .....	111
Propulsión hibrida .....	112
Conclusiones.....	115



Bibliografia.....	117
Anexos A.....	121

## Tabla de ilustraciones

Ilustración 1 efectos que agotan la capa de ozono .....	13
Ilustración 2 efecto invernadero, fuente IPCC .....	14
Ilustración 3 fuente IPPC, 2007. cuadro informe de evaluación .....	15
Ilustración 4 fuente IPPC 1996 .....	16
Ilustración 5 buque realizando emisiones contaminantes fuente google.....	17
Ilustración 6 MARPOL anexo VI fuente IMO .....	25
Ilustración 7 límite máximo de emisiones de NO <sub>x</sub> . Fuente IMO.....	30
Ilustración 8 Zonas ECA y futuras fuente ingeniero marino .....	33
Ilustración 9 Fuente: IMO estrategia reducción. ....	37
Ilustración 10 fuente MECP module 2 .....	42
Ilustración 11 Fuente M2 course on Energy Efficient Ship Operation. ....	43
Ilustración 12 fuente DNV .....	45
Ilustración 13. fuente: Proyecto GLOMEEP, IMO.....	48
Ilustración 14 estrategia IMO fuente organización marítima internacional .....	50
Ilustración 15 fuente TNO innovación, GHG report .....	52
Ilustración 16 sistema inyección agua en CC fuente ingeniero marino .....	54
Ilustración 17 emulsión combustible fuente ingeniero marino .....	54
Ilustración 18 homogeneizador de combustible, fuente WFE.....	55
Ilustración 19 dispositivo HAM fuente Wärtsilä.....	56
Ilustración 20 beneficios de instalación de un HAM, fuente ingeniero marino..	57
Ilustración 21 sistema cammon-rail fuente Wärtsilä .....	57
Ilustración 22 rail común fuente propia.....	58
Ilustración 23 inyector electrónico de cammon-rail, fuente ingeniero marino ...	59
Ilustración 24 sistema EGR .....	60
Ilustración 25 sistema SCR en Motor MAN, fuente MAN marine .....	63
Ilustración 26 Reacción producida en un SCR, fuente ingeniero marino .....	64
Ilustración 27 SCR fuente propia.....	64
Ilustración 28 Scrubber fuente Wärtsilä.....	66
Ilustración 29 Scrubber de gases tipo seco.....	67
Ilustración 30 Armazón de un scrubber fuente wärtsilä .....	68

Ilustración 31 Sistema completo scrubber en un buque fuente ingeniero marino .....	69
Ilustración 32 resistencias totales fuente: Prof Joel Jurado.....	71
Ilustración 33 interacción del bulbo con la formación de ola, fuente IMO module 4 .....	73
Ilustración 34 resistencia por formación de olas fuente: apuntes Prof. Joel Jurado UPC.....	74
Ilustración 35 sistema de lubricación por aire MELS, fuente Mitsubishi .....	75
Ilustración 36 coef. bloque, carena en paralelepípedo fuente: teoria del buque Joan Olivella.....	78
Ilustración 37 helice Keppel. Fuente G.Gourgoulidis Hydrodynamic Energy Efficiency .....	80
Ilustración 38 pala CLT, fuente G. Gougoulidis .....	80
Ilustración 39 Helice con sistema PBCF fuente propia.....	81
Ilustración 40 empuje de una hélice fuente geometría de la Hélice.pdf .....	81
Ilustración 41 eliminación de vórtices con PBCF fuente Wärtsilä.....	82
Ilustración 42 amortización del sistema PBCF debido al ahorro de fuel fuente Wärtsilä .....	83
Ilustración 43 combinación de hélices PCBF y bulbos en timón Wärtsilä .....	83
Ilustración 44 fuente Wärtsilä .....	84
Ilustración 45 sistema BTF fuente Wärtisla .....	85
Ilustración 46 fuente Wartsila .....	85
Ilustración 47 flap, fuente Georde Gourgoulidis .....	86
Ilustración 48 tabla monitoreo de datos según EEOI fuente IMO.....	88
Ilustración 49 grafico resistencia al avance en condiciones clim. adversas. fuente Univ. Pol. argentina .....	89
Ilustración 50 ejemplo de la operación "apresurarse y esperar" fuente GLOMEEP.....	90
Ilustración 51 fuente Wärtsilä .....	93
Ilustración 52 fuente YARA Company .....	93
Ilustración 53 fuente Wärtsilä .....	94
Ilustración 54 demanda de buques con combustibles alternativos. fuente DNV .....	97

Ilustración 55 actual uso de combustibles y tecnología en el sector. fuente DNV	97
Ilustración 56 fuente DNV	98
Ilustración 57 composición GNL fuente propia	99
Ilustración 58 motor dual diésel GNL fuente Wärtsilä	101
Ilustración 59 fuente MAN	104
Ilustración 60 Imagen CC motor dual fuente MAN	105
Ilustración 61 fuente MAN	105
Ilustración 62 Fuente marine Science and engineering	106
Ilustración 63 fuente Wärtsila	108
Ilustración 64 pila SOFC	109
Ilustración 65 configuración full electric. fuente siemens	113
Ilustración 66 Certificado de emisiones EIAPP. fuente MECP	122
Ilustración 67 informe SEEMP	123
Ilustración 68 documento normalizado SEEMP fuente: MECP70	124
Ilustración 69 tabla calculo EEDI fuente MECP208	125
Ilustración 70 MECP208	126
Ilustración 71 tabla de cálculo EEXI fuente 62	127
Ilustración 72 notificación estándar CII MECP76	128

# Cambio climático

El cambio climático es la variación global del clima de la tierra, esta variación se debe tanto a causas naturales como a la acción del hombre, y se reflejan en variaciones de los patrones naturales del clima como, por ejemplo, sequías más frecuentes, tormentas más devastadoras o desglaciación temprana de los polos. Todo ello, se debe en gran medida al calentamiento global propiciado por la acción humana.

## Calentamiento global

El calentamiento global es debido al aumento de emisiones de gases contaminantes que provocan el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, que propician un aumento de la temperatura de la superficie terrestre y con ello la alteración del clima.

Estudios desarrollados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) estiman que las actividades humanas, han causado un calentamiento global de aproximadamente 1.0°C con respecto a los niveles preindustriales. Y prevén que, si las emisiones continúan aumentando, entre los años 2025 a 2050, el calentamiento global llegue a 1.5°C de manera irreversible.

Para entender claramente los conceptos anteriores, es importante conocer **porque se produce un calentamiento global.**

El calentamiento global se debe tanto a causas naturales, debidas a la propia naturaleza de la tierra como, por ejemplo, la erupción de un volcán y que son necesarias para disponer de un ecosistema propicio para la vida, como a causas artificiales, y relativas a las actividades humanas como el **uso de combustibles fósiles.**

El “calentamiento” se debe a la radiación proveniente del sol, que llega al planeta tierra atravesando la atmósfera. Una parte de la radiación que atraviesa la atmósfera llega a la superficie terrestre mientras que otra parte es absorbida y otra reflejada. La radiación ultravioleta es absorbida principalmente por el oxígeno y el ozono que componen la atmósfera, gracias ello, los rayos UV no

llegan a la superficie terrestre, de ahí, la importancia de preservar la capa de ozono y de regular los gases que la agotan, conocidos como SAOs



Ilustración 1 efectos que agotan la capa de ozono

Mediante el Protocolo de Montreal, en 2009 se acordó la prohibición de 96 sustancias que agotan la capa de ozono, de entre otras las siguientes:

- Clorofluorocarbonos (CFC)
- Hidroclorofluorocarbonos (HCFC)
- Halones.
- Hidrobromofluorocarbonos (HBFC)
- Bromoclorometano.
- Metilcloroformo.
- Tetracloruro de carbono.
- Bromuro de metilo

## Efecto invernadero

El efecto invernadero es un fenómeno que impide que la radiación del sol que llega a la superficie terrestre sea rebotada en su totalidad de nuevo a la atmosfera. Propiciando unas condiciones óptimas para la vida terrestre.

Si no existiera una capa de gases de efecto invernadero que fueran capaces de absorber la radiación infrarroja que irradia la superficie terrestre hacia la atmosfera, se estima que la temperatura del planeta rondaría los  $-18^{\circ}\text{C}$ . según el estudio publicado por el IPCC en 2001 "la base científica".

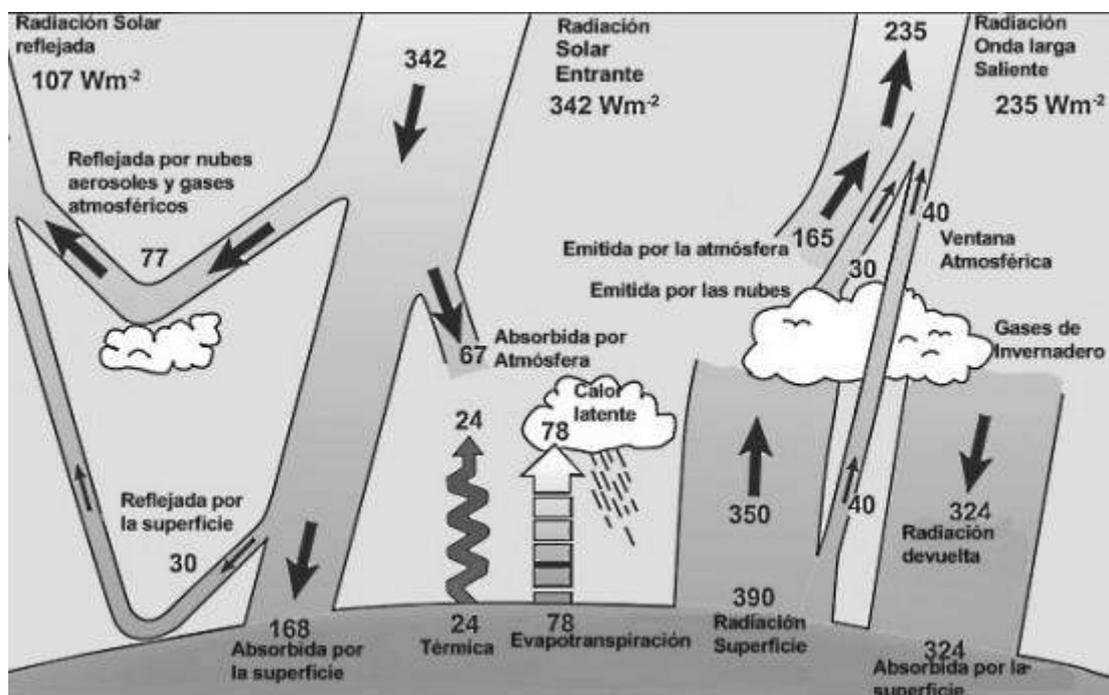


Ilustración 2 efecto invernadero, fuente IPCC

Los gases del efecto invernadero, tienen la capacidad de absorción de energía debido a que la frecuencia de radiación electromagnética es similar a la frecuencia vibracional molecular del gas y así poder retener parte de la radiación infrarroja que emite la superficie terrestre. Gracias a ello, la temperatura aproximada del planeta es de unos  $+15^{\circ}\text{C}$ .

La concentración de gases de efecto invernadero, ya existían de manera natural y anterior a la reindustrialización y acción humana. Estos gases mantenían un equilibrio entre fuentes emisoras de GEI y sumideros. Entendiéndose como

sumidero los procesos que los destruyen o absorben, como la vegetación con su ciclo de fotosíntesis.

La composición natural de los gases propicios del efecto invernadero son, el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), el Metano ( $\text{CH}_4$ ), el Ozono ( $\text{O}_3$ ) y el Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) entre otros. Mientras que los de origen no natural y provenientes de la actividad humana, es decir antropogénicos, son, el Óxido de azufre ( $\text{SO}_x$ ), el Óxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) el Dióxido de carbono relativo a la combustión y los Hidrofluorocarbonos (HFC) y HCFC mencionados anteriormente.

**El problema viene cuando se elevan los niveles de estos gases a un ritmo superior a la capacidad que la naturaleza tiene para procesarlos. Rompiendo el equilibrio natural entre sumideros y fuentes.** Ese aumento de concentración de gases, provoca un aumento de la retención de la radiación infrarroja de la que se debería, en estado de equilibrio, provocando un aumento de la temperatura terrestre.

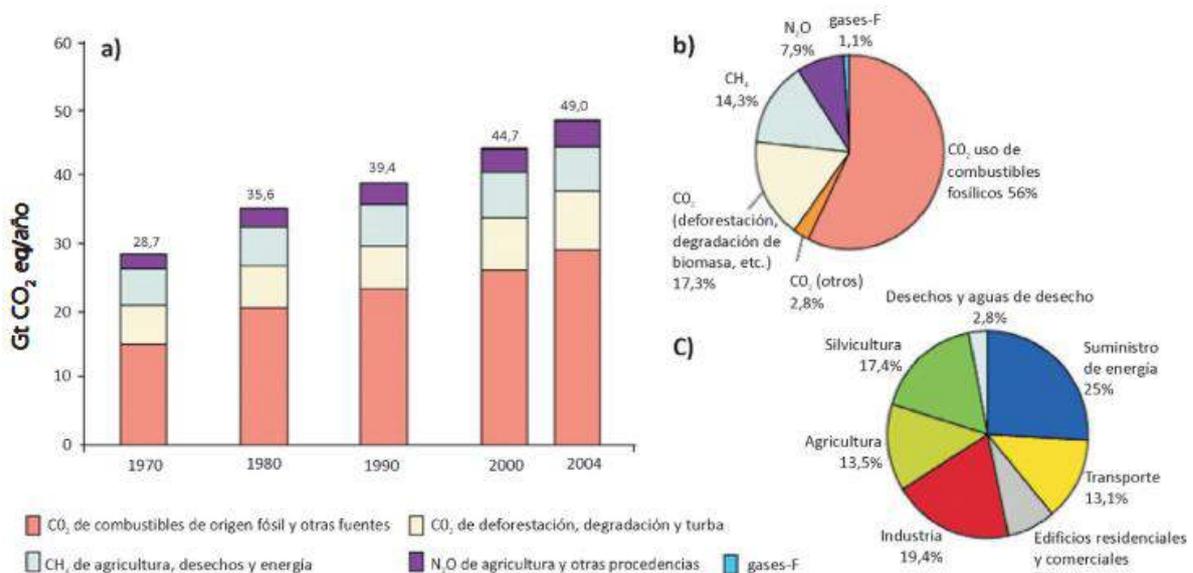


Ilustración 3 fuente IPPC, 2007. cuadro informe de evaluación

De manera global y según el estudio del IPPC en 2007, el total emitido en el año 2004 fue 49.000 millones de toneladas de  $\text{CO}_2$  siendo el 56% del total provenientes de los combustibles fósiles. De ahí la importancia de tomar medidas para revertir la situación.

Finalmente, cabe destacar que no todos los gases que propician el efecto invernadero, permanecen retenidos en la atmosfera el mismo periodo de tiempo, ni mantienen la misma capacidad de “atrapar” la radiación. Por ello, desde el IPCC se determina el potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global (PCG o GWP).

Este índice, se calcula en comparación con el gas de referencia CO<sub>2</sub> y se calcula en periodos 20 y 100 años. Es decir, durante un periodo de tiempo específico, este índice compara la cantidad de calor atrapado por una cierta masa de gas como por ejemplo el Metano CH<sub>4</sub>, con la cantidad de calor atrapado por una masa similar de CO<sub>2</sub>.

Nombre	Fórmula Química	Potencial de Calentamiento Global (PCG ó GWP)
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	21
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	310
Tetrafluoruro de carbono (PFC)	CF <sub>4</sub>	6.500
Hexafluoruro de carbono (PFC)	C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	9.200
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	23.900
Trifluorometano	HFC-23	11.700
Difluorometano	HFC-32	650
Pentafluoroetano	HFC-125	2.800
Trifluoroetano	HFC-143 <sup>a</sup>	3.800
Difluoroetano	HFC-152 <sup>a</sup>	140
Tetrafluoroetano	HFC-134 <sup>a</sup>	1.300

Debido a la variabilidad existente entre las actividades radiativas de los diferentes GEI y sus tiempos de residencia atmosférica, es necesario hacer la conversión de las emisiones de cada uno de los GEI en unidades de CO<sub>2</sub> equivalentes (CO<sub>2</sub> eq), lo cual permite integrar los efectos de las emisiones de varios gases con el fin de ser comparados. Este reporte presenta resultados globales para la totalidad de los GEI anteriormente mencionados en unidades de CO<sub>2</sub> eq usando los potenciales de calentamiento global (GWP) para un horizonte de 100 años contenidos en el "1995 IPCC Second Assessment Report (IPCC 1996)".

Ilustración 4 fuente IPCC 1996

Como se puede observar en la gráfica, el Metano y el Óxido Nitroso NO<sub>x</sub> tienen un PCG de 21 y 310 respectivamente, esto significa que en comparación con la misma masa de CO<sub>2</sub> emitida a la atmosfera, el Metano atrapa 20 veces más de calor/radiación que el dióxido de carbono, mientras que el NO<sub>x</sub> unas 310 veces más que el gas de referencia CO<sub>2</sub>.

## Contaminación en el sector naval



Ilustración 5 buque realizando emisiones contaminantes fuente google

El transporte marítimo de mercancías supone aproximadamente un 80% del total de mercancías transportadas en todo el mundo, con lo cual, es un sector esencial a la hora de reabastecimiento, de desarrollo económico e industrial de los países.

El gran volumen y capacidad de carga de los buques se ha ido incrementando a lo largo de la historia hasta ser una de sus mayores ventajas en comparación con otros tipos de transportes, sin contar la versatilidad a la hora de construcción de diferentes tipos de buques ajustándose a las mercancías a transportar.

A pesar de ser el sector más importante en el transporte de mercancías a nivel mundial, y ser uno de los más eficientes a la hora de la contaminación por emisiones/volumen de carga transportada, contamina. Esto supone una gran cantidad de emisiones liberadas a la atmósfera, siendo la flota naval la responsable de un 5% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero como son el Óxido de Azufre ( $\text{SO}_x$ ), el Óxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) derivados de la combustión de los motores marinos.

La calidad del aire se determina en función de la distribución de las fuentes de emisiones contaminantes, así como las cantidades.

Principalmente la emisión de los  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$  están asociados principalmente a la actividad humana. Procedentes desde la combustión hasta los fertilizantes utilizados en el sector agrícola.

La concienciación por parte de toda la humanidad, también ha ido en aumento en los últimos años, debido a los peligros que acarrearán estas emisiones en el medio ambiente como para la salud humana. Esto ha hecho que se necesiten regulaciones específicas en todos los ámbitos en los que se produzca cualquier tipo de contaminación, no simplemente en el sector naval si no en los demás sectores, industrial, automovilístico, agrícola, etc.

En lo que respecta al transporte marítimo, una gran parte de la flota mundial tiene que cumplir una serie de regulaciones prescritas por la OMI (organización marítima internacional), que es el organismo internacional encargado de la protección de la contaminación, entre otras, en el sector naval.

Cabe destacar que, a pesar de la concienciación social, en contra a las nuevas medidas propulsadas durante toda la industrialización naval hasta hoy, existe la contra de la inversión económica que deben de invertir los armadores en este caso, para luchar contra este fenómeno que a priori es invisible y a la vez letal.

Existen organizaciones internacionales encargadas de reglamentar este tipo de emisiones en el sector naval. La organización marítima internacional "IMO" es la organización encargada de prefijar unos límites de emisiones de estos gases, de su correcta implantación y de las posibles sanciones que pueden acarrear el no cumplimiento de estas.

En cuanto a los sectores no pertenecientes al naval, existen también reglamentaciones específicas para reducir al máximo este tipo de emisiones. Como es el protocolo de Kioto. En este tratado fue un acuerdo internacional que tuvo como objeto la reducción de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global. En el protocolo se acordó una reducción de al menos un 5% de las emisiones de estos gases en 2008-2012. En este tratado no forman parte las principales potencias mundiales que son las encargadas de las mayores emisiones, estados unidos, Canadá y Rusia.

# Capítulo 1. Normativa aplicable a los buques



la OMI, es la organización marítima internacional siendo el organismo especializado de las naciones unidas responsables de prevenir la contaminación de la mar producida por los buques, de la seguridad y la protección de la navegación.

La organización fue fundada gracias al convenio del 6 de marzo de 1948 por varias naciones con visión de futuro. En el convenio, se elaboraron unas normas para el transporte marítimo, que se adoptarían e implantaría con carácter universal en todo el sector, ya que se empezó a entenderse que era contraproducente que cada nación tuviera sus propias leyes a la hora de garantizar la seguridad de las operaciones de transporte en todo el mundo.

Tras la entrada en vigor del Convenio constitutivo de la OMI, la primera tarea consistió en adoptar una nueva versión del Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar (SOLAS), el más importante de todos los convenios relativos a la seguridad marítima.

Años más tarde, y debido al incremento de la cantidad de petróleo que se transportaba por mar y del tamaño de los petroleros y en especial a una serie de accidentes marítimos, la OMI presento una serie de medidas destinadas a prevenir accidentes de petroleros y a reducir al mínimo sus consecuencias.

La más importante de todas estas medidas fue la elaboración del Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, en 1973 y posteriormente, modificado por el Protocolo de 1978 nació el convenio MARPOL 73/78.

Este convenio comprende no solo la contaminación accidental y operacional por hidrocarburos, sino también la contaminación causada por sustancias químicas, mercancías en bultos, aguas sucias, basura y la contaminación del aire.

A día de hoy, muchos de los principales tratados de la IMO han sido ratificados por los estados que son responsables, de forma colectiva, de más del 98% de la flota mundial.

De entro todos los convenios, el convenio que nos atañe en este trabajo en especial es el convenio MARPOL que se explicaran en mayor profundidad en el capítulo 2 del presente documento.

## Convenio MARPOL 73/78

El convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques MARPOL es un conjunto de normativas internacionales con el objetivo de prevenir la contaminación por lo buques aprobado en 1973 y modificado el1978. Debido a una serie de accidentes medioambientales causados por petroleros entre los años 1976 y 1977.

El convenio MARPOL es el antecesor del convenio OILPOL que entro en vigor anterior al MARPOL en 1954, donde se prohibió de la descarga de las mezclas de hidrocarburos y aguas a menos de una determinada distancia de la costa, así, como en las “zonas especiales”, donde la sensibilidad del ecosistema es mucho mayor y donde se recomendaban unas medidas más estrictas.

Años más tarde y debido a la ineficacia de las medidas ya adoptadas por el convenio OILPOL, la asamblea de la OMI adopto la decisión de elaborar un nuevo convenio que ampliara nuevas medidas al ya existente.

## Normativa internacional del convenio MARPOL

La estructura del actual Convenio MARPOL 73/78 (2016) consta de 2 Protocolos y 6 Anexos técnicos que regulan las condiciones de emisión al medio ambiente de distintos tipos de materias contaminantes, equipos de control, prevención, etc.

ambos protocolos constituyen las normas básicas que rigen el Convenio y establecen las principales obligaciones y derechos de los países que hayan ratificado dicho Convenio.

## Protocolo de 1973

Compuesto por 20 artículos que se tratan los siguientes temas:

- Obligaciones Generales en Virtud del Convenio.
- Ámbito de Aplicación (Art. 3): En este tema se explican que las normas estipuladas dentro del documento solo son aplicables a buques que enarboleden el pabellón de uno de los países firmantes o aquellos buques que a pesar de enarbolar un pabellón de un país no firmante opere bajo autoridad de un país firmante.
- Transgresiones (Art. 4): Existen 2 vías para sancionar cualquier transgresión del Convenio:
  - I. Aplicar un procedimiento contra el buque transgresor de acuerdo con la legislación de dicho Estado.
  - II. Facilitar a la administración del pabellón del buque las pruebas necesarias para que este actúe con su ordenamiento jurídico.
- Certificados y Reglas Especiales sobre Inspecciones del Buque (Art. 5): En esta parte se dan las normas generales para la expedición de Certificados por una de las Partes en el Convenio y así como los derechos de inspección que asisten los Estados firmantes.

Dentro de este artículo se presentan las siguientes cuestiones fundamentales:

- I. Los Certificados expedidos por un Estado Parte en el Convenio, han de ser aceptadas como válidas por cualquier otra Parte del mismo.

- II. Todo buque de un Estado Parte ha de someterse a las inspecciones que otro Estado determine, mientras este, se encuentre bajo su jurisdicción.
- Detención de Transgresiones del Convenio y Cumplimiento del Mismo (Art. 6): En este texto se establecen normas generales sobre la investigación de las transgresiones y la colaboración entre las Partes para facilitar la información pertinente para culminar la investigación.
  - Demoras Innecesarias a los Buques (Art. 7): Se establece el compromiso entre las Partes de no causar demoras innecesarias a los buques con motivo de inspecciones o investigaciones de transgresiones.
  - Cuestiones Generales (Art. 8 hasta el Art. 20): A lo largo de estos artículos se establecen una serie de cuestiones relacionadas con el cumplimiento del Convenio y que responden al siguiente titulado.

## Protocolo de 1978

Protocolo El protocolo de 1978 amplía las normas del Protocolo anterior mediante 9 artículos;

I- Obligaciones Generales

II- Aplicación del Anexo II del Convenio

III- Comunicación de Información

IV- Firma, Ratificación, Aprobación y Adhesión

V- Entrada en Vigor

VI- Enmiendas

VII- Denuncias

VIII- Depositario

## IX- Idiomas

La ratificación del Convenio MARPOL 73/78 implica la **aceptación obligatoria de los 2 Protocolos descritos anteriormente y de los Anexos I y II**. Los Anexos restantes (III, IV, V, VI) pueden ser aceptados de forma voluntaria por cada Estado Parte en el Convenio requiriendo, por tanto, firma de ratificación independiente.

## Normativa Española

España al formar parte de la unión europea se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, tratadas en el tratado de Kioto que se llevó a cabo el 11 de diciembre de 1997.

El tratado de Kioto los países industrializados se comprometieron a un conjunto de medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los gobiernos firmantes, pactaron una reducción del 5% en promedio de las emisiones de estos gases durante los años 2008 y 2012.

La entrada en vigor del tratado no fue efectiva hasta el año 2004, ya que se estableció que el compromiso sería de obligatorio cumplimiento cuando lo ratificasen los países responsables de, al menos, el 55% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Con la entrada de Rusia en el convenio, este pudo entrar en vigor el año 2004.

La unión europea se comprometió a reducir sus emisiones totales medias durante el periodo 2008-2012 de un 8% respecto de las de 1990. No obstante, a cada país de la unión se le concedió un margen distinto de emisiones en función de variables económicas y medioambientales según el principio de “reparto de carga”.

Desde los años 2013 hasta el 2020 una vez finalizado el 1 periodo de acción del protocolo de Kioto, los países miembros de la unión europea, entre ellos España, se comprometieron a la reducción de los gases de efecto invernadero a través

del paquete europeo de energía y cambio climático. En este se establecen los objetivos concretos a alcanzar en el año 2020 en materia de

energía renovable, eficiencia energética y reducción de emisiones que deben reducirse en un 21% respecto a niveles del año 2005.

a España le corresponde un objetivo de reducción de 10% en 2020 con respecto a 2005 en sectores no cubiertos por la directiva de comercio europeo de derechos de emisión 2003/87/CE.

También deberá cumplir con la directiva referente al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables, con al menos un 20% del consumo final de energía de la UE en 2020 procederá de fuentes de energía renovables. Incluyendo que un 10% de la energía consumida en el transporte, provenga de fuentes renovables.

Además, cabe destacar que mediante el nuevo reglamento de la UE 2017/352, aplicable desde el pasado 24 de marzo de 2019. recoge que el suministro de combustible pasa a ser un servicio portuario, con lo cual se abre la obligatoriedad de incorporar al servicio portuarios el suministro de GNL y electricidad desde muelle, además de los combustibles ya suministrados MGO y HFO, todo ello, Dentro de un espacio de tiempo prudencial para actualizar las instalaciones.

Gracias a este nuevo reglamento, se desbloquea la accesibilidad al reabastecimiento de combustibles alternativos por parte de las navieras que quieran llevar a cabo proyectos de buques sostenibles.

## Capítulo 2. Anexo VI.- Reglas para prevenir la contaminación Atmosférica ocasionada por los Buques.

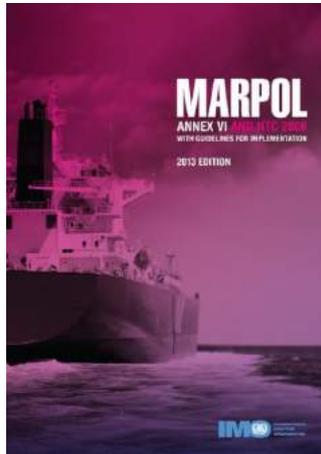


Ilustración 6 MARPOL anexo VI fuente IMO

El anexo VI del MARPOL son una serie de reglas prescritas por el órgano delegado por la OMI el MECP. En él se especifican las normas relativas a la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques.

A partir del 19 de mayo de 2005 este anexo entro en vigor. Dado el avance de la tecnología desde esa misma fecha, se acordó en revisar el convenio a fin de conseguir reducir progresivamente los límites máximos de emisiones. con lo cual, todo motor diésel marino debe de ajustarse a los límites de emisiones fijados por este anexo y de las posibles modificaciones que se vayan produciendo por parte del órgano ejecutor de la OMI el MECP (comité de protección del medio marino).

Este comité, es el encargado del estudio y modificación de los convenios dentro del MARPOL y tiene la misión de ir adaptándose a los nuevos desafíos que se presentan en cuanto a la protección del medio marino.

El siguiente anexo VI que entro en vigor el año 2005 y el cual supone una base en cuanto a modificaciones posteriores por parte del MECP se compone de la siguiente estructura:

- **Cap. I-** Generalidades.
- **Cap. II-** Reconocimiento, certificación y medios de control.
- **Cap. III-** Prescripciones para el control de las emisiones de los buques.

- **Cap. IV-** Reglas sobre la eficiencia energética de los buques.
- **Cap. V-** Verificación del cumplimiento de las disposiciones.

Según el MECP 76/15, resol. 328. las reglas específicas son las siguientes:

- **Regla 1** **Ámbito de aplicación**
- **Regla 2** **Definiciones**
- **Regla 3** **Excepciones generales**
- **Regla 4** **Equivalentes**
- **Regla 5** **Reconocimientos**
- **Regla 6** **Expedición o refrendo del Certificado**
- **Regla 7** **Expedición del certificado por otra Parte**
- **Regla 8** **Modelo del certificado**
- **Regla 9** **Duración y validez del certificado**
- **Regla 10** **Supervisión de las prescripciones operacionales por el Estado rector del puerto**
- **Regla 11** **Detección de transgresiones y cumplimiento**
- **Regla 12** Sustancias que agotan la capa de ozono
- **Regla 13** Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- **Regla 14** Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)
- **Regla 15** **Compuestos orgánicos volátiles (COV)**
- **Regla 16** **Incineración a bordo**
- **Regla 17** **Instalaciones de recepción**
- **Regla 18** **Disponibilidad y calidad del fueloil**
- **Regla 19** **Ámbito de aplicación.**
- **Regla 20** **objetivo**
- **Regla 21** **prescripciones funcionales**
- **Regla 22** índice de eficiencia energética de proyecto obtenido (EEDI obtenido).
- **Regla 23** índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI obtenido).
- **Regla 24** **EEDI prescrito**
- **Regla 25** **EEXI prescrito**
- **Regla 26** Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)
- **Regla 27** **Recopilación y notificación de los datos sobre el consumo de fueloil del buque**
- **Regla 28** Intensidad del carbono operacional (CII)
- **Regla 29** **fomento de la cooperación técnica y la transferencia de tecnología.**

Dentro del capítulo III referente a las Prescripciones para el control de las emisiones de los buques, se prestará mayor atención a la regla 12, sustancias que agotan la capa de ozono, y posteriormente al código técnico de los NO<sub>x</sub> en el cual están reflejadas estrictamente las reglas 13, óxidos de nitrógeno y la regla 14, óxidos de azufres.

Debido a las medidas de importancia de las reglas contenidas en el capítulo IV del anexo VI del MARPOL, **(reglas 19 a la 29), se expondrán en el siguiente capítulo III relativo a las medidas para la reducción de gases de efecto invernadero.**

### Sustancias que agotan la capa de ozono.

- I. Se prohíbe toda emisión deliberada de sustancias que agotan la capa de ozono. Incluidas durante el mantenimiento, la reparación, o el arrumbamiento de sistemas o equipos.
- II. Se prohíben las nuevas instalaciones, sistemas y equipos que contengan clorofluorocarbonos o halones que agotan la capa de ozono. Entrada en vigor el 1 de enero de 2020
- III. Las sustancias y el equipo en los que estén presentes estas sustancias se depositaran en instalaciones de recepción adecuadas cuando se retiren del buque.
- IV. Los buques que contengan equipos o sistemas con gases que agotan la capa de ozono y que deban de llevar un certificado IAPP, se deberá llevar un libro de registro de las sustancias, en las que se reflejaran todas las operaciones conexas de suministro, recarga, reparación y eliminación de tales sustancias.

## Código técnico sobre los NO<sub>x</sub>

El MECP 58, fue publicado en octubre de 2008 gracias al acuerdo de modificación fijado unos años atrás por el MECP53 en el que se acordó de realizar una modificación del código técnico sobre los NO<sub>x</sub>, relativo al control de las emisiones de nitrógeno en los motores diésel marinos.

**El código tiene por objeto ofrecer procedimientos obligatorios de prueba, reconocimiento y certificación en los motores diésel marinos** que permitan a los fabricantes de motores y armadores tener la seguridad de que todos los motores diésel marinos a los que se aplique se ajusten a los límites de emisiones de los NO<sub>x</sub>

Todas las reglas a las que se hace referencia en el código técnico sobre los NO<sub>x</sub> son reglas del anexo VI.

### Aplicación.

Esta regla es de aplicación a los motores descritos a continuación:

- I. La presente regla se aplicará:
  - A todo motor diésel con potencia de salida superior a 130KW, instalado a bordo o que haya sido transformado el 1 de enero de 2000 o posteriormente.
- II. la presente regla no será de aplicación a los siguientes motores con lo cual no necesitaran el certificado EIAPP.
  1. a los motores diésel de emergencia, motores de botes salvavidas o equipos previstos para la utilización de emergencia.
  2. A los motores de buques que realicen navegaciones exclusivamente dentro de las aguas sometidas a la soberanía o jurisdicción del estado, a condiciones de que estén sometidos a otra medida de control de los NO<sub>x</sub>.
- III. No obstante, se permite el funcionamiento de un motor diésel si:

1. El motor consta de un sistema de limpieza de los gases de escape, aprobado por la Administración, y destinado a reducir las emisiones de gases  $\text{NO}_x$  del buque a los límites especificados en el apartado II.2, como mínimo o, se utilice cualquier otro método equivalente, aprobado por la Administración, y teniendo en cuenta las directrices pertinentes que elabore la Organización, con objeto de reducir las emisiones de los  $\text{NO}_x$  del buque a los límites especificados.

## Óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ).

Este gas, es producido por los motores de combustión, ya que el aire absorbido por los motores, al igual que el aire que nos rodea, supone una mezcla de nitrógeno y oxígeno.

Gran cantidad del oxígeno es consumido por la combustión, y la cantidad de oxígeno sobrante depende de la proporción de aire/combustible con la que funcione el motor.

Una vez producida la combustión, se genera óxido nítrico, y una vez en la atmósfera, se oxida a  $\text{NO}_2$ .

Debido a las altas temperaturas de combustión, el oxígeno y nitrógeno presentes en el aire de admisión se combinan para dar el óxido nítrico ( $\text{NO}$ ) y este posteriormente se oxida parcialmente en dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ). por lo tanto, **cuanto mayor es la temperatura de combustión, mayor será la cantidad de  $\text{NO}$  que se forme.**

Los principales efectos de los  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ) son:

- I. **La formación de lluvia ácida**, cuando el  $\text{NO}_2$  entra en contacto con el agua produce ácido nítrico  $\text{HNO}_3$  que es altamente corrosivo. Cuando el gas ácido entra en contacto con el vapor de agua en la atmósfera, se produce la llamada lluvia ácida.

- II. **Formación de niebla toxica.** Se forma cuando el NO<sub>x</sub> y compuestos volátiles VOC reaccionan en presencia de la luz del sol.
- III. **Producción de monóxido de nitrógeno** este gas, participa en la destrucción de la capa de ozono de la estratosfera.

Según el reglamento técnico de emisiones NO<sub>x</sub>, todo motor diésel marino deberá cumplir con el control de emisiones mediante el cumplimiento de las prescripciones de reconocimiento y certificación que conducen a la expedición del Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores (EIAPP). Se puede observar este modelo estandarizado, en el anexo A al final de este documento.

Existen varios niveles de control de emisiones que se aplicara según la fecha de construcción del buque, y cuyo valor máximo viene determinado a partir del régimen nominal del motor.

Nivel	Fecha de construcción del buque	Valor límite de emisión ponderada total del ciclo (g/kWh)		
		n = régimen nominal del motor (rpm)		
		n < 130	n = 130 - 1999	n ≥ 2000
I	1 enero 2000	17.0	$45 \cdot n^{(-0.2)}$ por ejemplo, 720 rpm – 12.1	9.8
II	1 enero 2011	14.4	$44 \cdot n^{(-0.23)}$ por ejemplo, 720 rpm – 9.7	7.7
III	1 enero 2016*	3.4	$9 \cdot n^{(-0.2)}$ por ejemplo, 720 rpm – 2.4	2.0

Ilustración 7 límite máximo de emisiones de NO<sub>x</sub>. Fuente IMO

Los controles de nivel III solo serán aplicables a buques específicos mientras naveguen en zonas de control de emisiones (ECA), fuera de dichas zonas el nivel de control de emisiones será de nivel II.

## óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>)

El óxido de azufre es generado por la combustión del carbón y del petróleo, debido a que el azufre presente en estos, reacciona con el oxígeno en el proceso de la combustión.

El monóxido de azufre (SO) reacciona con el oxígeno creando (SO<sub>2</sub>) a altas temperaturas. La cantidad de óxido de azufre dependerá exclusivamente de la cantidad de azufre presente en el combustible y no podrá regularse mediante la combustión del motor.

Los óxidos de azufre afectan sobre todo a los pulmones de quienes lo inhalan. Las exposiciones de altas concentraciones durante periodos prolongados pueden provocar enfermedades respiratorias graves.

En cuanto al efecto sobre el medio ambiente, los SO<sub>x</sub> viene cuando se combina con la humedad del aire ya que forma ácido sulfúrico, produciendo lluvia acida.

Los controles de emisiones de los SO<sub>x</sub> se aplican a equipos y los dispositivos de combustión de todo tipo de fueloil instalados a bordo. Incluye tanto motores principales como a los auxiliares, así como calderas y generadores de gas inerte.

Estos controles se dividen entre las zonas de control de emisiones (ECA) y los controles que se aplican fuera de esas zonas.

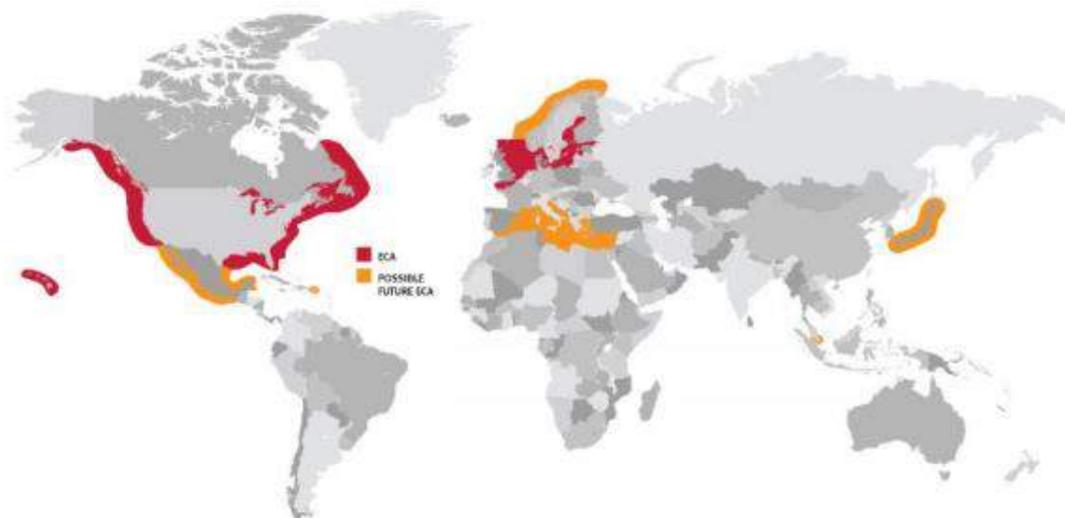
## Zonas de control de emisiones (ECA)

Las zonas de control de emisiones son zonas en las cuales se ha establecido controles especiales para minimizar las emisiones transmitidas a través del aire ocasionadas por el transporte marítimo. Estas zonas especiales, designadas por la OMI, son áreas en las cuales la contaminación de los gases NO<sub>x</sub> pueden tener mayor impacto sobre el medio ambiente que en otras, dependiendo de la geografía.

Las ECA establecidas por la OMI siguen criterios de necesidad de prevención de emisiones, del impacto al medio ambiente y en la salud humana.

Estas son, las diferentes ECA's existentes:

1. zona del mar Báltico – definida en el Anexo I del Convenio MARPOL (solamente para los SO<sub>x</sub>).
2. zona del Mar del Norte –definida en el Anexo V del Convenio MARPOL (solamente para los SO<sub>x</sub>).
3. Zona de Norteamérica (que entró en vigor el 1 de agosto de 2012) – definida en el apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL.
4. Zona del mar Caribe de los Estados Unidos (que entró en vigor el 1 de enero de 2014) – definida en el Apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL.



Il·lustració 8 Zonas ECA y futuras fuente ingeniero marino

Los buques que naveguen dentro de una ECA deberán de adaptarse a las exigencias de las mismas, substituyendo el combustible pesado con el que operan. Este procedimiento suele realizarse tanto para entrar en las ECA como al salir de ellas.

La elección de quemar un combustible u otra ira en elección de la rentabilidad económica, ya que combustibles como el HFO, con mayor contenido de azufres, tienen un precio menor que el MDO de menor contenido de azufre y que deben de consumir en zonas ECA.

Fuera de una ECA establecida para limitar las emisiones de SO <sub>x</sub> y de materia particulada.	En una ECA establecida para limitar las emisiones de SO <sub>x</sub> y de materia particulada
4,50 % Masa/masa antes del 1 de enero de 2012	1,50% masa/masa antes del 1 de julio de 2010
3,50% masa/masa a partir del 1 de enero de 2012	1,00% masa/masa a partir del 1 de julio de 2010
0,50% masa/masa a partir del 1 de enero de 2020	0,10% masa/masa a partir del 1 de enero de 2015.

Tabla Niveles de SOX permitidos fuera y dentro de una ECA. Fuente propia

En la tabla anterior se muestran los límites de emisiones de azufre que deberán cumplir los buques que enarbolan bandera de países firmantes del convenio MARPOL. A fin de reducir progresivamente la contaminación atmosférica.

Según el capítulo IV del anexo VI del MARPOL,

## Teoría física/química de la combustión

Antes de todo, es necesario conocer a la perfección que es una combustión y como se obtiene energía de la misma.

La combustión es toda reacción química que va acompañada de gran desprendimiento de calor, estas reacciones pueden ser tanto extremadamente lentas, en las producidas por la oxidación de un elemento, como en las detonaciones, reacciones extremadamente rápidas.

Para que se produzca cualquier combustión, deben de estar presentes los diferentes elementos:

**Combustible:** es todo elemento que arde que al combinarse con el oxígeno es capaz de reaccionar y desprender calor.

**Comburente:** elemento que produce la combustión, generalmente el oxígeno presente en el aire.

Además, de los dos anteriores, se requiere de un tercer elemento a tener en consideración que es la **Temperatura/calor**, puesto que toda reacción requiere una cierta temperatura mínima, que depende del tipo de combustible. Generalmente esta última recibe el nombre de **temperatura de inflamación**

Todas las sustancias en el proceso de la combustión tienen que cumplir las siguientes leyes elementales:

**Primer principio de la Termodinámica**, un sistema termodinámico intercambia energía con su entorno en forma de trabajo y de calor, y acumula energía en forma de energía interna, quedando la siguiente ecuación:

$$Q = W + \Delta U$$

**Segundo principio de la Termodinámica**, permite obtener el rendimiento termodinámico de la transformación de energía que tiene lugar durante la reacción química, y conocer en qué dirección y en qué proporción se desarrollará

**Principio de conservación de la materia**, conocidas las cantidades de combustible y aire que intervienen en la reacción, será posible hallar la cantidad resultante de productos de combustión. Como se dice vulgarmente, “todo lo que entra en la lavadora debe de salir”.

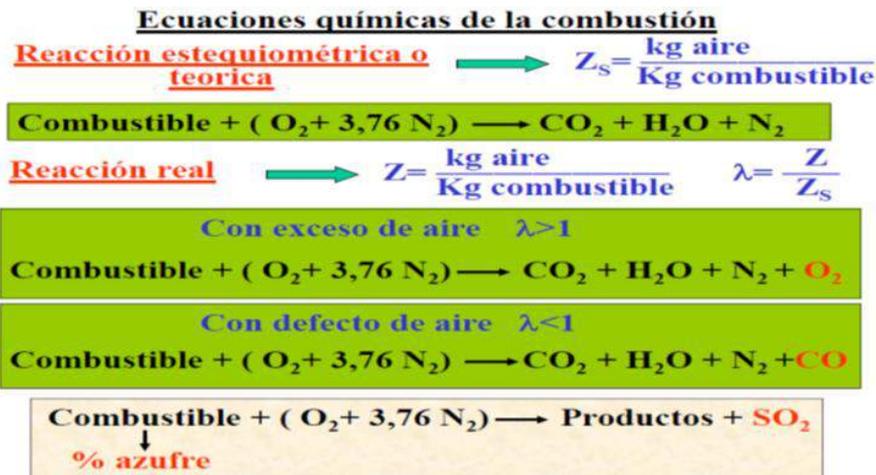
Cuando toda la parte de combustible presente en la reacción se ha oxidado al máximo, se denomina combustión completa. Por otro lado, si la proporción de aire es insuficiente en la mezcla se dice que es una combustión incompleta, debido a que todavía quedan productos resultantes capaces de ser oxidados. Ello produce problemas de pérdidas de energía y procesos contaminantes generando partículas sin quemar y elementos contaminantes NO<sub>x</sub>, CO, etc.

Para el análisis de toda combustión, se realiza un balance de materia para determinar las cantidades y composiciones de los productos de la combustión ya que con el análisis de la composición de los humos se puede controlar la combustión y saber si es completa o no.

Toda materia combustible, está formada en mayor o menor medida de moléculas de carbono, hidrogeno o azufre entre otras, toda reacción de la combustión se puede expresar así:

**combustible + comburente = productos + energía**

entendiéndose como productos como agua, dióxido de carbono y otras moléculas intervinientes.



. UPC 1 ecuación química combustión fuente: fuente: Prof German de Melo.  
 como se observa en la imagen, se puede ver claramente el resultado de una reacción con oxígeno insuficiente obteniendo in quemados CO.

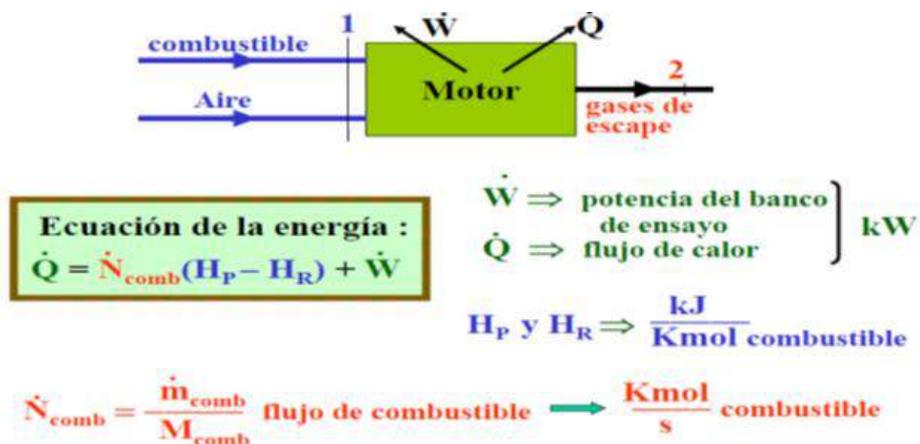
Los combustibles se pueden clasificar en función de su forma física en líquidos sólidos y gaseosos y de disponer de características inherentes de casa uno de ellos. Siendo las siguientes:

Humedad: cantidad de agua presente en el material combustible, de especial importancia en los sólidos

Materias volátiles que son el porcentaje de pérdida en peso experimentado por el combustible.

Cantidad de carbono contenida en el combustible.

A continuación, se muestra un balance energético de un motor de combustión interna.



. UPC 2 balance energético fuente: Prof. German de Melo

# Capítulo 3 Medidas para la reducción de gases de efecto invernadero

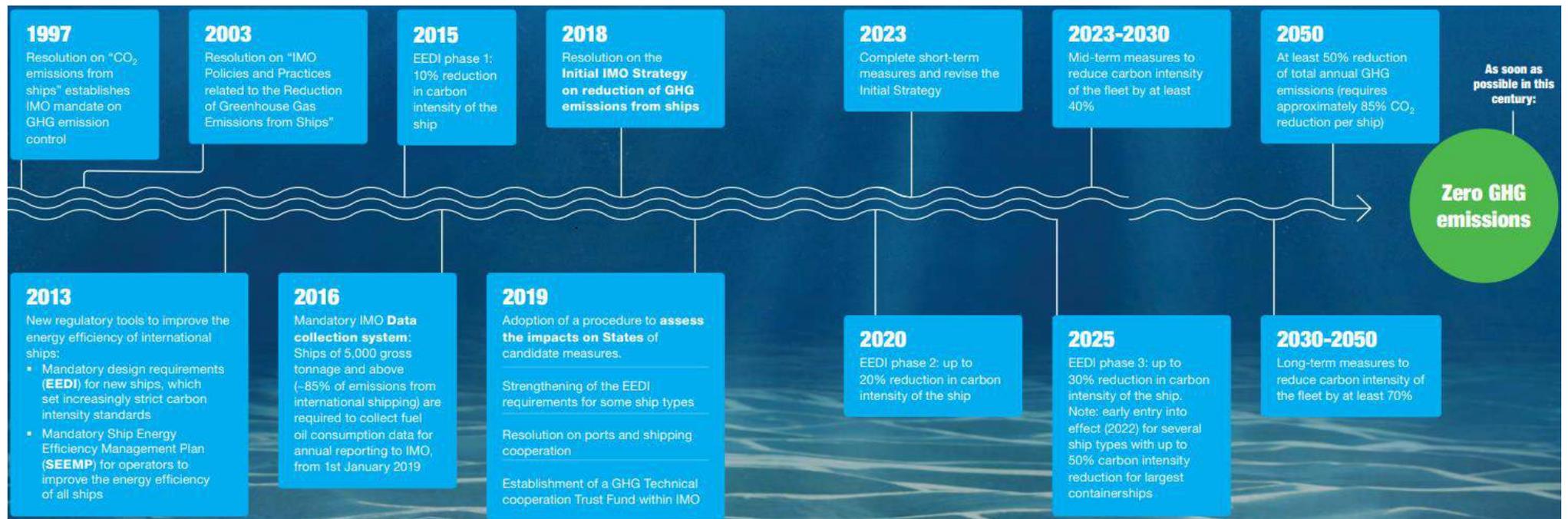


Ilustración 9 Fuente: IMO estrategia reducción.

En 2018 la OMI adoptó una estrategia inicial de reducción de gases de efecto invernadero de los buques, se pretende una reducción en el total de emisiones de gases provocados por el transporte marítimo internacional de al menos un 50% en 2025 (comparado con los niveles de 2008, unos 885 millones de toneladas) de manera paralela que persigue la eliminación por completo

Además, se estableció un itinerario de reducción de emisiones de dióxido de carbono con los objetivos de temperatura del acuerdo de París (mantener aumento de T mundial por debajo de 2°C con respecto niveles preindustriales)

Los niveles de ambición son:

1. Disminuir la emisión de carbono implementando la implantación de fases adicionales del índice de eficiencia energética del proyecto (EEDI) para los buques nuevos.
2. Reducir el CO<sub>2</sub> en el transporte marítimo internacional, en al menos un 40% de aquí a 2030 comparado con niveles del 2008.
3. En 2025, todos los buques construidos deberán ser un 30% más eficientes que los construidos en 2014.
4. Implementación de sistema de recopilación de datos SEEMP, que arrojará información para decidir en el futuro que medidas adicionales pueden adoptarse
5. Enmienda al convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, incluyendo la categoría de desechos electrónicos y enmienda al certificado internacional de prevención de la contaminación por hidrocarburos (certificado IOPP) obligando a todo buque mayor o igual a 5000 toneladas brutas, de realizar una recopilación de datos sobre el consumo de fueloil del buque.

En cuanto al punto número 4, El MECP 62, estableció de obligado cumplimiento dos medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), **el plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP) y el índice de eficiencia energética del proyecto (EEDI)**. Todo ello, a través del convenio MARPOL VI mediante la resolución MECP.203.

## Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)

Según el reglamento 22 del anexo VI del MARPOL, que entro en vigor el 1 de enero de 2013, **es obligatorio, para todo buque que realice navegaciones internacionales de mayor o igual a 400 toneladas de arqueo bruto** deberán de disponer de un SEEMP abordo. (con las excepciones contenidas en la regla 19-2.1 y 2.2 del MEPC76/15.). **El SEEMP es una medida operativa individual** que establece un mecanismo de mejora de eficiencia energética de un buque de una manera rentable. Ayuda a que las compañías navieras puedan llevar un seguimiento, a lo largo del tiempo, de la eficiencia energética del buque y de la flota.

**El sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible del buque, recopila datos sobre el consumo para cada tipo de fuel oíl que se emplea abordo, así como datos específicos.** Los datos se notificarán al estado de abanderamiento al final de cada año y la bandera expedirá una declaración de cumplimiento del buque y estos serán transferidos a una base de datos de consumo de combustible de la OMI. Por último, la OMI será la encargada de realizar un informe anual para el MEPC con el resumen de los datos recopilados de los buques.

El SEEMP incita al armador en cada etapa del plan a examinar la posibilidad de incorporar nuevas tecnologías y practicas cuando se trata de optimizar el rendimiento de un buque. Para ello, se ayuda de una herramienta de vigilancia cuantitativa, el EEOI que es un indicador operacional de la eficiencia energética con la finalidad de que se realice un seguimiento que permite a los armadores medir el consumo eficiente de combustible de un buque en servicio y ajustar el efecto de cualquier cambio que se produzca en el funcionamiento. Como, por ejemplo, la realización de una limpieza más frecuente de casco y hélices, mejorar la planificación de la travesía o la introducción de medidas técnicas de recuperación de calor residual, etc.

A partir de 2019, el SEEMP incluirá una descripción de metodología de recopilación de datos además de los procesos de notificación de datos al estado de abanderamiento.

Los estados miembros podrán acceder a la base de datos de la OMI a través de sistema mundial integrado de información marítima, el (GISIS), para el ello, se designará una persona de contacto/administrador que será el encargado de presentación de la documentación, todo ello a través de la página oficial de la IMO en apartado de GISIS.

En cuanto a los datos de recopilación, la IMO sugiere un control de los siguientes:

- Planificación de travesía
- Navegación meteorológica
- Justo a tiempo
- Optimización de la velocidad
- Asiento y lastre optimo sistema de propulsión
- Gestión de energía

Al fin y al cabo, todos aquellos datos operacionales que pueda aumentar la eficiencia del buque.

Los certificados estandarizados de recopilación de datos para el SEEMP se pueden consultar en el anexo A al final del estudio.

## Medidas a corto y medio plazo

En cumplimiento de la reducción de la intensidad de carbono de todos los buques en un 40% para 2030, y según la estrategia de la IMO dentro del anexo VI del MARPOL anteriormente mencionado. Se centra en varias medidas específicas, el cálculo del EEDI, el EEXI y establecer su indicador de intensidad de carbono CII.

## Índice de diseño de eficiencia energética (EEDI)

El índice de diseño de eficiencia energética es una medida introducida por la IMO en 2013 para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los buques, deben de aprobar el valor EEDI alcanzado en su vida útil a más tardar en la primera inspección periódica en 2023 y se deberá de ajustar gradualmente cada

5 años. Con ello, se consigue una mejora constante en el uso de tecnología cada vez más innovadora y un desarrollo de todos los factores que afectan al consumo de combustible y a la eficiencia del buque. Tal y como se explica en las siguientes resoluciones del MEPC.

El EEDI se basa en la guía de cálculo de 2018 del EEDI, incluyendo algunas adaptaciones a los buques existentes, de las que se destacan las siguientes:

Resolución MEPC.333(76)2021 sobre el método de cálculo del EEDI

Resolución MECP.333(76)2021 sobre las directrices del estudio y la certificación

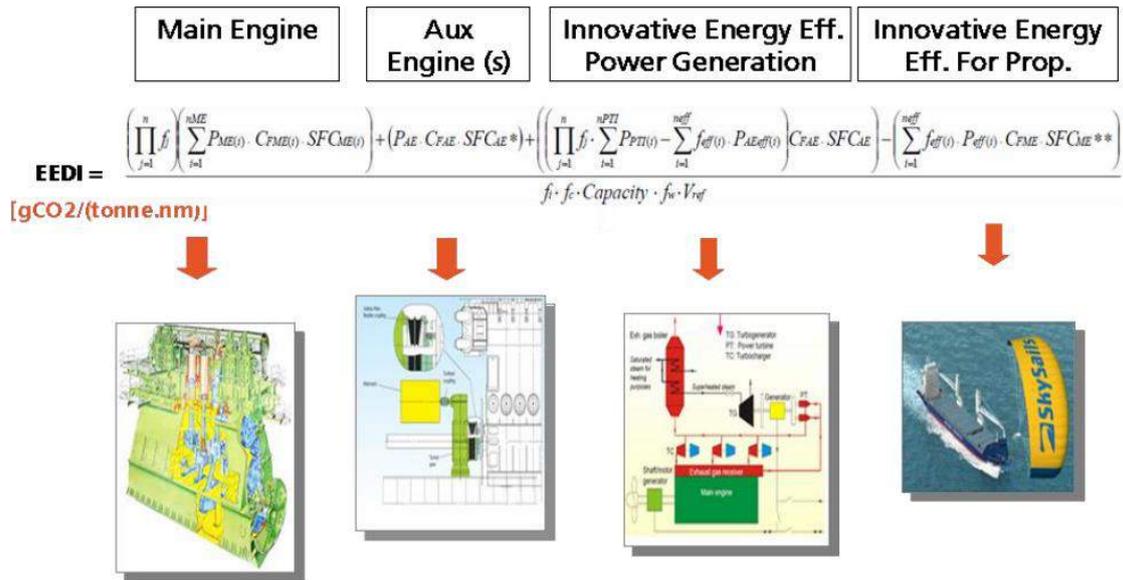
Resolución MECP.333(76)2021 sobre el sistema de limitación de potencia eje/motor para cumplir requisito del EEDI y uso de una reserva de potencia

Al igual que el EEDI, es un índice de diseño, no un índice operativo, por ello, se describen las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada de carga y milla. Además, determina las emisiones de CO<sub>2</sub> normalizadas relacionadas con la potencia del motor instalada, la capacidad de transporte y la velocidad del buque. esta medida no define una tecnología a utilizar, sino que otorga una cifra concreta de un determinado proyecto. Cuanto menor sea el EEDI mayor será la eficiencia energética y viceversa.

Según la guía MECP.308(73) el EEDI (obtenido) se calcula mediante la siguientes formulas:

$$EEDI = \frac{\textit{emisiones de CO}_2}{\textit{trabajo de transporte}} \quad (1)$$

Como fórmula más genérica la expresa anteriormente, proveniente de la siguiente:



Il·lustració 10 fuente MECP module 2

Como se puede observar, para el cálculo del EEDI, se toman 5 factores de referencia de emisiones de CO<sub>2</sub> de:

El primero de ellos, el motor principal y la energía que es necesaria para la propulsión del buque

Segundo, los requisitos de potencia auxiliar del buque.

Tercero, cualquier dispositivo de generación de energía innovadora a bordo, así como los sistemas de recuperación de calor residual

Cuarto y último término del denominador hace referencia a las tecnologías innovadoras que proporcionan energía mecánica para la propulsión del buque o sistemas ESD.

Por último, como denominador de la fórmula, hace referencia la capacidad y velocidad del buque, que juntos, se obtiene el valor del trabajo de transporte.

**Este índice de diseño de eficiencia energética, se aplica a casi todos los buques transoceánicos de carga y pasajeros de más de 400 TRB, excluyendo aquellos buques con turbina de vapor, diésel-eléctricos o propulsión híbrida.**

El EEDI entro en vigor el 12 de enero de 2013, y con ella una implementación por fases, siendo la fase 0 en 2013 hasta 2015 y posteriormente fase 1.

El EEDI se ajusta cada 5 años siendo más estricta con las emisiones de Co2, con lo cual la fase 1 comprende desde 2015 hasta 2020. Así sucesivamente hasta completar la fase 3 más allá del 2025. Donde se prevé la reducción de emisiones del 30%. En mayo de 2019 el MECP acuerdo el adelanto de la fase 3 hasta 2022 para diferentes buques como los buques de carga general, los gaseros y los de transporte de GNL.

Cabe destacar, que se debe de diferenciar entre el EEDI obtenido de la implementación de las formulas anteriores y el EEDI prescrito que se calcula de la siguiente manera. Todo ello, al igual que el EEXI prescrito, ayuda a la administración a disponer de unos valores fiables y de referencia de los índices.

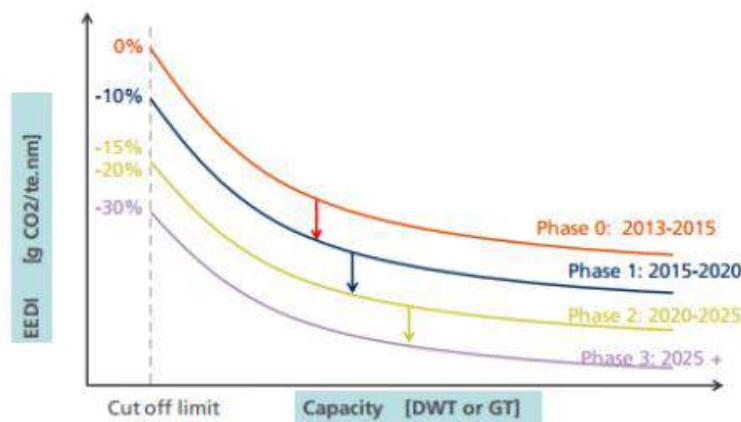


Ilustración 11 Fuente M2 course on Energy Efficient Ship Operation.

La línea de referencia del gráfico, se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$EEDI \text{ alcanzado} \leq EEDI \text{ requerido} = \left(\frac{1-x}{100}\right) \cdot \text{valor de la línea de referencia} \quad (2)$$

- El valor “X” = factor de reducción, utilizado para hacer más estricto el valor EEDI y que se puede consultar en el cuadro 1.
- Línea de referencia, dependerá del tamaño de cada tipo de buque, (buques a, b y c) “disponible en el cuadro 2 siguiente”

Obteniendo la línea de referencia con la siguiente ecuación:

$$\text{EEDI}_{\text{referencia}} = \text{EEDI}_{\text{requisito}} \cdot \left(\frac{100}{1-x}\right) \quad (3)$$

Para obtener los cálculos de EEXI y EEDI prescritos, se deberá de acceder a las tablas normalizadas en la resolución MECP76/15 del anexo A al final del documento.

## Índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI)

Según la resolución del MECP62, el EEXI será aplicable a partir del 1 de enero de 2023 a todos los buques de aqueo bruto igual o superior a 400, con excepción de los buques dedicados únicamente a viajes dentro de aguas del estado del pabellón. Sin embargo, las partes, deben de garantizar que los buques se construyen y actúan según capítulo 4 del MECP-176. Este índice se calcula en relación con diferentes valores establecidos para cada tipo de buque y las categorías de tamaño.

El EEXI indicara, la eficiencia energética del buque y es calculado a partir de la potencia instalada del motor principal, el correspondiente consumo específico del motor principal y de los motores auxiliares y un factor de conversión entre el combustible y la correspondiente masa de CO<sub>2</sub>. Según la resolución MECP 308(73)

A pesar de ser obligatorio a partir del 2023, el EEXI se puede calcular de manera voluntaria desde entonces mediante la resolución del MECP62.

El EEXI prescrito, y utilizado por la administración como valor de referencia, se podrá calcular mediante la siguiente formula:

$$EEXI_{prescrito} \leq EEXI_{voluntario} \quad (4)$$

$$= \left(1 - \frac{Y}{100}\right) \cdot EEXI_{referencia} \cdot EEXI_{cuadro 2}$$

- Siendo Y el factor de reducción específico en el cuadro 3 en comparación con el nivel de referencia del EEDI.
- Multiplicado por el valor de referencia del EEDI del cuadro 2

Para consultar los datos estandarizados por la IMO y esta resolución, se debe acceder al anexo A al final de este documento.

A continuación, se muestra esquematizado los pasos a seguir para la implementación de los índices y la obtención de los certificados. Tanto en su fase Voluntaria, hasta el 1 de enero de 2023 como posteriormente.

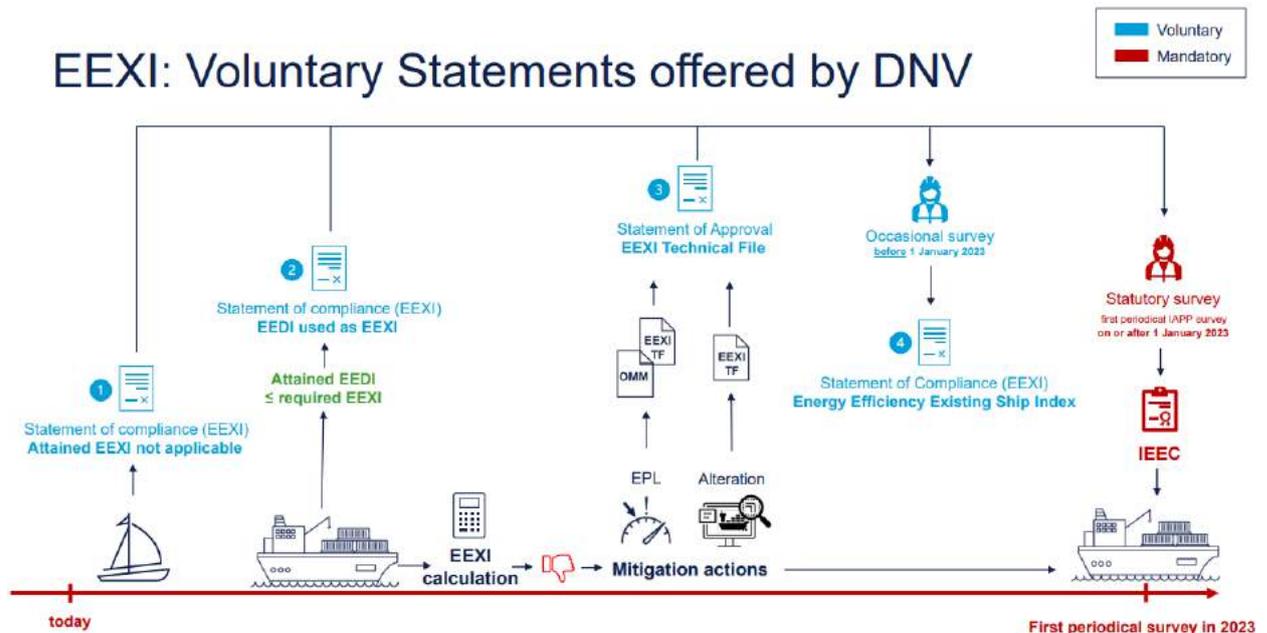


Ilustración 12 fuente DNV

## Indicador de la intensidad de carbono (CII)

El CII determina el factor de reducción anual que garantiza la mejora continua de la intensidad de carbono operacional del buque dentro de un nivel de clasificación concreto, para ello, se requiere que se documente y verifique el CII operacional anual obtenido respecto del CII operacional prescrito. Ello permite determinar la clasificación de carbono operacional consumido por el buque. Esta clasificación se basa en una escala alfabética, A, B, C, D o E, que indicara el nivel de rendimiento A= muy superior, B= superior, moderado, inferior o muy inferior. El nivel de rendimiento se registrará en el SEEMP que será remitido al MECP (IMO) a través de su administración.

Presentar el CII será de obligado cumplimiento, tras el final del año civil de 2023, y tras el final de cada año siguiente, para todo buque de arqueo bruto igual o superior a 5000

La IMO tomará como indicador el AER (gramos de CO<sub>2</sub>/DWR\*nm), para el cálculo del CII de cada buque.

Los buques clasificados D y E tres años consecutivos, deberán elaborar un plan de medidas correctivas para alcanzar un CII operacional anual prescrito.

En cambio, los buques clasificados como A o B obtendrán una serie de incentivos por parte de las administraciones y autoridades portuarias.

## Indicador de la intensidad de carbono (CII) operacional anual obtenido

Con los datos recopilados y remitidos a la base de datos de la IMO, se elaborará un informe anual para el comité de protección del medio marino, (MECP), teniéndose en cuenta el CII obtenido y el CII prescrito.

En un plazo de tres meses desde el final de cada año civil del buque, Sera de obligada notificación el anexo IX, como modelo valido, y que está disponible en el anexo A, al final de este documento.

Para el cálculo del Indicador de la intensidad de carbono (CII) operacional anual prescrito. Se utilizará la siguiente ecuación:

$$CII \text{ operacional anual prescrito} = \left( 1 - \frac{Z}{100} \right) \cdot CII_R \quad (5)$$

Donde,

Z es el factor de reducción anual para garantizar la mejora continua del CII dentro de un nivel de clasificación concreto y

CII<sub>R</sub> es el valor de referencia.

ambos valores, serán calculados por la OMI.

## Proyecto GLOMEEP

El GLOMEEP es una asociación para la eficiencia energética marítima mundial que pretende agilizar la adopción e implantación de medidas de eficiencia energética y así, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo.

La asociación, perteneciente a la IMO, busca la implementación y cooperación para llevar a cabo la implementación de estas medidas:

1. Reformas legales, políticas e institucionales para la implementación de la reglamentación de la IMO en cuanto a la eficiencia energética.
2. Concienciación de conocimiento y difusión del sector marítimo en materia de eficiencia energética.
3. La creación de asociaciones público/privadas para fomentar la innovación, el I+D en materia de eficiencia energética, entre ellos, el proyecto "GIA"

En 2017, través del GLOMEEP se creó el proyecto global de cooperación industrial "Global Industry Alliance to Support Low Carbon Shipping (GIA)" con la finalidad de crear un sistema de transporte marítimo de bajo consumo de carbón y cooperar en cuanto a conocimiento entre las empresas más representativas de la industria (wartsila, abb, Sociedades de Clasificación, proveedores de big data, MSC...)

Las actividades que promueve la alianza son, entre otras, foros de industria para fomentar el dialogo entre industrias y el desarrollo e investigación. Además, se creó, un fondo GIA con el que se financian las actividades.



Il·lustració 13. fuente: Proyecto GLOMEEP, IMO

Este esquema representa las áreas prioritarias de trabajo de la alianza, las cuales son clave para la optimización del transporte marítimo.

## Cop26

La denominada COP26 fue la conferencia de las partes de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, el protocolo de Kioto, y el acuerdo de París. Se celebró en Glasgow, Escocia entre el 31 de octubre y el 12 de noviembre de 2021. Reunió a los representantes de los gobiernos los cuales llegaron al acuerdo del pacto climático de Glasgow. El documento contiene las guías de acción política acordadas entre los países, y son las siguientes:

En consonancia con el acuerdo de París, se mantiene el esfuerzo de reducir las emisiones un 45% con respecto a niveles de 2010 y alcanzar emisiones netas nulas en 2050.

Se llega a consenso en acelerar la reducción del carbón y combustibles fósiles ineficientes, prestando apoyo para que sea una transición justa.

Los países miembros deberán trabajar para cumplir con urgencia y transparencia el objetivo de 100.000 millones de dólares de financiación climática, así como revisar este objetivo antes del 2025.

Se establece un plan de dos años para fijar un objetivo global de adaptación al cambio climático

Las empresas podrán participar en el Balance Global de 203, donde se realizará un diagnóstico de la situación y revisarán leyes climáticas.

Se pone en marcha mecanismos de apoyo financiero a los países en desarrollo.

En cuanto al transporte, más de 100 gobiernos, estados y grandes empresas, firmaron un acuerdo sobre coches y furgonetas con cero emisiones para poner fin a la venta de motores de combustión interna para 2035 en los principales mercados del mundo. Además, unos 13 países se comprometieron a poner fin a la venta de vehículos pesados impulsados por combustibles fósiles para 2040.

Los mandatarios acordaron reunirse a no más tardar en el 2025, donde revisaran las medidas y negociaran si es necesario modificarlas para llegar a los acuerdos fijados.

## Capítulo 4. Métodos de aumento de eficiencia

El rendimiento de un buque, a menudo puede mejorarse mediante la actualización de tecnologías de eficiencia energética, existiendo numerosos proyectos de actualización con PID (dispositivos de mejora de la propulsión).

Primero de todo, es importante comprender, que para conseguir una mejora óptima de la eficiencia y conseguir un margen de funcionamiento ligero adecuado y con lo cual se consiga que el motor del buque opere al mínimo del SFOC (curva de consumo específico de fuel oil). **Es necesario una combinación de las medidas de reducción de emisiones relativas a la planta propulsora, además de las medidas de reacondicionamiento que mejoran el rendimiento hidrodinámico y la implementación de medidas operacionales.**

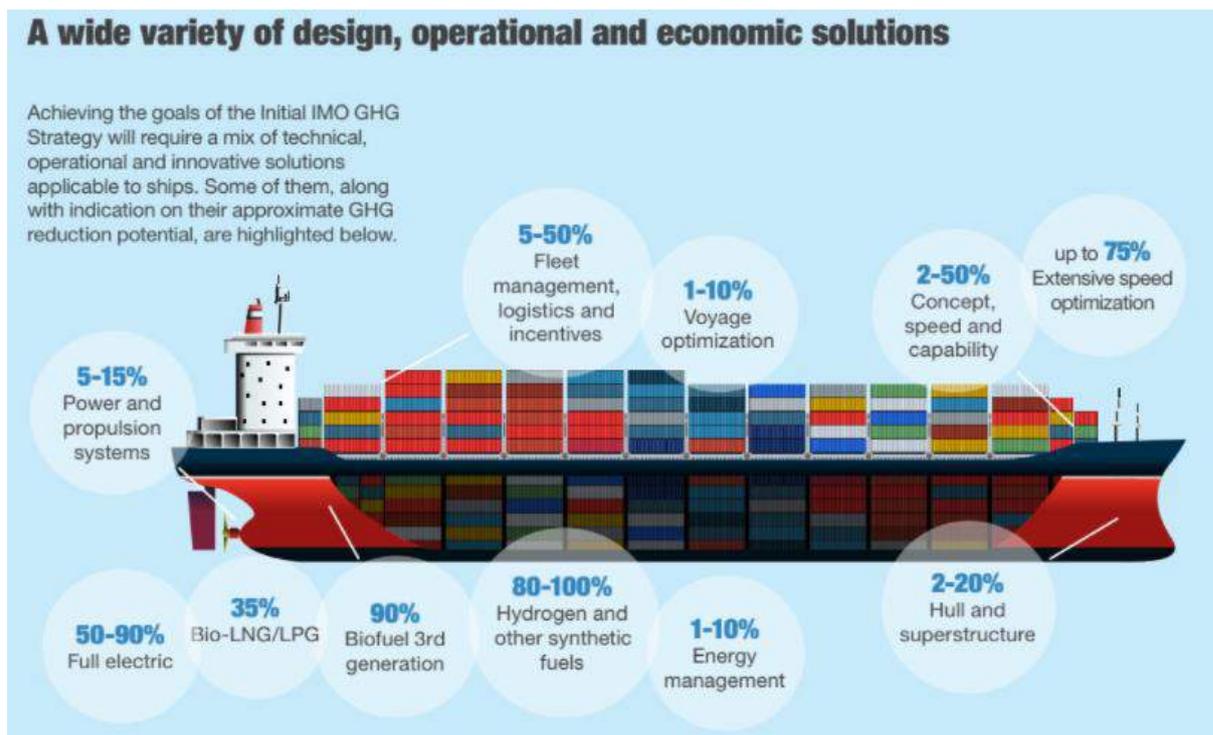


Ilustración 14 estrategia IMO fuente organización marítima internacional

Los proyectos de mejora de la propulsión pueden reducir el consumo de combustible de los buques y mejorar las calificaciones EEDI y EEXI.

Siguiendo la estrategia de la OMI en cuanto a la reducción de gases de efecto invernadero para 2050, numerosas sociedades de clasificación se suman a la búsqueda de **soluciones viables a corto plazo** para adaptarse a las nuevas

normativas, evaluando las medidas actuales y los dispositivos de ahorro energético.

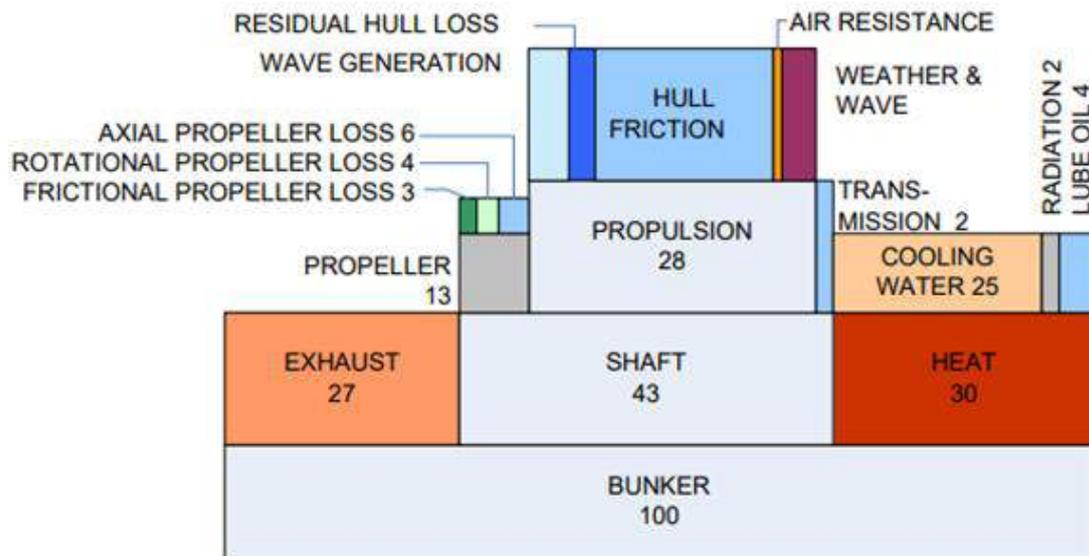
De entre ellas, la sociedad DNV evalúa las tecnologías existentes para ofrecer una decisión segura en el tipo de medida de ahorro de energía (ESD) para cada tipo de buque, esta evaluación, consiste en dos fases, la fase 1 es el estudio de la madurez técnica y potencia de ahorro de medidas probadas y ESD en el mercado. Y la fase 2 es una evaluación detallada de la viabilidad de la modernización de los ESD a cada tipo de embarcación existente.

Cabe destacar, que existen muchas más opciones aparte de las siguientes, y cada una dependerá del diseño y de la utilidad que se le quiera dar al buque.

El aumento de eficiencia se basa en conseguir un mismo trabajo útil utilizando menos cantidad de energía, para ello, existen infinidad de subdivisiones clasificando las medidas principales de aumento de eficiencia, en este estudio, se dividirán en tres grandes bloques, que son:

- **Los relativos al sistema propulsivo.**
- **Diseño hidrodinámico, relativo a la carena y elementos en contacto con el fluido.**
- **Operacionales.**

Primero de todo, se debe de entender que todo ciclo térmico de transformación de energía no ideal, tiene perdidas en menor o mayor medida, y que, en la propulsión de un buque, entre el 40 y el 50% de la energía del combustible se transforma en potencia entregada en el eje. Teniendo perdidas por calor disipado en el motor, energía perdida en el escape, en la línea de transmisión, y en la hélice.



Il·lustració 15 fuente TNO innovación, GHG report

Atendiendo al gráfico anterior, se observan las principales pérdidas de energía en la planta propulsora, el 100% corresponde a la energía neta del combustible suministrada a la planta, de este aporte, el 27% se pierde en el escape, el 43% en la línea de eje debido a la fricción mientras que el 30% se pierde en forma de calor disipado. Obteniendo como resultado, que el 28% de la energía del combustible transformada por el motor principal produce la propulsión.

## Sistema propulsivo

A continuación, se enumeran algunos de los métodos de aumento de eficiencia con los cuales se reducen las emisiones de gases contaminantes específicos al sistema propulsivo del buque. Estos métodos de reducción inciden en las pérdidas por el escape y el calor disipado por el motor, y pueden dividirse en sistemas directos o externos.

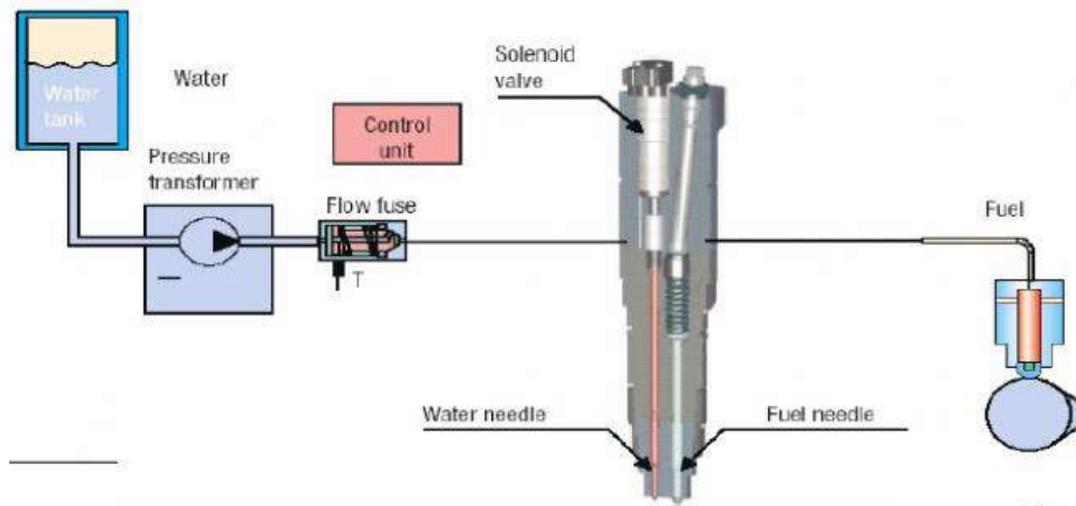
## Métodos de reducción directos.

Estos métodos de reducción de emisiones se realizan sobre el diseño del motor, sus componentes y del trabajar del motor. Principalmente se intenta reducir los picos de temperatura que se alcanzan en las cámaras de combustión y que como hemos visto anteriormente, es la causa fundamental de la formación y emisión de los NO<sub>x</sub>.

### Inyección directa de agua en la cámara de combustión.

Los gases NO<sub>x</sub> presentes en la combustión son en mayor proporción cuanto mayor es la temperatura de combustión de los gases, este sistema consiste en inyectar agua previa a la inyección de combustible en la cámara de combustión reduciendo los niveles de óxidos de nitrógeno en un 50% en contra del aumento de un 3% de combustible.

Además de una reducción de las emisiones, con este sistema se puede conseguir un 2% de potencia extra ya que, debido a la disminución de la temperatura de la cámara de combustión, el avance de encendido puede disminuir en un par de grados, aumentando la eficiencia, al no haber probabilidad de detonación no controlada. También permitir una mayor relación de compresión aumentando mayor cantidad de masa de aire y combustible.

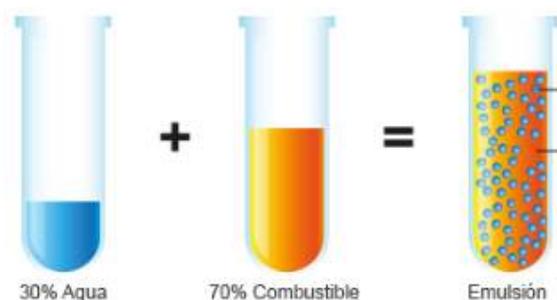


Il·lustració 16 sistema inyecció aigua en CC font enginyer mariner

En la imatge es observen els elements dels quals consta el sistema, un tanque d'emmagatzematge d'aigua, una bomba d'aigua, i inyector. Tot això és controlat mitjançant una unitat de control electrònica que inyecta en el moment oportú mitjançant l'inyector.

### Emulsió d'aigua de combustible.

La emulsió es defineix com una mescla de dos líquids, en aquest cas del dièsel i de l'aigua, en la proporció adequada, l'aigua està en forma de gotes petites dins del combustible.



Il·lustració 17 emulsió combustible font enginyer mariner

Quan s'escalfa la mescla inyectada a la cambra de combustió, es dona lloc a un fenomen anomenat micro-explosions, que ocorre quan les partícules d'aigua es vaporitzen instantàniament dins de la mescla. L'aigua es evapora

de forma rápida y violenta, desencadenando una rotura de las gotas de combustible en micro-partículas, ayudando a una vaporización más completa y favoreciendo la turbulencia del combustible.

Esto ayuda a la atomización del combustible, dando lugar a una combustión más efectiva.

La temperatura de la cámara de combustión disminuye con lo cual la producción de gases NO<sub>x</sub> descienden.

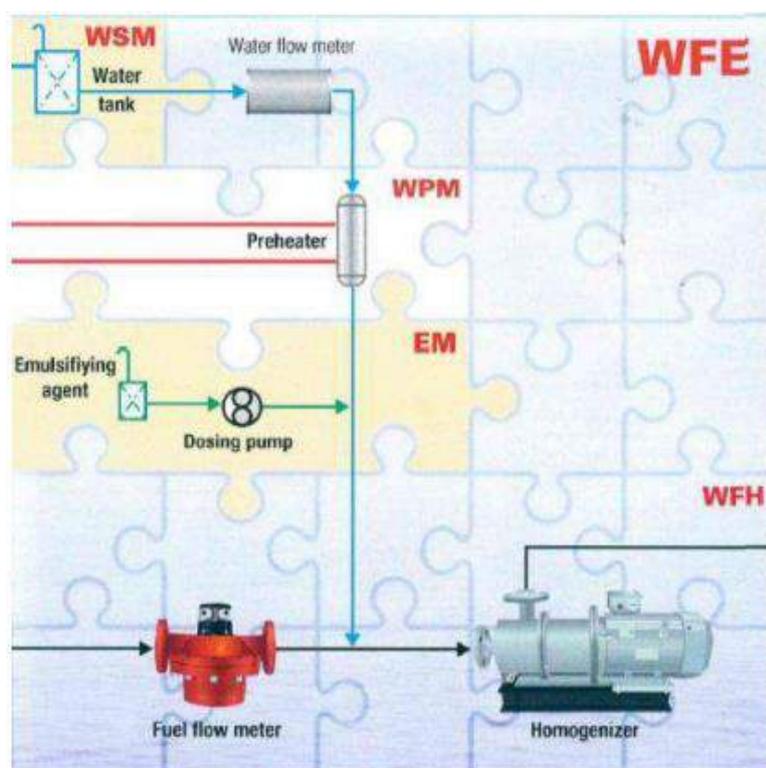


Ilustración 18 homogeneizador de combustible, fuente WFE

Este sistema se compone principalmente por un motor eléctrico en el cual acciona una cámara de mezclado en la que desembocan las entradas de agua y combustible en proporciones ajustables. Una vez emulsionados, la mezcla es impulsada a los consumidores.

## Inyección de agua en el aire de admisión (HAM)

La inyección de agua en el aire de admisión consiste básicamente en inyectar una emulsión de vapor saturado en la admisión de aire del motor. Este aire comprimido procedente de un turbocompresor se satura de agua de mar, previamente filtrada. Esto crea una atmosfera con vapor saturado que hace bajar la temperatura de la cámara de combustión reduciendo los picos de temperatura en el proceso de las combustiones, reduciendo los gases  $\text{NO}_x$ .

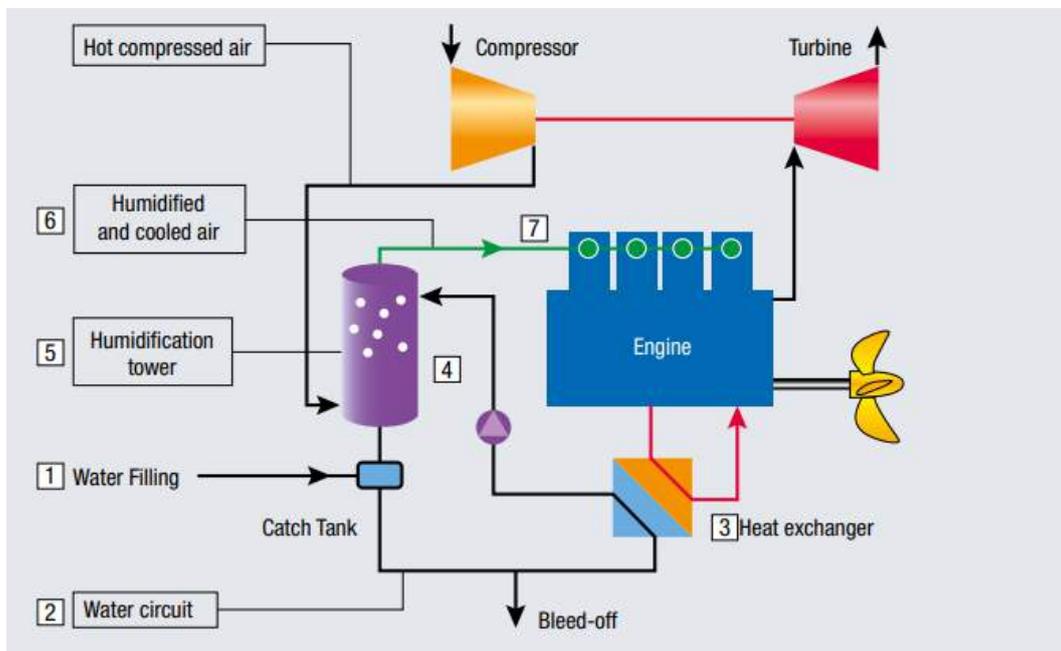
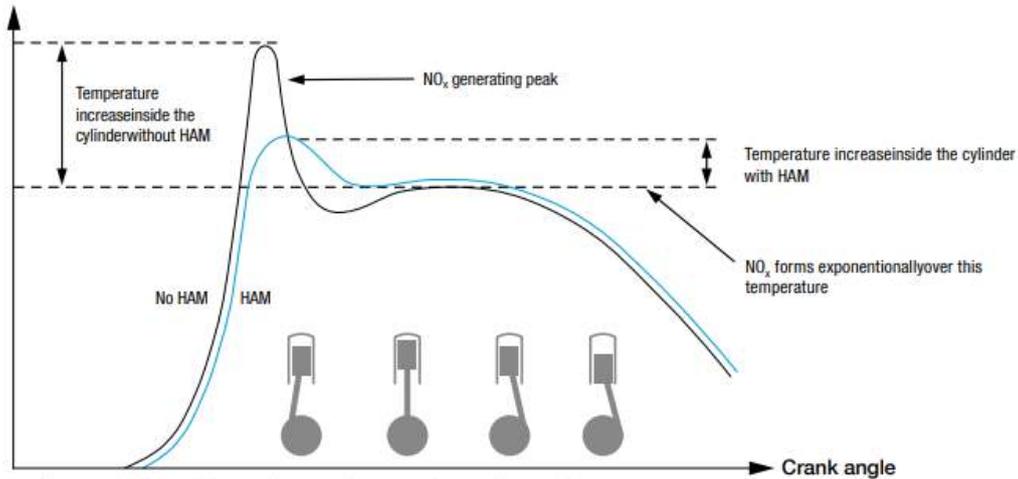


Ilustración 19 dispositivo HAM fuente Wärtsilä

A parte de la reducción de las emisiones de los  $\text{NO}_x$ , la reducción de la temperatura de la cámara, supone una menor temperatura de trabajo de los materiales empleados, alargando drásticamente los periodos de mantenimiento y la vida útil de los mismos.

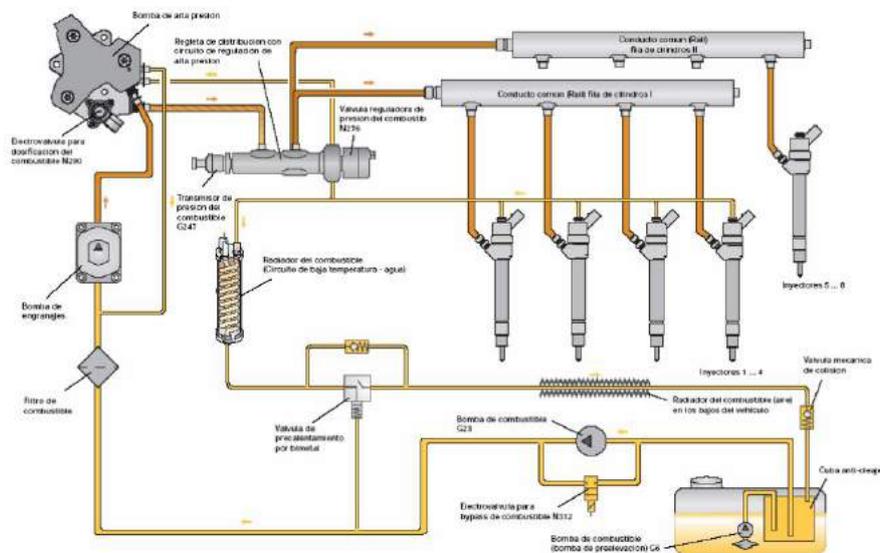


Il·lustració 20 beneficis de instal·lació de un HAM, fuente ingeniero marino

La implantación de este sistema signifió un gran avance en la reducción de los NO<sub>x</sub> ya que es un sistema capaz de reducir cerca de un 60% de estas emisiones por motor.

Este sistema fue instalado por primera vez al barco noruego KVANNOY que monta un motor MAN 16V28 de 3.920KW, esto supuso una reducción entorno a las 50 toneladas anuales de emisiones.

### Sistema de inyección Cammon-rail



Il·lustració 21 sistema cammon-rail fuente Wärtsilä

El sistema de inyección cammon-rail (conducto común) es un sistema eléctrico de inyección de combustible que se basa en la pulverización del combustible a alta presión en la cámara de combustión.

El combustible es aspirado desde el tanque mediante una bomba de baja presión hasta la bomba de inyección mecánica del propio motor (bomba de alta). Desde la bomba de inyección, el combustible es enviado a alta presión, en torno a unos valores de 1000 a 2000 bares, hasta un rail/rampa desde donde se alimentan todos los inyectores del motor.

En el rail dispone de un sensor de presión y una válvula limitadora. Ambos elementos serán controlados bajo la ECU la unidad de control electrónica que actuara sobre cada elemento para mantener la presión requerida.

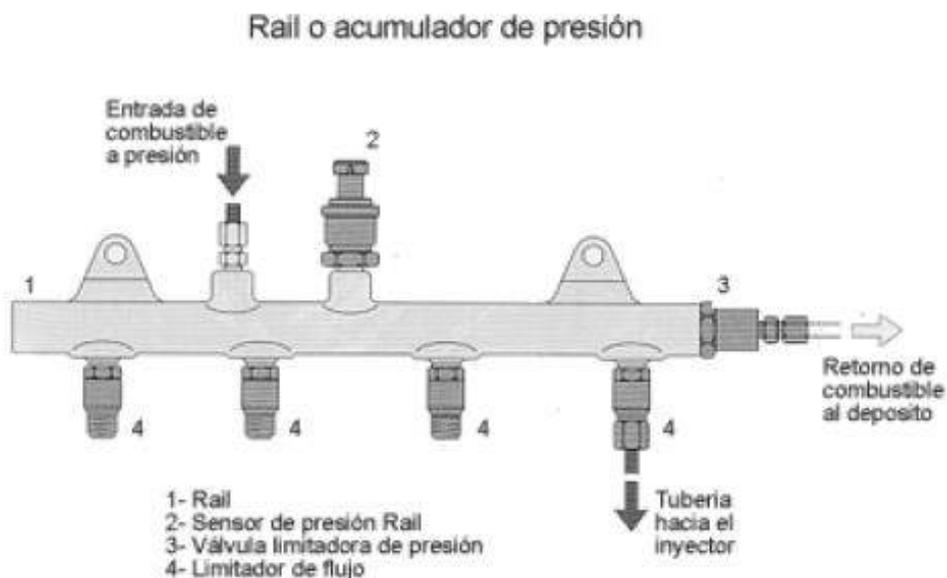


Ilustración 22 rail común fuente propia

La inyección de combustible de este sistema es controlada mediante una válvula solenoide incorporada en cada inyector. Este sistema de inyección a alta presión proporciona una máxima pulverización del combustible que genera una mayor eficiencia en la combustión.

El sistema cammon-rail permite realizar en el rango de 5 a 8 preinyecciones antes de la inyección principal, estas preinyecciones como la inyección principal, que variara principalmente en función de la velocidad del motor y la carga.

La utilidad de las preinyecciones es adecuar lo máximo posible termodinámicamente la cámara de combustión para la inyección principal, la cual necesitara un menor caudal de combustible pulverizado.

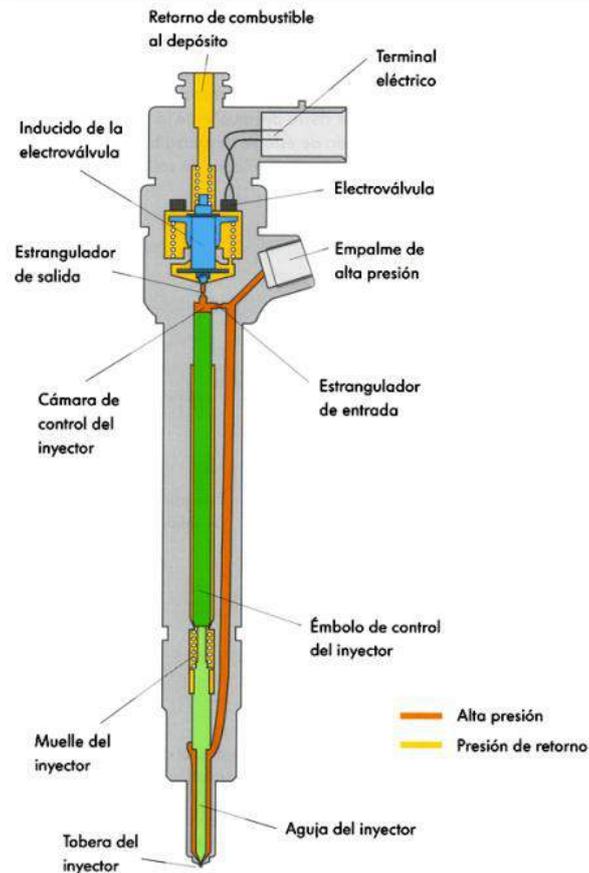


Ilustración 23 inyector electrónico de cammon-rail, fuente ingeniero marino

Este sistema reduce el consumo de combustible, aumenta el par motor (mayor presión y temperatura en la cabeza del pistón) y reduce la formación de humos al aumentar la eficiencia del combustionado de las nano partículas pulverizadas por los inyectores.

## Recirculación de gases (EGR)

El sistema de recirculación de gases, consiste en redirigir una parte de los gases de escape producidos por el motor, hasta la entrada de la admisión para empezar el ciclo nuevamente. Con esto se consigue un empobrecimiento de la mezcla, ya que se inyecta parte de los gases ya combustionados con menor proporción de  $\text{CO}_2$ , con lo cual, implicara un descenso de la temperatura de la cámara de combustión, disminuyendo la formación de los  $\text{NO}_x$ .

El mayor inconveniente de este sistema, es la formación de hollín en la válvula reguladora de caudal. Esta deberá de mantenerse en perfectas condiciones de mantenimiento para un funcionamiento eficaz.

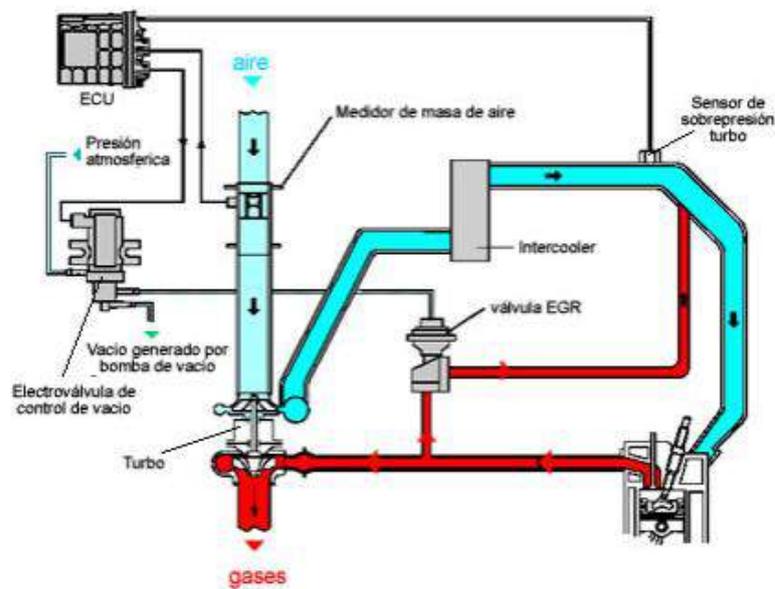


Ilustración 24 sistema EGR

Como se observa en la imagen, la válvula EGR se sitúa a la salida del colector de escape. Esta válvula regula el caudal de entrada de los gases de escape a la admisión generalmente mediante una unidad de control electrónica que, mediante una serie de sensores de presión, realiza la apertura en función del aumento de régimen.

Como se ha explicado en los sistemas de reducción directos, la producción de los NO<sub>x</sub> derivados de la combustión suelen reducirse un 50%. A pesar de ser un gran porcentaje, aun si, no siempre se cumple la legislación referente a la reducción de emisiones.

Por ello es importante complementarlos con tratamientos externos a fin de conseguir la máxima eficacia en cuanto a la eliminación de los NO<sub>x</sub>, y poder cumplir con las normativas y el certificado EIAPP.

A continuación, se expondrán los sistemas externos de reducción de los gases NO<sub>x</sub> más empleados a día de hoy.

## Métodos de reducción externos

Los métodos de reducción de emisiones externos o post combustión, son los tratamientos realizados a los gases de escape de los motores. Los gases de escape se componen fundamentalmente por compuestos oxidantes como el O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, HC y los NO<sub>x</sub>, presentes estos últimos, en mayor o menor proporción en función de los tratamientos anteriormente explicados.

Los siguientes dispositivos son instalados en las salidas de los gases de escape antes de ser liberados a la atmosfera.

Estos sistemas funcionan de distintas formas para la eliminación de los gases contaminantes y pueden clasificarse en cuatro grupos en función de su principio de funcionamiento:

- I. Filtros Químicos: son sistemas en los cuales se acumulan los compuestos químicos procedentes de los gases de escape. Reteniéndolos en su interior. Las acumulaciones de estas substancias requieren un remplazo periódico de estos.
- II. Reactores Catalíticos: algunos metales y compuestos ejercen un efecto catalítico sobre algunos gases de escape permitiéndoles alcanzar el equilibrio químico que no se ha logrado alcanzar en el proceso de la combustión.

- III. Reactores Químicos: funcionan mediante una mezcla química de los gases de escape y una serie de elementos, como el amoníaco, permitiendo la eliminación de alguno de los gases contaminantes. El más conocido el SCR.
- IV. Reactores Térmicos: consiste en la combustión a alta temperatura de los productos susceptibles de oxidarse.

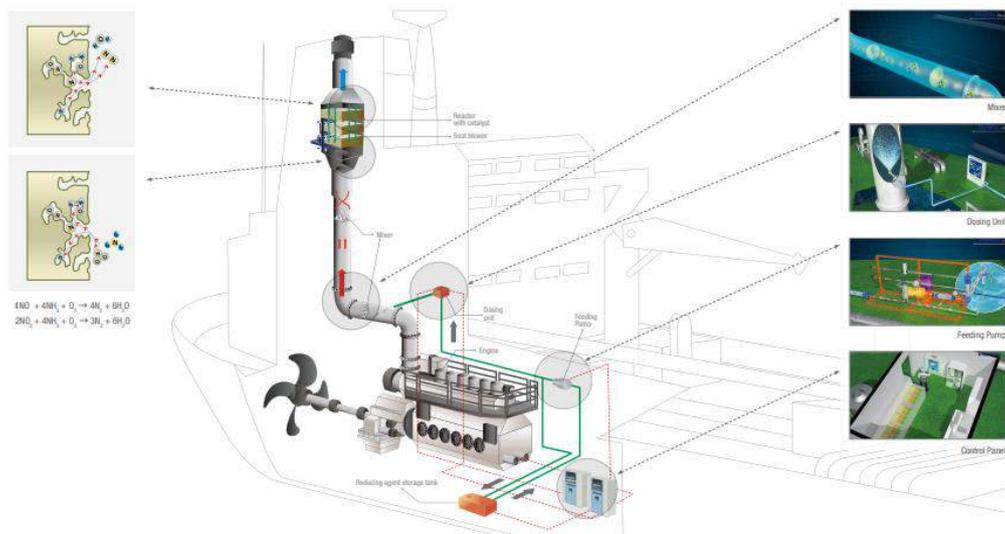
Una vez clasificados, se exponen los siguientes:

### Catalizador de gases. (SCR)

El proceso de reducción catalítica selectiva (SCR) se basa en una reacción química que reduce los óxidos de nitrógeno  $\text{NO}_x$  a través de la inyección de un agente reductor como el amoníaco  $\text{NH}_3$  con una proporción de urea y en presencia de un exceso de oxígeno monoatómico  $\text{O}_2$ .

Toda esta reacción química se lleva a cabo en el interior de un recipiente montado en el colector de escape del motor de combustión y que en su interior contiene un agente catalizador.

Se entiende por catalizador a toda sustancia o material presente en una reacción química y que aumenta la velocidad de la reacción sin que su masa disminuya a lo largo de ella. Los catalizadores más empleados son el paladio, el cloruro de aluminio, vanadio y el zinc.



Il·lustració 25 sistema SCR en Motor MAN, fuente MAN marine

Como se puede observar en la imagen, este sistema está compuesto de un tratamiento externo de gases SCR, se observa un catalizador a la salida del colector de escape, donde mediante una bomba se inyecta la proporción de agente reductor de amoníaco y aire, consiguiendo una reacción química completa.

Este proceso es controlado a través de una unidad de control electrónica que recibe información del sensor lambda ubicado a la entrada del catalizador, este sensor, suministra información de la proporción de combustible y oxígeno del motor, con la que se ajustara lo mejor posible a una reacción química ideal en la que se produzcan la menor cantidad de gases  $\text{NO}_x$ .

Para lograr que esta reacción se realice correctamente, y que el material cataléctico funcione de manera adecuada, es necesario un rango de temperatura de entre  $270^\circ$  y  $500^\circ$ .

### Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR)

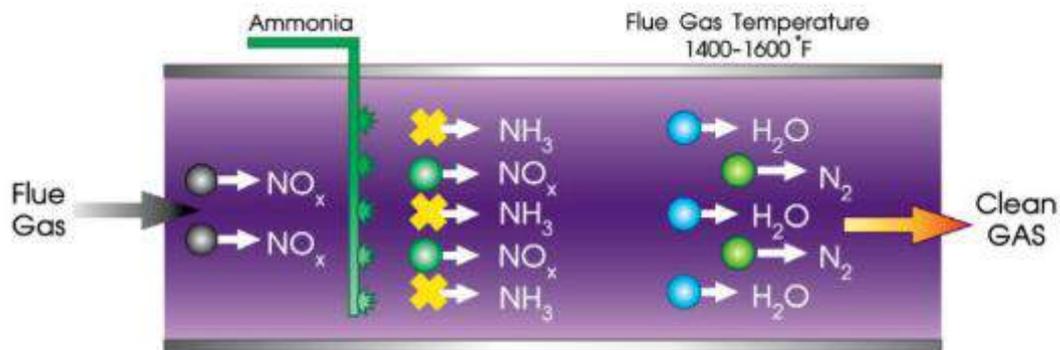


Ilustración 26 Reacción producida en un SCR, fuente ingeniero marino

La reacción química que se dan en el interior del armazón, llamado catalizador por el elemento cataléctico de su interior, es la siguiente:

1.  $4NO + 4NH_3 + O_2 \rightarrow 4N_2 + 6H_2O$  (6)
2.  $6NO_2 + 8NH_3 + O_2 \rightarrow 7N_2 + 12H_2O$
3.  $NO + NO_2 + 2NH_3 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$

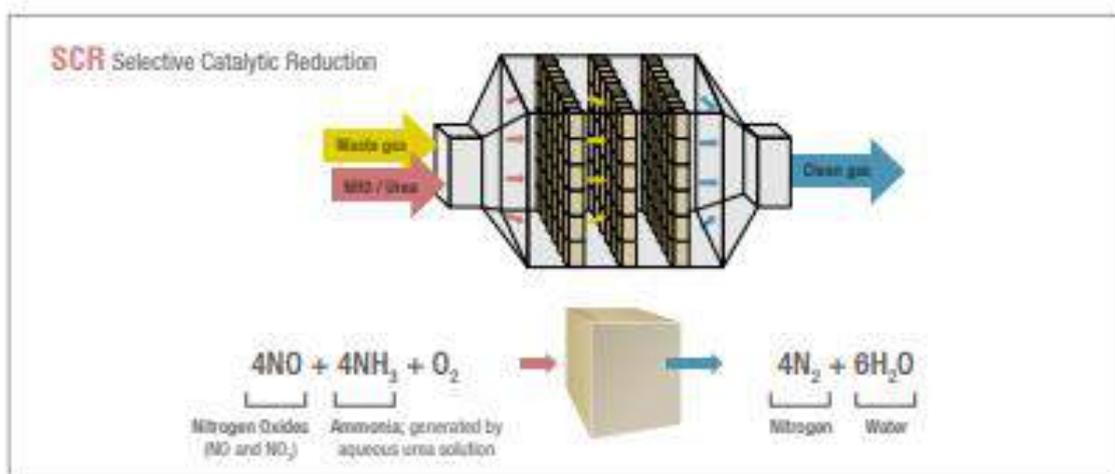


Ilustración 27 SCR fuente propia

Al combinarse la solución de amoníaco y urea en la atmosfera rica en O<sub>2</sub> se obtiene N<sub>2</sub> (sustancia no nociva para la atmosfera) y agua que debido a la temperatura del catalizador se evapora.

Como se ha comprobado anteriormente es importante que dicha reacción se encuentre dentro de un rango de temperatura y que contenga un exceso de  $O_2$ , ya que el desajuste de alguno de estos parámetros, conllevará la formación de óxidos nitroso.

Una de las ventajas de este sistema es que el elemento cataléctico no se consume. Pero eso no significa que no pueda recubrirse de impurezas derivadas de la combustión de diferentes combustibles o aceites, produciendo una pérdida de eficiencia del dispositivo.

El consumo de combustibles con alto porcentaje de azufre como los HFO, durante su combustión, producen  $SO_2$ , debido al azufre presente en su composición. Al entrar en la reacción química, el catalizador se oxida a  $SO_3$ .

Las sales de sulfato se pueden depositar y acumular sobre el catalizador dando lugar a su desactivación si la temperatura del catalizador no es la adecuada.

Este sistema proporciona una reducción de emisiones  $NO_x$  cerca del 85%, y capaz de reducir los gases hasta un 2 g/kWh.

## Filtros de partículas

Por norma general los filtros de partículas están ubicados a la salida del catalizador, este filtro con forma de colmena, filtra los gases procedentes del catalizador, extrayendo las partículas de hollín procedentes de la combustión del motor y de la reacción química sobrante del catalizador.

El hollín es atrapado en las paredes porosas del filtro y posteriormente son quemadas mediante un proceso térmico de regeneración, este proceso funciona incrementando la temperatura del filtro reajustando la inyección después del PMS (punto muerto superior) e inyectando parte de ese combustible al colector y así, aumentar la temperatura en el escape. A este proceso se le denomina regeneración activa.

El control de este sistema es bajo las ordenes de la ECU que detecta un diferencial de presión en la salida y entrada del mismo

El inconveniente de estos filtros son que debido a la regeneración residual que queda al realizarse el proceso, este desecho queda ubicado en la parte inferior del filtro sin posibilidad de eliminación, teniéndose que abrirse para su limpieza.

Este tipo de filtros son generalmente utilizados en el sector automovilístico, aun así, algunos fabricantes de motores marinos empiezan adaptar este tipo de filtros a sus motores.

### Scrubber (lavado de gases)

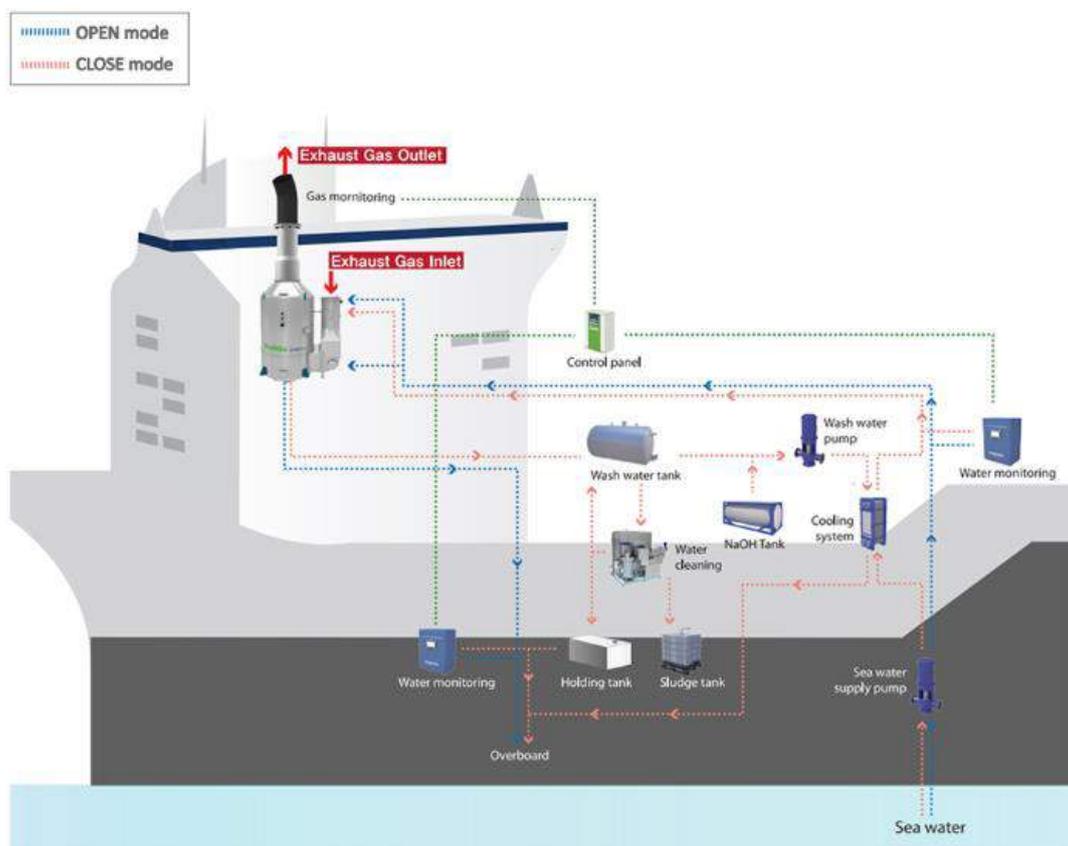


Ilustración 28 Scrubber fuente Wärtsilä

El sistema SCRUBBER, su principio básico consiste en rociar los gases de escape procedentes de la combustión mediante una sustancia líquida, generalmente agua tratada con un reactivo.

La ducha de estos gases mediante el sistema scrubber elimina tanto las partículas de hollín producidas por combustibles de alto contenido de azufre como gases  $SO_x$ .

Este sistema se coloca a lo largo de la chimenea de escape, posteriormente a los sistemas SCR si los hubiera, y el final de esta donde serán expulsados a la atmosfera.

Existen varios tipos de scrubber, según las necesidades del proceso. En los buques los scrubber de torre son los más empleados, dividiéndose en dos categorías de lavado, seco y húmedo.

### Torres de lavado seco

Estos sistemas consisten en el tratamiento de los gases utilizando el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) como método de lavado, dando lugar a ( $\text{CaSO}_4$ ) eliminando los óxidos de azufre y las partículas sólidas. Para ello, los gases de escape circulan horizontalmente por la superficie del compuesto permitiendo una optimización de la reacción.

Esta reacción química libera calor a los gases de escape, ya que es una reacción exotérmica.

Una de las mayores ventajas de este sistema, además de la eliminación del 90% de los  $\text{SO}_x$ , es la del tener un mínimo consumo energético.

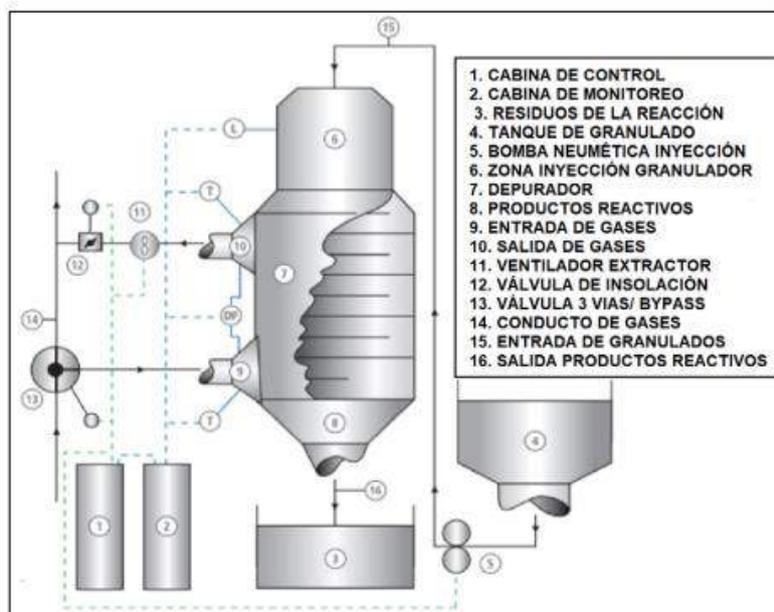


Ilustración 29 Scrubber de gases tipo seco.

Los scrubber de lavado húmedo consiste en una serie de elementos filtrantes dispuestos verticalmente a la salida de los gases, estos compuestos son polímeros plásticos con alta permeabilidad.

Una serie de rociadores suministran líquido de lavado desde la parte superior, atravesando los materiales de empaque y entrando en contacto con las moléculas de gas. Al contactar las moléculas de gas con el líquido de lavado son arrastradas por el líquido hasta la parte inferior del armazón.

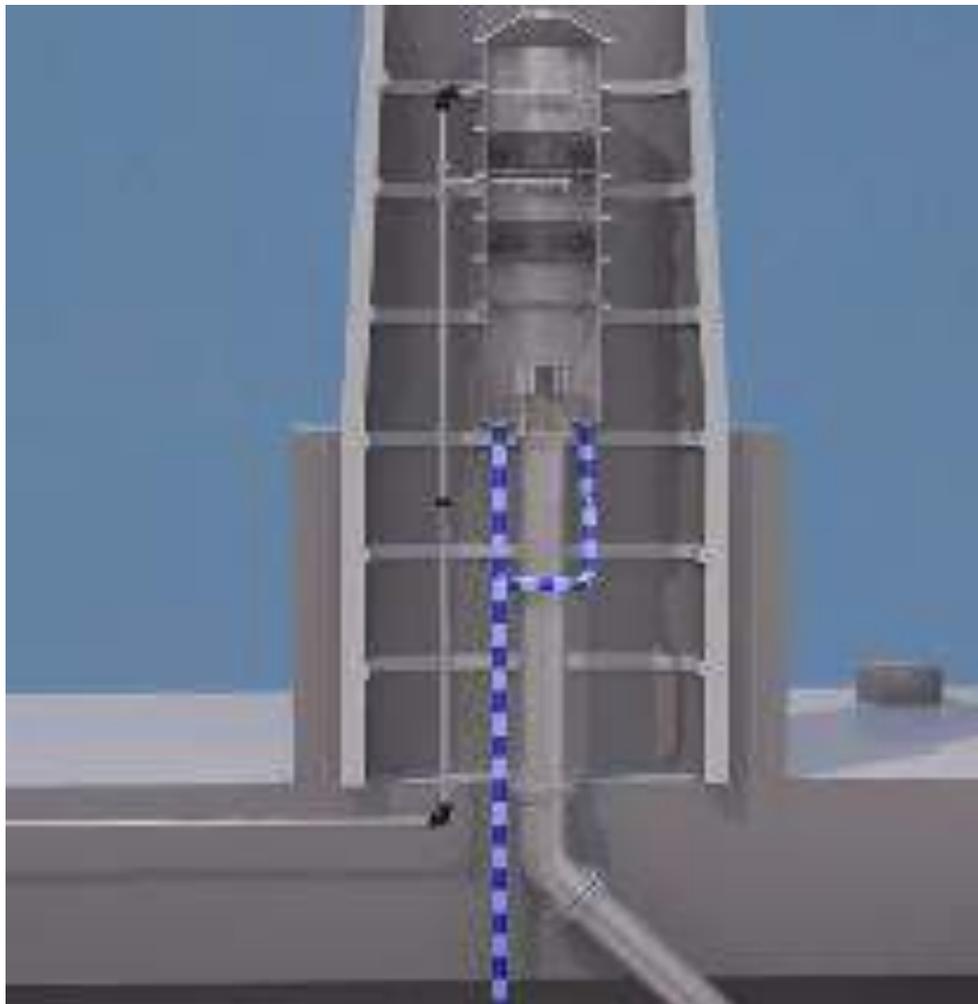


Ilustración 30 Armazón de un scrubber fuente wärtsilä

### Torres de lavado húmedo

Consiste en scrubber dispuestos verticalmente donde los gases son lavados mediante una solución acuosa. Se clasifican según el modo en el que se filtran los gases.

El vapor resultante de atravesar esta lluvia de líquido de lavado suele contener partículas de fluido contaminado, para ello existe un último elemento encargado de separar estas gotas evitando que estas salgan a la atmosfera.

Los residuos líquidos resultantes del lavado son llevados a una planta de tratado de residuos, y depositados en una serie de tanques de lodos donde se almacenarán para su extracción en puerto.

El líquido de lavado generalmente suele ser una mezcla de reactivo (NaOH) y agua, dependiendo de los contaminantes a tratar. Los derivados del nitrógeno pueden ser absorbidos en un medio ácido, mientras los derivados del azufre pueden ser absorbidos en un medio alcalino u oxidante. Esto requiere en ocasiones un tratado del líquido de lavado, el cual tendrá que tener un determinado pH, ya que el agua de mar succionada por las bombas para el lavado, tendrán un determinado pH en función del agua en las que navegue el buque.

Todo este sistema será controlado por una unidad de control electrónica que ayudándose de una serie de sensores a la salida de gases determinara si es necesario un aumento de reactivo.

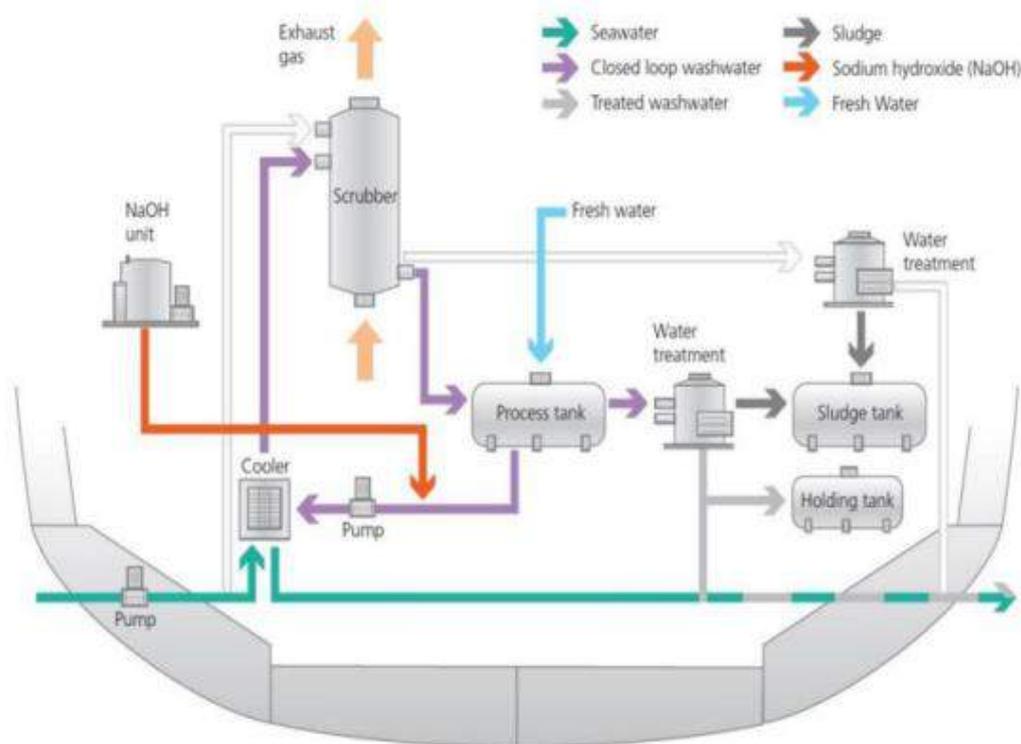


Ilustración 31 Sistema completo scrubber en un buque fuente ingeniero marino

Estos sistemas de lavado de gases están en plena modificación constante, ya que debido a la normativa de la OMI sobre los límites de emisiones de los SO<sub>x</sub> que entro en vigor en pasado 1 de enero de 2020, todo buque que navegue en una ECA deberá cumplir con el límite de emisión de azufres fijado en un 0,50% masa/masa.

A pesar de estar hablando sobre los sistemas de reducción de emisiones NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, existen sistemas de aumento de eficiencia en los motores, con lo cual conlleva una reducción de gases de efecto invernadero.

## Medidas relativas al diseño Hidrodinámico

El diseño de formas del buque, interacciona directamente con la contaminación atmosférica, puesto que la potencia instalada es calculada para revertir la resistencia al avance que otorga la carena del buque. Cerca de 1/3 de las pérdidas energéticas de un buque es debido a las pérdidas en el casco. Siendo la resistencia hidrodinámica, la fricción del propio casco con el fluido, la más significativa con respecto a la resistencia por formación de olas.

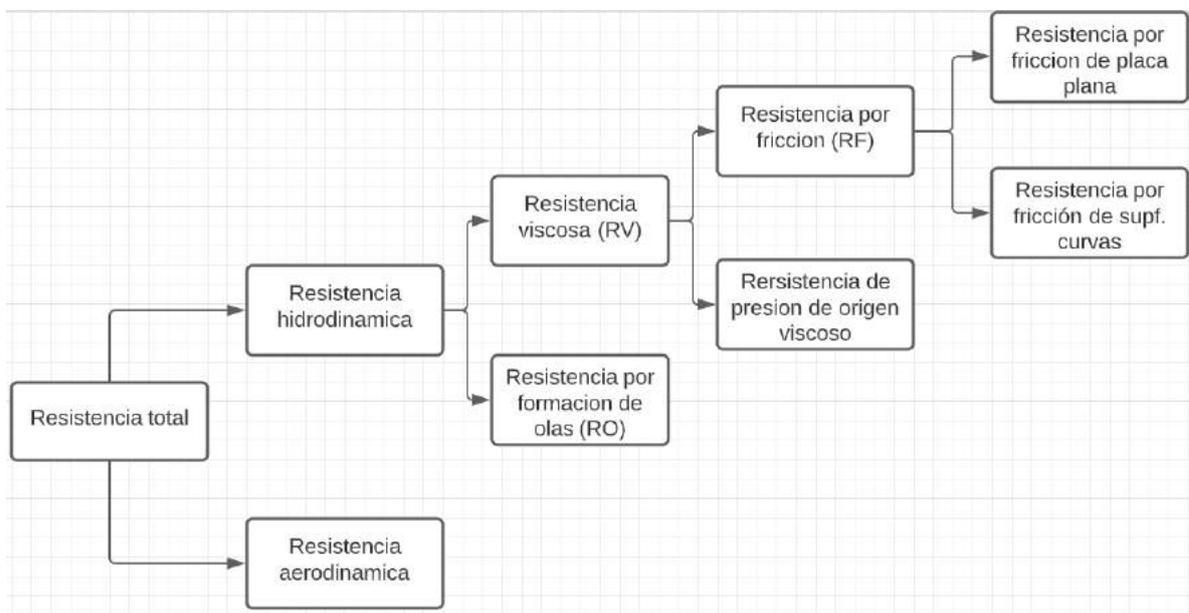


Ilustración 32 resistencias totales fuente: Prof Joel Jurado

La resistencia viscosa, (RV) depende enteramente del número de Reynolds que representa si un fluido es laminar o turbulento siendo su fórmula la siguiente:

$$RV = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (7)$$

La resistencia viscosa dependerá de la viscosidad del fluido, así como la velocidad y la eslora del buque

Debido a la viscosidad del fluido aparecerá otro fenómeno del cual dependerá la resistencia por fricción (RF) que es la capa límite, ya que consiste en la variación que se da en la velocidad de un fluido no ideal respecto a un sólido en

movimiento y dependiente en gran medida de la geometría del buque. Entrando en juego la resistencia de fricción de placa plana y de superficies curvas.

El coeficiente de resistencia viene dado por la ecuación siguiente:

$$CT = Cv + Cw + \Delta Cf + \Delta Caa \quad (8)$$

Donde el  $C_v$  es el coeficiente viscoso y su ecuación es:

$$Cv = (1 + k) \cdot Cf \quad (9)$$

$C_f$  es el coeficiente de fricción que se obtiene principalmente por la experiencia en canales de ensayo con diferentes placas planas a distintos números de Reynolds. De ellos, se determinan unas líneas de fricción universal a la hora del cálculo. (método de Prohaska)

Siempre que sea en régimen turbulento, se obtiene la siguiente ecuación:

$$Cf = \frac{1.327}{\sqrt{Rn}} \quad (10)$$

El factor de forma  $(1+k)$ , perteneciente a las Resistencias Viscosas determina la diferencia de un buque a una placa plana, siendo el 1 una placa plana con coeficiente de resistencia más bajo.

Con este coeficiente, se relaciona la manga y eslora. Al obtener una relación más pequeña entre manga y eslora, con formas más largas y esbeltas, se obtiene un valor de  $K$  más pequeño consiguiéndose una resistencia viscosa menor con lo cual una menor potencia instalada y un menor consumo de combustible.

### Resistencia por superficies curvas

Esta resistencia de fricción es debida a las características curvas de la obra viva de cualquier embarcación en contacto con la viscosidad del agua.

Esta resistencia se debe a la curvatura propia de las cuadernas del buque. A medida que el radio de curvatura del buque disminuye, más se reduce la capa límite, esto conlleva que a menos espesor de capa límite, mayor aumento de resistencia de fricción ya que se produce un mayor esfuerzo tangencial a la superficie.

Por otro lado, **la resistencia por formación de olas (RO)** es un fenómeno gravitacional, dependiente del **número de Froude** que relaciona las fuerzas de

inercia y las de gravedad que actúan sobre un fluido. Este número adimensional, tiene como variables, la Velocidad, la Eslora y la fuerza de la gravedad.

Dependiendo de su valor, prevé el comportamiento de resistencia de una embarcación

$$Fn = \frac{v}{\sqrt{gL}} \quad (11)$$

La RO, se produce con cualquier cuerpo en movimiento que flote en una superficie libre, puesto que debido a su movimiento generara un sistema de olas. Estas olas se producen debido a las variaciones de presiones entre proa y popa, según el teorema de superposición de ondas, el buque al desplazarse por la superficie, y debido a las discontinuidades en la carena, se crean sistemas de olas que interfieren entre ellos. Dichas interferencias, pueden ser favorables o desfavorables, si el sistema de olas está en fase con el de popa, es decir, coinciden las crestas de las olas, resultara en un aumento de la amplitud (altura) resultando un aumento de resistencia por olas. Por otro lado, si los sistemas están desfasados entre sí, el valle de una ola coincide con la cresta de la otra, genera que la amplitud resultante se reduzca, disminuyendo la resistencia por formación de olas.

Los bulbos de proa, tienen como función crear un sistema desfasado adicional de olas contrario al del casco y así reducir la resistencia.

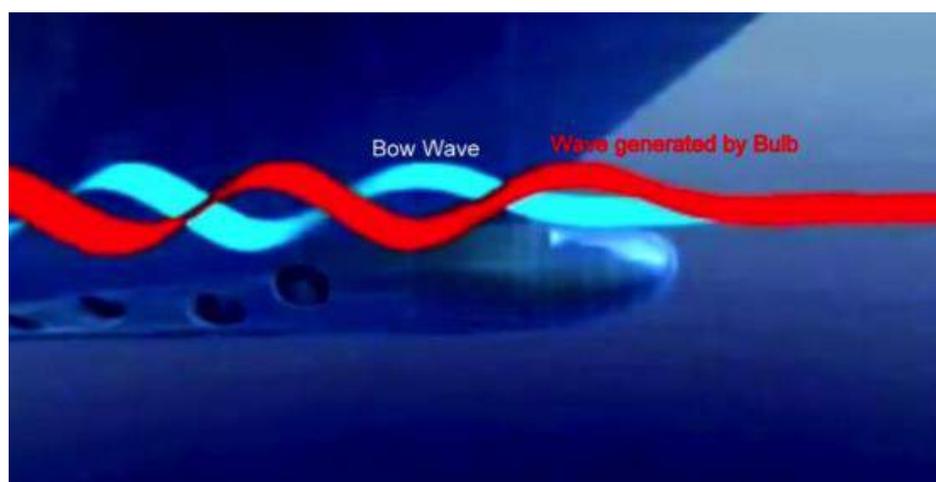


Ilustración 33 interacción del bulbo con la formación de ola, fuente IMO module 4

La resistencia por formación de olas, no sigue un patrón de comportamiento exponencial con la velocidad, sino que depende de las interferencias entre los sistemas de olas.

Es posible saber en qué puntos se obtendrá una mayor o menor resistencia, puesto que si fuera la proa la única interviniente en la superficie y no hubiera más puntos que interrumpian la continuidad del casco, solo se generaría un sistema de olas que iría aumentando a medida que aumenta la velocidad, tal y como se observa en la siguiente imagen.

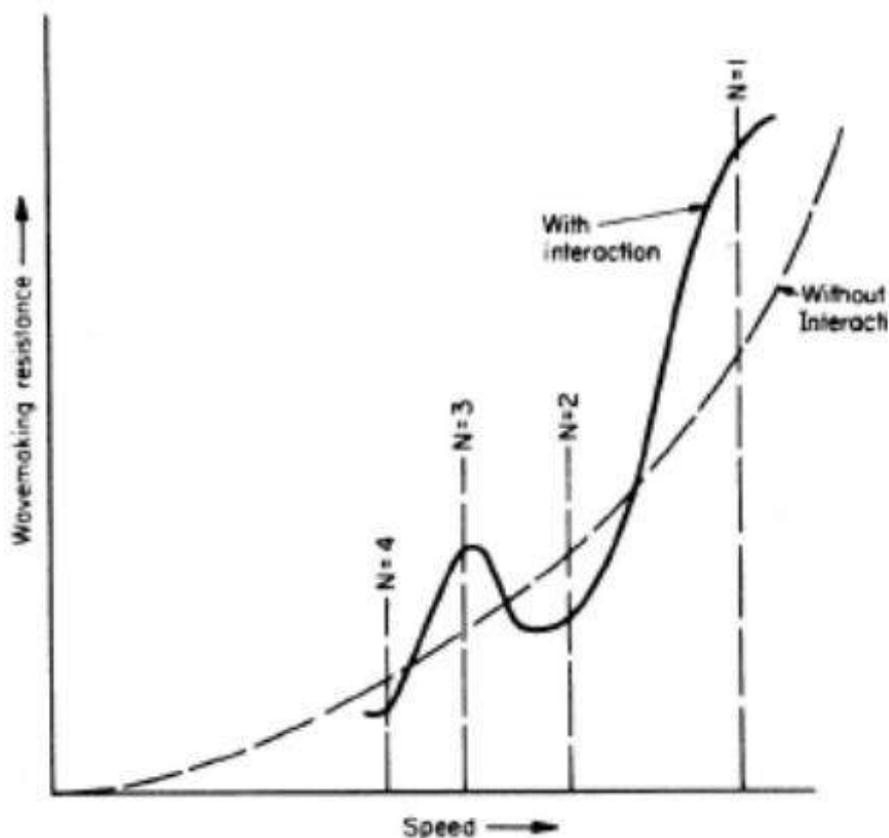


Ilustración 34 resistencia por formación de olas fuente: apuntes Prof. Joel Jurado UPC

Lo que se pretende conseguir es la resistencia mínima al avance por formación de olas, siendo en la gráfica anterior el N=2 ya que, a partir de este, la resistencia sube exponencialmente. El N=2 es el punto de mayor velocidad a menor resistencia.

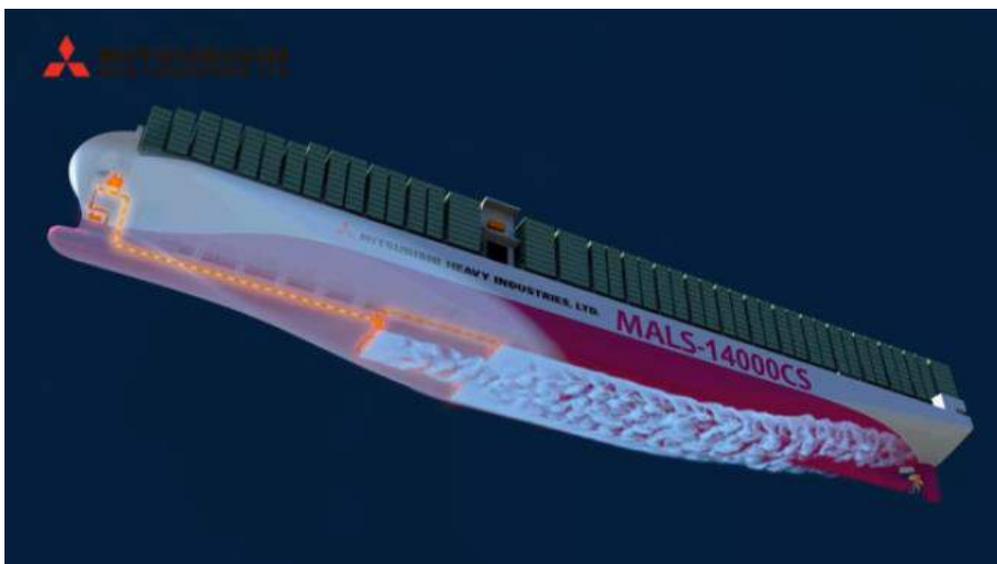
Existen infinidad de formas y diseños del bulbo de proa, pero todos ellos cumplen con la misma finalidad de reducir la altura entre los sistemas de olas, creando un

sistema desfasado. Además, se reduce el arrastre de flujo turbulento de la capa límite y la resistencia por formación de remolinos.

Un bulbo de proa, debe optimizarse para ciertos calados y números de Froude, siendo los de forma de “pera” los más efectivos. Según estudios como los de Ship Resistance and Flow de Lars Larsson and Hoyte C. Raven (2010)

Uno de los diseños innovadores a la hora de mitigar la resistencia por fricción entre el casco del buque y el mar son los sistemas MELS de Mitsubishi que se explican a continuación.

### Sistema de lubricación por aire



*Ilustración 35 sistema de lubricación por aire MELS, fuente Mitsubishi*

El sistema de lubricación por aire “MALS” de Mitsubishi, reduce la resistencia por fricción entre el casco del buque y el agua, mediante la introducción de micro burbujas de aire en el fondo del casco y así crear una fina capa de burbujas entre ellos. Este sistema, unido con un diseño avanzado del casco, es capaz de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en aproximadamente un 25% frente a los buques convencionales.

Debido a la disminución de la fricción, es reducir la potencia de propulsión para una misma velocidad de diseño, con la consiguiente disminución de consumo y emisiones.

A pesar de las evidentes mejoras entorno a la emisión de gases, existen también hándicaps dignos de mención para esta tecnología, que aparte de la instalación requerida para crear la capa uniforme alrededor del casco, como bombas, unidades de liberación de aire, tanques de almacenamiento y compresores de producción y distribución, se debe de tener en cuenta los posibles inconvenientes a la hora de crear flujos uniformes de agua que lleguen al propulsor como de posibles turbulencias que puedan llegar a generarse.

El último buque en montar este sistema MELS es el buque ro-ro “Finneco III” de la compañía filipina Finnlines que permitirá realizar escalas eco, gracias a los bancos de baterías de litio que sirven de complemento a sus motores de dos tiempos de bajas emisiones.

### Velocidad de diseño

La velocidad de diseño influye es de gran importancia en la eficiencia energética del buque, tal y como se ha visto anteriormente, existe una velocidad límite para cada diseño y forma del casco. Una vez alcanzada esta velocidad, la aportación de más potencia conllevará un aumento de consumo y emisiones. En comparación con la poca velocidad que pueda alcanzarse.

La **potencia propulsiva en adelante BHP** (potencia al freno), viene dada por la siguiente ecuación:

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_p} = \frac{R_t \cdot V}{\eta_p} \quad (12)$$

Donde EHP es la potencia efectiva que a su vez es equivalente a la  $R_t$  (resistencia al avance) X Velocidad, es decir, coeficientes de fricción relativos al diseño por la velocidad límite.

$$R_t = C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \quad (13)$$

$$EHP = C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (14)$$

$$\text{BHP} = \frac{R_t \cdot V}{\eta_p} = \frac{(C_t \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^2) \cdot V}{\eta_p} = \frac{(C_t \cdot \rho \cdot S) \cdot V}{2 \cdot \eta_p} = c \cdot V^3 \quad (15)$$

Obtenemos que la potencia propulsiva es proporcional a la C (constante relativa al diseño y que evalúa la potencia en función de la velocidad) por la velocidad al cubo.

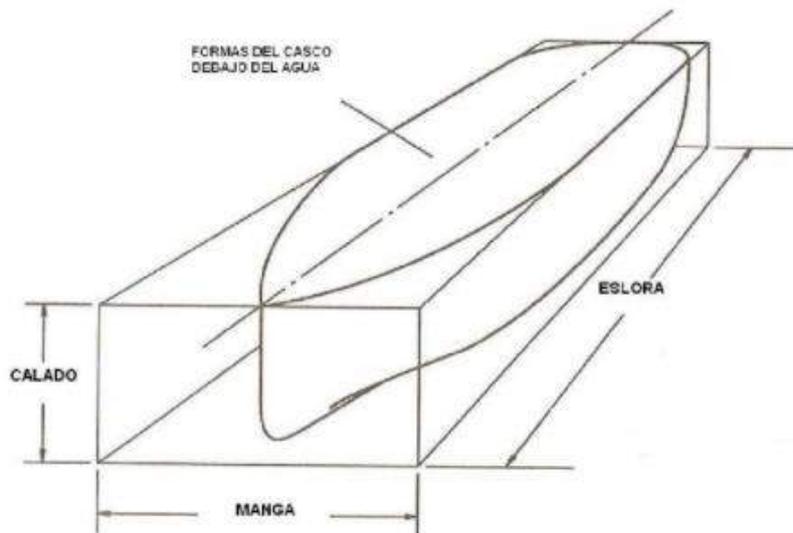
**Es decir, que reducir la velocidad de diseño implica reducir la potencia y con lo cual el consumo de combustible.**

Este concepto es de importancia a la hora de poder interferir de manera directa en el consumo de combustible. Tal y como se hablará en el apartado de medidas operacionales.

### Diseño del casco

En el diseño de un buque, las variables como calado, manga, eslora y capacidad de carga, juegan un papel fundamental en el rendimiento hidrodinámico y de resistencia al avance del proyecto. Históricamente, los buques se diseñaban para transportar la máxima carga con el menor coste posible, realizándose unos diseños con elevados coeficientes de bloque, altas resistencias al avance y elevados costes de combustibles. A día de hoy, se diseñan buques con bajos coeficientes de bloque que disminuyan la resistencia al avance y consumos.

**El coeficiente de bloque** (coeficiente de afinamiento), se define como la relación entre el volumen de la carena de un casco y el paralelepípedo que lo contiene, es decir, cuanto mayor o cercano a 1 (0,9), las formas del casco serán más llenas y próximas a la forma del paralelepípedo, mientras que valores cercanos a 0,5 corresponderán a formas más afinadas y con menores resistencias al avance. Es decir, Los valores del coeficiente de bloque varían según el tipo de embarcación



Il·lustració 36 coef. bloque, carena en paralelepípedo fuente: teoria del buque Joan Olivella

La ecuación de coeficiente de bloque es la siguientes:

$$C_b = \frac{\text{volumen desplazado o volumen de carena}}{\text{volumen del paralelepípedo}} = \frac{\nabla c}{L \cdot B \cdot T} \quad (16)$$

Donde cuyas variables son la eslora (L- Lenght), la manga ( B- Beam) y el calado ( T – Draught)

Como se ha podido ver en apartados anteriores, **un buque con coeficiente de bloque menor y con formas más alargadas y esbeltas, requiere de una menor potencia para una velocidad determinada.** Según estudios como el de Elizabeth Lindstad y Torstein Ingebrigtsen Bø. Transportation Research Part D.

## Dispositivos de ahorro de energía (ESD)

Los dispositivos ESD están diseñados principalmente, para otorgar en la popa del buque un flujo más favorable, minimizando las pérdidas rotacionales y mejorando la eficiencia del propulsor.

La hélice es el elemento propulsivo por excelencia, a pesar de ello, el rendimiento oscila entre el 50% y el 70%, siendo un área importante en la cual aumentar la eficiencia.

Las pérdidas se pueden dividir en tres categorías, **perdidas por fricción axiales y perdidas por rotación o rotacionales.**

Las pérdidas axiales, se crean debido a la aceleración del fluido en la superficie de la hélice, estas pérdidas no se pueden eliminar, puesto que esa aceleración del fluido es la base que produce el empuje.

Por otro lado, la propia rotación de la hélice genera el empuje que propulsa el buque, dicha rotación disipa energía rotacional al flujo obteniendo un flujo rotacional irrelevante a la generación de empuje, por lo que provoca pérdidas de energía.

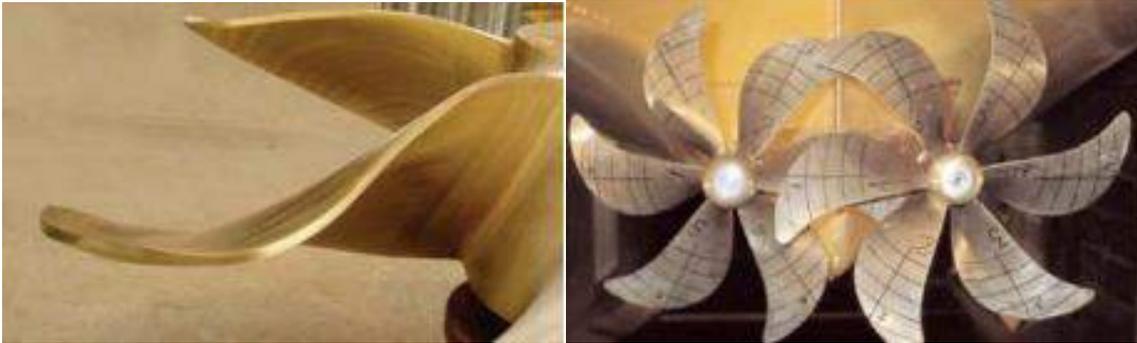
Las pérdidas por fricción son producidas debido a las rugosidades de la superficie de la propia pala. Y en diferencia con las pérdidas axiales, este si se puede combatir, puesto que son causadas principalmente por incrustaciones marinas y corrosión. **Todo tratamiento con antifouling que ayude a combatir las incrustaciones, además del pulido periódico de las hélices, conlleva una mejora de hasta el 6% en el consumo de combustible.**

Las pérdidas rotacionales es una característica intrínseca de cualquier tipo de Hélices, a pesar de ello, existen diseños que intentan mitigar los vórtices generados y así, aumentar la eficiencia. Se les conoce como hélices de alta eficiencia.

### Hélice Kappel

Este tipo de hélices disponen de una geometría de la pala larga y curvada, con la finalidad de reducir al máximo el vórtice que se produce en el extremo. además

de su pala alargada tiene la peculiaridad de ser algo curvada hacia la cara de succión de la misma.



*Ilustración 37 helice Keppel. Fuente G.Gourgoulidis Hydrodynamic Energy Efficiency*

### Hélices de extremo plano (CLT)

Estas hélices, están definidas por una placa final montada en la punta, en el lado de presión, además el paso de la hélice aumenta continuamente a medida que se avanza hacia la punta de la pala, los finales de las palas, eliminan la comunicación entre los dos lados de la hoja, dando como resultado una restricción significativa de la formación de vórtices. Este sistema arroja una eficiencia cercana al 6%. Reduciendo ruidos cavitación y pulsos de presión en la popa y con lo consiguiente mejora en la maniobra del buque, puesto que llega mayor flujo de presión al Timón.



*Ilustración 38 pala CLT, fuente G. Gougoulidis*

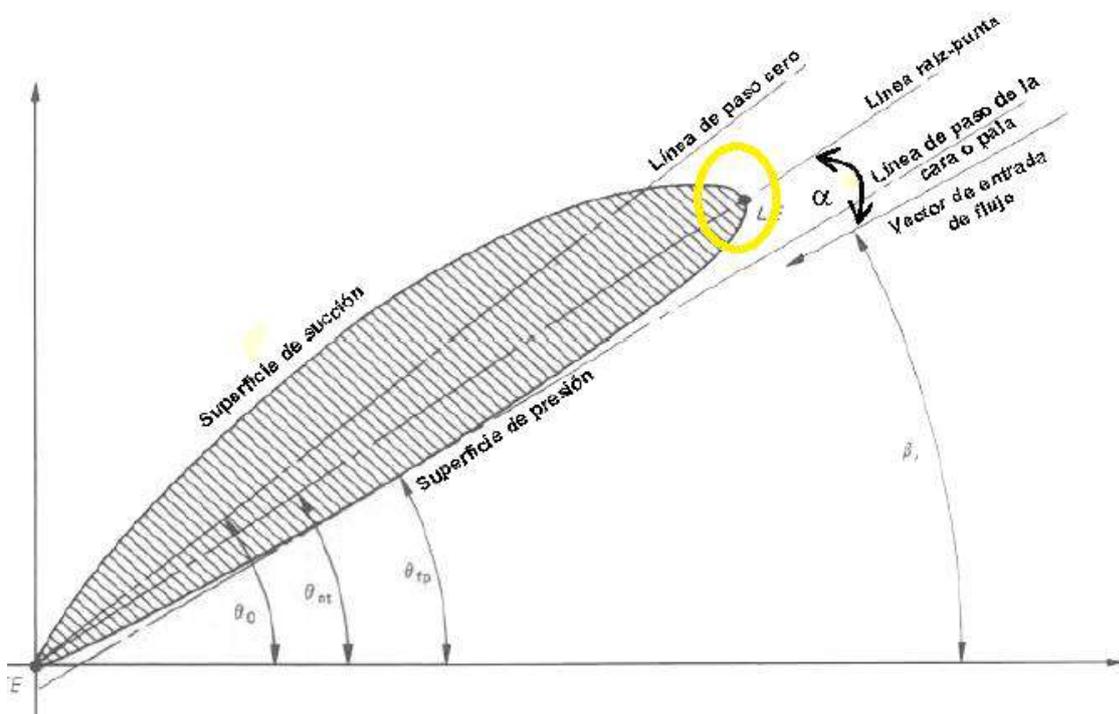
## PBCF (propeller boss cap fins)



Il·lustració 39 Helice con sistema PBCF fuente propia

El Sistema conocido como PBCF consiste en la colocación de un capacete (parte final cónica de una hélice) aleteado consiguiendo una recuperación de energía perdida debido al vórtices generados por la rotación de la hélice (perdidas rotacionales).

Toda hélice genera un empuje debido a la diferencia de presiones entre las caras de la pala (cara de succión y de presión)



Il·lustració 40 empuje de una hélice fuente geometría de la Hélice.pdf

Una vez llegadas las partículas del fluido al punto amarillo, considerándose como el punto final de la pala/hélice, se producen grandes velocidades y bajas

presiones, el líquido circundante llega a evaporarse formándose burbujas de vapor, al llegar a las zonas de presión más altas, vuelve a estado líquido, ese cambio de estado, provoca un cambio brusco de volumen, rellenándose con el resto del volumen de líquido la zona que ha quedado vacía, provocando choques de energía cinética muy elevados. Con ello se provocan vibraciones, ruidos y deterioro superficial. A este fenómeno se le conoce como cavitación.

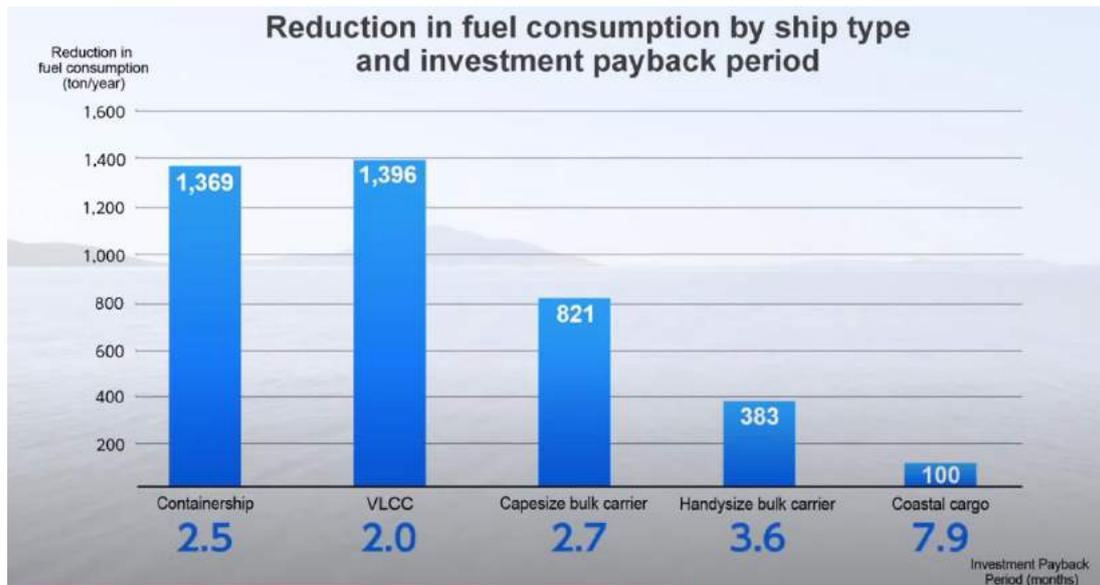
A pesar de ello, la cavitación en los vórtices del final de la pala y en el cono, es la menos dañina. Aunque provoca pérdidas de empuje y vibraciones.



Ilustración 41 eliminación de vórtices con PBCF fuente Wärtsilä

Este capacete, minimiza las pérdidas rotacionales creadas en el núcleo, reduciendo las vibraciones y mejorando el empuje de la hélice. Con ello, se consigue un ahorro de energía del 5% además de una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de 9.000.000 kg/año

Estos sistemas permiten la adaptación de cualquier tipo de buque y eslora, independientemente el punto de vida en el que se encuentre, requiere de un nulo mantenimiento además de un efecto económico permanente.



Il·lustració 42 amortització del sistema PBCF debido al ahorro de fuel fuente Wärtsilä

La elección de estos sistemas de aumento de eficiencia, obtienen en muchos casos una amortización del sistema de unos 2 años, gracias al ahorro de consumo de fuel.



Il·lustració 43 combinació de hèlices PCBF y bulbos en timón Wärtsilä

Además de las técnicas mencionadas anteriormente, existen combinaciones que proporcionan beneficios substanciales en el ahorro de combustible. Estos sistemas está en continuo desarrollo tal y como se puede observar en la imagen anterior, donde se adaptan diferentes aletas/bulbos sobre el timón y bocina, proporcionando una mejora hidrodinámica reduciendo los vórtices que se producen en el centro de la hélice y creando una corriente de estela axial homogénea. Estos dispositivos son capaces de otorgar unos ahorros de combustible cercanos al 3%.

## Tobera Mewis ( pre-Swirl duct PSD)



*Il·lustració 44 fuente Wärtsilä*

Este dispositivo consta de un conducto de ecualización de estela combinado con un Sistema de aletas de remolino integrado, todo ello colocado a proa de la hélice. El dispositivo reduce las pérdidas en la entrada de la hélice, al igualar el flujo de entrada a través del conducto, reduciendo las pérdidas de estela a través del uso de las aletas, reduciendo los vórtices del cubo al aumentar la carga en el radio interior de la hélice.

Este dispositivo es adecuado para buques con alto coeficiente de bloque y velocidades inferiores a 20 nudos.

Para los buques de velocidades más altas, existe otro tipo de tobera adaptada la cual se denomina Becker twisted Fins (BTF) la cual dispone de aletas pre-remolino dispuestas radialmente dentro y fuera de la tobera este diseño a diferencia del anterior, es más pequeño y compacto, ayudando así a los flujos que recibe la hélice. Este diseño es incorporado en grandes buques portacontenedores.



*Il·lustració 45 sistema BTF fuente Wärtsilä*

## Hélices contra rotantes (CRP)



*Il·lustració 46 fuente Wartsila*

Este elemento consiste en dos hélices colocadas en tándem en ejes coaxiales que giran en direcciones opuestas. La hélice posterior del par es de menor diámetro para adaptarse a la columna de contracción de la delantera. Con este sistema se mejora la eficiencia porque no es necesario dejara la energía rotacional en la estela de la hélice.

Este sistema fue montado por primera vez en el buque TOYOFUJI en 1988, aumentando hasta el doble de par que con una hélice convencional.

## Flaps



*Il·lustració 47 flap, fuente Georde Gourgoulidis*

Los llamados Flaps, son dispositivos ubicados generalmente en el espejo de popa de las embarcaciones y tienen la utilidad de aumentar la presión en la parte de popa del casco ralentizando el flujo y creando una elevación vertical. Como resultado se reduce la resistencia viscosa y por formación de olas. Con estos dispositivos, se aumenta la eficacia cuanto mayor es la velocidad de la embarcación.

Además de los Flaps, existen otros tipos de dispositivos y apéndices instalados a lo largo de la carena con la finalidad de reducir la resistencia por fricción.

En estudios como los de D.S.Cusanelli, L. Hundley, 1999 Stern Flap Powering Performance on a Spruance Class Destroyer: Ship Trials and Model Experiments concluyen que los Flaps ofrecen una reducción de la resistencia de propulsión en torno al 12%.

Además de los expuestos, existen muchos otros con gran eficacia e innovación como los Sistemas de lubricación por aire (ALS), Sistemas de propulsión asistidos por viento (WAPS) Estatores de remolino previo (PSS), estatores posteriores, aletas de empuje.

## Medidas operacionales

En relación con el plan de gestión de la eficiencia del buque, el SEEMP, y la obligatoriedad de la recopilación de datos relativos a la travesía por parte de la IMO mediante el CII anual, se abre una gran ventana en cuanto a la gestión operativa de los buques y plantas portuarias para incidir en los costes medioambientales por parte de la operación de estos.

### Indicador operacional de la eficiencia energética (EEOI)

El EEOI es un elemento regulatorio de la IMO a través del plan de gestión de la eficiencia energética de cada buque y que ayuda a los armadores en la evaluación del desempeño operativo del buque. Esta medida, se espera que funcione como una herramienta de monitoreo en el SEEMP. En comparación con el EEDI, el EEOI se define para un punto operativo del buque y representa la emisión real de CO<sub>2</sub> de la combustión de todos los tipos de combustibles a bordo de un buque durante cada viaje.

Este índice, se calcula, utilizando la siguiente formula:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \leftrightarrow CF_j}{M_{carga} \leftrightarrow D} \quad (17)$$

Donde,

- J es el tipo de combustible
- FC<sub>j</sub> es la masa de combustible consumido en el viaje
- CF<sub>j</sub> es un factor de conversión de masa de combustible a masa de CO<sub>2</sub> para el combustible
- M<sub>carga</sub> es carga transportada
- D es la distancia en millas náuticas correspondiente a la carga transportada.

La IMO mediante la resolución MECP.1/circ.684 adjunta un formato que puede servir como para la recopilación de datos, así como para el cálculo y desarrollo del EEOI a bordo.

Name and type of ship						
Voyage or day (i)	Fuel consumption at sea and in port in tonnes				Voyage or time period data	
	Fuel type ( )	Fuel type ( )	Fuel type ( )	...	Cargo (m) (tonnes or units)	Distance (D) (NM)
1						
2						
3						
4						

Ilustración 48 tabla monitoreo de datos según EEOI fuente IMO

Se estima que las medidas operacionales ofrecen la posibilidad de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> a corto plazo en hasta el 40%.

Para intentar conseguir ese aumento de eficiencia energética como medidas operacionales, la IMO se centra en las siguientes:

- Navegación meteorológica
- Justo a tiempo
- Asiento óptimo
- Gestión de energía
- Optimización de la velocidad

### Navegación meteorológica:

Todo buque, está obligado a tener un plan de derrota actualizado del viaje a realizar, según el código ISM de gestión de la seguridad (International Safety Management code) todo ello, nació de la necesidad de establecer prácticas de seguridad en las operaciones del buque y en materia de navegación, así como hacer frente a situaciones de emergencia que afecten a la seguridad. A día de hoy, se ha demostrado, que, teniendo un plan de derrota optimizado, además del aporte de seguridad operacional y marítima, se obtienen ahorros energéticos relativos a la optimización del viaje, puesto que todo plan de derrota contendrá de entre otras, las siguientes:

- Velocidad operativa del buque, concepto importantísimo a la hora de realizar la derrota y que se mencionara más adelante.

- Condiciones climáticas, teniendo especial atención al mar, al oleaje, al viento y a las depresiones o tormentas.
- Posiciones de partida y llegada, puntos de recalada, rumbos, waypoints y reports.
- Tráfico marítimo
- Condiciones del flete (cláusulas del contrato de fletamiento)

Al fin y al cabo, cualquier variable que interactúe con el buque y la navegación.

A continuación, en el gráfico siguiente se muestra, el aporte de energía requerido para el avance del buque a una determinada velocidad fija.

El mar, de color morado, representa el aporte de energía requerido por unidad de tiempo para hacer frente a una condición climática adversa. Siendo junto con el viento, de azul celeste, los que requieren de un mayor aporte de energía y consumo para el avance del buque.

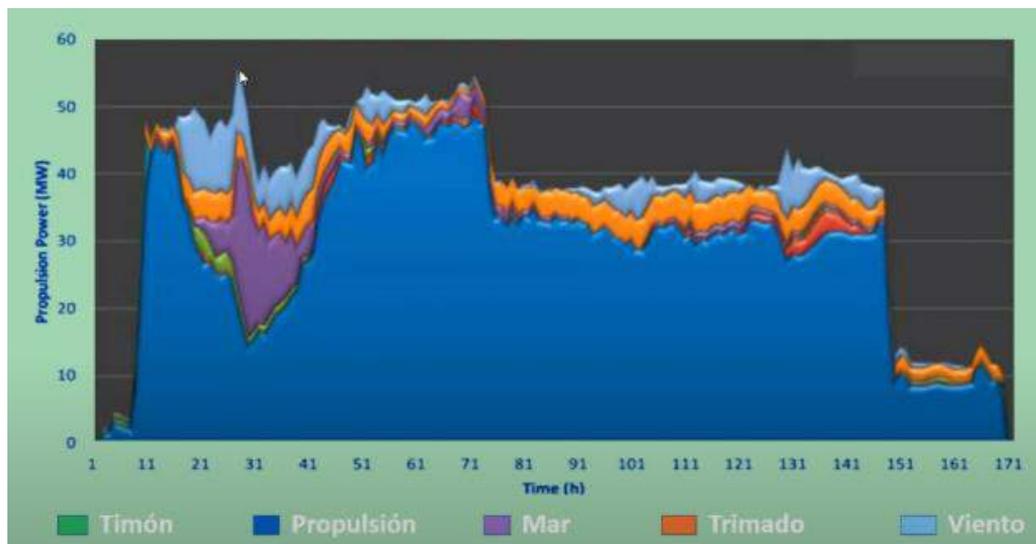


Ilustración 49 gráfico resistencia al avance en condiciones clim. adversas. fuente Univ. Pol. argentina

Por otro lado, se muestra como hace falta un aumento significativo de la potencia para mantener la velocidad y la incidencia del timado del buque (color naranja).

## Justo a tiempo (just in time)

Siguiendo las directrices de reducción de emisiones de la IMO, y por parte del proyecto GLOMEEP mencionado anteriormente, se ha creado una **guía acerca de la llegada a tiempo en los puertos**, publicada en 2020 por los miembros de la GIA “Global Industry Alliance to Support Low Carbon Shipping”.

En ella, se analiza, el proceso de escala en puerto por parte de los buques. Hoy en día, generalmente este proceso no está optimizado. Los barcos pueden **apresurarse** al próximo puerto, y encontrar allí que el amarre no está todavía disponible. Esto da como resultado tener que **esperar** fuera del puerto fondeado durante horas o incluso días. Definiéndose esta práctica como “apresurarse y esperar” ocasionando una espera ineficiente, y el consumo de combustible correspondiente.

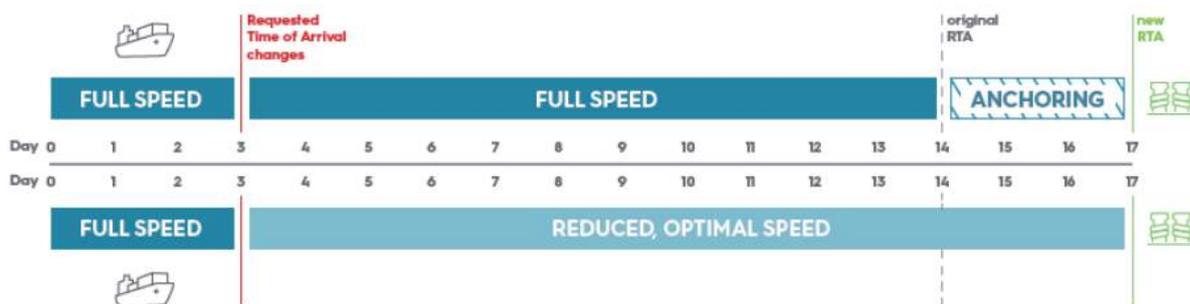


Ilustración 50 ejemplo de la operación "apresurarse y esperar" fuente GLOMEEP

Como se observa en el primer ejemplo, el buque mantiene la misma velocidad hasta la llegada al puerto el día 14, teniendo que esperar fondeado para la operación de descarga hasta el día 17, en cambio en el segundo ejemplo, se puede ver que si mantiene una **velocidad óptima más baja** y una gestión del ETD( estimate time of departure) adecuada con autoridad portuaria, se “elimina el tiempo de espera y emisiones, con el análisis de datos realizado, se estima que los barcos, en promedio y dependiendo el tipo de buque pasan hasta el 9% de su tiempo esperando en un fondeadero.

Estudios como los realizados por la TNO (organización para la investigación científica) en el puerto de Rotterdam, muestran que si existe una comunicación efectiva y temprana (mayor a 12 horas) de la ETD y consiguiente ETA y del

ataque asignado, se podría reducir hasta un 4% las emisiones de CO<sub>2</sub>, siendo un total de 134.000.000 kg para ese mismo año.

### Asiento y calado óptimo

El asiento óptimo de un buque, se refiere al asiento por debajo del cual se obtiene la potencia propulsora requerida mínima para la velocidad operativa específica y el calado del buque. Entendiéndose como asiento a la diferencia de calados entre la proa y popa del buque.

Se entiende por ello, que toda forma del casco de un buque se diseña para dos condiciones de calado, el calado en condición de lastre y el calado en carga. En la fase operativa de un buque, una diferencia de calados/asiento, provoca un aumento de resistencia al avance, provocando un incremento notable en el consumo de combustible.

Por ello, el trimado del buque, entendiéndose como la acción del asiento, es una función del calado y la velocidad, ya que, para cualquier calado y velocidad del buque, existe una condición de asiento óptimo que ofrece una menor resistencia al avance.

Todo buque debe hacerse a la mar con unas condiciones aceptables de estabilidad, lo que se conoce con una buena altura metacéntrica, para ello, al igual q en navegación, se utilizan los tanques de lastres que otorgan al buque un mejor asiento y estabilidad.

Generalmente, se consigue un ahorro de combustible entre el 2 y el 4% relativos a la optimización del asiento variando entre el tipo de buque y calado.

El estudio realizado por Lloyd's Register en 2011 sobre el calado óptimo realizado con métodos computacionales CFD, muestra como cada tipo de buque, tiene un asiento/trimado óptimo en función del calado y la velocidad.

## Gestión de la energía

La energía eléctrica de un buque, proviene generalmente de motores auxiliares diésel acoplados a alternadores que transforman la energía, con el gasto de combustible y emisiones que ello conlleva. En navegación es imposible prescindir de esta fuente de energía, pero si existen sistemas para aumentar la eficiencia de los sistemas generadores de energía eléctrica. En este punto, el buque requerirá de un mayor o menor consumo amperios hora, en función de la demanda de consumo de los equipos y tripulantes. Pudiéndose minimizar por parte de los tripulantes con acciones como:

- Bajar el consumo de las plantas de clima, x grados, a lo largo de una jornada o prescindir de ellas cuando sea necesario.
- Cambio de la iluminación con bombillas de bajo consumo.
- Utilización de la maquinaria únicamente cuando sea necesario
- Conexión a tierra cuando el buque este atracado en la terminal (cold ironing)

Al fin y al cabo, cualquier procedimiento operacional que conlleve una gestión más eficiente de la energía.

El cold ironing, consiste en la conexión del buque a tierra mediante cables eléctricos, aunque el concepto proviene de cuando los barcos navegaban con motores y calderas de carbón, puesto que al amarrar el barco ya no era necesario continuar alimentando el fuego y los motores de hierro se enfriaban por completo.

Para buques de menor eslora y consumo, es habitual disponer en las terminales y puertos, torres de conexión, pero para buques de mayor eslora y consumos por encima de 100KW esta simple medida se vuelve más complicada, puesto que se requiere de una línea estable a sobrecargas con tensiones medias y numerosos transformadores para cada tipo de buques.

Estudios como el de “limiting emissions facilities” de Giulia arduino, la conexión a tierra podría ahorrar hasta un 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub>. además, se muestra como con la parada de un crucero durante 10 horas, se reducen las emisiones desde 72.000 a 50.000 kg de CO<sub>2</sub>.

Además, de la reducción de emisiones, se mejoran la calidad del aire y la contaminación acústica.

Wärtsilä ha optado por soluciones que pasan por incorporar pequeñas plantas energéticas portátiles en contenedores de 40 y 20 pies.



Ilustración 51 fuente Wärtsilä

Empresas como YARA ofrecen alternativas de colocación de tomas estáticas en puerto.



Ilustración 52 fuente YARA Company

## Optimización de la velocidad

Como se ha podido comprobar en apartados anteriores, la velocidad es uno de los pilares de diseño de los buques, puesto que se diseñan para operar a unas velocidades máximas y así poder realizar más viajes al año obteniendo un mayor beneficio, aun consumiendo más combustible.

Existe la práctica conocida como Slow Steaming que consiste en operar los buques a una velocidad inferior a la de su diseño y así reducir el consumo de combustible y por ende la reducción de emisiones contaminantes ya que la potencia requerida y la velocidad están estrechamente relacionadas. (ecuación 13).

La reducción de la velocidad implica menor potencia desarrollada, sin embargo, los motores están diseñados para trabajar a una carga de diseño entorno al 80-90% de su carga máxima. A X carga X potencia y X velocidad desarrollada por el buque. Por ello, se debe de tener en cuenta la autonomía del buque y el consumo específico del motor cuando trabaja a unas cargas que no son las de diseño.

Wärtsilä ha diseñado una nueva generación de motores RTA de dos tiempos que son capaces de operar de manera fiable en rangos de carga del 10% al 100%.

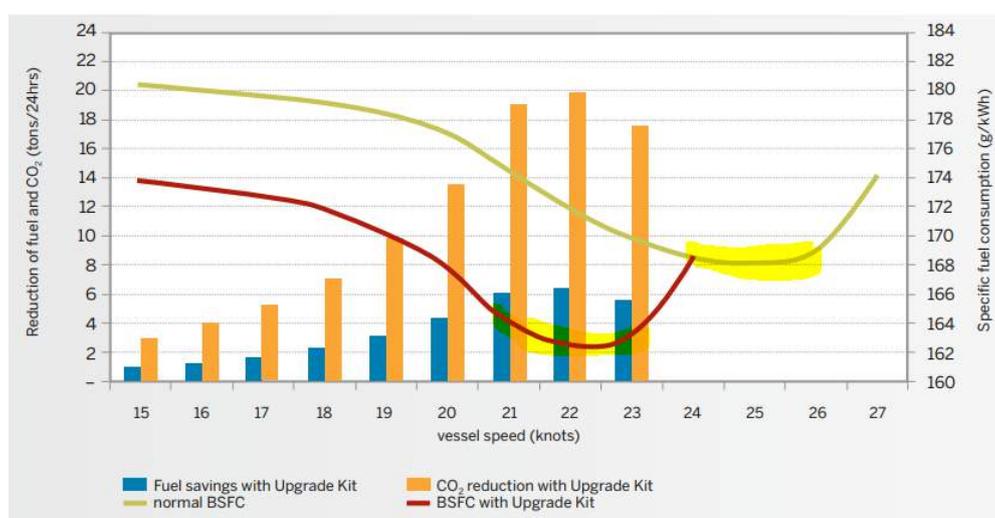


Ilustración 53 fuente Wärtsilä

En el gráfico, se observa la típica curva de consumo específico con y sin el kit de actualización de carga, siendo el rango de 80-90% de carga el mínimo consumo específico a la mayor potencia desarrollada (marcado en amarillo).

Esta nueva generación de motores, permite reducir la velocidad sin sacrificar el consumo específico a su potencia de diseño. Permitiendo que no se penalice la autonomía para las mismas millas navegadas.

Cabe destacar que la aplicación de la reducción de la velocidad y la búsqueda de la velocidad óptima en cuanto al ahorro energético, es una medida totalmente voluntaria y que dependerá directamente del contrato de fletamiento.

Se considera que si se redujera la velocidad de todos los buques de la flota en un 10% rebajaría el consumo de combustible en hasta el 25% y con ello las emisiones.

Finalmente, hasta la fecha, la IMO no ha implementado ninguna medida obligatoria en cuanto a la reducción de velocidad en los buques.

## Capítulo 5 Combustibles Alternativos

La urgencia climática para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial y junto con las exigencias establecidas por la organización marítima internacional (IMO) para la descarbonización del transporte marítimo, ha propiciado en los últimos años, una carrera tecnológica en la busca de soluciones medioambientales y operativas para reducir las emisiones en el sector naval.

El objetivo a cumplir es claro, reducir las emisiones de GEI un 90% para 2050, y que para 2025 se reduzcan un 40% respecto a niveles de 2008. Y para ello, deben de existir soluciones tecnológicas de buques de cero emisiones contaminantes.

Siguiendo la línea marcada por la IMO en cuanto a la emisión de Óxido de Azufre  $SO_x$  fijadas en un máximo de 0.5% masa/masa para 2020 y las emisiones del Óxido de Nitrógeno ( $NO_x$ ), el sector fue implementando diferentes medidas a corto plazo como la utilización de combustibles con bajo contenido de azufre, la instalación de Scrubber, sistemas de recirculación de gases (EGR) o sistemas de catalización de gases (SCR). Mientras la innovación, la accesibilidad, disponibilidad y madurez de los combustibles alternativos continúan aumentando.

Cada vez más empresas navieras se suman al afán de conseguir minimizar las emisiones utilizando combustibles alternativos, como Balearia con su “joya tecnológica” el Eleanor Roosevelt al incorporar Motores duales de GNL. Además, tanto Gondan con la construcción de 10 ferris eléctricos utilizando bancos de baterías y motores DC como el primer barco propulsado a base de amoníaco, el Viking Energy de la naviera Eidesvik, previsto para 2023.

La elección de construir nuevos buques con combustibles alternativos, supone una decisión difícil de afrontar, ya que hasta la fecha no importaban las emisiones de gases, simplemente el rendimiento del buque durante su vida útil (25-30 años). Además, las innovaciones actuales pueden no ser validas en un futuro cercano. Tal y como se muestran en los gráficos siguientes en la demanda de buques de nueva construcción proporcionado por DNV.

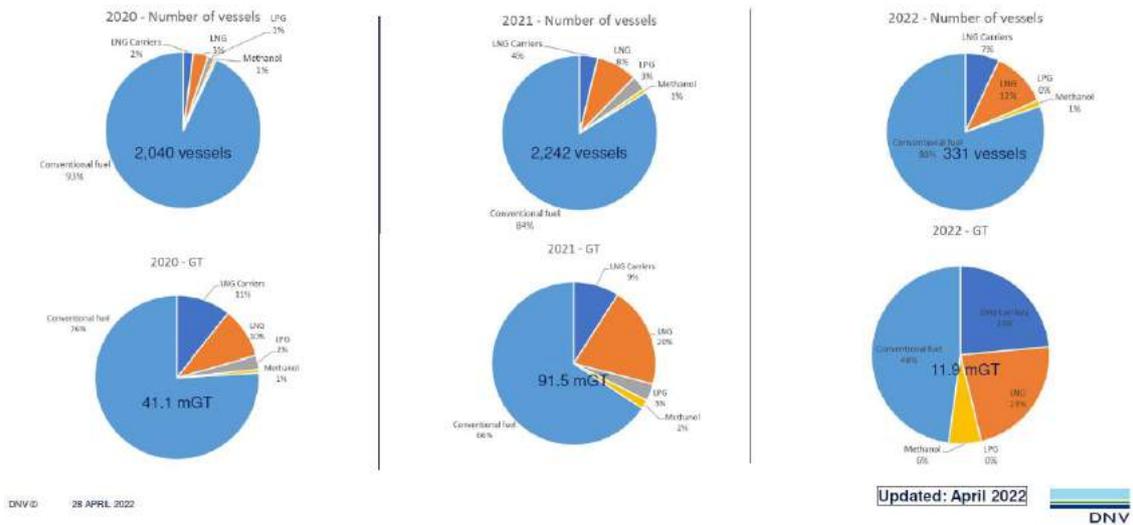


Ilustración 54 demanda de buques con combustibles alternativos. fuente DNV  
Se observa cómo va en detrimento la utilización de MGO en la construcción de buques y el aumento significativo en la utilización de GNL(LNG) además, en las gráficas inferiores se muestran la utilización de combustibles en cuando a volumen del buque, haciendo referencia a los VLCC donde la utilización de GNL y Metanol. Además, se observa una disminución significativa de la construcción de nuevos buques con combustibles alternativos, respecto a los años 2021 y 2020.

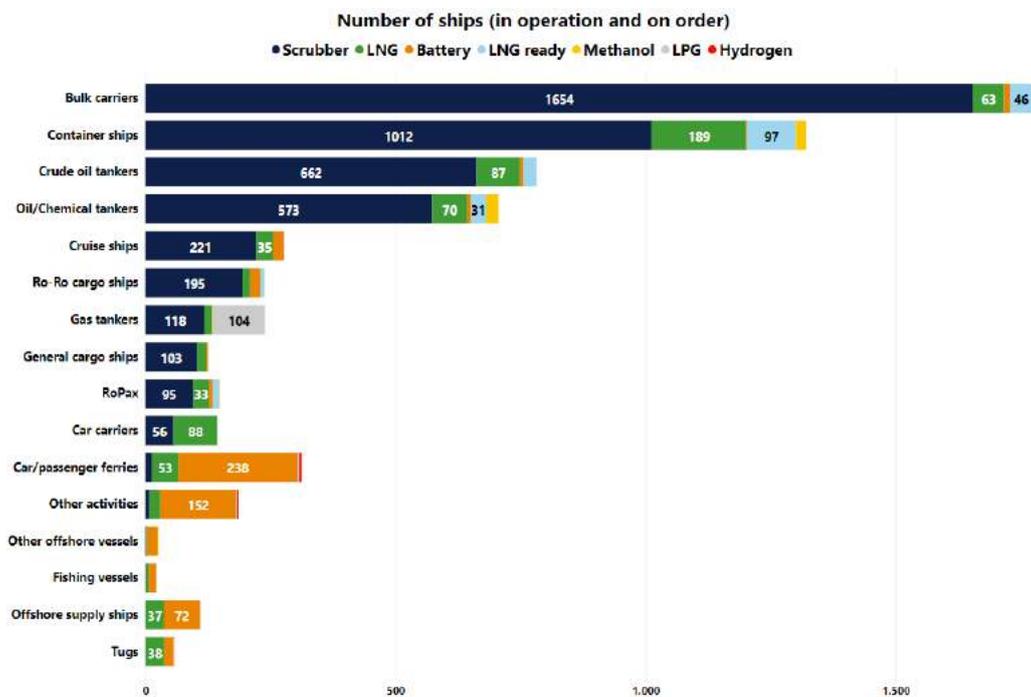


Ilustración 55 actual uso de combustibles y tecnología en el sector. fuente DNV

La madurez de la tecnología junto con la **accesibilidad y disponibilidad** suponen claves en el cambio hacia los combustibles alternativos, pero también es vital, las **políticas en cuanto a regulaciones** como el acceso de las navieras y armadores al **capital monetario**.

A continuación, se expondrán los combustibles alternativos con más posibilidades a fecha del 2022 y los posibles en 2035

	Availability	Infrastructure & Storage	Maturity of technology	Energy density	Price	Green credentials
VLSFO/MGO	Green	Green	Green	Green	Green	Red
LNG	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow
LPG	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Methanol	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow
Bio-/e-fuels	Red	Green	Yellow	Green	Red	Light Green
Hydrogen	Red	Red	Red	Red	Red	Light Green
Ammonia	Red	Yellow	Red	Yellow	Yellow	Light Green

The picture as we see it in 2022

	Availability	Infrastructure & Storage	Maturity of technology	Energy density	Price	Green credentials
VLSFO/MGO	Green	Green	Green	Green	Green	Red
LNG	Green	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow
LPG	Green	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow
Methanol	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Yellow
Bio-/e-fuels	Yellow	Green	Green	Green	Red	Light Green
Hydrogen	Yellow	Red	Yellow	Red	Red	Light Green
Ammonia	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Yellow	Light Green

**A possible** picture in 2035

Ilustración 56 fuente DNV

Cabe destacar, que los combustibles de GNL y GPL disponen de una tecnología más avanzada respecto al Amoniaco y el hidrogeno y suponen una solución viable a corto plazo, pero, no elimina la huella del carbono debido a su composición atómica (CH<sub>4</sub> y C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>). Siendo ambos, denominados combustibles de transición.

## Gas Natural Licuado (GNL)

Debido a las grandes ventajas que aporta el gas natural en relación a las emisiones de gases contaminantes por unidad de energía producida. En los últimos años se ha ido adaptando cada vez más a los buques.



Ilustración 57 composición GNL fuente propia

El GNL es una mezcla de hidrocarburos, principalmente por CH<sub>4</sub>, en torno al 90%, el GNL es incoloro, inodoro, no tóxico y no corrosivo. Se transporta y almacena en estado líquido, a temperaturas inferiores a -162 °C, su temperatura de ebullición a presión atmosférica.

A la hora del transporte este gas es transportado de manera líquida debido a que el volumen en estado líquido es mucho menor al de estado gaseoso, unas 600 veces.

En cuanto a la seguridad, el gas natural no se inflama por sí mismo y es necesario que este mezclado con el aire y en estado gaseoso. Su inflamabilidad está limitada en concentraciones de aire, por debajo del 4% y por arriba de aproximadamente el 14%, no se encenderá. Además, su temperatura de autoignición de 600 °C reducen la posibilidad de un incendio o explosión accidental.

A pesar de sus características, se deben de seguir una serie de procedimientos adecuados en cuanto al transporte y manipulación para que este combustible no suponga ningún riesgo. Ya que, debido a la inyección de Nitrógeno para controlar la atmósfera en el interior de los tanques, existen fugas inevitables de Metano a la atmósfera, llamadas *methane slip*.

A la hora del transporte, se utilizan grandes buques de GNL en los cuales se almacena el combustible en estado líquido, alrededor de la temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$ . durante la navegación, las moléculas de GNL chocan entre si provocando un aumento de temperatura, haciendo que parte del gas se evapore y tenga que ser re licuado.

En cuanto a la operativa del buque, es necesario disponer de un tanque de almacenamiento del gas, además de toda la infraestructura de bombas necesarias para reabastecer la propulsión del buque.

Por otro lado, se debe de controlar la atmosfera que se produce dentro de los tanques, y a la hora de la carga o bunkering para ello se diluye nitrógeno en su interior disminuyendo la proporción de oxígeno que contiene el aire hasta máximo un 2%. Ya que en atmosferas superiores a un 13% de oxígeno se corre el riesgo de explosión de estos.

El GNL como combustible aporta una reducción del 80% de emisiones  $\text{NO}_x$ , se reducen un 25% las emisiones de  $\text{CO}_2$  y una inexistente generación de gases  $\text{SO}_x$ , ya que su composición no contiene azufres.

Uno de los puntos débiles de la propulsión por GNL es la contaminación que se produce por parte del metano liberado a la atmosfera, generalmente en la operativa de carga y por las fugas inevitables de los sellos de los pistones. Puesto que el metano, se ha comprobado que es uno de los gases que favorecen al efecto invernadero y es unas 20 veces más contaminantes que el  $\text{CO}_2$ .

## Motores de combustión de GNL

En la actualidad existen motores de propulsados por GNL: los motores dual fuel y los motores de mezcla pobre.

### Motores dual fuel

Los motores dual fuel, están diseñados para trabajar con dos tipos de combustible, el GNL en estado gaseoso, el MDO y HFO en estado líquido.

Cuando el motor está trabajando con diésel marino, su funcionamiento es idéntico a cualquier motor diésel marino alternativo, que inyecta el combustible en la cámara de combustión mediante el sistema de inyección. Mientras que cuando trabaja quemando GNL el aire pasa a través de la admisión y se inyecta

combustible a baja presión, formando una mezcla de aire y gas natural, al entrar en la cámara de combustión se inyecta una pequeña parte de diésel marino como llama para completar la combustión.



Ilustración 58 motor dual diésel GNL fuente Wärtsilä

Este tipo de motores arrojan una gran versatilidad ya que, según el combustible quemado en la combustión, cumplirá una regulación de nivel II, en el caso de diésel marino, o nivel III, en el caso de GNL.

### Motores de mezcla pobre (baja presión)

Los motores de mezcla pobre trabajan según el ciclo Otto, y en diferencia con los motores convencionales, estos motores trabajan con una mezcla pobre de combustible, es decir, no estequiométrica. La combustión se produce en el interior de la cámara de combustión con una mayor proporción de comburente (aire) y una pequeña parte de combustible (gas), esta mezcla rica en comburente, proporciona una menor temperatura en la cámara de combustión reduciendo los  $\text{NO}_x$  y una disminución de in quemados derivados de una posible falta de comburente.

Estos motores generalmente se ayudan de una bujía para producir la combustión en el interior de la cámara de combustión, mientras que hay gamas en las cuales se inyecta una pequeña cantidad de gasoil marino para ayudar en la combustión. Debido al funcionamiento de estos tipos de motores, y al no ser una mezcla estequiométrica, inevitablemente se producen pequeñas pérdidas de Metanol por los segmentos de los pistones, con la consiguiente emisión a la atmósfera.

Finalmente, cabe destacar que el PCG del metanol como elemento mayoritario del GNL es unas 20 veces mayor que el  $\text{CO}_2$  lo cual indica que a pesar de ser

una opción tecnológica madura, se muestran indicios de ser una tecnología de transición a los nuevos biocombustibles al poder beneficiarse de la infraestructura instalada.

## Gas Licuado del Petróleo (GLP)

El GLP es una mezcla entre propano y butano que se obtiene de yacimientos del petróleo con fórmula atómica de  $C_3H_8$ , siendo un gas a temperatura ambiente, y teniendo su punto de ebullición a unos  $-42^{\circ}C$ , si es sometido a presiones superiores a 8.4bares a  $20^{\circ}C$  se licua, pudiendo ser transportado con seguridad.

El poder calorífico medio de la mezcla es de 46,8 MJ/kg siendo ligeramente superior al del GNL 44,2MJ/kg.

La obtención de energía con la quema de este combustible, puede utilizarse con los mismos principios de funcionamiento y seguridad utilizados con el GNL. Tanto en motores de ciclo otto de 4 tiempos, turbinas de gas y motores de 2 tiempos diésel. proporcionando una reducción de las emisiones de  $SO_x$  de entorno al 95% y un 16% de los  $NO_x$ . Cabe destacar que la utilización del GLP para la reducción de los  $NO_x$ , tanto Wärtsilä como MAN Marine hacen hincapié en la utilización de sistemas SCR y EGR para disminuir los Óxidos de Nitrógeno.

En comparación con el GNL, el propano emite una mayor cantidad de  $CO_2$  aun así, reduce en torno al 20% las emisiones de GEI en comparación con el diésel marino HFO MGO.

Finalmente, este combustible, arroja sencillez a la hora de la instalación a bordo de los equipos a pesar de disponer de una densidad mayor que el aire, y un punto de inflamación más bajo que el GNL, siendo un problema las posibles fugas que puedan darse en espacios confinados como sala de máquinas.

## Combustibles de cero emisiones de carbono

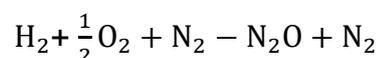
Los combustibles cero emisiones de carbono son tanto los biocombustibles a base de aceites vegetales como el Amoniac, el Hidrogeno y pilas de combustible. Y se espera que para mediados de 2035 sea una tecnología viable para la propulsión de los buques debido a que son capaces de eliminar las emisiones de GEI tanto la de gases contaminantes.

Las soluciones existentes, en cuanto al amoniaco e hidrogeno, pasan por la transformación de los sistemas existentes de propulsión de combustibles de bajo contenido de carbono, adaptando las plantas de potencia para el consumo de estos combustibles de cero emisiones de carbono.

### Amoniac

Generalmente la producción de amoniaco se realizaba para el uso como fertilizante, pero debido a la reglamentación del consumo del GNL Y GLP en los buques, se abre una opción de propulsión con amoniaco NH<sub>3</sub> gracias a su inexistente molécula de carbono en su composición, como a sus características. Siendo un gas a presión y temperatura atmosférica, en cuanto al estado líquido, puede obtenerse, a presión atmosférica y a -33°C. con lo cual, hace que su almacenaje sea más sencillo en comparación al hidrogeno, además de ocupar un menor espacio debido a su densidad energética superior al H<sub>2</sub>. por el contrario, y en comparación con el fuel oil, para mantener la misma autonomía, será necesario disponer de tanques de almacén de en torno a 4/5 veces superior.

En cuanto a su producción, existen diferentes maneras de obtención del amoniaco como a través del carbón, energía nuclear pirolisis de metano y por último y más extendido mediante un proceso de transformación del GNL, H<sub>2</sub>O y el aire. Según la ecuación química siguiente:



Y como segunda fase,



En cuanto a la producción, para que pueda ser un combustible viable, utilizado para la propulsión, es necesario que haya un gran aumento de producción.

En cuanto a la utilización del amoniaco para la propulsión, se emplea tanto en pilas de combustible PEM como en la combustión en motores marinos MAN y turbinas de vapor.

### Motores de combustión de NH<sub>3</sub>

MAN Energy solution, es uno de los productores de motores en la carrera de producción de motores de combustión de amoniaco, este proyecto requiere una reglamentación específica, a día de hoy inexistente y se espera que para 2024 haya una gama de motores disponibles.

Energy storage type/chemical structure	Energy content, LHV [MJ/kg]	Energy density [MJ/L]	Fuel tank size relative to MGO	Supply pressure [bar]	Emission reduction compared to HFO Tier II [%]			
					SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sub>2</sub>	PM
Ammonia (NH <sub>3</sub> ) (liquid, -33°C)	18.6	12.7(-33°C) 10.6 (45°C)	2.8 (-33°C) <sup>1</sup> 3.4 (45°C) <sup>1</sup>	80	100	Compliant with regulation	~90	~90
Methanol (CH <sub>3</sub> OH) (65°C)	19.9	14.9	2.4	10	90-97	30-50	11	90
LPG (liquid, -42°C)	46.0	26.7	1.3 <sup>2</sup>	50	90-100	10-15	13-18	90
LNG (liquid, -162°C)	50.0	21.2	1.7 <sup>2</sup>	300	90-99	20-30	24	90
LEG (liquid, -89°C)	47.5	25.8	1.4 <sup>2</sup>	380	90-97	30-50	15	90
MGO	42.7	35.7	1.0	7-8				
Hydrogen (H <sub>2</sub> ) (liquid, -253°C)	120	8.5	4.2					

<sup>1</sup> The relative fuel tank size for ammonia has been provided for both cooled (-33°C) and pressurised tanks (45°C)  
<sup>2</sup> Assuming fully refrigerated media

Ilustración 59 fuente MAN

Estos motores duales de ciclo diésel, series dos tiempos ME, funcionan con pequeñas cantidades de fuel que ayudan en la detonación del NH<sub>3</sub> que es inyectado en la cámara de combustión. ya que el amoniaco tiene un punto de inflamación muy elevado.

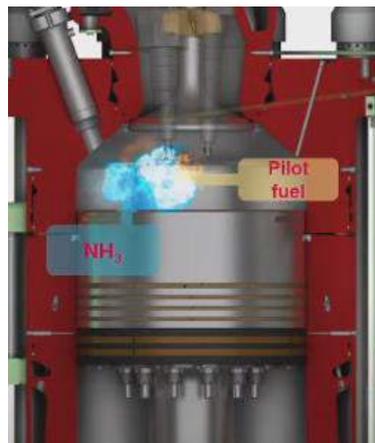


Ilustración 60 Imagen CC motor dual fuente MAN

Una vez inyectado esa cantidad de fuel piloto detona generando una llama en la que se inyecta el amoniaco en fase liquida para ser combustionado.

Para esta aplicación, es necesario la instalación de sistemas auxiliares para combatir los gases NO<sub>x</sub> con un catalizador SCR. Además, existe otro tipo de contaminación de gases provenientes de la combustión como el H<sub>2</sub>O ya que este tiene un PCG de 300 respecto al CO<sub>2</sub>. Para atajar este problema, será la utilización de sistemas de alta eficiencia de combustión.

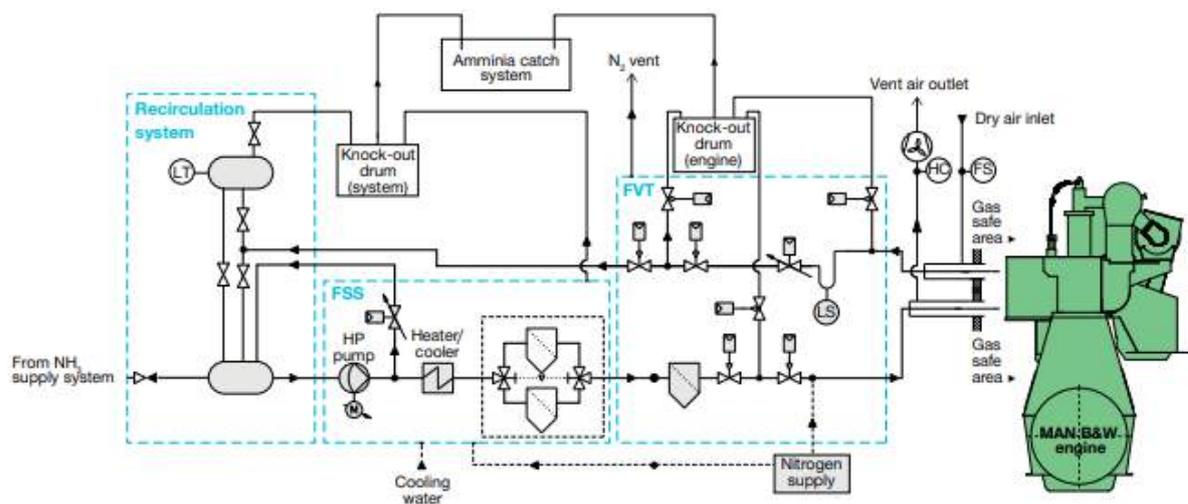


Ilustración 61 fuente MAN

Para los sistemas adicionales SCR, la utilización de amoniaco como agente reductor o urea, no elimina las partículas de H<sub>2</sub>O como se ve en las reacciones químicas en el apartado SCR (página 62).

En cuanto a las pilas combustibles de NH<sub>3</sub> se examinarán más en profundidad en el apartado siguiente.

**Una de las líneas de trabajo actual**, es la de utilizar la disociación del amoniaco, (almacenado en los tanques de combustible del buque) e hidrogeno, y poder utilizar el hidrogeno como combustible en la planta propulsora. Es decir, beneficiarte de las características de almacenamiento del amoniaco respecto al hidrogeno y utilizar este hidrogeno resultante de la disociación, para propulsar el buque. (imagen siguiente) Este concepto, sé podría extrapolar también con la propulsión de metano y GNL, con la diferencia de que este último, tendría la huella de carbono en la disociación.

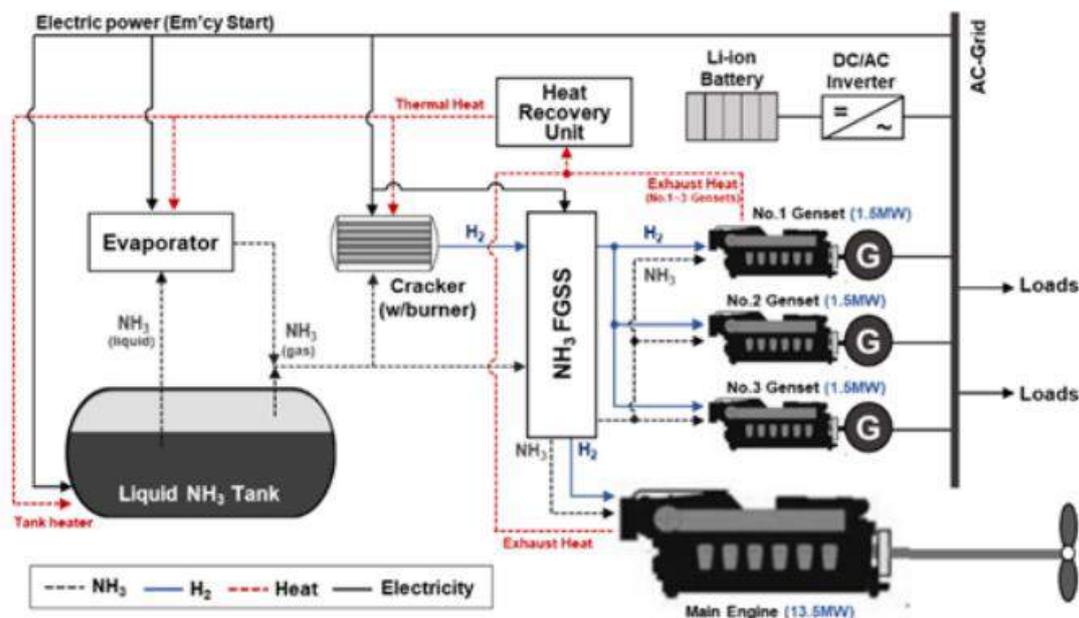


Ilustración 62 Fuente marine Science and engineering

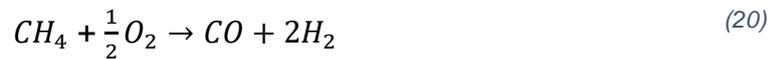
## Hidrogeno

El Hidrogeno( $H_2$ ) es un gas incoloro, inodoro y **no toxico en diferencia con el  $NH_3$ (amoniaco)** y se puede almacenar en el buque como liquido o gas.

Su punto de ebullición es de  $-253^{\circ}C$  a 1 bar siendo muy bajo en comparación con el GNL y GLP. debido a su **baja densidad volumétrica** de  $71 \text{ kg/m}^3$ , a la hora del almacenaje en estado líquido lo hace ser un hándicap debido a que ocupa en torno a 5 veces más que el HFO para la misma energía almacenada, siendo mucho peor en forma de gas, que aumenta hasta en 15 veces más que el HFO y rondando los 700 bar de presión.

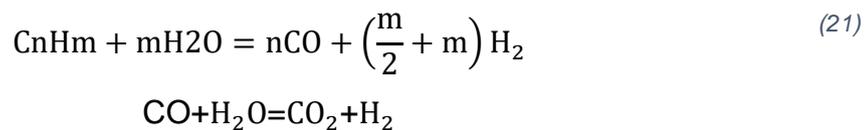
La Producción de Hidrogeno, se utiliza en amplias aplicaciones en el sector del transporte. Siendo la electrolisis del GNL la forma más habitual de obtenerse respecto a la producción a partir de fuentes renovables.

Mediante el GNL el Hidrogeno obtenido se consigue mediante el proceso de oxidación parcial del GNL(POX) siguiendo la siguiente ecuación:



Mientras que la segunda manera de obtención es mediante el proceso de reformado de la reacción catalítica de una mezcla de vapor de agua e hidrocarburos (temperatura alta), formando monóxido y bióxido de carbono

Esa transformación sigue la siguiente reacción química:



La quema de hidrogeno puede realizarse mediante motores de combustión interna y motores de hidrogeno de pila combustible. De estos últimos se hablará más en detalle en el apartado de celdas de combustible.

En cuanto a los motores de combustión interna por hidrogeno, como el DZ H2-spark ignited de BEH<sub>2</sub>YDRO que funcionan bajo el principio de funcionamiento diésel, la molécula de hidrogeno se une al oxigeno liberando energía y vapor de agua, mediante la ayuda de una chispa generalmente producida por una bujía. Esta combustión produce unos 140 kJ por cada gramo de hidrogeno quemado en la mezcla. Y se expresa en la siguiente reacción química:



Además, de la quema única de hidrogeno, existen aplicaciones de motores duales como el DZ H<sub>2</sub>, los cuales queman además de hidrogeno, pequeñas cantidades de diésel, Debido a los problemas de auto ignición del Hidrogeno(585°C) necesitando un combustible piloto o chispa para su ignición

(el diésel se sitúa en 252°C). estos motores se ayudan por una unidad de gas oxihidrogeno (HHO) obtenido a través de la electrólisis del agua. Este, se mezcla en la admisión con la mezcla de diésel y oxígeno, disminuyendo el consumo del diésel y bajando las emisiones en torno a un 50%.

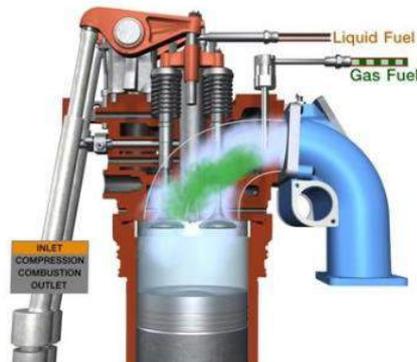


Ilustración 63 fuente Wärtsila

Además de los sistemas habituales de obtención de hidrogeno, cada vez más estudios, diseñan reactores nucleares (MSR) capaces de poder dividir las moléculas de agua en estado gaseoso para los cuales se requieren temperaturas mucho más elevadas que en la electrólisis termoquímica. Para ello, se está investigando para la implementación de estos reactores para mediados del 2030, aunque algunos como los reactores VHTR se encuentran en una fase más avanzada. Estos, serian empleados para la generación de hidrogeno siguiendo un ciclo Brayton con regenerador, en el que las turbinas de gas permiten trabajar a las temperaturas adecuadas para los ciclos termoquímicos.

A pesar de la línea de estudio, existe una mentalidad negativa respecto a la energía nuclear, puesto que conlleva riesgos importantes en tema de seguridad, además de no disponer aun de una normativa modernizada por parte de la IMO

Es importante mencionar que estos sistemas están en fase de experimentación y que pueden ser sistemas que no acaben de funcionar correctamente.

## Pilas de combustible

El funcionamiento de una pila combustible es la obtención de electricidad a partir de sustancias que reaccionan químicamente entre sí. Toda pila, consta de dos electrodos, el ánodo (donde se oxida el combustible) y el cátodo (donde el comburente se reduce), todo ello dentro de un electrolito y un determinado

número de celdas, se producirá una reacción redox. Los electrones viajan desde el ánodo hasta el cátodo a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica, mientras que los protones lo hacen a través del electrolito.

En el sector naval, las pilas combustibles con mayor rendimiento son las de combustible de óxido sólido(SOFC) y las de membrana de intercambio de protones(PEM) en todas sus gamas.

Las pilas de combustible de Oxido Sólido (SOFC) están diseñadas para reformar hidrocarburos y se caracteriza por la utilización de un electrolito de óxido sólido para conducir iones de oxígeno negativo del cátodo al ánodo.

Estas pilas de combustible funcionan en rangos de temperatura de 500 a 1000°C y a diferencia de las pilas PEM, no necesitan material catalizador de platino.

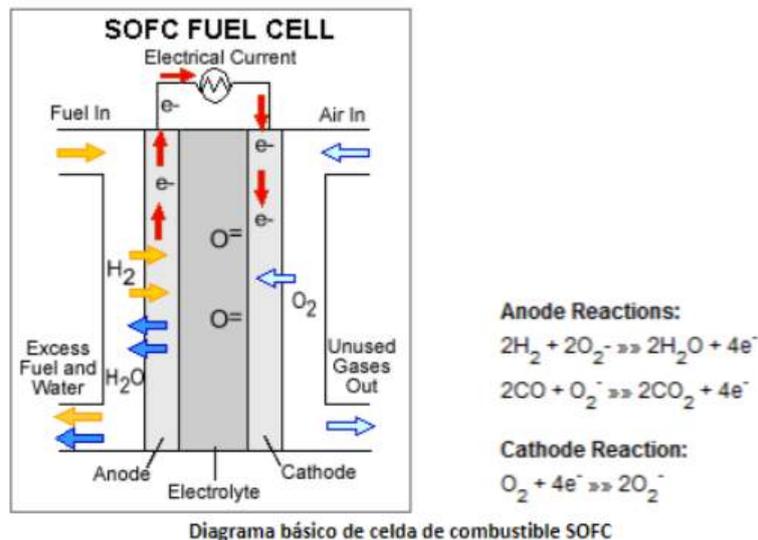


Ilustración 64 pila SOFC

En cuanto a las pilas combustibles de membrana de intercambio de protones (PEM) son de las más utilizadas a la hora de obtener energía de cero emisiones de carbono, ya que su funcionamiento es la transformación de energía mediante la reacción electroquímica entre la interacción del hidrogeno y el oxígeno del aire. Y a diferencias de las SOFC, el electrolito empleado en las PEM es una membrana de polímero solido que favorece a la circulación de protones creados en la oxidación del hidrogeno.

Según la ecuación general siguiente:



## Nuevas pilas de combustible PEM

Uno de los inconvenientes de las pilas de combustible PEM es la temperatura de operación de las mismas, para ello se está trabajando por parte de empresas como Jalvasub y ventor Innovations (ATD) en una nueva generación de pilas con las que se desarrollan nuevos procesos de síntesis de amoníaco, basados en nuevos catalizadores y reactores de plasma de baja potencia, más eficientes y con temperaturas de operación por debajo de los 350°C. además de la disociación de amoníaco.

En cuanto a los nuevos reactores de plasma de cátodos de baja potencia, se está trabajando con el material cerámico denominado Electríd C12A7.

Estas pilas de combustibles, independiente de los productos anódicos y catódicos, se requieren en gran medida para la propulsión híbrida que se mencionara en el apartado siguiente.

## Biocombustibles

Los biocombustibles son denominados aquellos combustibles provenientes a partir de materias primas renovables aceites vegetales y biomasa.

Estos tipos de combustibles, se obtienen de procesos como la fermentación, la transesterificación o la digestión anaeróbica para la materia orgánica. A pesar de ser una alternativa a los combustibles fósiles, esta tecnología no parece ser la solución a largo plazo para la des carbonización del sector ya que las quemadas de estos combustibles ocasionan un aumento de los gases NOx generados debido a los altos contenidos de oxígeno.

De entre los biocombustibles, los más utilizados en la industria son el biodiesel FAME y HVO junto con el bioetanol BTL

El biodiesel o Éster metílico de ácido graso (FAME).

Este combustible de origen vegetal es producido mediante el proceso de transesterificación, donde varios aceites son convertidos en esteres metílicos y

generalmente es mezclado con el diésel marino para su combustión. Para ello debe cumplir normativa en cuanto a porcentajes según la norma ISO8217:2017, donde se especifica los volúmenes máximos de mezclas dependiendo su aplicación.

### Aceite vegetal Hidrotratado (HVO)

el hidrobiodisel es obtenido mediante hidrogenación catalítica de aceites que a diferencia de producción utilizado en el biodiesel FAME, el HVO es una mezcla que se puede introducir en las instalaciones de distribución y repostaje, así como en los motores sin necesidad de realizar ninguna modificación. Siempre y cuando se cumplan las normas ASTM D 975.

### Bioetanol (BTL)

El etanol, es un combustible que puede obtenerse de diferentes maneras, desde el procesamiento de materias de origen renovable, biomasa o materias vegetales, como de origen del refinado del petróleo. Para conseguir la catalogación de bioetanol se debe de obtener mediante la fermentación anaeróbica de azúcares purificación o a través de la síntesis química. Además del bioetanol, también se trabaja en la obtención de biometanol a través de la pirolisis de materia orgánica.

	ventajas	desventajas	disponibilidad	Compatibilidad
Biodiesel FAME	Producción bajo procesos renovables y bajas emisiones de CO <sub>2</sub>	-Favorecen el crecimiento de bacterias	Escasa debido a sus desventajas operativas, aunque se estima que para 2030 se haya ampliado su consumo	Totalmente con motores marinos con % de mezclas con MFO
Biodiesel HVO		-Degradación del oxígeno		
Bioetanol BLT		-Obstrucción en filtros debido a su punto de enturbiamiento -Corrosión -Degradación de juntas gomas y mangueras del sistema -Necesidad de limpieza de tanques al realizar la conversión a MFO o HFO		

## Propulsi3n hibrida

La propulsi3n hibrida, consisteix en la combinaci3n de motors de combusti3n i sistemes amb capacitat de guardar grans quantitats d'energia. Dins d'aquest concepte, hi ha moltes variants depenent de la demanda i necessitat.

L'idea principal de la combinaci3n de motors di3sel i motors el3ctrics s3ncrons, es una optimitzaci3n de la propulsi3n. Ja que els motors di3sel produeixen un nivell d'emissions diferent al llarg de tot el seu r3gim de treball, sent el m3nys d'aquests el rang3ptim de funcionament (al voltant del 85% de càrrega, il·lustraci3n 53), aquest punt és on la contaminaci3n és m3nys i el rendiment del combustible és considerablement m3jor que operant a baixa velocitat (funcionament motor el3ctric).

Asi mateix, quan el sistema di3sel opera a velocitat 3ptima i constant, el consum de combustible és m3nys que a velocitat variable.

Dins de totes les aplicacions possibles, una d'elles és utilitzar la combinaci3n de motors di3sel, encarregats de portar el vaixell a la pot3ncia requerida per a la velocitat de creuer 3ptima, i l'utilitzaci3n de sistemes de guardament d'energia ESS (Energy Storage System) encarregat de subministrar corrent al motor el3ctric s3ncron per a realitzar l'entrada a port i maniobres.

Con aix3, s'aconsegueixen estalvis de combustible i reducci3n d'emissions de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> i SO<sub>x</sub> proporcionals al temps de funcionament en mode el3ctric i autonomia de l'ESS. Aquests estalvis poden variar des de l'15 al 30%.

Una de les possibles configuracions de propulsi3n hibrida, és la implementaci3n de motors el3ctrics PTO (amb un reductor doble) que permeten treballar en mode el3ctric com a propulsi3n o mode generador, arrossegats pel motor principal.

Tamb3, existeix la configuraci3n de sistemes totalment el3ctrics, amb càrrega de l'ESS des de port per a realitzar el creuer o amb l'utilitzaci3n d'alternadors d'alt rendiment per a la generaci3n d'energia el3ctrica per als propulsors, generalment azipost de ABB.

Uno de los últimos movimientos de los astilleros nacionales, es el encargo de 10 catamaranes totalmente eléctricos para la naviera portuguesa Transtejo, por parte de los astilleros GONDAN. Estos buques contarán con la potencia eléctrica almacenada en sus ESS de 2MWh que propulsarán al buque a una velocidad de 15knots.

Una de las soluciones viables es la ofrecida por siemens con sus sistemas MlueDrivePlusC switchboard. Tal y como se puede observar en la imagen siguiente.

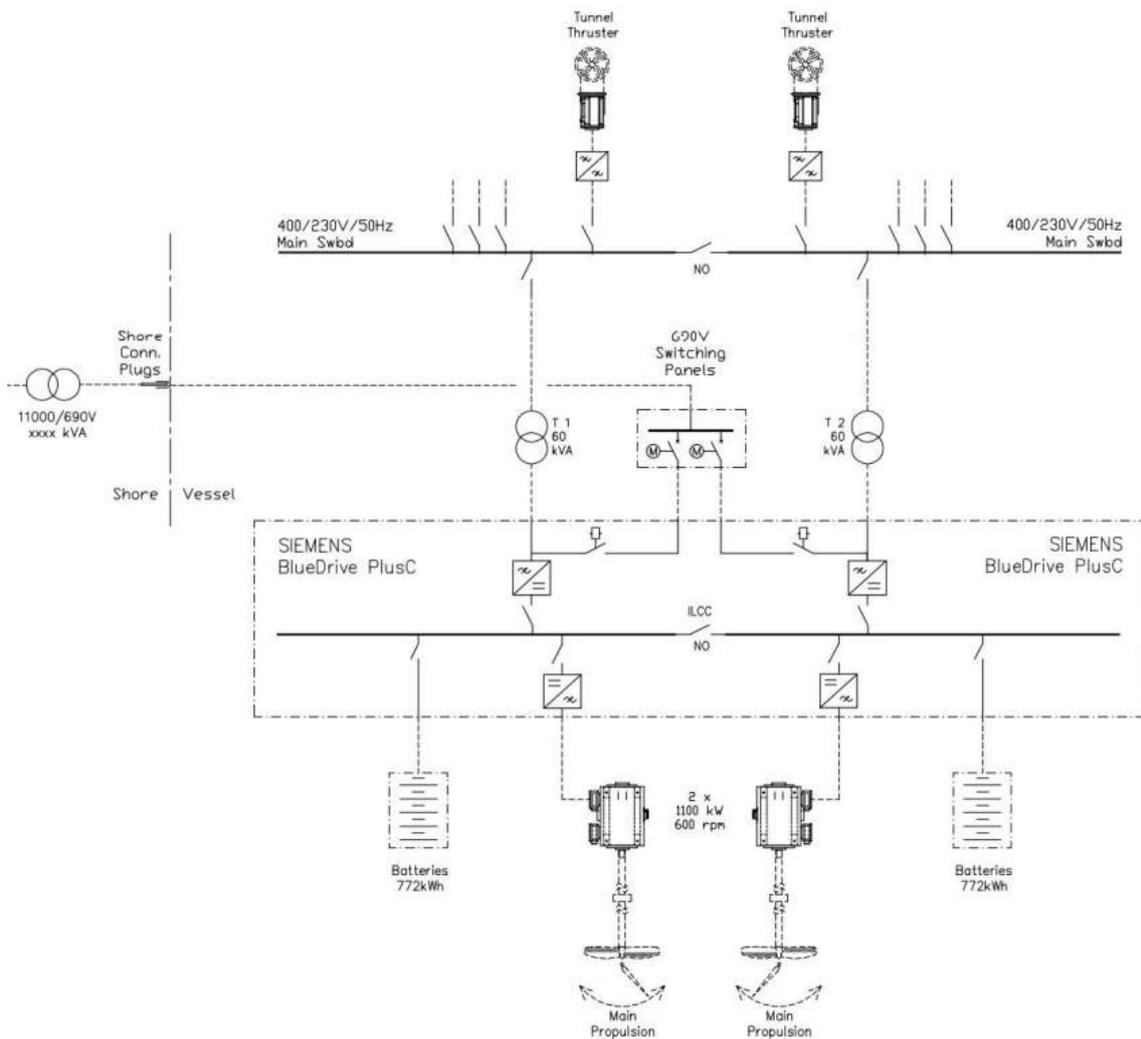


Ilustración 65 configuración full electric. fuente siemens

Este tipo de sistema, funcionara con el reabastecimiento de energía desde tierra hacia el barco, el cual cargara sus sistemas ESS para la propulsión principal de sus motores eléctricos.

Este tipo de propulsión reduce al 100% los GEI producidos por el buque. A pesar de ello, cabe destacar que estos sistemas son viables en cuanto a navegaciones interiores y de pocas millas náuticas, ya que están condicionados a la autonomía del ESS.

## Conclusiones

***"Poned un precio al carbono, la naturaleza no puede pagar más ese precio"***. Ursula von der Leyen. Presidenta Naciones Unidas (COP26)

Tras realizar el presente trabajo, se ha dado a conocer en mayor profundidad las necesidades del sector naval, tanto las normativas aplicables hasta el día de hoy como las futuras. Además, de mostrar unas posibles alternativas para la reducción de gases de efecto invernadero producidos por los buques.

El cambio climático es una realidad, y el aumento de emisiones de gases de efecto invernadero y destructores de la capa de ozono supone un gran problema para la humanidad.

Para reducir las emisiones de gases contaminantes por parte de todos los buques existentes, y como **medidas a corto plazo**, es necesario, primero de todo, un consumo de combustibles más refinados y de bajo o nulo porcentaje de azufres. además de una implementación de medidas operacionales, como es el concepto "JUST IN TIME", optimización de la energía a bordo y la reducción de la velocidad (slow steaming). En cuanto a las **medidas a medio y largo plazo** en busca de la des carbonización del sector naval, se abre un abanico de posibilidades de modificación de buques existentes, y de nueva construcción a fin de conseguir las cero emisiones para 2050.

De entre ellas, y como medidas de mayor popularidad entre los buques existentes, debido a su "menor" coste de instalación vs reducción de emisiones, es la instalación de sistemas EGR, catalizadores SCR y Scrubbers, todos ellos capaces de eliminar en gran medida las emisiones NO<sub>x</sub>.

En cuanto a los buques de nueva construcción, se apuesta por la optimización del diseño de cascos esbeltos, reducir la velocidad de diseño, así como la instalación de dispositivos ESD. Además, de la instalación de dispositivos cada vez más eficientes, como nuevos sistemas propulsivos de motores diésel. Así como, el diseño de plantas propulsoras de bajas emisiones de gases contaminantes, como la propulsión por hidrogeno, amoniaco y en menor medida el gas natural licuado.

Con las nuevas reglamentaciones obligatorias de la realización de un SEEMP y un cálculo de EEXI y CII para cada buque, este próximo año 2023 supondrá una revolución y demanda de sistemas de aumento de eficiencia para que los buques puedan ajustarse a normativa.

Cabe destacar, que para conseguir un cambio lo más “rápido” posible de tendencia hacia las cero emisiones, debe existir una estrecha colaboración entre las regulaciones políticas, un acceso eficaz a la inversión por parte de las navieras y armadores, además de, un apoyo social por parte de los consumidores.

Finalmente, las líneas de trabajo hacia un transporte marítimo de cero emisiones, parece ser la utilización del GNL como medida de transición, para la utilización de hidrogeno y o amoniaco.

Hasta el día de hoy, todavía no está claro que tipo de combustible o sistemas serán una alternativa viable a los combustibles fósiles, a pesar de ello, se está trabajando e investigando en busca de una solución.

## Bibliografía

- Babicz, J. (2015). *Wärtsilä encyclopedia of ship technology*. Helsinki.
- Benavides..., D. M. (2016). *inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero tomo II cap.2*. Recuperado el marzo de 2022, de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021658/2Comunicacion/IDEAMTOMOIIICap2.pdf>
- canela badrinas, v. (2018). *upccommons desarrollo del sistema de propulsion diesel\_electrico de un catamaran*. Recuperado el abril de 2022, de <file:///C:/Users/rodri/OneDrive/Escritorio/bueno/Baterias%20y%20propulsion%20hibrida.pdf>
- DNV. (2019). *LPG as marine fuel*. Recuperado el abril de 2022, de <https://www.dnv.com/Publications/lpg-as-marine-fuel-95190>
- DNV. (28 de abril de 2022). *WEBINAR alternative ship fuels*. Obtenido de [https://www.dnv.com/maritime/webinars-and-videos/on-demand-webinars/access/Alternative-ship-fuels-status-and-outlook.html?utm\\_campaign=MA\\_AUTO\\_WBNR\\_CNT\\_22Q2\\_Alternative%20ship%20fuels%20%E2%80%9C%20status%20and%20outlook&utm\\_medium=email&utm\\_source=Eloqua](https://www.dnv.com/maritime/webinars-and-videos/on-demand-webinars/access/Alternative-ship-fuels-status-and-outlook.html?utm_campaign=MA_AUTO_WBNR_CNT_22Q2_Alternative%20ship%20fuels%20%E2%80%9C%20status%20and%20outlook&utm_medium=email&utm_source=Eloqua)
- DNV, E. (2021). *study on the use of fuel cells in shipping*. Recuperado el abril de 2022, de <https://www.dieselduck.info/machine/01%20prime%20movers/2016%20EMSA%20Study%20on%20the%20use%20of%20Fuel%20Cells%20in%20Shipping.pdf>
- Elizabeth Lindstad, T. I. (2018). *potential power setups, fuel and hull desing capable os satisfying future EEDI requeriments*. Norway : NTNU.
- FAL324, b. (2013). *cepla.org/trasnporte*. Obtenido de medidas para mejorar la eficiencia energetica en el transporte maritimo : [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37618/Bolet%C3%ADN%20FAL%20324\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/37618/Bolet%C3%ADN%20FAL%20324_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Frutos, R. A. (marzo de 2015). *noticias juridicas*. Recuperado el 15 de enero de 2022 , de [https://noticias.juridicas.com/base\\_datos/Admin/ec150311-maec.html#i](https://noticias.juridicas.com/base_datos/Admin/ec150311-maec.html#i)

George Gougoulidis, N. V. (2015). An Overview of Hydrodynamic Energy Efficiency Improvement Measures.

Giulia Arduino, D. C. (2015). *Key factors and barriers to the adoption of cold ironing in europe*. Obtenido de [https://web.archive.org/web/20120907064225/http://ww2.unime.it/sefisast/SEFISAST/Conference\\_Paper\\_files/Arduino\\_Carrillo\\_Murillo\\_Ferrari.pdf](https://web.archive.org/web/20120907064225/http://ww2.unime.it/sefisast/SEFISAST/Conference_Paper_files/Arduino_Carrillo_Murillo_Ferrari.pdf)

Glomeep. (2020). *Just in Time Arrival Guide barriers and Potential Solutions* . Obtenido de <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2021/01/GIA-just-in-time-hires.pdf>

IMO, r. M. (17 de junio de 2021). *guidelines on survey and certification os the attained energy efficiency existing ship index* . Obtenido de [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.334\(76\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.334(76).pdf)

internacional, o. m. (febrero de 2016). *IMO*. Recuperado el 16 de abril de 2022, de Module 2 - ship Energy Efficiency Regulations and Related Guideline: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M2%20EE%20regulations%20and%20guidelines%20final.pdf>

internacional, o. m. (2016). *IMO.org*. Recuperado el 5 de marzo de 2022, de module 4 - ship board Energy Management: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M4%20energy%20management%20onboard%20final.pdf>

internacional, o. m. (2016). *OMI.org*. Recuperado el octubre de 2021, de Module 6 Energy Management plans and systems: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/M6%20energy%20management%20plan%20and%20system%20final.pdf>

internacional, o. m. (s.f.). *OMI.es*. Recuperado el 10 de octubre de 2021, de

Historia de la IMO:

<https://www.imo.org/es/About/HistoryOfIMO/Paginas/Default.aspx>

life, T. i. (july de 2015). *GHG emission reduction potential of EU-related maritime transport and on its impacts*. Recuperado el 16 de abril de 2022, de [https://ec.europa.eu/clima/system/files/2016-11/report\\_ghg\\_reduction\\_potential\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/system/files/2016-11/report_ghg_reduction_potential_en.pdf)

marinos, i. n. (23 de marzo de 2022). *el potencial del amoniaco como combustible marino*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=L99tvOKW-os>

Mayor, A. B. (2016). *Resistencia y propulsion del buque* .

MECP.308(73). (2018). *Directrices de 2018 sobre el metodo de calculo del indice de eficiencia energetica de proyecto (EDDI) obtenido para buques nuevos*. Recuperado el Abril de 2022

oficial, b. (s.f.). *Boletin oficial del estado (boe)*. Recuperado el 13 de octubre de 2021, de ENMIENDAS AL CÓDIGO TÉCNICO RELATIVO AL CONTROL DE LAS EMISIONES DE OXIDOS DE NITROGENO DE LOS MOTORES DIESEL MARINOS :

<https://www.boe.es/boe/dias/2011/04/07/pdfs/BOE-A-2011-6228.pdf>

Puig, J. O. (1994). *Teoria del buque Flotabilidad y estabilidad*. ediciones UPC.

Raven, L. L. (2010). *ship resistance and flow*.

SEALNG. (s.f.). *SEA-LNG.ORG*. Recuperado el 15 de abril de 2022, de [https://gasnam.es/wp-content/uploads/2019/02/190123\\_SEALNG\\_InvestmentCase\\_DESIGN\\_FINAL.pdf](https://gasnam.es/wp-content/uploads/2019/02/190123_SEALNG_InvestmentCase_DESIGN_FINAL.pdf)

siemens. (2019). *BlueDrivePlusC*. trondheim Norway.

Solutions, M. E. (s.f.). *MAN* . Obtenido de <https://www.man-es.com/marine/strategic-expertise/future-fuels>

Soutullo, R. G. (2015). *ingeniero marino*. Recuperado el 5 de marzo de 2022, de <https://ingenieromarino.com/normativa-tecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>

Soutullo, R. G. (s.f.). *ingeniero marino*. Recuperado el 20 de enero de 2022, de [https://ingenieromarino.com/el-convenio-marpol-7378/#3-Estructura\\_del\\_Convenio\\_MARPOL\\_7378](https://ingenieromarino.com/el-convenio-marpol-7378/#3-Estructura_del_Convenio_MARPOL_7378)

systems, B. m. (s.f.). *BECKER MEWIS DUCT® TWISTED*. Recuperado el marzo de 2022, de <https://www.becker-marine-systems.com/products/product-detail/becker-mewis-duct-twisted.html>

Thomas F.Stocker, Q. d. (2013). *resumen tecnico IPCC sobre el calentamiento global* . Obtenido de [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI\\_AR5\\_TS\\_FAQ\\_ES.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_TS_FAQ_ES.pdf)

unidas, n. (2008). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Obtenido de <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>

wärtsilä. (febrero de 2010). *slow steaming* . Obtenido de <https://www.wartsila.com/docs/default-source/Service-catalogue-files/Engine-Services---2-stroke/slow-steaming-a-viable-long-term-option.pdf>

wärtsilä. (febrero de 2018). *technical journal*. Obtenido de [https://www.wartsila.com/docs/default-source/about-us/in-detail/in-detail--2018-issue-02.pdf?sfvrsn=d0880144\\_4](https://www.wartsila.com/docs/default-source/about-us/in-detail/in-detail--2018-issue-02.pdf?sfvrsn=d0880144_4)

Wärtsilä. (2022). *meeting EEXI with power limitations solutions*. Obtenido de [https://wartsila.dam-cdn.com/1l8qfcbKqfG8Zl8jo5YDci/Meeting-EEXI-with-power-limitation-solutions.pdf?utm\\_term=marine&utm\\_content=bwp&utm\\_campaign=bwp-lead-scoring](https://wartsila.dam-cdn.com/1l8qfcbKqfG8Zl8jo5YDci/Meeting-EEXI-with-power-limitation-solutions.pdf?utm_term=marine&utm_content=bwp&utm_campaign=bwp-lead-scoring)

Wärtsilä. (s.f.). *Wärtsila*. Recuperado el 2 de marzo de 2022, de <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/common-rail-injection-system>

## Anexos A

A continuació, en este anexo, se adjuntan las tablas utilizadas para el cálculo del EEDI, EEXI y CII. Además de los certificados SEEMP proporcionados la IMO.

Como se mencionó en el capítulo 2 (página 26) sobre la normativa en cuanto a reducción de gases contaminantes, según el reglamento técnico de emisiones de gases  $\text{NO}_x$ , un motor marino deberá de cumplir con el control de emisiones aportando este Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para motores (EIAPP).



## APÉNDICE 2

### EJEMPLO DE MODELO DEL PLAN DE RECOPIACIÓN DE DATOS SOBRE EL CONSUMO DE FUELOIL DE LOS BUQUES (PARTE II DEL SEEMP)

#### 1 Datos del buque

Nombre del buque	
Número IMO	
Compañía	
Pabellón	
Tipo de buque	
Arqueo bruto	
Arqueo neto	
Peso muerto	
EEDI (si procede)	
Clase de navegación en hielo	

#### 2 Registro de revisión del plan de recopilación de datos sobre el consumo de fueloil

Fecha de la revisión	Disposición revisada

#### 3 Motores y otros consumidores de combustible y tipos de combustible utilizados

	Motores u otros consumidores de combustible	Potencia	Tipos de combustible
1	Tipo/modelo del motor principal	(kW)	
2	Tipo/modelo del motor auxiliar	(kW)	
3	Caldera	(...)	
4	Generador de gas inerte	(...)	

#### 4 Factor de emisión

$C_F$  es un factor de conversión adimensional entre el consumo de fueloil y las emisiones de CO<sub>2</sub>, previsto en las Directrices de 2014 sobre el método de cálculo del índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) obtenido para buques nuevos (resolución MEPC.245(66)), enmendadas. La cantidad total anual de CO<sub>2</sub> se calcula multiplicando el consumo anual de fueloil y el  $C_F$  para cada tipo de combustible.

APÉNDICE 3

FORMATO NORMALIZADO DE NOTIFICACIÓN DE DATOS PARA EL SISTEMA DE RECOPIACIÓN DE DATOS

Método utilizado para medir el consumo de fueloil <sup>9</sup>	Consumo de fueloil (t)	Distancia recorrida (m.m.)	Horas de navegación (h)	Potencia de salida <sup>8</sup> (potencia nominal) (kW)		Clase de navegación en hielo <sup>7</sup> (si procede)	EEDI (si procede) <sup>6</sup> (gCO <sub>2</sub> /t.m.m.)	Peso muerto <sup>5</sup>	Arqueo neto <sup>4</sup>	Arqueo bruto <sup>3</sup>	Tipo de buque <sup>2</sup>	Número IMO <sup>1</sup>	Fecha de inicio (dd/mm/aaaa)	Fecha de fin (dd/mm/aaaa)
				Motor o motores principales	Motor o motores auxiliares									
	Diesel/gasoil (C: 2,750)													
	Metanol (C: 1,375)													
	Etanol (C: 1,913)													
	Otro (...)													
	(C: .....)													

- De conformidad con el sistema de asignación de un número de la OMI a los buques para su identificación, adoptado por la Organización mediante la resolución A.1078(28).
- Tal como se define en la regla 2 del presente anexo; en otro caso, deberá indicarse.
- El arqueo bruto debería calcularse de conformidad con el Convenio internacional sobre arqueo de buques, 1969.
- El arqueo neto debería calcularse de conformidad con el Convenio internacional sobre arqueo de buques, 1969. Si no es aplicable, indíquese "N/A".
- El peso muerto es la diferencia expresada en toneladas entre el desplazamiento de un buque en aguas de densidad relativa de 1 025 kg/m<sup>3</sup> al calado en carga de verano y el desplazamiento en rosca del buque. Se debería considerar que el calado en carga de verano es el calado máximo de verano certificado en el cuadernillo de estabilidad aprobado por la Administración o una organización reconocida por ésta.
- El EEDI debería calcularse de conformidad con las Directrices de 2014 sobre el método de cálculo del índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) obtenido para buques nuevos, enmendado, adoptado mediante la resolución MEPC.245(66). Si no es aplicable, indíquese "N/A".
- La clase de navegación en hielo debería ajustarse a la definición establecida en el Código internacional para los buques que operen en aguas polares (Código polar), adoptado mediante las resoluciones MEPC.264(68) y MSC.385(94). Si no es aplicable, indíquese "N/A".
- Potencia de salida (potencia nominal) de los motores principales y auxiliares alternativos de combustión interna superior a 130 kW (deberá indicarse en kW). La potencia del motor del buque se define como el régimen nominal máximo continuo que se especifica en la placa de identificación.
- Métodos utilizados para medir el consumo de fueloil: 1: método en el que se utilizan notas de entrega de combustible, 2: método en el que se utilizan caudalímetros, 3: método en el que se utiliza la vigilancia del tanque de combustible líquido.

\*\*\*

Por otro lado, para el cálculo del EEDI requerido, la IMO se ayuda con las tablas siguientes para el cálculo del factor de reducción. (cuadro 1) y para obtener el valor de referencia de cada tipo de buque. (cuadro 2)

**Cuadro 1: Factores de reducción (en %) del EEDI en comparación con el nivel de referencia del EEDI**

Tipo de buque	Tamaño	Fase 0 1 de enero de 2013 a 31 de diciembre de 2014	Fase 1 1 de enero de 2015 a 31 de diciembre de 2019	Fase 2 1 de enero de 2020 a 31 de marzo de 2022	Fase 2 1 de enero de 2020 a 31 de diciembre de 2024	Fase 3 A partir del 1 de abril de 2022	Fase 3 A partir del 1 de enero de 2025
Granelero	20 000 TPM o más	0	10		20		30
	Entre 10 000 y 20 000 TPM	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
Buque gasero	15 000 TPM o más	0	10	20		30	
	Entre 10 000 y 15 000 TPM	0	10		20		30
Buque tanque	Entre 2 000 y 10 000 TPM	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
	20 000 TPM o más	0	10		20		30
Buque portacontenedores	Entre 4 000 y 20 000 TPM	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
	200 000 TPM o más	0	10	20		50	
	Entre 120 000 y 200 000 TPM	0	10	20		45	
	Entre 80 000 y 120 000 TPM	0	10	20		40	
	Entre 40 000 y 80 000 TPM	0	10	20		35	
	Entre 15 000 y 40 000 TPM	0	10	20		30	
Buque de carga general	Entre 10 000 y 15 000 TPM	n/a	0-10*	0-20*		15-30*	
	15 000 TPM o más	0	10	15		30	
Buque de carga refrigerada	Entre 3 000 y 15 000 TPM	n/a	0-10*	0-15*		0-30*	
	5 000 TPM o más	0	10		15		30
Buque de carga combinada	Entre 3 000 y 5 000 TPM	n/a	0-10*		0-15*		0-30*
	20 000 TPM o más	0	10		20		30
Buque para el transporte de GNL***	Entre 4 000 y 20 000 TPM	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
Buque de carga rodada (buque para el transporte de vehículos)***	10 000 TPM o más	n/a	10**	20		30	
Buque de carga rodada***	10 000 TPM o más	n/a	5**		15		30
	2 000 TPM o más	n/a	5**		20		30
Buque de pasaje de transbordo rodado***	Entre 1 000 y 2 000 TPM	n/a	0-5**, **		0-20*		0-30*
	1 000 TPM o más	n/a	5**		20		30
Buque de pasaje dedicado a cruceros*** con propulsión no tradicional	Entre 250 y 1 000 TPM	n/a	0-5**, **		0-20*		0-30*
	Arqueo bruto igual o superior a 85 000	n/a	5**	20		30	
	Arqueo bruto comprendido entre 25 000 y 85 000	n/a	0-5**, **	0-20*		0-30*	

Ilustración 69 tabla calculo EEDI fuente MECP208

**Cuadro 2: Parámetros para la determinación de los valores de referencia de los distintos tipos de buques**

Tipo de buque definido en la regla 2	a	b	c
2.2.5 Granelero	961,79	TPM del buque cuando TPM ≤ 279 000  279 000 cuando TPM > 279 000	0,477
2.2.7 Buque de carga combinada	1 219,00	TPM del buque	0,488
2.2.9 Buque portacontenedores	174,22	TPM del buque	0,201
2.2.11 Buque de pasaje dedicado a cruceros con propulsión no tradicional	170,84	Arqueo bruto (GT) del buque	0,214
2.2.14 Buque gasero	1 120,00	TPM del buque	0,456
2.2.15 Buque de carga general	107,48	TPM del buque	0,216
2.2.16 Buque para el transporte de GNL	2 253,7	TPM del buque	0,474
2.2.22 Buque de carga refrigerada	227,01	TPM del buque	0,244
2.2.26 Buque de carga rodada	1 405,15	TPM del buque	0,498
	1 686,17*	TPM del buque cuando TPM ≤ 17 000*  17 000 cuando TPM > 17 000*	
2.2.27 Buque de carga rodada (buque para el transporte de vehículos)	$(\text{TPM}/\text{GT})^{-0.7} 780,36$ cuando $\text{TPM}/\text{GT} < 0,3$ 1 812,63 cuando $\text{TPM}/\text{GT} \geq 0,3$	TPM del buque	0,471
2.2.28 Buque de pasaje de transbordo rodado	752,16	TPM del buque	0,381
	902,59*	TPM del buque cuando TPM ≤ 10 000*  10 000 cuando TPM > 10 000*	
2.2.29 Buque tanque	1 218,80	TPM del buque	0,488

Ilustración 70 MECP208

Para el cálculo del EEXI requerido, también, la IMO a través de la resolución del MECP62 ha publicado una serie de tablas para el cálculo del índice energético, que son las siguientes:

**Cuadro 3: Factores de reducción (en %) del EEXI en comparación con el nivel de referencia del EEDI**

Tipo de buque	Tamaño	Factor de reducción
Granelero	Igual o superior a 200 000 TPM	15
	Igual o superior a 20 000 TPM pero inferior a 200 000 TPM	20
	Igual o superior a 10 000 TPM pero inferior a 20 000 TPM	0-20*
Gasero	Igual o superior a 15 000 TPM	30
	Igual o superior a 10 000 TPM pero inferior a 15 000 TPM	20
	Igual o superior a 2 000 TPM pero inferior a 10 000 TPM	0-20*
Buque tanque	Igual o superior a 200 000 TPM	15
	Igual o superior a 20 000 TPM pero inferior a 200 000 TPM	20
	Igual o superior a 4 000 TPM pero inferior a 20 000 TPM	0-20*
Buque portacontenedores	Igual o superior a 200 000 TPM	50
	Igual o superior a 120 000 TPM pero inferior a 200 000 TPM	45
	Igual o superior a 80 000 TPM pero inferior a 120 000 TPM	35
	Igual o superior a 40 000 TPM pero inferior a 80 000 TPM	30
	Igual o superior a 15 000 TPM pero inferior a 40 000 TPM	20
	Igual o superior a 10 000 TPM pero inferior a 15 000 TPM	0-20*
Buque de carga general	Igual o superior a 15 000 TPM	30
	Igual o superior a 3 000 TPM pero inferior a 15 000 TPM	0-30*

Tipo de buque	Tamaño	Factor de reducción
Buque de carga refrigerada	Igual o superior a 5 000 TPM	15
	Igual o superior a 3 000 TPM pero inferior a 5 000 TPM	0-15*
Buque de carga combinada	Igual o superior a 20 000 TPM	20
	Igual o superior a 4 000 TPM pero inferior a 20 000 TPM	0-20*
Buque para el transporte de GNL	Igual o superior a 10 000 TPM	30
Buque de carga rodada (buque para el transporte de vehículos)	Igual o superior a 10 000 TPM	15
Buque de carga rodada	Igual o superior a 2 000 TPM	5
	Igual o superior a 1 000 TPM pero inferior a 2 000 TPM	0-5*
Buque de pasaje de transbordo rodado	Igual o superior a 1 000 TPM	5
	Igual o superior a 250 TPM pero inferior a 1 000 TPM	0-5*
Buque de pasaje dedicado a cruceros con propulsión no tradicional	Arqueo bruto igual o superior a 85 000	30
	Arqueo bruto igual o superior a 25 000 pero inferior a 85 000	0-30*

\* El factor de reducción se calculará por interpolación lineal entre los dos valores en función del tamaño del buque. El valor más bajo del factor de reducción se aplicará a los buques más pequeños.

Ilustración 71 tabla de cálculo EEXI fuente 62

Finalmente, para el cálculo del indicador de reducción de carbono CII, el MECP ha publicado un documento guía que puede ser utilizado para la recopilación de datos.

MEPC 76/15/Add.1  
Anexo 1, página 83

APÉNDICE IX

**Información que se ha de presentar a la base de datos de la OMI sobre el consumo de fueloil de los buques**

Identidad del buque

Número IMO: .....

Periodo del año civil para el cual se presentan los datos

Fecha de inicio (dd/mm/aaaa): .....

Fecha final (dd/mm/aaaa): .....

Características técnicas del buque

Tipo de buque, según se define en la regla 2 del presente anexo, u otro (indíquese): .....

Arqueo bruto:<sup>1</sup> .....

Arqueo neto:<sup>2</sup> .....

Peso muerto:<sup>3</sup> .....

Potencia de salida (potencia nominal)<sup>4</sup> de los motores principales y auxiliares alternativos de combustión interna superior a 130 kW (deberá indicarse en kW): .....

EEDI (si procede): .....

Clase de navegación en hielo:<sup>5</sup> .....

Consumo de fueloil, por tipo de fueloil<sup>6</sup> en toneladas métricas, y métodos utilizados para recopilar los datos sobre el consumo de fueloil

Distancia recorrida: .....

Horas fuera del puesto de atraque: .....

<sup>1</sup> El arqueo bruto debería calcularse de conformidad con el Convenio internacional sobre arqueo de buques (Convenio de arqueo 1969).

<sup>2</sup> El arqueo neto debería calcularse de conformidad con el Convenio internacional sobre arqueo de buques (Convenio de arqueo 1969). Si no es aplicable, indíquese "N/A".

<sup>3</sup> El peso muerto es la diferencia expresada en toneladas entre el desplazamiento de un buque en aguas de densidad relativa de 1 025 kg/m<sup>3</sup> al calado en carga de verano y el desplazamiento en rosca del buque. Se debería considerar que el calado en carga de verano es el calado máximo de verano certificado en el cuadernillo de estabilidad aprobado por la Administración o una organización reconocida por esta. Si no es aplicable, indíquese "N/A".

<sup>4</sup> Por potencia nominal se entiende la potencia nominal máxima continua especificada en la placa de identificación del motor.

<sup>5</sup> Según se define en las "Directrices de 2014 sobre el método de cálculo del índice de eficiencia energética de proyecto (EEDI) obtenido para buques nuevos" (resolución MEPC.245(66)), u otro tipo (deberá indicarse).

<sup>6</sup> La clase de navegación en hielo debería ajustarse a la definición establecida en el Código internacional para los buques que operen en aguas polares (Código polar) (resoluciones MEPC.264(68) y MSC.385(94)). Si no es aplicable, indíquese "N/A".

<https://imocloud.sharepoint.com/MS/SWPU/MEPC/76/MEPC 76-15-Add.1.docx>

*Ilustración 72 notificación estándar CII MECP76*

