ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

TECNOLOGÍAS DE PROPULSIÓN EÓLICA E HIDRÓGENO: APLICACIÓN AL BUQUE CATHERINE Y ESTUDIO ECONÓMICO, REDUCCIÓN DE CONSUMOS Y EMISIONES. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

WIND AND HYDROGEN PROPULSION TECHNOLOGIES: APPLICATION TO THE CATHERINE SHIP AND ECONOMIC STUDY, REDUCTION OF CONSUMPTION AND EMISSIONS. ENVIRONMENTAL IMPACT

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Autor: Felipe Pérez-Andújar

Director: Alfredo Girón

Marzo - 2023

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Grado

TECNOLOGÍAS DE PROPULSIÓN EÓLICA E HIDRÓGENO: APLICACIÓN AL BUQUE CATHERINE Y ESTUDIO ECONÓMICO, REDUCCIÓN DE CONSUMOS Y EMISIONES. IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

WIND AND HYDROGEN PROPULSION TECHNOLOGIES: APPLICATION TO THE CATHERINE SHIP AND ECONOMIC STUDY, REDUCTION OF CONSUMPTION AND EMISSIONS. ENVIRONMENTAL IMPACT

Para acceder al Título de Grado en

INGENIERÍA MARÍTIMA

Marzo – 2023

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros.

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo

RESUMEN

El mundo actualmente atraviesa una crisis energética alimentada por las consecuencias de la pandemia por la COVID-19, y la guerra entre Rusia y Ucrania. Combinada esta crisis con la progresiva concienciación de las naciones y sus habitantes del cada vez más notable cambio climático, han provocado que potencias mundiales, como la Unión Europea, adelante los plazos e invierta más recursos en la transición energética para reducir el uso del combustible fósil. Por consecuencia directa, organizaciones legislativas como la IMO, redactan normativas, cada año más exigentes, para reducir el consumo y las emisiones de CO2, obligando a los armadores y las navieras a presentar planes correctivos y de transformación para cumplimentar la normativa. El objetivo de este trabajo es plantear y estudiar proyectos de instalación de modernos sistemas de propulsión, eólica y por hidrógeno, en el buque Ro-ro Catherine para determinar cuál es más eficaz en el contexto actual. Para ello se realiza un previo estudio económico y de consumos de los sistemas para una ruta de navegación entre Rotterdam y Singapur, donde también se analiza la viabilidad de la instalación y los efectos en la estabilidad y operaciones del buque, para finalmente efectuar un análisis a largo plazo de los resultados obtenidos en función de factores económicos, medioambientales, sociopolíticos y legislativos. Tras finalizar los estudios y análisis, se concluye y reafirma la relevancia de proyectos de este tipo en el sector naval en la actualidad, siendo imprescindibles en un futuro próximo durante la evolución ecológica del transporte marítimo.

PALABRAS CLAVE

- Crisis energética
- Sector marítimo
- Emisiones
- Transición ecológica
- Nuevas Tecnologías de propulsión
- Hidrógeno

ABSTRACT

The world is currently going through an energy crisis fuelled by the consequences of the COVID-19 pandemic, and the war between Russia and Ukraine. Combined this crisis with the progressive awareness of nations and their inhabitants of the increasingly notable climate change, have caused world powers, such as the European Union, to advance the deadlines and invest more resources in the energy transition to reduce the use of fossil fuel. As a direct consequence, legislative organizations such as the IMO draft regulations, each year more demanding, to reduce consumption and CO2 emissions, forcing shipowners and shipping companies to submit corrective and transformation plans to comply with the regulations. The objective of this work is to propose and study projects for the installation of modern propulsion systems, wind, and hydrogen, in the Ro-ro Catherine ship to determine which is more efficient in the current context. For this, a previous economic and consumption study of the systems for a navigation route between Rotterdam and Singapore is carried out, where the feasibility of the installation and the effects on the stability and of the ship are also analysed, to finally carry out a long-term analysis. term of the results obtained based on economic, environmental, socio-political, and legislative factors. After completing the studies and analysis, the relevance of projects of this type in the naval sector today is concluded and reaffirmed, being essential soon during the ecological evolution of maritime transport.

KEY WORDS

- Energy crisis
- Maritime sector
- Emissions
- Ecological transition
- New propulsion technologies
- Hydrogen

ÍNDICE

1 INTRODUCCIÓN

El sector naval y la industria del transporte marítimo está sufriendo una evolución desde un marco principalmente ecológico, haciendo que en los últimos años surjan proyectos de modernos sistemas de propulsión, y combustibles alternativos, como el amoniaco o el hidrogeno, para reducir la dependencia de los combustibles fósiles. La mayoría de estos proyectos están en una fase muy temprana de desarrollo. Sin embargo, por diversos factores que se irán desarrollando a lo largo del estudio, hay un especial interés en desarrollar estas tecnologías lo más pronto posible y con unas garantías mínimas, para favorecer este cambio.

En este trabajo, desarrollaremos los proyectos más trascendentes y con el mayor potencial, siendo estos, dentro de las tecnologías eólicas y de propulsión asistida, las turbovelas, velas rígidas, aerogeneradores y cometas de viento, y dentro de las tecnologías de propulsión completa y combustibles alternativos, los motores por pila de hidrógeno.

El objetivo principal es determinar cuál de estas tecnologías es, en el contexto actual, la mejor candidata para ser utilizada en los buques mercantes operantes en este momento, aplicando las tecnologías mencionadas en el párrafo anterior a las operaciones de un buque Ro-ro de 13.320 tpm llamado Catherine

Para completar este objetivo y llegar a un resultado satisfactorio, realizaremos un estudio económico y de emisiones de las tecnologías, por separado y combinadas, en una ruta fija desde Rotterdam hasta Singapur. Durante este estudio analizaremos, de manera elemental, las consecuencias y complejidades ingenieriles relacionadas con la instalación, y las operaciones del buque en relación con las condiciones de navegación. Finalmente, analizaremos los resultados realizando tablas comparativas de los diferentes estudios, tomando como referencia los datos de la propulsión actual del buque, para definitivamente, y a través de análisis desde varios ámbitos, llegar a un resultado conclusivo.

2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La crisis energética, vigente a día de hoy desde 2020, ha generado que el precio de los combustibles fósiles y el gas fluctúe bastante, con una tendencia positiva. Además, la OMI ha puesto en vigor la nueva ley de emisiones desde el 1 de enero de este año. En los apartados 7.3 y 7.4 desarrollamos en profundidad estos factores. Sin embargo, podemos adelantar que el buque que se pretende estudiar en este trabajo, el buque Ro-ro Catherine, no cumple con la nueva normativa de la OMI. Para ello estudiaremos si los sistemas planteados en este trabajo son viables y permiten cumplir con la normativa.

3 ANTECEDENTES

Antes de comenzar con el estudio, es conveniente contextualizar y desarrollar las dos tecnologías que se pretenden implementar en el buque Catherine.

3.1 TECNOLOGÍA HIDRÓGENO

3.1.1 Qué es el hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico más sencillo y abundante en el universo, suponiendo aproximadamente el 75% de toda la materia existente. Presentándose generalmente en su forma molecular, en condiciones normales se encuentra en estado gaseoso, siendo además insípido, incoloro, inodoro e inflamable. Como combustible presenta un gran potencial, pues al reaccionar con el oxígeno, libera una gran cantidad de energía, más que cualquier otro combustible (un kilo de hidrógeno produce casi 3 veces más energía que un kilo de hidrocarburos) generando agua en el proceso.

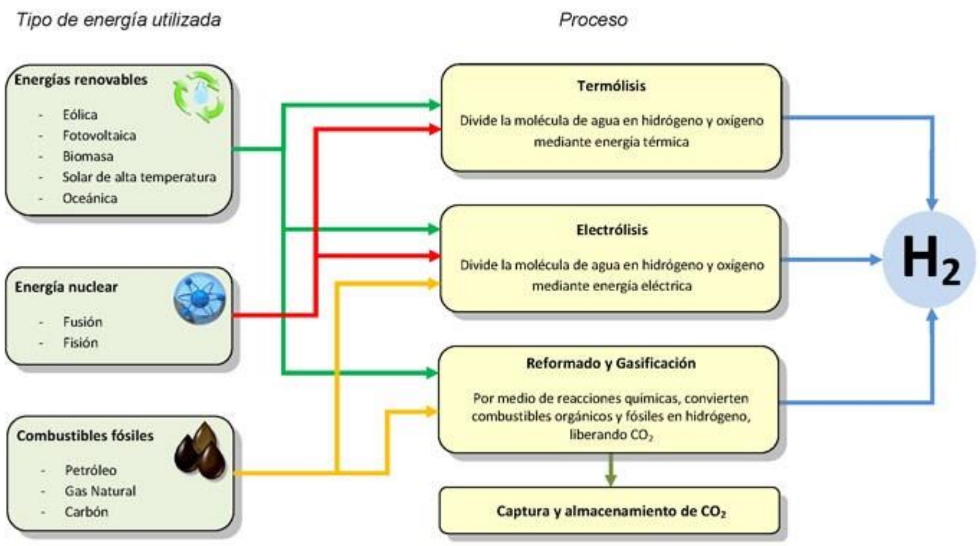
Sin embargo, la principal desventaja que presenta frente al resto de combustibles es que se encuentra en mayor parte combinado con otros elementos, como, por ejemplo, con el oxígeno para formar agua, o con el carbono para formar compuestos orgánicos. Por ello, no es una fuente de energía primaria, sino un vector energético, haciendo necesario el uso de otras energías para su producción.

3.1.2 Producción

El hidrógeno se puede producir a través de tres procesos: termólisis, electrólisis y reformado y gasificación para los cuales, como se ha mencionado con anterioridad, es necesario emplear otras fuentes de energía:

- Electrólisis: reacción o proceso químico mediante el cual, aplicando una corriente eléctrica, se logra separar la molécula de agua en oxígeno e hidrógeno. Para ello se hace uso de un electrolizador, aparato que hace posible este proceso aplicando la corriente eléctrica.
- Termólisis: reacción o proceso térmico mediante el cual se divide la molécula de agua para producir oxigeno e hidrógeno aplicando altas temperaturas. La temperatura necesaria para conseguir esta reacción mediante termólisis directa es de 3000 k, por ello se recurre a complejos ciclos químicos para lograr reducir esta temperatura a 1000 k
- Reformado y gasificación: conjunto de reacciones químicas sobre hidrocarburos (petróleo, gas natural) o compuestos orgánicos (biomasa, carbón) que produce hidrogeno liberando monóxido, dióxido de carbono y otros compuestos. Existen variaciones de este proceso en función del aporte de oxígeno a la reacción, por ejemplo, la pirolisis, donde no hay aporte de oxígeno, o la oxidación parcial, donde el aporte de oxígeno es limitado, sin embargo, todos los procesos se basan en el mismo principio; separación del combustible en distintos compuestos mediante el aporte de calor.

Figura 1: procesos de obtención de hidrogeno y energías utilizadas



Fuente: cnh2.es/el-hidrogeno/#tab-id-3

Estas tres técnicas son las tradicionales, de las cuales la más utilizada es el reformado y gasificación debido a sus bajos costes de operación frente a las otras dos. Aun así, se están estudiando nuevas tecnologías de producción muy interesantes que pueden llegar a competir en un futuro con los métodos tradicionales, por ejemplo, la producción mediante microrganismo, algas unicelulares o cianobacterias que pueden producir hidrogeno a partir de la energía solar.

El tipo de hidrógeno producido se clasifica según la fuente energética y la materia prima utilizada. Esta clasificación se divide en colores los cuales hacen alusión a las emisiones de dióxido de carbono durante el proceso de producción, yendo desde hidrógeno negro hasta hidrógeno verde pasando por hidrógeno gris, marrón, amarillo, turquesa, violeta, etc. La gama de colores es amplia, pero los más comunes son los 3 siguientes:

- Hidrógeno verde: aquel producido a partir de energías 100% renovables, tales como la eólica o la fotovoltaica.
- Hidrógeno azul: aquel producido a partir de hidrocarburos donde se efectúa una captura y almacenamiento para tratar el carbono generado
- Hidrógeno negro: aquel producido a partir de hidrocarburos donde no se efectúa una captura y almacenamiento de las emisiones.

Figura 2: Esquema conceptual de los colores del hidrógeno con las distintas fuentes, procesos, postprocesos y emisiones.

Fuente: apilados.com/blog/tecnologias-para-la-produccion-de-hidrogeno-los-colores-del-hidrogeno/

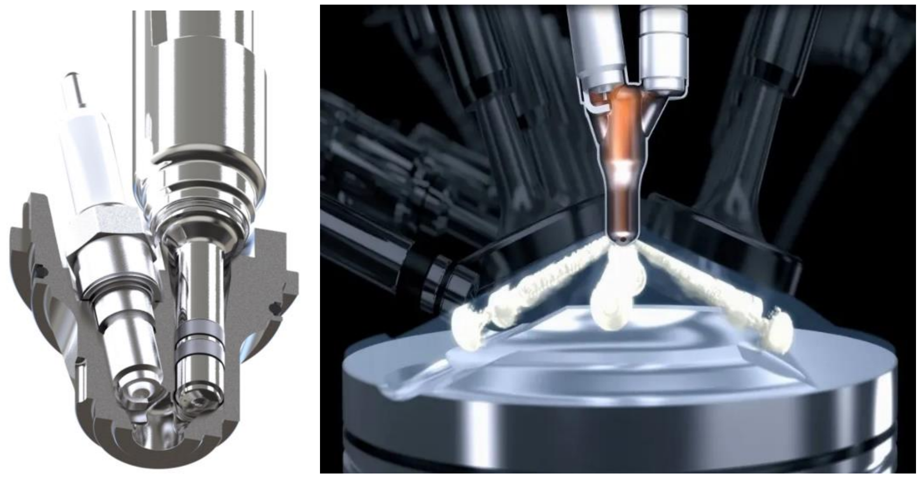
El tipo de hidrogeno más utilizado es el azul, pues los niveles de emisiones no son muy elevados y el proceso de producción es económico. No obstante, el hidrógeno verde cada vez gana más protagonismo debido a las mejoras en la eficiencia de los procesos de producción y la búsqueda de una energía limpia libre de emisiones.

3.1.3 Aplicaciones en la industria naval

En la actualidad, existen dos formas de extraer la energía del hidrógeno con una eficiencia mínima que lo haga rentable; mediante la combustión, o la pila de combustible.

Como se ha mencionado con anterioridad, el hidrógeno tiene la propiedad de ser inflamable al reaccionar con el oxígeno, por lo tanto, se puede utilizar en motores de combustión interna tradicionales modificando ligeramente sus parámetros. Las bujías convencionales no son lo suficientemente potentes para encender la mezcla de combustible y aire, además necesita de una muy elevada relación de compresión y gran exceso de aire para funcionar de manera estable. Estas condiciones hacen que se generen vibraciones en el motor, además de que se alcance temperaturas muy elevadas en los cilindros, oxidando el nitrógeno del aire y por consecuencia generando NOx. Para hacer frente a estos problemas se hace uso de la tecnología MJI, un sistema de inyección avanzado que consiste en "*una combustión previa en una pequeña precámara, instalada justo por encima de la cámara de combustión principal del cilindro, que alberga una bujía convencional y un inyector*" (**Gutiérrez, Diego. 2021.**). Gracias a este sistema la combustión es más rápida y uniforme, permitiendo reducir la relación de compresión necesaria y reduciendo la temperatura alcanzada en el cilindro.

Figura 3: ilustración de un inyector MJI (izquierda), representación de su funcionamiento (derecha)



Fuente: hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/funcionamiento-motor-combustion-interna-hidrogeno-mahle-liebherr/20211018105805050304.html

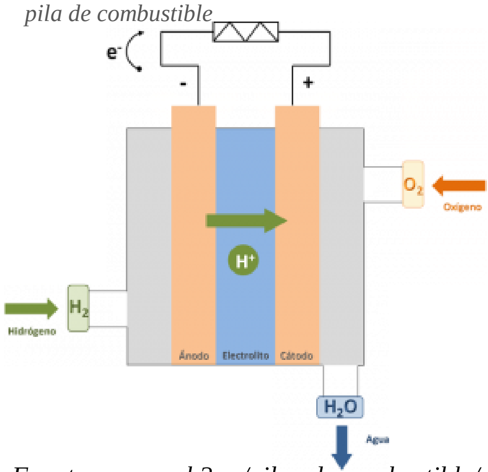
Por otra parte, en los motores por pila de combustible no se genera una combustión, sino una transformación de la energía química en eléctrica. Esto se consigue mediante un sistema compuesto por:

- Electrodos: por una parte, el ánodo, donde se reduce la molécula de hidrógeno en dos protones H+, y por otra, el cátodo, donde reaccionan los protones con el oxígeno O2.
- Electrolito: sustancia encargada de separar los gases permitiendo el paso de iones H+ al cátodo y separando los electrones.
- Placas bipolares: separan las celdas y conducen los gases evacuando el agua producida.

En dicho sistema tienen lugar las siguientes reacciones:

- Reacción en el ánodo: $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$
- Reacción en el cátodo: $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
- Reacción global: $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$

Figura 4: esquema funcionamiento de la pila de combustible



Fuente: www.cnh2.es/pilas-de-combustible/

En un motor de pila de hidrógeno, este conjunto se llama celda, y se agrupan varias de ellas formando la pila. Por consiguiente, este motor funciona introduciendo el hidrogeno de alta presión en la pila por parte del ánodo produciendo la primera semirreacción señalada y liberando electrones en el proceso. Estos electrones viajan por el circuito eléctrico alimentado el motor eléctrico, el cual genera un trabajo como por ejemplo mover un coche, hasta llegar al otro extremo del circuito donde se encuentra el cátodo. Una vez en el cátodo, los electrones se combinan con el oxígeno y los iones H+, generando moléculas de agua como se representa en la segunda semirreacción.

Figura 5: distribución de un motor de pila de combustible de hidrógeno en un coche

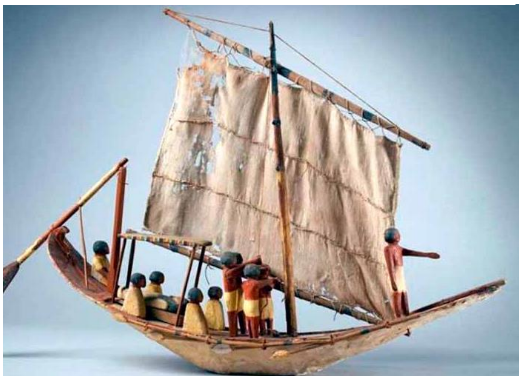
Fuente: tuteorica.com/material-complementario/motor-de-hidrogeno/

Como resultado, las aplicaciones de esta tecnología en la industria naval son muy variadas, todas enfocadas en la generación de energía para realizar un trabajo específico, ya sea para los sistemas de calefacción, refrigeración, generadores eléctricos, sistemas auxiliares o para la propia propulsión del buque.

3.2 TECNOLOGÍA EÓLICA

Durante siglos, antes de la aparición de sistemas como la maquina alternativa de vapor, o los motores de combustión interna, el medio de propulsión que dominó de manera absoluta el transporte marítimo fue la navegación a vela aprovechando la fuerza del viento.

Figura 6: representación de los primeros buques del antiguo Egipto



Fuente: todoababor.es/historia/evolucion-historica-de-la-vela/

Se asigna la primera navegación a vela a la antigua civilización egipcia a través del rio Nilo, entorno al 3000 a.C. con un aparejo compuesto de una vela cuadrada auxiliada por remos para las maniobras. A partir de entonces, los aparejos han ido evolucionando, adoptando diversas formas, desde velas latinas, juncos de la China oriental, gavias, juanetes, etc. para maximizar la fuerza del viento.

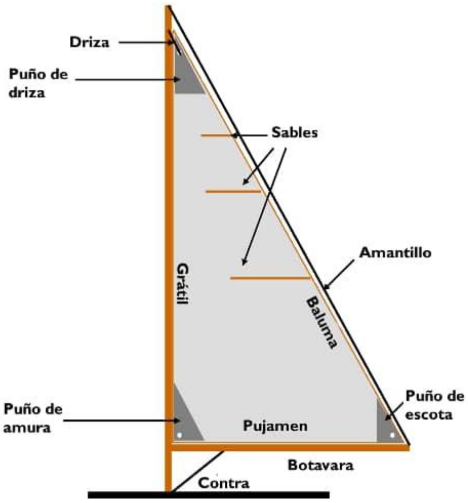
Actualmente ha caído casi en desuso para el transporte marítimo, vencido por la máquina de vapor a finales del siglo XIX y los motores de combustión interna actuales. Sin embargo, con las políticas de consumo y emisiones cada vez más estrictas, parece que poco a poco revive, apareciendo consigo nuevas tecnologías de propulsión eólica como las velas rígidas o los aerogeneradores, sin olvidar por supuesto las velas tradicionales, las cuales, aunque en menor medida, siguen vigentes el sector.

3.2.1 Velas tradicionales

Para simplificar, vamos a desarrollar el aparejo más habitual hoy en día, denominado sistema bermuda o marconi.

Este sistema se caracteriza por tener una vela bermudiana, de forma triangular, izada en un mástil por el lado del gratil y apoyada generalmente sobre una botavara, palo unido al mástil de extensión horizontal unida al pujamen de la mayor. Además, se le suele añadir una vela en la zona de proa entre las cuales destacan 3 tipos; génova, foque y tormentín.

Figuras 7,8: partes de la vela mayor (izquierda), tipos de vela de proa (derecha)



Fuente (izquierda): nauticaformacion.es/cuales-son-las-partes-de-velero-tipos-de-velas-nomenclatura-nautica/

Fuente (derecha): sailandtrip.com/vela/velas-de-proa-foques-y-genovas/

Este aparejo destaca sobre los demás debido a su sencillez y su capacidad de aprovechar la fuerza del viento, dando mejores rendimientos que el resto de los sistemas. Por ello es habitual verlo en los veleros actuales, o en altas competiciones.

En el transporte marítimo está en desuso pues no supone de interés para las navieras frente a los motores de combustión interna. No obstante, como se ha mencionado con anterioridad, las actuales políticas restrictivas en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, y el encarecimiento y agotamiento de los recursos fósiles han llevado a la búsqueda de soluciones baratas y limpias, haciendo que los armadores vuelvan a mirar al viento como solución óptima.

Sistemas combinados de propulsión mediante motores de combustión interna y aparejos marconi existen y son habituales en embarcaciones de recreo y yates privados. El reto de extrapolarlo al transporte marítimo reside en la escala, ya que las dimensiones de estos aparejos para buques de determinada eslora son enormes y a priori poco prácticas. Por ello no es habitual encontrar veleros de más de 100 metros de eslora.

Figuras 9: velero de aparejo marconi con vela de proa tipo génova

Fuente: propia del alumno

El velero más grande hoy en día es el SY "A" (Super Yacht), un velero de diseño inusual propiedad de Andrey Melnichenko, el cual presenta una eslora de 143 m y una manga de 25 m. Cuenta con 3 mástiles de fibra de carbono, siendo el mayor de 90 m de altura y albergando 3 grandes velas bermudianas con una superficie de 3700 m^2, capacitándole para una navegación 100% eólica.

Este ambicioso proyecto demuestra que la navegación a vela tradicional en grandes barcos es posible, pero a un precio muy elevado pues este barco costó entre 400 y 500 millones de euros. Además, la altura y calado alcanzados (el SY “A” tiene un calado 8 m) limitarían varias rutas dentro del transporte marítimo, haciendo el uso de la vela tradicional para este sector poco admisible por ahora.

Figuras 10: Super Yacht A navegando con las 3 velas desplegadas

Fuente: MarineTraffic.com/Sailing_Yacht_A/

Una opción más adecuada dentro de la vela tradicional para generar propulsión en un buque mercante, y el cuál lleva en uso desde 2008, es el uso de cometas, una vela de tipo parapente amarrada al extremo de un cable que tira de la embarcación desde un punto de amarre en la proa. Su principal característica es que puede volar entre los 100 y 400 metros de altura donde la fuerza del viento es mayor y sin la necesidad de instalar mástiles sobre la cubierta. Además, los costes de instalación son bajos y su control esta automatizado para maximizar su eficiencia al vuelo. Las principales desventajas que presenta son que no puede navegar en rumbos contra la dirección del viento, es decir, no puede bajar del ángulo de 90º de entrada, no se puede navegar con vientos de muy baja velocidad ni en zonas de alto tráfico marítimo por la dificultad que presenta el cambio de rumbo con la cometa en el aire.

El primer buque en instalar este sistema fue BBC Skysails, un buque de carga general de 132 m de eslora y con capacidad para más de 200 contenedores construido en 2008 en los astilleros Volharding (Holanda) para la compañía Beluga Group, el cual inauguró ese mismo año la primera navegación con una cometa automatizada de 160 m^2, propiedad de la compañía Skysails, registrando una reducción de consumo del 10% de combustible. Actualmente se han instalado cometas de alrededor de 4000 m^2, llegando a registrar en condiciones óptimas de viento reducciones del 50% de combustible.

3.2.2 Velas rígidas

A finales del siglo XX, a raíz de una competición de catamaranes de la Clase Internacional C, surge una nueva evolución dentro de la navegación eólica conocido como vela rígida que se aleja de la técnica convencional. Estas velas, a diferencia de las tradicionales, tienen un perfil invariante, es decir, tienen una forma predeterminada con independencia del viento. Asemejadas a las alas de un avión tanto en forma como en funcionamiento, las velas rígidas generan, mediante el efecto de Bernoulli y en función del ángulo de ataque al viento, una sustentación y una resistencia. La suma vectorial de estas dos fuerzas generadas da como resultado la dirección de la fuerza de avance real. A pesar del adjetivo “rígidas” realmente no lo son pues rotan sobre un eje para variar el ángulo de ataque en función de la posición del buque y la dirección del viento, para así generar la máxima fuerza de empuje en la dirección deseada.

Este nuevo diseño llamó mucho la atención debido a su gran potencial, y varios ingenieros y empresas empezaron a estudiar su aplicación en otros sectores de la navegación marítima, como el transporte marítimo. Sin embargo, no es hasta hace escasos años que se toman en serio estos estudios y empiezan a surgir proyectos formales de tecnologías de velas rígidas aplicadas a grandes buques mercantes, como es el caso de la empresa Michelin.

La conocida empresa francesa especializada en la producción de neumáticos, Michelin, se ha unido al desarrollo de tecnologías derivadas del viento para su aplicación en grandes buques mercantes, presentando durante el evento Movin' On el proyecto WISAMO (Wing Sail Movility), el cual consiste en un sistema de vela rígida automatizado inflable, es decir, utiliza compresores de aire para inflar y desinflar el material elástico del cual están compuestas las velas. Fue presentado a principios de 2021 y su objetivo es tener para finales de 2022 la primera instalación en un buque mercante, estudiando su practicidad para en un futuro cercano iniciar una producción en cadena.

3.2.3 Sistemas especiales

En este apartado desarrollaremos aquellos sistemas menos estudiados, pero con gran potencial que no funcionan por el mismo principio aerodinámico que los sistemas mencionados anteriormente (efecto Bernoulli) sino por otro principio conocido como efecto Magnus.

El efecto Magnus es un fenómeno aerodinámico que consiste en la creación de un flujo rotacional aprovechando la adherencia que experimenta un fluido cuando un objeto rota, generando una diferencia de presiones y, por consiguiente, una fuerza de sustentación. Dentro de los sistemas de propulsión que utilizan este efecto encontramos las Turbovelas y la e-SAIL de la empresa Bound4blue.

- Turbovela: el primer diseño, conocido como rotor Flettner, consistía en un cilindro rotatorio el cual al efectuar el giro generaba el efecto Magnus produciendo una fuerza de sustentación. Fue presentado por el alemán Anton Flettner en la década de 1920, transformando el velero trimástil llamado Buckau en un navío birrotor e instalando un pequeño motor auxiliar Diésel en casos de ausencia de viento. Con este proyecto Flettner demostró que su sistema de impulso a través del efecto Magnus es posible, cruzando en 1926 el océano Atlántico únicamente con la propulsión de los rotores.

El diseño se abandonó en los años 30 ante la mayor rentabilidad de los motores de combustión, siendo retomado en 1980 por el investigador francés Jacques Cousteau, el cual inspirándose en el rotor Flettner, creó la turbovela, un sistema que no utiliza exactamente el efecto Magnus ya que no recurre a un cilindro girando. La sección de este sistema no es cilíndrica, como la del rotor

Flettner, sino ovoidal y posee añadido un batiente vertical que corre paralelo al cilindro y está colocado de un modo saliente. Tal batiente es llamado vela, y para facilitar la separación del viento entre el intradós y el extradós, se le orienta según la dirección del viento. El cilindro, por su parte, posee una turbina que permite crear una disminución importante de la presión del aire en el costado hacia el cual se desea dirigir la fuerza de empuje (la cual resulta perpendicular al conjunto turbovela), impulsando así al navío. (**Wikipedia. 2022.**).

La empresa Bound4blue posee un sistema muy similar a la turbovela, llamado sistema eSAIL, cuyo funcionamiento se detalla a continuación:

- eSAIL (**Bound4Blue. 2023.**): sistema de propulsión que se basa en el control activo de la capa limite mediante succión.

Al exponerse al viento, con la succión desactivada, solo produce resistencia, al igual que cualquier otra estructura que no genera sustentación. Sin embargo, cuando la succión está activada, se aspira una pequeña cantidad de aire que se adhiere al flujo de aire de la vela, generando enormes cantidades de sustentación con baja resistencia.

La eSAIL produce entre seis y siete veces más sustentación que una vela convencional, con un consumo de potencia mínimo y sin ninguna complejidad mecánica (sin cargas inerciales, vibraciones, movimiento constante, etc.), lo que garantiza un funcionamiento sencillo y fiable.

3.2.4 Aerogeneradores

Los aerogeneradores se dividen en dos grandes grupos dependiendo de la dirección del eje generador, pudiendo este ser vertical u horizontal. Los aerogeneradores de eje horizontal son los más comunes, destacando de entre todos los modelos el de 3 palas, siendo utilizados sobre todo en parques eólicos terrestres y marinos para la generación de energía eléctrica. Se caracterizan por tener una gran altura de buje (pieza a la que se unen las palas), el eje de giro paralelo al suelo y un mecanismo de rotor que orienta el aerogenerador hacia la dirección del viento. A pesar de ser más eficientes, debido a su diseño y su movimiento rotativo su instalación en buques mercantes es poco práctica, siendo los de eje vertical una opción más plausible.

En los aerogeneradores de eje vertical su eje de giro es perpendicular al suelo, un movimiento que genera menos inestabilidades en el buque no necesita de un rotor de orientación a la dirección del viento, siendo una gran ventaja pues durante la navegación los cambios de dirección del viento son más frecuentes que en tierra, y no necesitan de gran altura para generar potencia, reduciendo así su calado aéreo. Dentro de este grupo existen varios tipos de aerogeneradores, siendo los primeros diseños las turbinas tipo Savonius, Darrieus y Giromill, presentando ciertos problemas de variación del par o "ondulación" durante cada revolución además de grandes momentos de flexión de las palas. Los modelos posteriores corrigen estos problemas barriendo las palas helicoidalmente, siendo el diseño más aceptado el tipo Gorlov.

La aplicación de esta tecnología en un buque sería para la generación de energía eléctrica para apoyar los sistemas auxiliares o la propia propulsión del buque si esta fuera mediante motor eléctrico.

4 METODOLOGÍA

Una vez planteado el problema y contextualizadas las tecnologías que se pretenden implantar en el buque Catherine, estableceremos la metodología que se llevará a cabo para desarrollar el cuerpo del trabajo. Se compondrá de las siguientes partes:

- Información general del buque: primero expondremos la información relevante del buque Catherine para llevar a cabo el estudio, siendo esta, una tabla de contenido con información sobre las dimensiones, calado, arqueos, desplazamiento y TPM, la maquinaria de propulsión y generación eléctrica, velocidad y consumos, y capacidad de los tanques.

- Estudio económico, de consumo y emisiones: seguido, realizaremos un estudio de gastos, consumo y las emisiones de los sistemas a instalar en el buque, primero de forma independiente y luego de forma combinada. Para ello estableceremos primero una ruta de navegación con los datos referentes a esta, y realizaremos el estudio previo del buque con la maquinaria y sistemas actuales, sobre el cual se desarrollarán los estudios de los nuevos sistemas.

- Análisis de resultados: Finalmente, analizaremos los resultados obtenidos en los estudios elaborando primero tablas comparativas donde se recogerán los resultados, y después haciendo los análisis en función de factores económicos, medioambientales, sociopolíticos y legislativos, hasta finalmente realizar un análisis conclusivo donde se determinará el sistema o conjunto de sistemas más favorables.

5 BUQUE CATHERINE

5.1 INFORMACIÓN GENERAL

El buque Catherine, registrado en el puerto de Valletta en noviembre del 2002 y bajo la bandera de Malta, es un buque Ro/RO además de carga general. En la siguiente tabla se detallan sus principales características.

Tabla 1: información principal del buque Catherine

Arqueo bruto	21.369	LBP	170,96 m
Arqueo neto	6.411	Manga	25,8 m
Desplazamiento	9.188 t	Calado (diseño)	7,40 m
TPM	13.320 t	Calado (verano)	7,80 m
Eslora total	182,2 m		

Fuente: propia del alumno

5.2 ESPECIFICACIONES

5.2.1 Maquinaria

A continuación, se detalla información referente a la maquinaria presente en el buque para la propulsión, generación de electricidad y maniobra:

- Potencia total: 12.600 kW NR (Nominal Rating).
- Motor principal: Wartsila 12V46C.
- Propulsión: 1 x CPP.
- Instalación eléctrica: 2 x motores auxiliares – 1.000 kW NR cada uno.
  1 x generador de emergencia – 500 Kw NR.
  1 x generador de eje – 2.000 kW.
- Equipos de maniobra: 2 x CP hélices de proa – 700 kW cada uno.
  1 x hélices de popa – 700 kW.

5.2.2 Velocidad y consumos

A continuación, se detalla información referente a la velocidad de crucero y consumos en servicio y en puerto:

- Velocidad de crucero: 17 nudos a NCR (Nominal Continuous Rating)
- Consumo a NCR: 52,5 t/día.
  - Combustible: ULSFO/ VLSFO
- Consumo en puerto: 4,26 t/día con equipamiento auxiliar a pleno funcionamiento
  - Combustible: ULSFO

5.2.3 Capacidad tanques

A continuación, se detalla la información a las capacidades, en volumen, de los tanques de agua de lastre, agua dulce y combustible:

- Agua de lastre: 7.830 m^3
- Agua dulce: 199 m^3
- VLSFO: 1.035 m^3
- ULSFO: 297,7 m^3

6 ESTUDIO ECONÓMICO, DE CONSUMO Y EMISIONES

A continuación, comenzaremos con el estudio económico, de consumo y emisiones de los diferentes sistemas desarrollados anteriormente y aplicados al buque Catherine, determinando qué combinación es la más rentable reduciendo al mínimo las emisiones. Para ello asentaremos una serie de condiciones y estimaciones básicas con el fin de simplificar los cálculos y análisis de resultados obtenidos. Estas son:

- Ruta de transporte Rotterdam-Singapur (**Vesselfinder. 2023**)
    - Distancia total: 8.399 millas náuticas.
    - Distancia ECA: 403 millas náuticas.
    - Duración estimada: 20 días 14 horas.
- El buque se encontrará con desplazamiento en máxima carga.
- Condiciones de navegación:
    - Velocidad de navegación: 17 nudos.
    - Velocidad media viento: 17,5 nudos.
    - La resistencia por olas y viento no afectarán al consumo.
- Consumo medio por día: 52,5 t/día.
- Precio medio combustible: (fecha datos: 25/8/2022) (**2023. Ship and bunker**)
    - VLSFO: 900 $/tm
    - ULSFO: 1.200 $/tm

6.1 PROPULSIÓN PRESENTE

Para empezar, estudiaremos el consumo y las emisiones del buque para las condiciones mencionadas en el apartado anterior sin ninguna modificación, es decir, con los sistemas que tiene actualmente.

El buque al partir de Rotterdam navega 403 millas náuticas por zona ECA, área donde las emisiones de óxido de azufre están muy restringidas no permitiendo superar la presencia de azufre en el combustible en 0,1%. Para ello, tendrá que navegar haciendo uso de ULSFO. Con esto, podemos determinar:

- Tiempo de navegación por zona ECA:

$$T = \frac{distancia}{velocidad} = \frac{403}{17} = 23{,}7\ horas \approx 1\ día$$

- Consumo de combustible (ULSFO):

$$Consumo\ = consumo\ medio\ por\ día * tiempo = 52{,}5 * 1 = 52{,}5\ toneladas$$

- Gastos de navegación por zona ECA:

$$G = consumo\ por\ día * precio\ de\ combustible = 52{,}5 * 1.200 = 63.000\ \$$$

Tras abandonar la zona ECA ya puede navegar haciendo uso de VLSFO hasta llegar al puerto de Singapore. Con esto determinamos:

- Tiempo de navegación restante:

$$T = 20\ días\ 14\ h - 1\ día = 19\ días\ y\ 14\ h = 19{,}583\ días$$

- Consumo de combustible (VLSFO)

$$C\ = consumo\ por\ día * T = 52{,}5 * 19{,}583 = 1.028{,}1\ toneladas$$

- Gastos de navegación:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 1.028{,}1 * 900 = 925.296{,}75\ \$$$

- Consumo total combustible

$$Ct = 1.028{,}1 + 52{,}5 = 1.080{,}6\ toneladas$$

El buque tiene capacidad para 931,5 toneladas de HFO, por lo que para esta ruta tendría que hacer una para para repostar combustible.

- Gastos totales

$$Gt = 925.296{,}75 + 63.000 = 988.296{,}75\ \$$$

Las emisiones de CO2, metano, N2O y NOx son muy similares para los dos combustibles, por lo que se calcularán en conjunto.

Emisiones:

- Emisiones t/t fuel (HFO): (Anexo 2, Anexo 3)

$$CO_2 \rightarrow 3{,}188\ t/t\ fuel$$

$$CH_4 \rightarrow 0{,}00006\ t/t\ fuel$$

$$N_2O \rightarrow 0{,}00017\ t/t\ fuel$$

$$NO_x \rightarrow 0{,}0437\ t/t\ fuel$$

- Emisiones totales navegación:

$$Emisiones\ CO_2 = 3{,}188 * 1.080{,}6 = 3.444{,}95\ toneladas$$

$$Emisiones\ CH_4 = 0{,}00006 * 1.080{,}6 = 0{,}0648\ toneladas$$

$$Emisiones\ N_2O = 0{,}00017 * 1.080{,}6 = 0{,}1837\ toneladas$$

$$Emisiones\ NO_x = 0{,}0437 * 1.080{,}6 = 47{,}222\ toneladas$$

6.2 SISTEMAS POR SEPARADO

En este apartado estudiaremos el consumo, las emisiones y los gastos asociados para cada sistema por separado y lo compararemos con el estudio del apartado anterior.

6.2.1 Cometa Skysails

Para este estudio instalaremos una cometa de 320 m^2 de Skysails, de precio estimado según un artículo publicado en la página de la comisión europea (**European Comission. 2021**) de 1 millón de $ con una reducción de consumo medio del 10% para buques de tamaño parecido al buque Catherine. Esto quiere decir que, para la ruta seleccionada, el consumo, gastos asociados y emisiones, calculados en el apartado 4.1, se reducen en un 10%, quedando:

- Consumo total combustible

$$Ct = 1.080{,}6 * 0{,}9 = 972{,}54\ toneladas$$

A pesar de la reducción de consumo, el buque sigue necesitando realizar una parada para repostar combustible.

- Gastos totales

$$Gt = 988.296{,}75 * 0{,}9 = 889.467{,}075\ \$$$

- Emisiones totales navegación:

$$Emisiones\ CO_2 = 3{,}188 * 972{,}54 = 3100{,}45\ toneladas$$

$$Emisiones\ CH_4 = 0{,}00006 * 972{,}54 = 0{,}0583\ toneladas$$

$$Emisiones\ N_2O = 0{,}00017 * 972{,}54 = 0{,}1653\ toneladas$$

$$Emisiones\ NO_x = 0{,}0437 * 972{,}54 = 42{,}5\ toneladas$$

6.2.2 Aerogenerador

Un aerogenerador instalado en el buque Catherine serviría para apoyar a la maquinaria auxiliar de generación eléctrica. Debido a esto, para este apartado, determinaremos en primer lugar los consumos, gastos y emisiones de la maquinaria auxiliar a pleno funcionamiento para acto seguido realizar el estudio correspondiente a la instalación de un rotor-generador de eje vertical.

Suponiendo la maquinaria auxiliar a pleno funcionamiento durante toda la navegación:

- Consumo de combustible (ULSFO):

$$C = consumo\ por\ día * T = 4{,}26 * 20{,}583 = 87{,}68\ toneladas$$

La máxima cantidad de ULSFO que puede cargar el buque son 267,93 toneladas. Sumando el consumo de combustible navegando por zona ECA y el consumo de la maquinaria auxiliar, nos queda un consumo total de 140,18 toneladas, siendo no necesario el repostaje.

- Gastos asociados:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 87{,}68 * 1.200 = 105.216\ \$$$

- Emisiones generación eléctrica:

$$Emisiones\ CO_2 = 3{,}188 * 87{,}68 = 279{,}52\ toneladas$$

$$Emisiones\ CH_4 = 0{,}00006 * 87{,}68 = 0{,}00526\ toneladas$$

$$Emisiones\ N_2O = 0{,}00017 * 87{,}68 = 0{,}0149\ toneladas$$

$$Emisiones\ NO_x = 0{,}0437 * 87{,}68 = 3{,}831\ toneladas$$

A continuación, procedemos a realizar el estudio correspondiente a la instalación de un aerogenerador. Para ello instalaremos el Exawind-750kW, un aerogenerador de eje vertical patentado por la empresa Bastan Technologies SL, cuyas especificaciones se detallan a continuación:

Figura 11: tabla de especificaciones del aerogenerador EXAWIND-750kW

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS AEROGENERADORES EXAWIND	
MODELO	**EXAWIND-750**
Diámetro turbina	35 m.
Altura máxima	34 - 40 m. según zonas
Potencia	750 kW
FUNCIONAMIENTO	
Velocidad arranque de viento	4,2 m/s
Potencia nominal	750 kW.
Alcance de potencia nominal a	19 m/s
Velocidad de corte de viento	45 m/s
Rango de temperatura	-40º C a +50º C
TURBINA	
Área de barrido	3.625 m^3
Nº de brazos	Seis
Nº de velas por brazo	2 + 1
Altura de las velas	12 m.
Nivel sonoro máximo	44 dB
Vibraciones	No se conocen
GENERADOR	
Tipo	Generador Asíncrono imanes permanentes
Voltaje nominal	690 v. trifásico
TRANSMISIÓN DE POTENCIA	
Posición componentes	Montaje del generador eléctrico y electrónica en la base de la torre
Transmisión	Corona dentada y engranajes con eje de transmisión a la base y multiplicador
Respuesta a cambio de orientación de viento	Instantánea por sistema electro-mecánico
Sistema de frenado	Variación automática de cambio ángulo de ataque velas y freno
TORRE	
Altura torre hasta turbina	20 m.
Diámetro	4 m.
Material	Acero
Longitud de tramo	10 m.

Fuente: bastan.es/producto/aerogenerador-exawind-750-kw/

El peso del sistema no se refleja en la ficha técnica proporcionada por la compañía, pero con las dimensiones y el material del cual está principalmente compuesto podemos estimarlo.

Un dato que nos haría falta para una estimación certera sería el diámetro del cilindro hueco del interior de la torre, pues es de suponer que la torre no es un cilindro macizo. Para los cálculos estimamos un diámetro hueco interior de 3,9 metros, quedando un grosor de 0,05 metros. Con estos datos y la densidad media del acero al carbono, 7850 kg/m^3, determinamos:

$$Area\ torre = \pi * 2^2 - \pi * 1{,}95^2 = 0{,}62\ m^2$$

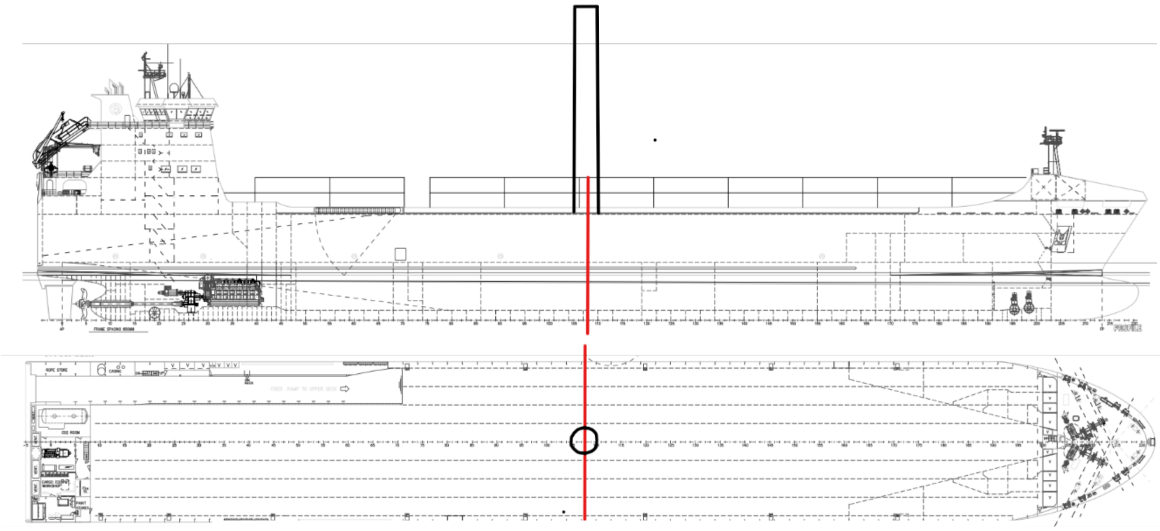
$$Volumen\ torre = AT * h = 0{,}62 * 34 = 21{,}1\ m^3$$

$$Peso\ torre = VT * densidad\ acero = 21{,}1 * 7850 = 165.602\ kg$$

El peso de la torre supone la mayoría del peso del sistema, al cual sumándole el generador, eje, la turbina y baterías para almacenar la energía podemos estimar un peso total de 220 toneladas.

Este peso supone una carga considerable al buque, por lo que se tendrá que determinar bien dónde ubicar el aerogenerador para no perjudicar la estabilidad. En este caso lo colocaremos cerca del centro de gravedad del buque, como se refleja en la Figura 12:

Figura 12: ubicación del aerogenerador sobre los planos de perfil y planta del Catherine



Fuente: depósito de planos de Hijos de J. Barreras

Esta configuración limita el espacio de carga en un radio de 3 metros (diámetro de la torre más un espacio de seguridad), además limita la cantidad de carga, pues al pesar alrededor de 220 toneladas, y pudiendo el buque cargar en condiciones normales 4132 toneladas, con el aerogenerador instalado podría cargar 3912 toneladas, lo cual supone una pérdida de 5,32% de cargamento.

En relación con el aporte energético, el aerogenerador tiene una potencia nominal de 750 kW el cual se alcanza con vientos de mínimo 19 m/s o 37 nudos. Según documento MEPC. 1 de IMO "*2021 guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EDDI and EEXI"* (Anexo 4) en la página 18 se encuentra un gráfico con las curvas de viento resultantes en las principales rutas marítimas mundiales en relación con el buque, reflejando que el viento más probable (14%) es de 7 m/s, teniendo el viento de velocidad cercana a 19 m/s una probabilidad muy baja cercana al 1%. Estimando durante la navegación una velocidad media de viento de 9 m/s o 17,5 nudos, podemos determinar que la potencia media suministrada por el aerogenerador es de 350-400 kW. Este aporte energético supone alrededor del 20% de la potencia total utilizada por la maquinaria auxiliar, reduciendo su consumo en la misma proporción, por lo tanto:

- Consumo de combustible (ULSFO):

$$C = 87{,}68 * 0{,}8 = 70{,}144 \; toneladas$$

- Gastos asociados:

  El precio medio del ULSFO actualmente es de 1200 $/tonelada

$$G = 105.216 * 0{,}8 = 84.172{,}8 \; \$$$

- Emisiones generación eléctrica:

$$Emisiones\; CO_2 = 3{,}188 * 70{,}144 = 223{,}61 \; toneladas$$

$$Emisiones\; CH_4 = 0{,}00006 * 70{,}144 = 0{,}0042 \; toneladas$$

$$Emisiones\; N_2O = 0{,}00017 * 70{,}144 = 0{,}0119 \; toneladas$$

$$Emisiones\; NO_x = 0{,}0437 * 70{,}144 = 3{,}065 \; toneladas$$

Con estos resultados podemos concluir que el aerogenerador no es un sistema rentable, debido al poco aporte energético comparado con sus dimensiones y la complejidad de instalación y funcionamiento, pues instalar un aerogenerador de 35 metros de diámetro de turbina posee unas implicaciones tales que requieren de un arduo trabajo ingenieril para poder llevarse a cabo. Por ende, queda descartado.

6.2.3 Turbovela

Los datos los cuales Bound4blue pone a disponibilidad para el público son limitados, por protección de intereses, por lo que este estudio se basará en los datos de los modelos presentados en la Figura 13 e información de artículos web refrentes a proyectos presentes y futuros, realizando una serie de estimaciones para llegar a un resultado final.

Figura 13: modelos de turbovela eSAIL ofertados por Bound4blue

MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3
Width: *2,85 m*	**Width:** *4,5 m*	**Width:** *6 m*
Variable height: *12-17 m*	**Variable height**: *18-26 m*	**Variable Height**: *24-36 m*
Automatic Control: *Yes*	**Automatic Control:** *Yes*	**Automatic Control:** *Yes*
Weight: *8-18 Tn*	**Weight:** *25-40 Tn*	**Weight:** *42-60 Tn*

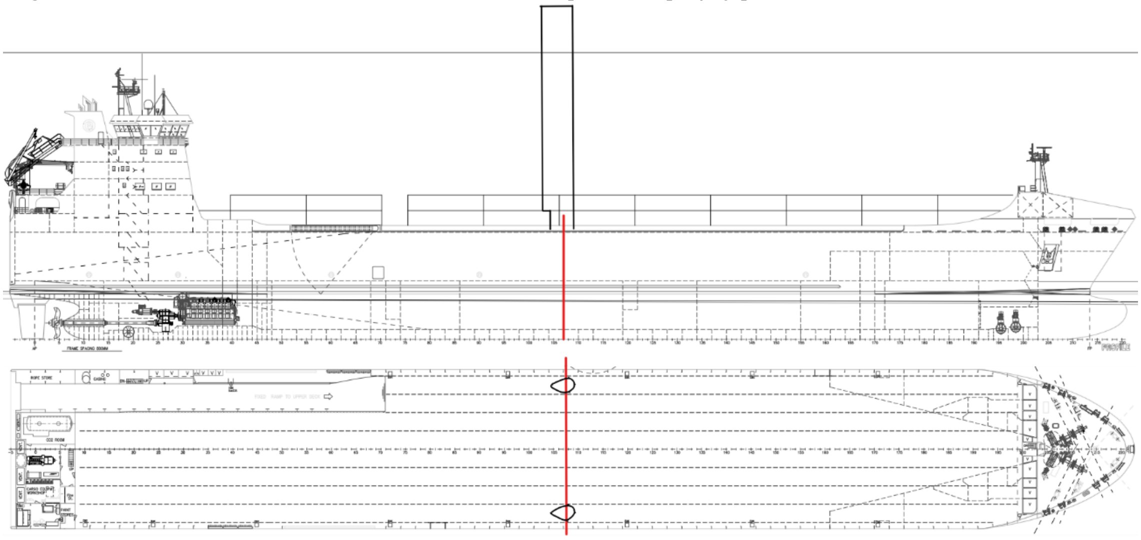
Fuente: Bound4blue

Según un artículo publicado por el Sector Marítimo (**Sector marítimo. 2022**), el EEMS Traveller, un buque de carga general de 91 metros de eslora y 2.850 tpm, pretende instalar 2 sistemas eSAIL Model 1 de 17 metros de altura con el que se espera reducir el consumo y emisiones hasta un 30% en rutas comerciales favorables.

El buque mercante reconvertido a buque teatro La Naumon, de 62 metros de eslora y 1.162 tpm, tiene instalado una eSAIL Model 2 de 18 metros, con el que espera reducir el consumo y emisiones en un 40%.

Con estos datos, y siendo el buque Catherine 11 veces mayor que La Naumon y 4 veces mayor que el EEMS Traveller, en términos de tmp, para estimar una reducción de consumo y emisiones cercanas al 30% de media, sería necesario instalar dos eSAIL Model 3 de 36 metros de altura y 60 toneladas de peso, el modelo de turbovela más grande ofertado por la empresa.

Figura 14: ubicación de las turbovelas Model 3 sobre los planos de perfil y planta del Catherine



Fuente: depósito de planos de Hijos de J. Barreras

Para no perjudicar la estabilidad del buque, las turbovelas se instalarán una a cada costado en el eje transversal que cruza el punto de gravedad, quedando como se representa en la Figura 14.

Al igual que el aerogenerador, esta disposición de las turbovelas limitan el espacio de carga en un radio de 4 metros cada una (ancho del dispositivo más una distancia de seguridad), además de la limitación de carga por peso pues el peso combinado de ambas estructuras es 120 toneladas, lo que supone una pérdida del 2,9% de cargamento.

Cabe destacar que las eSAILS tienen un consumo eléctrico para generar la succión que les permiten aumentar la sustentación, y la rotación para posicionarse en una dirección favorable en función de la dirección del viento. No se conoce el consumo de estos motores eléctricos, pero se estima más o menos en torno al 2% de la energía de sustentación producida.

Suponiendo una reducción del consumo y emisiones del 28%, podemos determinar a partir de los resultados obtenidos en el apartado 4.1:

- Consumo total combustible

$$Ct = 1.080{,}6 * 0{,}72 = 778\ toneladas$$

Con este consumo el buque ya no necesitaría parar para repostar.

- Gastos totales

$$Gt = 988.296,75 * 0,72 = 711.573,66\ \$$$

- Emisiones totales navegación:

$$Emisiones\ CO_2 = 3,188 * 778 = 2.480,26\ toneladas$$

$$Emisiones\ CH_4 = 0,00006 * 778 = 0,0467\ toneladas$$

$$Emisiones\ N_2O = 0,00017 * 778 = 0,1323\ toneladas$$

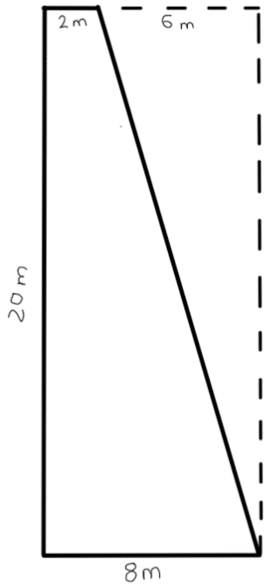
$$Emisiones\ NO_x = 0,0437 * 778 = 33,9986\ toneladas$$

6.2.4 Vela rígida

Para este estudio instalaremos velas rígidas del proyecto WISAMO de Michelín. Actualmente el proyecto es muy reciente y no se conoce muchos datos de este, además de que las primeras pruebas de este sistema en condiciones reales se llevarán a cabo a finales de este año en el buque mercante MN Pélican, un buque de 155 metros de eslora sobre el cual se pretende instalar una vela WISAMO de una superficie vélica de 100 m^2. Con estos datos, y con las imágenes renderizadas de las velas, podemos estimar sus dimensiones:

Figura 15,16: render de la vela WISAMO (izquierda), dimensiones estimadas para 100 m² de superficie(derecha)

Fuente: Michelin.com/Wisamo/

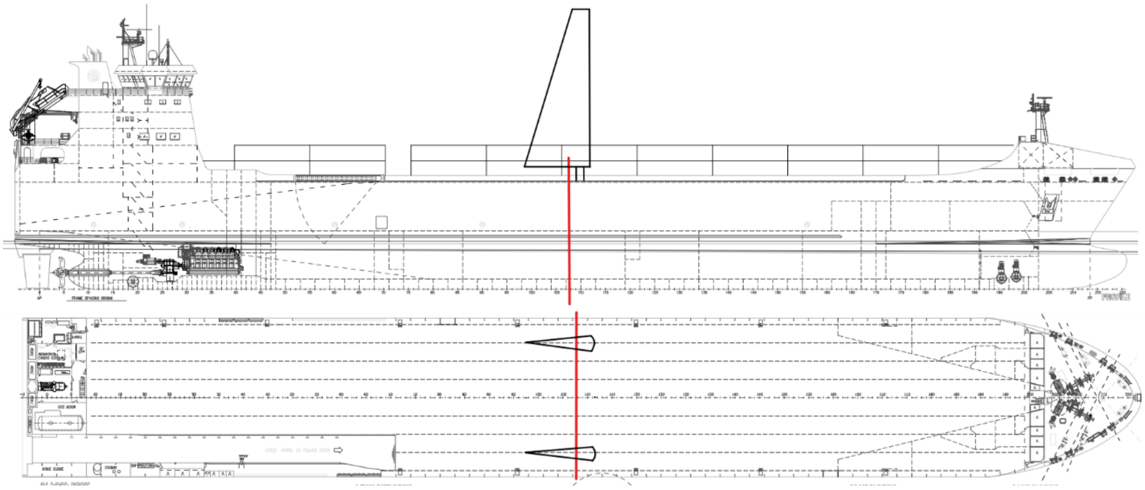


Fuente: propia del alumno

Estimando una longitud de botavara de 8 metros, una altura del mástil de 20 metros y una longitud superior de 2 metros, la superficie resultante son 100 m^2. Estas dimensiones en un buque del tamaño del MN Pélican no tendrán mucho efecto de propulsión, siendo meramente un proyecto de estudio para en el caso de obtener resultados favorables empezar proyectos de velas de mayor superficie.

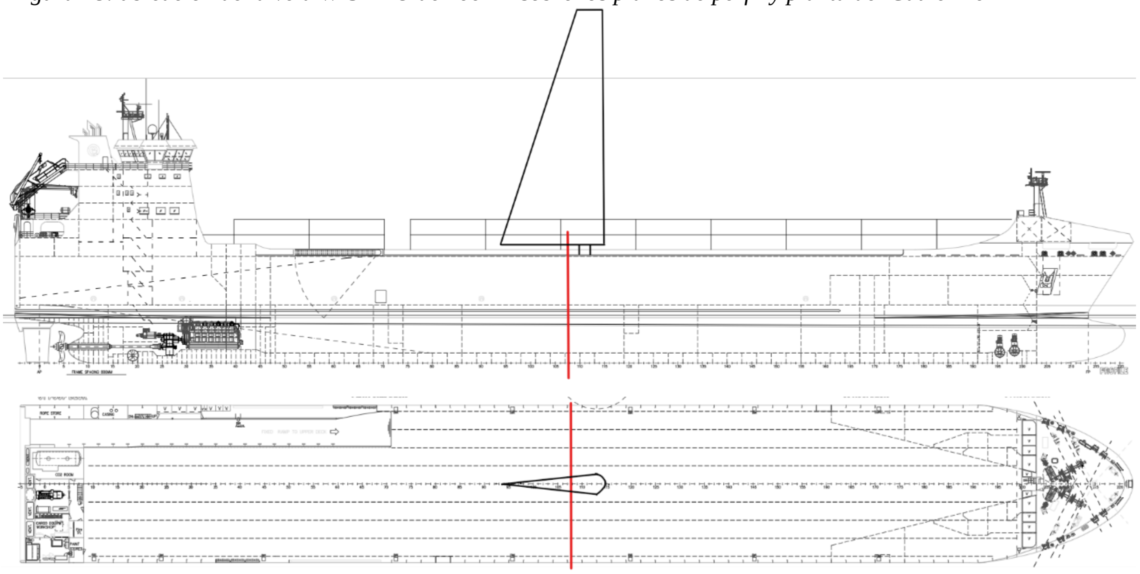
En numerosos artículos web, como el publicado por Juan Carlos Diaz Lorenzo en "*Puente de mando*" (**Lorenzo, Juan Carlos Díaz. 2022.**), Michelín asegura poder mejorar el consumo de combustible hasta en un 20% con velas adaptadas en función al tipo de buque, la ruta y las condiciones de navegación. Con esto podemos valorar que velas rígidas de dimensiones similares a las turbovelas que emplean succión, generan menos sustentación y por tanto menos ahorro de combustible. A partir de esto, para considerar una reducción del 20% del consumo de combustible de nuestro buque, necesitaríamos instalar dos velas WISAMO de superficies similares a las eSAIL del apartado anterior, las cuales tienen, cada una, una superficie aproximada de 200 m^2 o, en su defecto, instalar una vela de 400 m^2. En el caso de instalar dos, las dimensiones serían de 29 metros de mástil, 11 metros de botavara y 3 metros de longitud superior[1]. En el caso de instalar una vela, las dimensiones respecto a la vela de 100 m^2 se doblarían, quedando un mástil de 40 metros, una botavara de 16 metros y 4 metros de longitud superior.

Figura 17: ubicación de las velas WISAMO de 200 m^2 sobre los planos de perfil y planta del Catherine



Fuente: depósito de planos de Hijos de J. Barreras

Figura 18: ubicación de la vela WISAMO de 400 m^2 sobre los planos de perfil y planta del Catherine

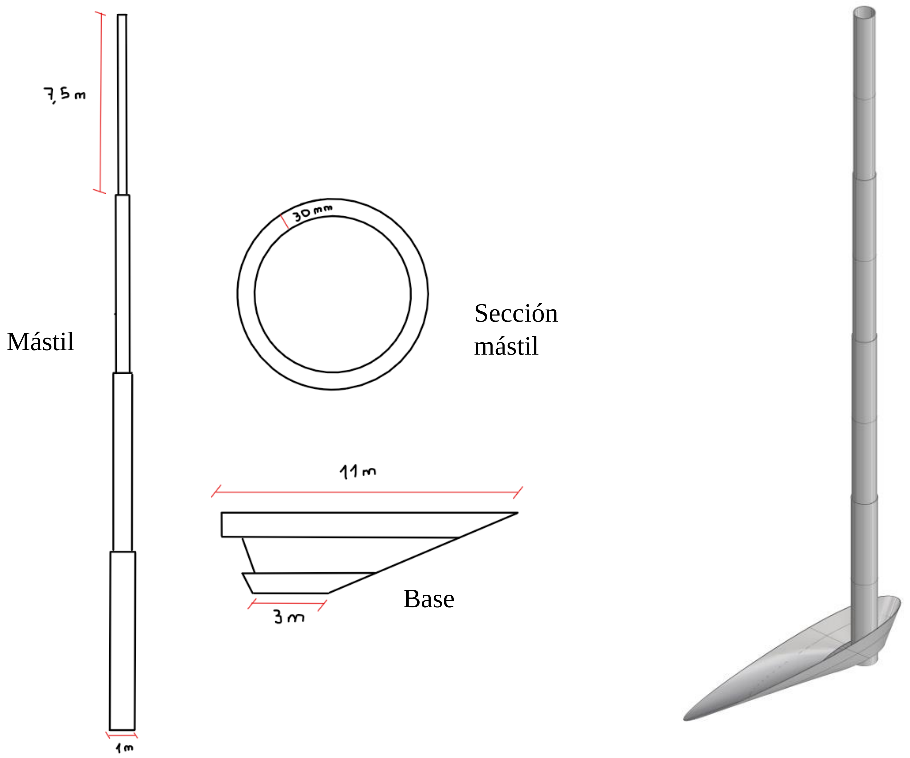


Fuente: depósito de planos de Hijos de J. Barreras

[1] Estas dimensiones dan como resultado una superficie de 203 m^2, sin embargo, se ha realizado así para tener unas dimensiones de números redondos.

Para determinar el peso de cada uno de los sistemas, calcularemos el peso de los componentes por separado. El mástil, al ser retráctil, deberá tener cambios de sección a lo largo de su longitud. Para las velas de 29 m se ha dividido el mástil en 4 partes con un espesor de 30 mm. En la Figura 19,20, se detallan las dimensiones propuestas de los diferentes componentes:

Figuras 19,20: componentes de la vela con sus dimensiones (Izquierda), render del sistema completo (derecha). Ambos son en referencia al sistema de 200 m^{2}de superficie



Fuente: propia del alumno

Con esto podemos calcular:

- Mástil:

$$Volumen\ sección\ 1 = (\pi * 0,5^2 - \pi * 0{,}47^2) * 7{,}25 = 0{,}662\ m^3$$

$$Volumen\ sección\ 2 = (\pi * 0,47^2 - \pi * 0,44^2) * 7{,}25 = 0{,}621\ m^3$$

$$Volumen\ sección\ 3 = (\pi * 0,44^2 - \pi * 0,41^2) * 7{,}25 = 0{,}58\ m^3$$

$$Volumen\ sección\ 4 = (\pi * 0,41^2 - \pi * 0,38^2) * 7{,}25 = 0{,}539\ m^3$$

$$\sum volumen = 1{,}081 + 0{,}968 + 0{,}854 + 0{,}74 = 2{,}405\ m^3$$

Suponiendo que es de aluminio (d=2.700 kg/m^3):

$$Peso\ mástil = 2{,}405 * 2.700 = 6493{,}5\ kg \approx 6{,}5\ toneladas$$

- Lona hinchable:

La lona hinchable desconocemos de que material será, pero podemos suponer una fibra sintética sostenible de prestaciones similares al pvc, por tanto, tomaremos los datos de este tipo de tejidos. La superficie de la lona extendida se puede estimar en 400 m^2, y el peso por metro cuadrado de algodón recubierto de pvc es 550 gr/m^2, quedando:

$$Peso\ lona = 0{,}55 * 400 = 220\ kg$$

La vela tiene un volumen de 27,63 m^3, y el aire a 15ºC y a presión atmosférica tiene una densidad de 1,225 kg/m^3, por lo tanto:

$$Peso\ aire = 1{,}225 * 27{,}63 = 33{,}85\ kg$$

El peso total de la lona hinchable es:

$$Peso\ total: 220 + 33{,}85 = 253{,}85\ kg$$

- Base:

El volumen de la base se ha aproximado a través del software de Rhino 7, dando como resultado 0,88 m^3, el cual suponiendo que es de aluminio da:

$$Peso\ base = 0{,}88 * 2.700 = 2.376\ kg \approx 2{,}4\ toneladas$$

Sumando el peso obtenido de los componentes:

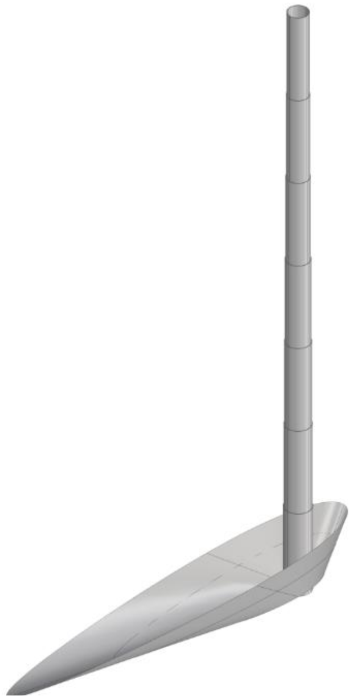
$$\sum componentes = 6{,}5 + 2{,}4 + 0{,}25 = 9{,}15\ toneladas$$

Añadiendo a este último resultado el peso del motor eléctrico encargado de hinchar la vela y rotar el mástil, y demás sistemas de fijación, podemos aproximar el peso total del sistema alrededor de las 10 toneladas.

Por ende, al instalar dos sistemas de este tamaño, el peso total será de 20 toneladas, lo cual significa reducir al 0,48 % la carga máxima que se puede transportar, además de la limitación del espacio que sería de un semicírculo de 12 metros de radio hacía la popa, y un semicírculo de 1 metros de radio hacia la proa (debido a la longitud de la botavara, un margen de seguridad y a que la vela rota en un ángulo de 180º).

En el caso de instalar un solo sistema de 400 m^2 de superficie (40 metros de altura de mástil, 0,75 metros de radio, 16 metros de botavara, 4 metros de distancia superior y 30 mm de espesor), se dividiría el mástil en 8 secciones de 5 metros cada una, tal y como se representa en la Figura 21:

Figura 21: render del sistema de 400 m^2de superficie



Fuente: propia del alumno

Al ser el doble de superficie que los sistemas anteriores, se puede suponer que el peso se duplica, siendo 20 toneladas. Calculando a través del software de Rhino 7 el peso del sistema da como resultado 18.578 kg, lo cual, sumando el peso del motor eléctrico, la lona hinchable y fijaciones, podemos aproximarlo a 20 toneladas.

En consecuencia, el límite de peso que se puede transportar también se reduce en un 0,48%, y el límite de espacio de carga sería un semicírculo de radio 17 metros a popa y un semicírculo de 1 metros a proa.

Referente al estudio de consumo y emisiones, este sistema también tiene un consumo eléctrico para hinchar las velas y rotarlas. Sin embargo, haremos el estudio con las velas ya hinchadas, por lo que clasificaremos este consumo como despreciable, quedando entonces en una reducción estimada del 20%:

- Consumo total combustible

$$Ct = 1.080{,}6 * 0{,}80 = 864{,}48\ toneladas$$

Con este consumo el buque ya no necesitaría parar para repostar.

- Gastos totales

$$Gt = 988.296{,}75 * 0{,}80 = 790.637{,}4\ \$$$

- Emisiones totales navegación:

$$Emisiones\ CO_2 = 3{,}188 * 864{,}48 = 2.766{,}96\ toneladas$$

$$Emisiones\ CH_4 = 0{,}00006 * 864{,}48 = 0{,}05186\ toneladas$$

$$Emisiones\ N_2O = 0{,}00017 * 864{,}48 = 0{,}1469\ toneladas$$

$$Emisiones\ NO_x = 0{,}0437 * 864{,}48 = 37{,}7777\ toneladas$$

6.2.5 Motor por pila de hidrógeno

A pesar de poder utilizar el hidrogeno en un proceso de combustión, su rendimiento es bajo, igual o menor que un motor de combustión de combustible fósil, alrededor del 35 %. Además, libera NOx durante el proceso debido a las temperaturas alcanzadas. Por ende, para este trabajo desarrollaremos el motor por pila de combustible de hidrógeno, ya que su rendimiento es mayor, cercano al 60%, y no genera residuos contaminantes.

El objetivo de este motor sería sustituir al Wartsila 12V46C, maquinaria que utiliza actualmente el buque para la propulsión. Para ello se tendría que instalar:

- Batería de 113 kW/h 311V
- Celdas de combustible (donde las reacciones se llevan a cabo)
- Tanques de almacenamiento de hidrógeno a 700 bar
- Motor eléctrico de 12.600 kW

En conjunto, el motor por pila de hidrógeno ocuparía menos espacio que el Wartsila 12V46C y pesaría menos (El Wartsila 12V46C pesa 177 toneladas mientras que el motor por pila de hidrógeno no superaría las 100 toneladas).

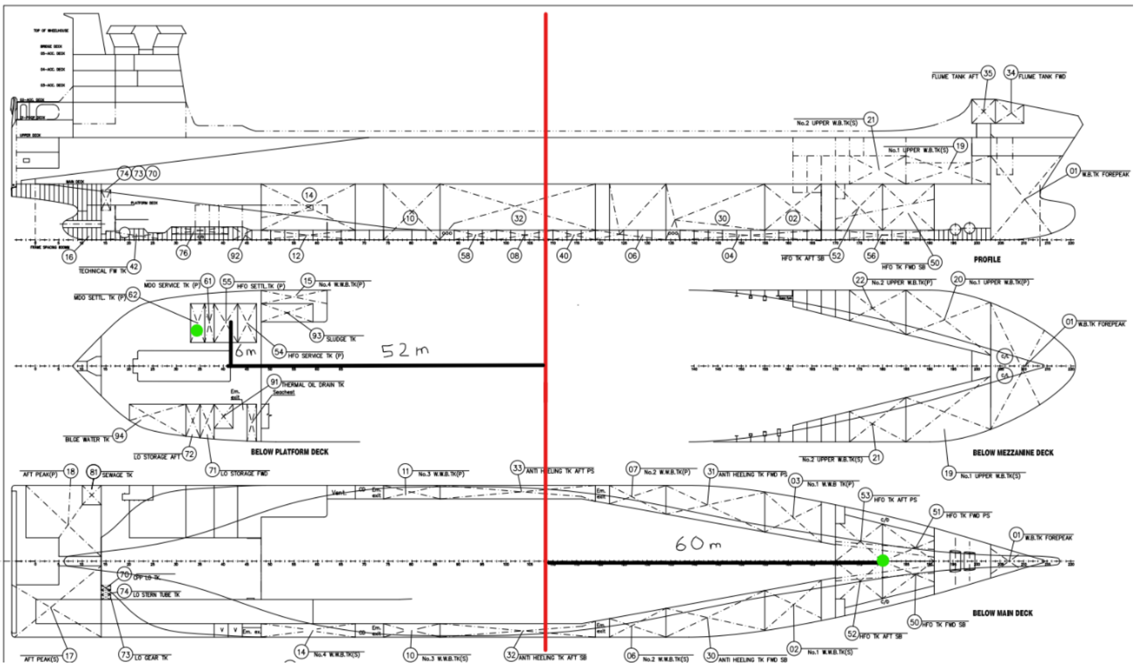
El cambio de maquinaria afectaría a la estabilidad del buque por pérdida de peso.

En proa, como se muestra en la Figura 22 a 60 metros del centro de gravedad, se ubican 4 tanques de HFO, 2 a babor y 2 a estribor, de 903 m^3 en total, llegando a pesar en máxima capacidad 812,7 toneladas. Utilizando los mismos tanques para almacenar hidrógeno a 700 bar, estos a máxima capacidad sumarían un peso de 35,6 toneladas, generando una pérdida de 777 toneladas.

En popa, a 52 metros del centro de gravedad y a 6 metros a babor de la línea de crujía, se ubican el tanque de asentamiento y el tanque de servicio de HFO. Estos 2 tanques suman una capacidad de 132,2 m^3, que a máxima carga de HFO pesan 118,98 toneladas. Si se llenaran de hidrogeno a 700 bar pesarían 5,2 toneladas, suponiendo una pérdida de peso de 113,78 toneladas, el cual añadido a la pérdida de peso por cambio de motor se quedaría en una pérdida de alrededor de 190 toneladas.

Los puntos verdes representan el centro de aplicación del peso en proa y popa.

Figura 22: ubicación de los tanques de HFO respecto del centro de gravedad y la línea de crujía. Los puntos verdes representan los puntos de pérdida de peso



Fuente: depósito de planos de Hijos de J. Barreras

Para compensar estás perdidas de peso, más notable en proa, se puede compensar con agua de lastre o añadiendo más carga en proa para mantener la estabilidad del buque.

En relación con el consumo, gastos y emisiones asociados al motor de pila de hidrógeno, se estima que dicho sistema tendría un consumo de 5,33 toneladas por día (cálculos en el Anexo 1). Con esto determinamos:

- Consumo de combustible:

$$C = consumo\ por\ día * T = 5{,}33 * 20{,}583 = 109{,}7\ toneladas$$

El buque sería capaz de almacenar un total de 40,8 toneladas de hidrógeno a 700 bar, por lo que para completar la ruta tendría que hacer 2 paradas para repostar.

- Gastos de navegación:
  El precio medio de Hidrógeno actualmente es de 8.000 $/tonelada

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 109{,}7 * 8.000 = 877.600\ \$$$

La propulsión por motor de pila de hidrógeno no genera emisiones de ningún tipo, además el producto de la reacción es agua líquida, la cual se puede reutilizar. Los únicos residuos generados son los derivados de las baterías (litio, cadmio, níquel, etc.).

6.3 COMBINACIÓN SISTEMAS EÓLICOS

En este apartado estudiaremos la combinación de los sistemas eólicos vistos en los apartados anteriores. Como es de esperar, el estudio se centrará en la combinación de la cometa Skysails con el resto de los sistemas, pues una combinación de eSAIL con WISAMO (el aerogenerador de Exawind ya quedó descartado) no sería sensata, debido a que estos últimos se ubican en la cubierta y presentan características, como el peso y dimensiones, muy diferentes.

6.3.1 Cometa Skysails + eSAIL

Así pues, comenzaremos combinando la cometa Skysails con las eSAIL. El efecto propulsivo de esta combinación, en condiciones favorables de navegación, resultaría en el 38% de la propulsión total proporcionada por el Wartsila 12V46C. esto supondría:

- Consumo total combustible

$$Ct = 1.080{,}6 * 0{,}62 = 669{,}6 \; toneladas$$

Con este consumo el buque no necesitaría parar para repostar.

- Gastos totales

$$Gt = 988.296{,}75 * 0{,}62 = 612.743{,}985 \; \$$$

- Emisiones totales navegación:

$$Emisiones \; CO_2 = 3{,}188 * \; 669{,}6 = 2.134{,}684 \; toneladas$$

$$Emisiones \; CH_4 = 0{,}00006 * 669{,}6 = 0{,}04017 \; toneladas$$

$$Emisiones \; N_2O = 0{,}00017 * 669{,}6 = 0{,}1138 \; toneladas$$

$$Emisiones\ NO_x = 0{,}0437 * 669{,}6 = 29{,}261\ toneladas$$

6.3.2 Cometa Skysails + velas WISAMO

En el caso de combinar la cometa Skysails con las velas WISAMO, la potencia propulsora sería del 30% de la total, resultando en:

- Consumo total combustible

$$Ct = 1.080{,}6 * 0{,}7 = 756{,}42\ toneladas$$

Con este consumo el buque no necesitaría parar para repostar.

- Gastos totales

$$Gt = 988.296{,}75 * 0{,}7 = 691.807{,}725\ \$$$

- Emisiones totales navegación:

$$Emisiones\ CO_2 = 3{,}188 * \ 756{,}42 = 2.411{,}46\ toneladas$$

$$Emisiones\ CH_4 = 0{,}00006 * 756{,}42 = 0{,}04538\ toneladas$$

$$Emisiones\ N_2O = 0{,}00017 * 756{,}42 = 0{,}1285\ toneladas$$

$$Emisiones\ NO_x = 0{,}0437 * 756{,}42 = 33{,}055\ toneladas$$

6.4 COMBINACIÓN COMPLETA

En este apartado estudiaremos la combinación de todos los sistemas desarrollados en los apartados anteriores. Debido a que el aerogenerador quedó descartado, combinaremos el resto de los sistemas eólicos al motor por pila de hidrógeno.

6.4.1 Motor por pila de hidrógeno + Skysail

Comenzaremos combinando el motor por pila de hidrógeno con la Skysail, el cual reduciendo en un 10% el consumo, nos queda:

- Consumo de combustible:

$$C = consumo\ por\ día * T = 109{,}7 * 0{,}9 = 98{,}73\ toneladas$$

Con este consumo, el buque para completar la ruta necesitaría realizar 2 parada para repostar.

- Gastos de navegación:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 877.600 * 0{,}9 = 789.840\ \$$$

6.4.2 Motor por pila de hidrógeno + eSAIL

Combinando el motor por pila de hidrógeno con las eSAIL. Recordemos que las eSAIL reducen el consumo en un 28% en condiciones de navegación favorables:

- Consumo de combustible:

$$C = consumo\ por\ día * T = 109{,}7 * 0{,}72 = 78{,}98\ toneladas$$

Con este consumo, el buque para completar la ruta necesitaría realizar 1 parada para repostar.

- Gastos de navegación:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 877.600 * 0{,}72 = 631.872\ \$$$

Este tipo de propulsión no genera residuos.

6.4.3 Motor por pila de hidrógeno + velas WISAMO

Combinando el motor por pila de hidrógeno con las velas WISAMO:

- Consumo de combustible:

$$C = consumo\ por\ día * T = 109{,}7 * 0{,}8 = 87{,}76\ toneladas$$

Con este consumo, el buque para completar la ruta necesitaría realizar 2 paradas para repostar.

- Gastos de navegación:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 877.600 * 08 = 702.080\ \$$$

Este tipo de propulsión no genera residuos.

6.4.4 Motor por pila de hidrógeno + eSAIL + Cometa Skysails

Aplicando el apartado 4.3.1. al motor por pila de hidrógeno nos queda:

- Consumo de combustible:

$$C = consumo\ por\ día * T = 109{,}7 * 0{,}62 = 68{,}01\ toneladas$$

Con este consumo, el buque para completar la ruta necesitaría realizar 1 parada para repostar.

- Gastos de navegación:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 877.600 * 0{,}62 = 544.112\ \$$$

Este tipo de propulsión no genera residuos.

6.4.5 Motor por pila de hidrógeno + velas WISAMO + cometa Skysails

Aplicando los resultados del apartado 4.3.2. al motor por pila de hidrógeno:

- Consumo de combustible:

$$C = consumo\ por\ día * T = 109{,}7 * 0{,}7 = 76{,}79\ toneladas$$

Con este consumo, el buque para completar la ruta necesitaría realizar 1 parada para repostar.

- Gastos de navegación:

$$G = consumo * precio\ de\ combustible = 877.600 * 0{,}7 = 614.320\ \$$$

Este tipo de propulsión no genera residuos.

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado recogeremos los resultados de cada estudio abordado en los apartados anteriores y haremos tablas comparativas para determinar qué sistema o combinación de sistemas sería el más atractivo para instalar en el buque Catherine. Para ello, recordamos

Para la ruta de Rotterdam-Singapur:

- Ruta
    - Distancia total: 8.399 millas náuticas
    - Distancia ECA: 403 millas náuticas
    - Duración estimada: 20 días 14 horas
- El buque se encontrará con desplazamiento en máxima carga
- Condiciones de navegación:
    - Velocidad de navegación: 17 nudos
    - Velocidad media viento: 17,5 nudos
    - La resistencia por olas y viento no afectarán al consumo
- Consumo medio por día:
    - HFO: 52,5 t/día
    - Hidrógeno: 5,33 t/día
- Precio medio combustible:
    - VLSFO: 900 $/tm
    - ULSFO: 1.200 $/tm
    - Hidrógeno: 8000 $/t

Propulsión asistida

Tabla 2: Tabla comparativa sistemas independientes de propulsión asistida

	Wartsila 12V46C	**Cometa Skysail**	**Vela rígida WISAMO**	**Turbovela eSAIL**
Precio ($)	**N/A**	**1 millón**	**2,5 millones**	**2,5 millones**
Peso (t)	**177**	**N/A**	**20**	**60**
Potencia (kW)	**12.600**	**1.300**	**2.520**	**3.528**
Consumo (t)	**1.080,6**	**972,54**	**864,48**	**778,032**
Escalas	**1**	**1**	**0**	**0**
Gasto ($)	**988.296,75**	**889.467,075** **+98.829,675**	**790.637,4** **+197.659,35**	**711.573,66** **+276.759,09**
Emisiones (t)	**3.444,95 CO_2** **0,0648 CH_4** **0,1837 N_2O** **47,222 NOx**	**3.100,45 CO_2** **0,0583 CH_4** **0,1653 N_2O** **42,5 NOx**	**2.755,96 CO_2** **0,0518 CH_4** **0,1469 N_2O** **37,777 NOx**	**2.480,36 CO_2** **0,0466 CH_4** **0,1322 N_2O** **34 NOx**

Fuente: propia del alumno

Sustitución propulsión principal

Tabla 3: tabla comparativa del motor de hidrógeno frente al motor de combustión

	Wartsila 12V46C	**Motor de hidrógeno**
Precio ($)	**N/A**	**4 millones**
Peso (tn)	**177**	**100**
Potencia (kW)	**12.600**	**12.600**
Capacidad (t)	**931,5**	**40,8**
Consumo (t)	**1.080,6**	**109,7**
Escalas	**1**	**2**
Gasto ($)	**988.296,75**	**877.600** **+110.696,75**
Emisiones (t)	**3.444,95 CO_2** **0,0648 CH_4** **0,1837 N_2O** **47,222 NOx**	**N/A**

Fuente: propia del alumno

Combinación eólica

Tabla 4: tabla comparativa de los sistemas eólicos combinados

	Wartsila 12V46C	**Cometa Skysail + WISAMO**	**Cometa Skysail + eSAIL**
Precio ($)	**N/A**	**3,5 millones**	**3,5 millones**
Peso (t)	**177**	**20**	**60**
Potencia (kW)	**12.600**	**3.780**	**4.788**
Consumo (t)	**1.080,6**	**756,42**	**669,6**
Escalas	**1**	**0**	**0**
Gasto ($)	**988.296,75**	**691.807,725** **+296.489,025**	**612.743,985** **+375.552,76**
Emisiones (t)	**3.444,95 CO_2** **0,0648 CH_4** **0,1837 N_2O** **47,222 NOx**	**2.411,46 CO_2** **0,04538 CH_4** **0,1285 N_2O** **33,055 NOx**	**2.134,68 CO_2** **0,04017 CH_4** **0,1138 N_2O** **29,261 NOx**

Fuente: propia del alumno

Combinación completa

Tabla 5: tabla comparativa de los sistemas combinados

	MH + Skysail	**MH + WISAMO**	**MH + eSAIL**	**MH + WISAMO + Skysail**	**MH + eSAIL + Skysail**
Precio ($)	**5 millones**	**6,5 millones**	**6,5 millones**	**7,5 millones**	**7,5 millones**
Peso (t)	**100**	**120**	**160**	**120**	**160**
Potencia (kW)	**12.600 + 1300**	**12.600 + 2.520**	**12.600 + 3.528**	**12.600 + 3.780**	**12.600 + 4.788**
Consumo (t)	**98,73**	**87,76**	**78,98**	**76,79**	**68,01**
Escalas	**2**	**2**	**1**	**1**	**1**
Gasto ($)	**789.840** **+198.456,75**	**702.080** **+286.216,75**	**631.872** **+356.424,75**	**614.320** **+373.976,75**	**544.112** **+444.184,75**
Emisiones (t)	**N/A**	**N/A**	**N/A**	**N/A**	**N/A**

Fuente: propia del alumno

Una vez recogidos los resultados de los estudios en las tablas anteriores, podemos finalmente realizar el análisis comparativo para determinar aquellos sistemas o conjunto de sistemas mas atractivos para el armador del buque, en función de varios factores; económicos, sociopolíticos, medioambientales, legislativos. Para ello, basaremos el análisis como proyecto a largo plazo, hasta los 10 años.

Las cifras de la fila "precio" en las tablas, a diferencia de la Skysail cuyo dato ha sido obtenido de la página web de la Comisión Europea, son una aproximación a un precio máximo del sistema el cual, en función de las prestaciones y el tiempo que se tardaría en recuperar la inversión, haría que su instalación fuera viable/atractiva para el armador. Cabe destacar que son los precios absolutos.

Gráfico 1: millas recorridas hasta recuperar la inversión

Fuente: propia del alumno

7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

En el aspecto económico podemos concluir, a priori, que el sistema más rentable es aquel que recupera la inversión en el menor tiempo. En este caso ese sistema sería la eSAIL, pues como se muestra en la gráfica, para recuperar la inversión se tienen que recorrer 75.869,23 millas náuticas. Suponiendo que, de media, un buque de las características del Catherine puede recorrer anualmente 45.000 millas, esto supondría recuperar la inversión en 1 año y 8 meses. Sin embargo, recordemos que el análisis es a largo plazo por lo que para comprobar qué sistema es más rentable, debemos determinar el ahorro en costes por combustible desde que se recupera la inversión, hasta los 10 años de cada sistema o conjunto:

Tabla 6: Tiempo de recuperación de la inversión y beneficios totales en 10

	Tiempo hasta recuperar la inversión	**Beneficios totales ($)**
Skysail	1 año 11 meses	4.295.077,19
WISAMO	2 años 4 meses	8.090.154,6
eSAIL	1 año 8 meses	12.328.145,2
Motor Hidrógeno	6 años 9 meses	1.930.889,11
Skysail + WISAMO	2 años 2 meses	12.385.231,72
Skysail + eSAIL	1 año 9 meses	16.621.293,52
MH + Skysail	4 años 8 meses	5.632.877,42
MH + WISAMO	4 años 3 meses	8.834.865,75
MH + eSAIL	3 años 5 meses	12.596.456,42
MH + WISAMO +Skysail	3 años 9 meses	12.536.854,09
MH + eSAIL +Skysail	3 años 2 meses	16.298.444,76

Fuente: propia del alumno

Como se muestra en la Tabla 6, a pesar de la eSAIL ser el sistema con el que más rapidez se recupera la inversión, al combinarlo con la cometa Skysail, se genera mucho mayor ahorro de combustible a largo plazo que con el sistema separado. Por ende, concluimos que el sistema más rentable económicamente es el sistema combinado Skysail + eSAIL.

Cabe destacar la combinación de motor de hidrógeno + eSAIL + Skysail, pues a pesar de tardar notablemente más tiempo en recuperarse la inversión que los dos sistemas mencionados en el párrafo anterior, genera un ahorro muy parecido al sistema Skysail + eSAIL en el rango seleccionado, hasta los 10 años, significando que el ahorro de combustible por milla es muy superior al resto, y por consecuencia, si se aumentase el rango del estudio, sería el conjunto de sistemas de más ahorro con diferencia.

7.2 ANÁLISIS MEDIOAMBIENTAL

Analizando los resultados desde el modelo medioambiental, podemos concluir de forma consensual que el sistema más respetuoso con el ecosistema marino y el medioambiente es el sistema combinado motor de hidrógeno + eSAIL + Skysail. Podríamos aventurar que todos los sistemas con el motor hidrógeno son igual de beneficiosos en el marco medioambiental, pero teniendo en cuenta que hay varios métodos de producción de hidrogeno como combustible que hacen uso de fuentes de energía no limpias, si se reduce el uso de hidrogeno para la navegación se reduce la demanda de producción, por ende, se fomenta el desarrollo de hidrogeno verde en lugar del uso de otros tipos de producción.

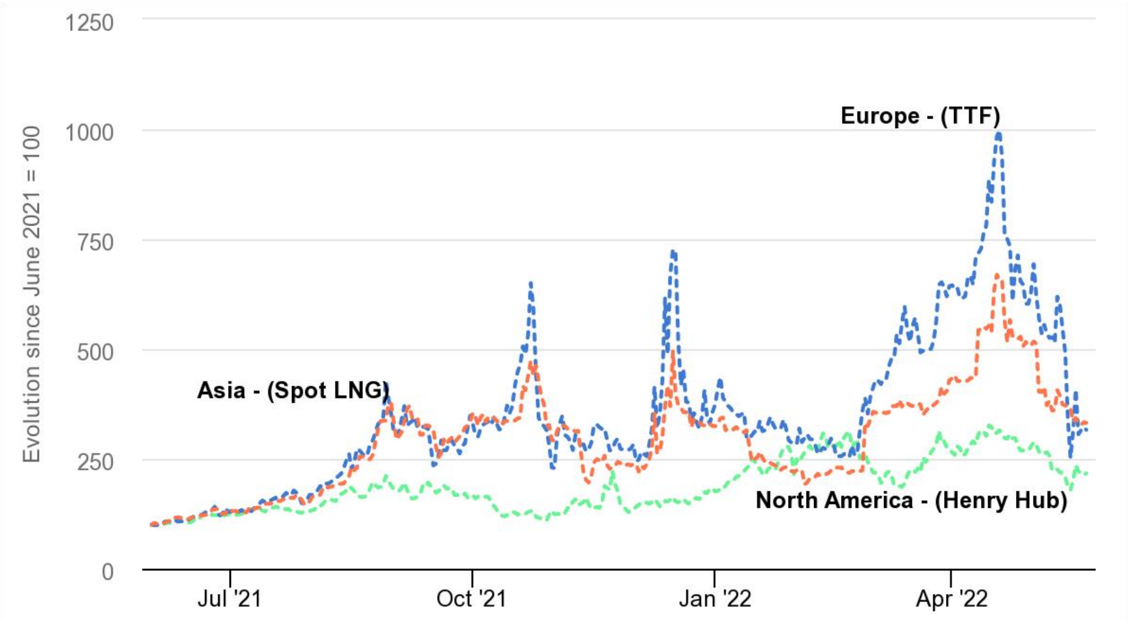
7.3 ANALISIS SOCIOPOLÍTICO

Un análisis exhaustivo del marco sociopolítico, por el cual llegaríamos a una conclusión precisa de la relevancia de estos estudios de implantación de modernos sistemas de propulsión en el buque Catherine en la actualidad, ocuparía mucho espacio de este trabajo, y, debido a que no es el objeto principal del mismo, analizaremos dicha relevancia de forma más elemental.

Actualmente el mundo atraviesa una crisis energética mundial desde el 2021, provocado por la extraordinaria rapidez del repunte económico que se produjo tras la pandemia y agravado considerablemente por el conflicto entre Rusia y Ucrania. Los precios de las principales fuentes de energía, como el gas natural o el petróleo, alcanzaron, no hace mucho, máximos históricos, subiendo de forma proporcional el precio de la electricidad en varios mercados, tal y como se muestra en las Figuras 23 y 24, donde se puede apreciar que la región más afectada por esta crisis es Europa, debido a su fuerte dependencia de fuentes de energía externas.

En este momento parece que el mundo, y especialmente Europa, ha conseguido controlar en cierta medida la situación, gracias a las favorables condiciones meteorológicas durante este invierno, reduciendo la demanda de combustible para la calefacción, y también debido a la obtención de reservas de gas de otras regiones para abastecer la demanda y conseguir eliminar la dependencia de Rusia. Aun así, se prevé que la demanda suba encareciendo nuevamente el precio de los combustibles fósiles, y Europa ha puesto en marcha proyectos para ser más independiente energéticamente y satisfacer la demanda desde un marco ecológico.

Figura 23: Evolución de los precios clave del gas natural regional, junio 2021-octubre 2022



Fuente: iea.org/topics/global-energy-crisis?language=es

Figura 24: Evolución de precios de la electricidad en España (EUR/MWh) desde 2010 hasta la actualidad

Fuente: traidingeconomics.com

La comisión europea ha publicado en su página web el siguiente artículo: “*Plan para reducir rápidamente la dependencia con respecto a los combustibles fósiles rusos y avanzar con rapidez en la transición ecológica*” (**European Commission. 2022**). En dicho artículo, se detallan las estrategias que está adoptando Europa para independizarse energéticamente y fomentar una transición ecológica.

Entre todas las estrategias mencionadas, se hace gran alusión a la inversión para fomentar el desarrollo de hidrogeno y mejorar las tecnologías de producción. En el apartado “Aceleración del despliegue de las energías renovables”, donde la comisión propone aumentar el objetivo principal para 2030 en materia de energías renovables del 40 % al 45 %, se establece el siguiente punto: “*Establecer un objetivo de 10 millones de toneladas de producción nacional de hidrógeno renovable y de 10 millones de toneladas de importaciones para 2030, a fin de sustituir el gas natural, el carbón y el petróleo en industrias y sectores del transporte difíciles de descarbonizar. Para acelerar el mercado del hidrógeno, los colegisladores deberían acordar subobjetivos más elevados para sectores específicos. La Comisión también publica dos actos delegados sobre la definición y producción de hidrógeno renovable para garantizar que la producción conduzca a una descarbonización neta. Para acelerar los proyectos de hidrógeno, se reserva una financiación adicional de 200 millones EUR para investigación, y la Comisión se compromete a completar la evaluación de los primeros proyectos importantes de interés común europeo durante el verano.”*

Como se muestra, a pesar de ser el hidrogeno a día de hoy una tecnología reciente, se están realizando proyectos e inversiones notables para introducirlo cuanto antes en la industria y el transporte, esperando para 2030 ser notablemente considerable. Debido a esto, y a los resultados en el análisis económico, la opción de instalar un motor por pila de hidrógeno + eSAIL + Skysail puede ser de interés.

7.4 ANÁLISIS LEGISTALIVO

El 1 de noviembre de 2022 entró en vigor la nueva enmienda al anexo VI del convenio MARPOL en relación con las medidas de intensidad de carbono. Esta normativa, entre otras cosas, estipula que, a partir del 1 de enero de 2023, será obligatorio que todos los buques calculen su índice de eficiencia energética aplicable a los buques existentes (EEXI), obtenido para medir su eficiencia energética y que informen de su indicador de intensidad de carbono (CII) operacional anual obtenido y de su calificación.

El índice EEXI (Anexo 4) indica la eficiencia energética de un buque, de arqueo bruto igual o superior a 400, en comparación con una línea base. El valor EEXI calculado debe ser inferior al EEXI requerido, para garantizar que el buque cumple una norma mínima de eficiencia energética. Ésta se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^{n} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}*\right) + \left(\left(\prod_{j=1}^{n} f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}\right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME}**\right)}{f_i \cdot f_c \cdot f_l \cdot Capacity \cdot f_w \cdot V_{ref} \cdot f_m}$$

No se dispone de la información suficiente referente al buque para calcular correctamente este índice, sin embargo, podemos suponer que, al estar activo, cumple con la norma mínima de eficiencia energética.

El indicador de intensidad de carbono (CII) determina la reducción anual necesaria para garantizar la mejora continua de la intensidad de carbono operacional de un buque dentro de un nivel de clasificación concreto. El indicador de intensidad de carbono operacional anual real alcanzada debe documentarse y verificarse respecto al indicador de intensidad de carbono operacional anual prescrito. Esto permite determinar la clasificación de la intensidad de carbono operacional, la cual se califica como A, B, C, D o E, siendo A la mejor.

La OMI menciona: "*Un buque calificado con D durante tres años consecutivos, o E durante un año, tendrá que presentar un plan de medidas correctivas para mostrar cómo se alcanzará el índice requerido de C o superior. Se alienta a las*

Administraciones, autoridades portuarias y otras partes interesadas, según proceda, a facilitar incentivos a los buques clasificados A o B.” (**OMI. 2022.**)

El indicador CII para un buque Ro-ro se determina según la siguiente fórmula:

$$\frac{Emisiones\ CO2}{Deadweight * Distancia\ navegada} * 10^6$$

Tras este cálculo, se calcula el CII de referencia según la siguiente relación:

$$\text{CII ref} = \text{a} * \text{Capacity}^{-c}$$

Siendo para el buque Catherine, *a = 10.952* y *c = 0,637.*

Se determina un CII requerido con la siguiente fórmula:

$$\frac{100 - Z}{100} * CIIref$$

Siendo *Z = 5%* para 2023.

Los valores de a, c y Z se obtienen de las tablas presentes en el Anexo 5.

Finalmente, el CII del buque Catherine es:

$$CII\ obtenido = \frac{3.444{,}95}{13.320 * 8.399} * 10^6 = 30{,}79$$

$$CII\ ref = 10.952 * 13.320^{-0{,}637} = 25{,}83$$

$$CII\ requerido = \frac{100 - 5}{100} * 25{,}83 = 24{,}53$$

$$Ratio = \frac{CII\ obtenido}{CII\ requerido} = \frac{30{,}79}{24{,}53} = 1{,}25$$

Según las tablas de clasificación, las cuales se encuentran en el Anexo 5, para este valor de ratio, el buque Catherine obtiene una calificación de D, siendo por lo tanto necesario hacer un plan para mejorar la calificación en los años siguientes.

Si repetimos la operación, con la cometa Skysail instalada, el resultado es el siguiente:

$$CII\ obtenido = \frac{3.100{,}45}{13.320 * 8.399} * 10^6 = 27{,}71$$

$$Ratio = \frac{27,71}{24,53} = 1,129$$

Siendo esta reducción no suficiente para mejorar la clasificación a C. De esta forma, podemos concluir que, para satisfacer la normativa y operar según los estándares mínimos establecidos por la IMO, con la instalación de una cometa Skysail no es suficiente, siendo necesario usar una cometa más grande de la propuesta en este trabajo, u otras tecnologías, como las turbovelas, las velas WISAMO o el motor de hidrógeno para cumplimentar la normativa.

7.5 ANALISIS CONCLUSIVO

Tras los resultados obtenidos en los estudios, y las conclusiones obtenidas en los anteriores análisis, el sistema o conjunto de sistemas más relevante para ser instalado en la actualidad en el buque Catherine, debido a su rápida recuperación de la inversión, su notable ahorro económico a largo plazo, su bajo impacto medioambiental, su autonomía, y por cumplir satisfactoriamente la nueva normativa de la IMO, es la combinación de cometa Skysail + eSAIL.

Cabe destacar la combinación de motor hidrógeno + eSAIL + Skysail, ya que los resultados obtenidos a lo largo de este trabajo son interesantes y para tener en cuenta en un futuro cuando la tecnología de hidrógeno mejore. Sin embargo, presenta unas limitaciones, tales como la autonomía, la notable inversión inicial, y la poca infraestructura actual para producir y suministrar hidrogeno, las cuales hacen que, a día de hoy, no sea rentable un proyecto de instalación de este tipo.

8 CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo era desarrollar las siguientes tecnologías; turbovelas, velas rígidas, aerogeneradores, cometas de viento y motores por pila de hidrógeno, y aplicarlas al buque Ro-ro Catherine, para determinar cuál de estas tecnologías es, en el contexto actual, la mejor candidata para ser utilizada en los buques mercantes operantes en este momento.

Para ello hemos estudiado la viabilidad de una instalación independiente de una cometa Skysail de 320 m^2, un aerogenerador Exawind-750 kW, dos turbovelas eSAIL Model 3 de 36 metros de altura y 60 toneladas de peso de Bound4Blue, dos velas rígidas hinchables de 200 m^2 cada una o, en su defecto, una de 400 m^2 WISAMO de Michelin y un motor por pila de hidrógeno de misma potencia que el motor de combustión actual. Acto seguido hemos hecho un estudio de gastos, consumos y emisiones, hemos repetido el estudio combinando las diferentes tecnologías y finalmente hemos analizado los resultados en función de factores económicos, medioambientales, sociopolíticos y legislativos.

En la primera parte del cuerpo del trabajo, el estudio económico, de consumos y emisiones, se aprecia la viabilidad de instalación de la mayoría de los sistemas, a excepción del aerogenerador, pues la instalación de este sistema es muy compleja, su aporte energético bajo, además de que genera problemas de estabilidad y de operación al buque, quedando por lo tanto descartado.

El resto de los sistemas, al presentar un estudio favorable, se han analizado bajo los factores ya mencionados, llegando así a las siguientes conclusiones:

- Cometa Skysail 320 m^2: sistema de fácil instalación, sin efectos notables en las operaciones del buque, el más económico, con rápida recuperación de la inversión, en la ruta seleccionada sigue siendo necesario realizar una parada para repostar, genera poco beneficio a largo plazo y su reducción en emisiones no es suficiente para permitir al buque cumplir con la nueva normativa. Por estos factores, es poco recomendable.

- eSAIL Model 3: Sistema de moderada complejidad de instalación. Limitan el espacio de carga en un radio de 4 metros y la carga que se puede transportar en un 2,9%. Aumenta el calado aéreo del buque (limitación para ciertas rutas). Rápida recuperación de la inversión, muy buen ahorro a largo plazo permite realizar la ruta sin paradas para repostar y su reducción en las emisiones es buena, permitiendo al buque cumplir con la normativa. Por estos factores, es el más recomendable de los sistemas independientes.

- WISAMO: sistema de moderada complejidad de instalación. Las limitaciones en espacio de carga son de, un semicírculo de 12 metros de radio hacía la popa, y un semicírculo de 1 metros de radio hacia la proa en el caso de ser dos velas, y un semicírculo de radio 17 metros a popa y un semicírculo de 1 metros a proa en el caso de ser una vela, además de la reducción de la cantidad de carga que se puede transportar del 0,48 %. No presenta problemas de calado aéreo debido a su propiedad hinchable, tiene una decente recuperación de la inversión, además de un decente ahorro a largo plazo, permite realizar la ruta sin paradas para repostar y su reducción en las emisiones es suficiente para permitir al buque cumplir con la normativa. Por estos factores, es recomendable en la actualidad. En futuros años es posible que sea necesario combinarlo con otras operaciones para cumplir con las normativas de emisiones.

- Motor por pila de hidrógeno: Sistema de compleja instalación. Genera inestabilidad en el buque, una diferencia de 663,22 toneladas entre proa y popa, por lo que sería necesario una redistribución de los tanques de combustible, u operar con agua de lastre para compensar la inestabilidad. Reduce la autonomía del buque, siendo necesario parar a repostar dos veces en la ruta seleccionada. Actualmente hay muy poca infraestructura para producir y suministrar hidrógeno tiene la recuperación de la inversión más tardía, y por consecuencia su ahorro a largo plazo es muy bajo. No genera ningún tipo de residuo contaminante, por lo que no habría ninguna preocupación por cumplimentar la normativa de emisiones. Por estos factores, es el sistema menos recomendado dentro de los independientes.

- Skysail + WISAMO: Rápida recuperación de la inversión, además de un notable ahorro a largo plazo. Permite realizar la ruta sin parar a repostar, y su reducción de emisiones es buena para cumplir con la normativa. Recomendable en el caso de realizar rutas con límite de calado aéreo.

- Skysail + eSAIL: sistema más recomendado (en el caso de que el buque opere por rutas sin límite de calado aéreo) por su rápida recuperación de inversión y tener el mayor ahorro a largo plazo. Su reducción en emisiones es excelente, permitiendo al buque operar varios años cumplimentando la normativa de emisiones y aumenta mucho su autonomía.

- Motor por pila de hidrógeno + Skysail: tardía recuperación de inversión, bajo ahorro a largo plazo, no aumenta mucho la autonomía, problemas de infraestructura y no genera residuo alguno. Poco recomendable.

- Motor por pila de hidrógeno + WISAMO: tardía recuperación de la inversión, moderado ahorro a largo plazo, sigue siendo necesario parar dos veces a repostar en la ruta seleccionada, problemas de infraestructura y no genera residuos. Poco recomendable.

- Motor por pila de hidrógeno + eSAIL: moderada recuperación de la inversión, decente ahorro económico a largo plazo, aumenta la autonomía permitiendo reducir a una parada para repostar en la ruta seleccionada, problemas de infraestructura y no genera residuos. Poco recomendable.

- Motor por pila de hidrógeno + WISAMO +Skysail: moderada recuperación de la inversión, decente ahorro económico a largo plazo, aumenta la autonomía permitiendo reducir a una parada para repostar en la ruta seleccionada, problemas de infraestructura y no genera residuos. Poco recomendable.

- Motor por pila de hidrógeno + eSAIL +Skysail: moderada recuperación de la inversión, excelente ahorro económico a largo plazo, siendo el sistema con mayor ahorro por milla recorrida. Tiene una autonomía similar al buque con los sistemas actuales, problemas de infraestructura y no genera residuos. Actualmente no es recomendable principalmente por el reciente desarrollo de la tecnología del hidrógeno, y la compleja instalación, sin embargo, en un futuro cuando la infraestructura de hidrogeno en el sector naval mejore (según la comisión europea para 2030 en Europa), es muy recomendable por su gran beneficio por milla recorrida, y por no generar ningún residuo durante las operaciones.

9 BIBLIOGRAFÍA

Bound4Blue. 2021. *bound4blue instala en Astander su sistema eSAIL® en "La Naumon".* [En línea] Diciembre de 2021. https://bound4blue.com/es/noticias/bound4blue-instala-en-astander-su-sistema-esail-en-la-naumon-92.

Bound4Blue. 2023. *PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA eSAIL.* [En línea] 2023. https://bound4blue.com/es/esail.

2021. Centro nacional del hidrógeno. *El hidrógeno.* [En línea] abril de 2021. https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/#tab-id-3.

2021. Centro Nacional del Hifrógeno. *Pilas de combustible.* [En línea] Julio de 2021. https://www.cnh2.es/pilas-de-combustible/.

European Comission. 2021. WINTECC. *Demonstration of an innovative wind propulsion technology for cargo vessels.* [En línea] 2021. https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/details/2650.

European Commission. 2022. REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition*. [En línea] Mayo de 2022. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131.

Gutiérrez, Diego. 2021. Híbridos y eléctricos. *Así funciona el motor de combustión interna de hidrógeno de Mahle y Liebherr.* [En línea] Octubre de 2021. https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/funcionamiento-motor-combustion-interna-hidrogeno-mahle-liebherr/20211018105805050304.html.

ICCT. 2021. *Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies.* [PDF]. 2021. https://theicct.org/sites/default/files/publications/Well-to-wake-co2-mar2021-2.pdf

IEA. 2022. *Crisis Energética Mundial.* [En línea] 2022. https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?language=es.

2021. IngMarítima. *Zonas ECA.* [En línea] Agosto de 2021. http://ingmaritima.blogspot.com/2017/06/zonas-eca.html.

Karina, Mondragon Gonzalez. 2013. Blogspot. *FIBRAS SINTÉTICAS Y ESPECIALES.* [En línea] Abril de 2013. http://fibrologia.blogspot.com/2013/04/fibras-sinteticas.html.

Km77. 2021. *Toyota Mirai, precio y ficha técnica.* [En línea] 2021. https://www.km77.com/coches/toyota/mirai/2015/4-puertas/estandar/mirai-2015/datos

Llorente, Felipe Benjumea. 2020. Felipe Benjumea Llorente. *La producción de hidrógeno renovable: energía solar.* [En línea] 2020. https://felipebenjumeallorente.com/la-produccion-de-hidrogeno-renovable-energia-solar/.

Lorenzo, Juan Carlos Díaz. 2022. Puente de Mando. *Michelin probará una vela inflable y telescópica para buques.* [En línea] Enero de 2022. https://www.puentedemando.com/michelin-probara-una-vela-inflable-y-telescopica-para-buques/.

M., Jorge Yahuaca. 2005. Todo a babor. *Evolución histórica de la vela.* [En línea] Septiemnbre de 2005. https://www.todoababor.es/historia/evolucion-historica-de-la-vela/.

Oliveira, Juan. 2014. Va de barcos. *El BBC Skysails, el primer carguero moderno del mundo arrastrado por una cometa.* [En línea] Junio de 2014. https://vadebarcos.net/2014/06/30/buques-arrastrados-cometas-bbc-beluga-skysails/.

OMI. 2022. *Entra en vigor la normativa sobre la intensidad de carbono de los buques y el sistema de clasificación.* [En línea] Noviembre de 2022. https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx.

Pérez, Alberto. 2021. Híbridos y eléctricos. *Michelin presenta el WISAMO: velas hinchables para grandes buques de transporte marítimo.* [En línea] Junio de 2021. https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/navegacion-sostenible/michelin-presenta-wisamo-velas-hinchables-grandes-buques-transporte-maritimo/20210615114619046011.html.

Rico, David Solera. 2019. Ariema. *Producción del hidrógeno.* [En línea] julio de 2019. http://www.ariema.com/produccion-de-h2#:~:text=Term%C3%B3lisis.,del%20proceso%20(%E2%89%881000K)..

Sánchez-Barcaiztegui, Marcial Gamboa. 1967. *Nociones de arquitectura naval* . Madrid : editorial naval, 1967.

Sector marítimo. 2022. *BOUND4BLUE INSTALARÁ DOS ESAIL® EN EL BUQUE DE CARGA GENERAL M/V EEMS TRAVELER DE AMASUS SHIPPING.* [En línea] Marzo de 2022. https://sectormaritimo.es/bound4blue-instalara-dos-esail-en-el-buque-de-carga-general-m-v-eems-traveler-de-amasus-shipping.

2023. Ship and bunker. *Rotterdam Bunker Prices.* [En línea] 2023. https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#ULSFO. (5)

Vesselfinder. 2023. [En línea] 2023. https://www.vesselfinder.com/.

Wikipedia. 2022. [En línea] 2022. https://es.wikipedia.org/wiki/Turbovela

Xataka. 2021. *El hidrógeno quiere mantener vivos los motores de combustión. Y lo tiene todo en contra, incluido el propio hidrógeno.* [En línea]. 2021. https://www.xataka.com/movilidad/hidrogeno-quiere-mantener-vivos-motores-combustion-tiene-todo-incluido-propio-hidrogeno#:~:text=La%20eficiencia%20de%20una%20pila,una%20eficiencia%20inferior%20al%2035%25.

10 ANEXOS

10.1 ANEXO 1: DETERMINACIÓN DEL CONSUMO DE HIDRÓGENO

Aun no existen buques mercantes con una tecnología de propulsión que haga uso de pilas de hidrógeno, sin embargo, si hay en el mercado coches, como el Toyota Mirai, que utilizan esta tecnología y presentan datos reales de consumos. Por ende, para aproximar un consumo de un motor por pila de hidrógeno en un buque como el Catherine, encontraremos una relación de consumo coche-barco para tal fin. Cabe destacar que es una estimación, por lo cual el resultado debe ser tratado como tal.

Un coche actual de gasolina de 5 cilindros de 1,9 litros, con una potencia de 150-200 CV, tiene un consumo medio de 7 litros a los 100 kilómetros. Un barco de 6-7 metros de eslora, con el casco limpio, 4 tripulantes a bordo, y un motor fueraborda de gasolina de misma potencia, a una velocidad de crucero de 25 nudos a 3700 rpm, muestra un consumo medio de 1,4 litros por milla náutica. Estos datos se basan en experiencias propias del alumno. El Toyota Mirai, según el siguiente artículo (**Km77. 2021**), presenta un consumo medio de hidrógeno de 0,76 kg/100 km. Con estos datos y los siguientes establecemos la siguiente aproximación:

Datos:

- *1 milla náutica = 1,852 km*
- *Densidad gasolina = 720 g/l*
- *Consumo coche gasolina → 7 l/100km = 0,129 l/milla náutica*
- *Consumo barco gasolina → 1,4 l/milla náutica*
- *Consumo Catherine → 52,5 t/día*
- *Consumo Toyota Mirai → 0,76 kg/100km = 0,0014 kg/milla náutica*

Cálculo:

$$Relación\ coche - barco\ gasolina = \frac{1,4}{0,129} = 10,852$$

$$Consumo\ barco\ hidrógeno = 0,014 * 10,852 = 0,1519\ kg/m$$

$$Consumo\ barco\ gasolina\ por\ día = 1,4 * 25 * 24 = 840\ l/día = 604,8\ kg/día$$

$$Relacion\ Catherine - barco\ gasolina = \frac{52.500}{604,8} = 86,8$$

$$Consumo\ Catherine\ hidrógeno = 0,1519 * 86,8 = 13,06\ kg/milla\ náutica$$

$$Consumo\ Catherine\ por\ día = 13,06 * 17 * 24 = 5.328,48\ kg/día \approx 5,33\ t/día$$

10.2 ANEXO 2: ACCOUNTING FOR WELL-TO-WAKE CARBON DIOXIDE EQUIVALENT EMISSIONS IN MARITIME TRANSPORTATION CLIMATE POLICIES

10.3 ANEXO 3: EMISSION FACTORS USED IN THE ESTIMATIONS OF EMISSIONS FROM COMBUSTION

10.4 ANEXO 4: GUIDANCE ON THE TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EDDI AND EEXI

10.5 ANEXO 5: CII (CARBON INTENSITY INDICATOR)

BRIEFING

MARCH 2021

Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies

Prepared by Bryan Comer, PhD, and Liudmila Osipova, PhD

INTRODUCTION

This briefing paper explains how policymakers can account for well-to-wake (WTW) carbon dioxide equivalent (CO_2e) emissions in strategies that aim to monitor or regulate climate-warming pollutants from ships. Well-to-wake emissions, or life-cycle emissions, are the sum of upstream (well-to-tank) and downstream (tank-to-wake) emissions. In addition to carbon dioxide (CO_2), carbon dioxide equivalents include greenhouse gases (GHGs) such as methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O), as well as particles like black carbon (BC). By focusing solely on CO_2 and ignoring other pollutants, regulators would significantly underestimate climate pollution from maritime transport which would work against achieving the Paris Agreement goal to limit global warming to 1.5°C compared to pre-industrial levels.

The European Union (EU) intends to add maritime shipping emissions to its Emissions Trading Scheme (ETS) and is currently deciding if only CO_2 emissions will be covered or if other climate pollutants, including CH_4, BC, and N_2O, should also be considered to account for CO_2-equivalent emissions. The emission factors presented in this briefing can be used by the EU and other regulatory bodies to calculate well-to-wake CO_2e emissions from marine fuel consumption.

www.theicct.org

communications@theicct.org

twitter @theicct

icct
THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION

APPROACH FOR CALCULATING WELL-TO-WAKE EMISSIONS BASED ON FUEL CONSUMPTION

Well-to-wake CO_2e emissions (CO_2e_{WTW}) account for the amount of climate pollutants emitted upstream well-to-tank (WTT) and downstream tank-to-wake (TTW). This briefing reports CO_2e_{WTW} based on both 100-year and 20-year global warming potentials. As upstream and downstream pollutants vary according to the type of fuel and engines that are used, the analysis determines the emissions factors for four different marine fuels and multiple engine types. Fuels include heavy fuel oil (HFO), very-low sulfur fuel oil (VLSFO), marine gas oil (MGO), and liquefied natural gas (LNG). Engine types include slow speed diesel (SSD); medium speed diesel (MSD); two-stroke, slow-speed, Otto-cycle, dual fuel LNG (LNG-Otto-SS); four-stroke, medium-speed, Otto-cycle, dual fuel LNG (LNG-Otto MS); lean-burn spark ignition LNG (LBSI); two-stroke, slow-speed, Diesel-cycle LNG (LNG-Diesel), and steam turbines.

The global warming potentials listed in Table 1 represent the relative amount of heat each pollutant traps compared with the heat trapped by the same amount of CO_2 over a given period after emission.

Table 1. Global warming potentials for climate pollutants.

Pollutant	100-year	20-year	Source
CO_2	1	1	Reference level
CH_4	36	87	IPCC AR5 Table 8.7, with climate-carbon feedbacks, +1 to GWP20 and +2 for GWP100 for fossil methane, per footnote in Table 8.7
N_2O	298	268	IPCC AR5 Table 8.7, with climate-carbon feedbacks
BC	900	3200	Bond et al. and Comer et al.

As shown in Table 1, CO_2 is used as the reference and has a global warming potential equal to one. For CH_4 and N_2O, values were obtained from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fifth Assessment Report (AR5).[1] For BC, values were obtained from Bond et al.[2] and Comer, Olmer, Mao, Roy, and Rutherford.[3]

A ship's CO_2e_{WTW} can be calculated based on the mass of fuel the ship consumed and a well-to-wake carbon dioxide equivalent factor (CEF_{WTW}) for that fuel, as shown in Equation 1. Although the equation determines grams of CO_2e, the same equation can be used with any other unit of mass. For example, if one gram of heavy fuel oil results in 4.5 grams of CO_2e_{WTW}, one tonne will emit 4.5 tonnes of CO_2e_{WTW}. For the EU ETS and other policies based on the fuel consumption of large ships, tonnes will be a more appropriate unit.

1 Rajendra K. Pachauri and Leo A. Meyer, *Climate Change 2014: Synthesis Report* (Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC: Geneva, Switzerland, 2014), https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/.

2 Bond, T. C., et al., Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos., 118* (2013) 5380– 5552, https://doi.org/10.1002/jgrd.50171.

3 Bryan Comer, Naya Olmer, Xiaoli Mao, Biswajoy Roy, and Dan Rutherford*, Black carbon emissions and fuel use in global shipping, 2015*, (ICCT: Washington, DC, 2017), https://theicct.org/publications/black-carbon-emissions-global-shipping-2015.

Equation 1

$$CO_2e_{WTW} = FC \times CEF_{WTW}$$

CO_2e_{WTW} = well-to-wake emissions, in gCO_2e

FC = fuel consumption, in g

CEF_{WTW} = well-to-wake carbon dioxide equivalent factor for that fuel, in gCO_2e/g fuel

Fuel consumption is reported by ship owners or operators. In the case of the EU ETS, fuel consumption will be based on EU Monitoring Reporting and Verification data. The CEF_{WTW} is calculated based on WTT emissions associated with extracting, processing, and transporting the fuel and TTW emissions associated with using the fuel on board the ship. The TTW emissions include combustion and non-combustion emissions, such as methane slip from marine engines that use LNG. Equation 2 shows that CEF_{WTW} is the sum of the WTT and TTW carbon dioxide equivalent factors, labeled CEF_{WTT} and CEF_{TTW}, respectively.

Equation 2

$$CEF_{WTW} = CEF_{WTT} + CEF_{TTW}$$

CEF_{WTW} = well-to-wake carbon dioxide equivalent factor, in gCO_2e/g fuel

CEF_{WTT} = well-to-tank carbon dioxide equivalent factor, in gCO_2e/g fuel

CEF_{TTW} = tank-to-wake carbon dioxide equivalent factor, in gCO_2e/g fuel

As shown in Equation 3, CEF_{WTT} is calculated based on the emission factors for each climate pollutant (EF_{WTT_p}) and the associated 100-year or 20-year global warming potential for each pollutant (GWP_p). The CEF_{TTW} is calculated in the same manner, per Equation 4.

Equation 3

$$CEF_{WTT} = \sum (EF_{WTT_p} \times GWP_p)$$

CEF_{WTT} = well-to-tank carbon dioxide equivalent factor, in gCO_2e/g fuel

EF_{WTT_p} = well-to-tank emission factor of pollutant *p*, in g/g fuel

GWP_p = the 100-year or 20-year GWP of pollutant *p,*

Equation 4

$$CEF_{TTW} = \sum (EF_{TTW_p} \times GWP_p)$$

CEF_{TTW} = tank-to-wake carbon dioxide equivalent factor, in gCO_2e/g fuel

EF_{TTW_p} = tank-to-wake emission factor of pollutant *p*, in g/g fuel

GWP_p = the 100-year or 20-year GWP of pollutant *p*

The EF_{WTT} and EF_{TTW} include CO_2, CH_4, N_2O, and BC. Table 2 shows EF_{WTT} by fuel type and engine type for each pollutant, as well as CEF_{WTT}, calculated in accordance with Equation 3 and the 100-year or 20-year global warming potentials listed in Table 1.

(Note that WTT BC emission factors have not yet been established but could be added in the future.) Table 3 shows EF_{TTW} for each pollutant by fuel type and engine type, as well as CEF_{TTW}, calculated in accordance with Equation 4 and the GWPs in Table 1. Summing them together, Table 4 shows well-to-wake emission factors for each pollutant and CEF_{WTW}. The following two sub-sections explain in detail how we determined EF_{WTT} and EF_{TTW}.

Table 2. Well-to-tank emission factors for each pollutant (EF_{WTT}) and associated carbon dioxide equivalent factors (CEF_{WTT}).

Fuel type[a]	Engine type	Well-to-tank (g/g fuel)					
		EF_{WTT}				CEF_{WTT}	
		CO_2	CH_4	N_2O	BC	CO_2e100	CO_2e20
HFO	SSD	0.4311	0.00399	0.00001	Unknown[a]	0.577	0.780
	MSD	0.4311	0.00399	0.00001		0.577	0.780
VLSFO	SSD	0.5457	0.00448	0.00001		0.710	0.938
	MSD	0.5457	0.00448	0.00001		0.710	0.938
MGO	SSD	0.5757	0.00460	0.00001		0.744	0.979
	MSD	0.5757	0.00460	0.00001		0.744	0.979
LNG	LNG-Otto-MS	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	LNG-Otto-MS + crankcase	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	LNG-Otto-SS	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	LNG-Otto-SS + crankcase	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	LNG-Diesel	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	LBSI	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	LBSI + crankcase	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107
	Steam Turbine	0.5300	0.01810	0.00001		1.184	2.107

[a] WTT emission factors for black carbon are yet to be established but could be added later. If so, CO_2e100 and CO_2e20 values will increase based on the BC emission factor and global warming potential.

Table 3. Tank-to-wake emission factors for each pollutant (EF_{TTW}) and associated carbon dioxide equivalent factors (CEF_{TTW}).

Fuel type	Engine type	Tank-to-wake (g/g fuel)					
		EF_{TTW}				CEF_{TTW}	
		CO_2	CH_4	N_2O	BC	CO_2e100	CO_2e20
HFO	SSD	3.114	0.00006	0.00017	0.00019	3.338	3.773
	MSD	3.114	0.00005	0.00016	0.00049	3.605	4.730
VLSFO	SSD	3.188	0.00006	0.00018	0.00019	3.415	3.849
	MSD	3.188	0.00006	0.00017	0.00049	3.682	4.806
MGO	SSD	3.206	0.00006	0.00018	0.00004	3.298	3.388
	MSD	3.206	0.00006	0.00017	0.00026	3.493	4.089
LNG	LNG-Otto-MS	2.750	0.03526	0.00013	0.00002	4.075	5.916
	LNG-Otto-MS + crankcase	2.750	0.04167	0.00013	0.00002	4.306	6.473
	LNG-Otto-SS	2.750	0.01689	0.00014	0.00002	3.416	4.320
	LNG-Otto-SS + crankcase	2.750	0.02365	0.00014	0.00002	3.660	4.908
	LNG-Diesel	2.750	0.00148	0.00022	0.00001	2.879	2.970
	LBSI	2.750	0.02628	0.00013	0.00002	3.752	5.135
	LBSI + crankcase	2.750	0.03269	0.00013	0.00002	3.983	5.693
	Steam Turbine	2.750	0.00014	0.00007	0.00002	2.794	2.845

Table 4. Well-to-wake emission factors for each pollutant (EF_{WTW}) and associated carbon dioxide equivalent factors (CEF_{WTW}).

Fuel type	Engine type	Well-to-wake (g/g fuel)					
		EF_{WTW}				CEF_{WTW}	
		CO_2	CH_4	N_2O	BC	CO_2e100	CO_2e20
HFO	SSD	3.545	0.00404	0.00018	0.00019	3.915	4.553
	MSD	3.545	0.00404	0.00017	0.00049	4.182	5.510
VLSFO	SSD	3.734	0.00453	0.00019	0.00019	4.124	4.787
	MSD	3.734	0.00453	0.00018	0.00049	4.391	5.744
MGO	SSD	3.782	0.00466	0.00019	0.00004	4.043	4.367
	MSD	3.782	0.00466	0.00018	0.00026	4.237	5.068
LNG	LNG-Otto-MS	3.280	0.05336	0.00014	0.00002	5.259	8.023
	LNG-Otto-MS + crankcase	3.280	0.05977	0.00014	0.00002	5.490	8.580
	LNG-Otto-SS	3.280	0.03499	0.00014	0.00002	4.600	6.427
	LNG-Otto-SS + crankcase	3.280	0.04175	0.00014	0.00002	4.844	7.015
	LNG-Diesel	3.280	0.01958	0.00023	0.00001	4.063	5.077
	LBSI	3.280	0.04438	0.00014	0.00002	4.936	7.242
	LBSI + crankcase	3.280	0.05079	0.00014	0.00002	5.167	7.799
	Steam Turbine	3.280	0.01824	0.00008	0.00002	3.978	4.952

DETERMINING WELL-TO-TANK EMISSION FACTORS FOR EACH POLLUTANT

The WTT emission factors in Table 2 are obtained by multiplying the upstream energy-based emission factors for marine fuels in in Table 5 (g pollutant/megajoule) by the fuel energy content assumption in Table 6 (MJ/g fuel). The energy content assumptions for HFO, MGO, and LNG are consistent with the Fourth IMO GHG Study.[4] Assumptions for VLSFO, which was not assessed in the Fourth IMO GHG Study, are taken from a previous analysis.[5] The upstream CH_4 emissions for liquified natural gas in Table 5 (0.38 gCH_4/MJ) are consistent with the findings in a previous study which finds that upstream methane leakage from liquefied natural gas production is higher than the 0.30 gCH_4/MJ assumed by the U.S. Environmental Protection Agency.[6]

Table 5. Well-to-tank emissions for marine fuels (g/MJ)

Pollutant	Fuel			
	HFO	VLSFO	MGO	LNG
CH_4	0.10	0.11	0.11	0.38
N_2O	0.00018	0.00022	0.00023	0.00016
CO_2	10.72	12.93	13.48	11.04

Table 6. Energy content of marine fuels

Fuel	Energy content (MJ/g fuel)
HFO	0.0402
MGO	0.0427
VLSFO	0.0422
LNG	0.0480

DETERMINING TANK-TO-WAKE EMISSION FACTORS FOR EACH POLLUTANT

The TTW emission factors for each pollutant are shown in Table 3, and CO_2 is consistent with the carbon dioxide factors used in the Fourth IMO GHG Study[7] for HFO, MGO, and LNG and Comer et al.[8] for VLSFO, as shown in Table 7.

Table 7. Carbon factors for marine fuels.

Fuel	Carbon factor (gCO_2/g fuel)
HFO	3.114
MGO	3.206
VLSFO	3.188
LNG	2.750

4 Jasper Faber, Shinichi Hanayama, Shuang Zhang, Paula Pereda, Bryan Comer, Elena Hauerhof,., and Hui Xing "Fourth IMO greenhouse gas study," (International Maritime Organization, 2020), https://docs.imo.org/.

5 Bryan Comer, Elise Georgeff, and Liudmila Osipova, *Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers*, ICCT: Washington, DC, 2020), https://theicct.org/publications/air-water-pollution-scrubbers-2020.

6 Nikita Pavlenko, Bryan Comer, Yuanrong Zhou, Nigel Clark, and Dan Rutherford, *The climate implications of using LNG as a marine fuel*, (ICCT: Washington, DC, 2020) https://theicct.org/publications/climate-impacts-LNG-marine-fuel-2020.

7 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."

8 Comer, Georgeff, and Osipova, *Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers*.

Black carbon TTW emission factors are consistent with those used in the Faber et al.[9] and Comer et al.[10] We assume that the BC emission factors for VLSFO are the same as for HFO. Black carbon emission factors are a function of fuel type, engine type, and engine load. The BC TTW emission factors for HFO, VLSFO, and MGO in Table 3 assume that ships operate at 50% load, corresponding to the gray shaded row in Table 8, and are divided by 1000 to convert from units of gBC/kg fuel to gBC/g fuel. Emission factors for LNG are the same as those in Faber et al. and Comer et al., as shown in Table 9.[11]

Table 8. Black carbon emission factors for oil-based fuels (g/kg fuel)

Engine load	HFO or VLSFO		MGO	
	SSD	MSD	SSD	MSD
0.05	0.44	4.54	0.10	3.48
0.1	0.34	2.32	0.08	1.60
0.2	0.27	1.19	0.06	0.73
0.25	0.25	0.96	0.05	0.57
0.3	0.23	0.80	0.05	0.46
0.4	0.21	0.61	0.04	0.34
0.5	0.19	0.49	0.04	0.26
0.6	0.18	0.41	0.04	0.21
0.7	0.17	0.35	0.04	0.18
0.75	0.17	0.33	0.03	0.17
0.8	0.16	0.31	0.03	0.15
0.9	0.16	0.28	0.03	0.14
1	0.15	0.25	0.03	0.12

Table 9. Black carbon emission factors for LNG (g/kg fuel)

Engine type	BC (g/kg LNG)
LNG-Otto-MS, LNG-Otto-SS, LBSI	0.02
LNG-Diesel	0.01
Steam Turbine	0.02

Methane TTW emission factors are consistent with those use in the Fourth IMO GHG Study.[12] To calculate CH_4 TTW emissions factors, we divide the CH_4 energy-based emission factors used in Faber et al.,[13] which can be found in Table 10 and are in units of gCH_4/kWh, by the specific fuel consumption (SFC) of each fuel-engine pair in Table 11, which are in units of g fuel/kWh. This results in TTW CH_4 emission factors in units of gCH_4/g fuel. The SFC assumptions reflect 2001 and newer model year engines and are

9 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."

10 Bryan Comer, Naya Olmer, Xiaoli Mao, Biswajoy Roy, and Dan Rutherford, *Black carbon emissions and fuel use in global shipping, 2015*. (ICCT: Washington, DC, 2017) https://theicct.org/publications/black-carbon-emissions-global-shipping-2015.

11 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study;" Comer, Georgeff, and Osipova, *Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers*.

12 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."

13 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."

taken from the Fourth IMO GHG Study.[14] The Fourth IMO GHG Study's LNG engine SFC assumptions are consistent with Pavlenko et al., which reflects modern LNG engines built in the last several years.[15] We assume that ships using VLSFO emit the same amount of CH_4 as those using HFO. Some ships using low-pressure injection engines, including LNG-Otto and LBSI may have open crankcases; if so, Pavlenko et al. estimate that there could be an additional 1 gCH_4/kWh escaping unburned from the crankcase.[16] Therefore, in Table 3, we include rows that show the impact on CH_4 and CO_2e from these additional crankcase emissions for LNG-Otto and LBSI engines in Table 10.

Table 10. Methane emission factors (g/kWh)

Engine type	Fuel type	Methane (g/kWh)
SSD or MSD	HFO, VLSFO, MGO	0.01
LNG-Otto-MS	LNG	5.5[a]
LNG-Otto-SS	LNG	2.5[a]
LNG-Diesel	LNG	0.2
LBSI	LNG	4.1[a]
Steam Turbine	HFO, VLSFO, MGO	0.002
	LNG	0.04

a This table shows methane emission factors used in the Fourth IMO GHG Study; however, low-pressure injection engines, such as LNG-Otto-MS, LNG-Otto-SS, and LBSI, may have open crankcases, which could emit an additional 1.0 gCH4/kWh.

Table 11. Specific fuel consumption (g/kWh) for marine engines.

Fuel type	Engine type	Specific fuel consumption (g fuel/kWh)
HFO	SSD	175
	MSD	185
VLSFO	SSD	167
	MSD	177
MGO	SSD	165
	MSD	175
LNG	LNG-Otto-MS	156
	LNG-Otto-SS	148
	LNG-Diesel	135
	LBSI	156
	Steam Turbine	285

Nitrous oxide TTW emission factors are consistent with those use in the Fourth IMO GHG Study.[17] To calculate N_2O TTW emissions factors, we divide the N_2O energy-based emission factors used in Faber et al.,[18] which can be found in Table 12 and are in units of gN_2O/kWh, by the SFC of each fuel-engine pair in Table 11, which are in units of g fuel/

14 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."
15 Pavlenko et al., *The climate implications of using LNG as a marine fuel.*
16 Pavlenko, et al., *The climate implications of using LNG as a marine fuel.*
17 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."
18 Faber et al., "Fourth IMO greenhouse gas study."

kWh. This results in TTW N_2O emission factors in units of gN_2O/g fuel. We assume that ships using VLSFO emit the same amount of N_2O as those using HFO.

Table 12. Nitrous oxide emission factors (g/kWh)

Engine	Fuel	N_2O (g/kWh)
SSD or MSD	HFO, VLSFO, MGO	0.03
Steam Turbine	HFO, VLSFO, MGO	0.04
LNG-Otto-MS, LNG-Otto-SS, LBSI	LNG	0.02
LNG-Diesel	LNG	0.03
Steam Turbine	LNG	0.02

RESULTS

Table 13 presents WTW emission factors for fossil marine fuels developed according to the methodology described in this briefing. These WTW emission factors include both upstream well-to-tank (WTT) and downstream tank-to-wake (TTW) emission factors.

In Table 13, CO_2 accounts for only carbon dioxide emissions, whereas CO_2e100 and CO_2e20 account for emissions of other climate pollutants based on their 100-year or 20-year global warming potential. Comparing the three metrics, one can see that focusing solely on CO_2 and ignoring other climate pollutants can significantly underestimate climate pollution from maritime transport. We suggest policymakers consider not only CO_2e100 but also CO_2e20 for policies intended to be aligned with the Paris Agreement. In addition to reducing CO_2 emissions, reducing pollutants with large 20-year global warming potential, such as CH_4, BC, and N_2O, can help prevent additional near-term warming.

Table 13. Well-to-wake carbon dioxide and carbon dioxide equivalent factors (CEF_{WTW}) for fossil marine fuels.

Fuel type	Engine type	Well-to-wake (g/g fuel)		
		CO_2	CO_2e100	CO_2e20
HFO	SSD	3.545	3.915	4.553
	MSD	3.545	4.182	5.510
VLSFO	SSD	3.734	4.124	4.787
	MSD	3.734	4.391	5.744
MGO	SSD	3.782	4.043	4.367
	MSD	3.782	4.237	5.068
LNG	LNG-Otto-MS	3.280	5.259	8.023
	LNG-Otto-MS + crankcase	3.280	5.490	8.580
	LNG-Otto-SS	3.280	4.600	6.427
	LNG-Otto-SS + crankcase	3.280	4.844	7.015
	LNG-Diesel	3.280	4.063	5.077
	LBSI	3.280	4.936	7.242
	LBSI + crankcase	3.280	5.167	7.799
	Steam Turbine	3.280	3.978	4.952

DISCUSSION

To give an example of why it is important to consider not only CO_2 but also CO_2e100 and CO_2e20, consider the figures below. Each figure applies Equation 1, and fuel consumption (*FC*) is assumed to be 1000 tonnes. Figure 1 shows the CO_2e_{WTW} emissions of consuming 1,000 tonnes of LNG in the engine with the highest WTW emissions (LNG-Otto-MS + crankcase) and the LNG engine with the lowest WTW emissions (LNG-Diesel). The exercise is repeated for SSD and MSD engines running on VLSFO (Figure 2) and MGO (Figure 3). Notice that estimates of WTW climate pollution can more than double for LNG engines that have high methane slip when evaluated on CO_2e20 compared with CO_2 (left side of Figure 1). Figure 2 and Figure 3 show that the relative contribution of black carbon emissions to WTW emissions depends strongly on whether it is evaluated using 100-year or 20-year global warming potential. When BC is accounted for, using MGO results in lower WTW emissions than VLSFO.

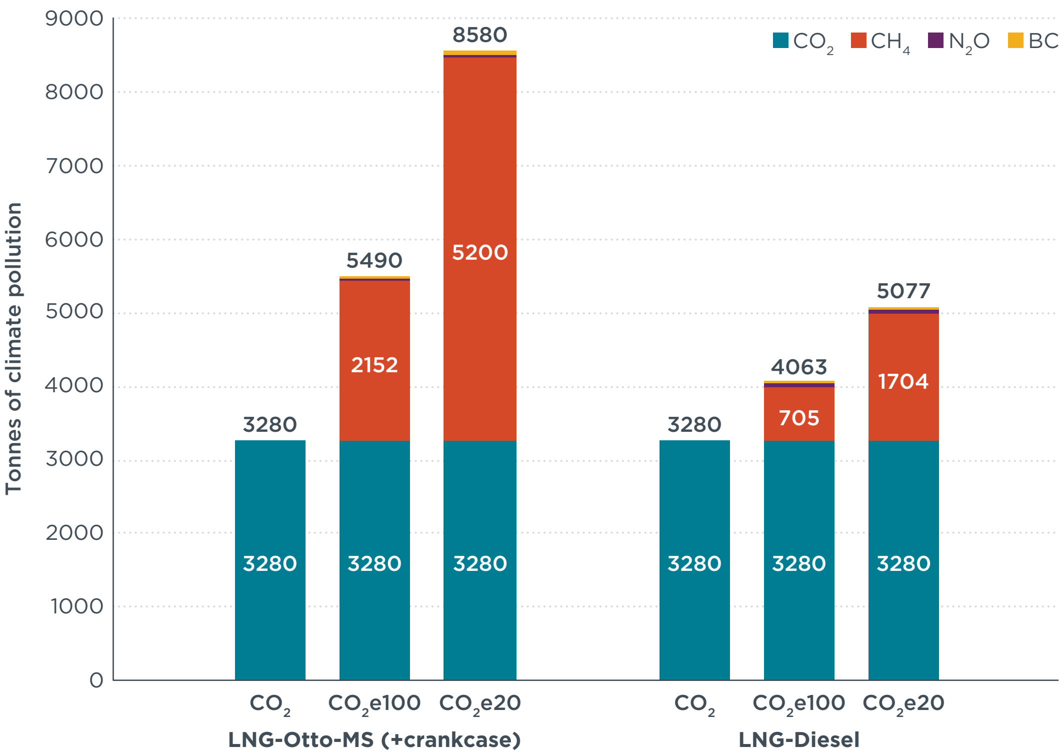


Figure 1. Well-to-wake emissions of consuming 1000 tonnes of liquefied natural gas in two engines.

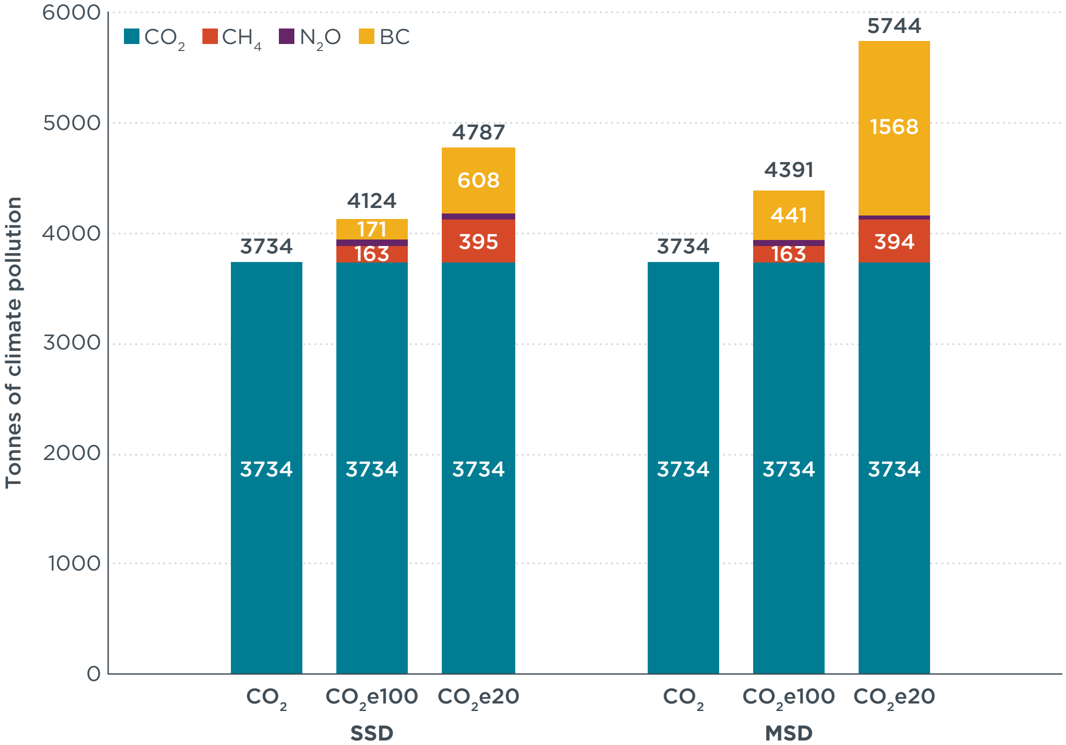


Figure 2. Well-to-wake emissions of consuming 1000 tonnes of VLSFO in two engines.

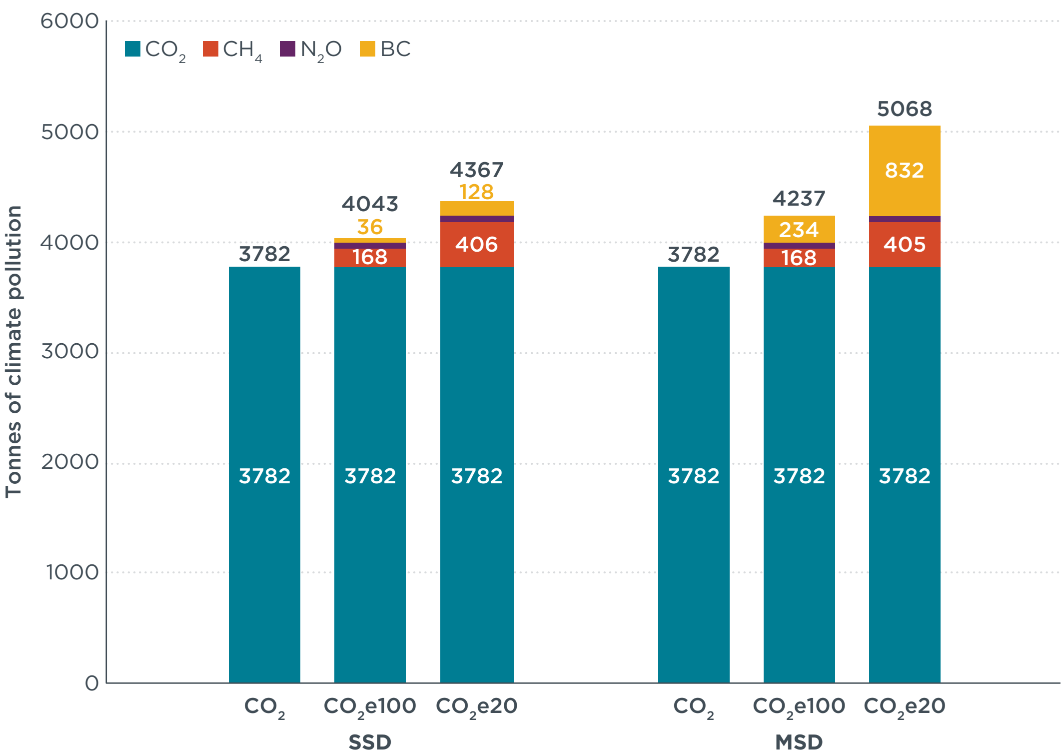


Figure 3. Well-to-wake emissions of consuming 1000 tonnes of MGO in two engines.

CONCLUSIONS

This briefing paper outlines a methodology for calculating well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions from four fossil marine fuels: heavy fuel oil, very low sulfur fuel oil, marine gas oil, and liquefied natural gas. Well-to-wake emission factors for these fuels are presented in Table 13. While the EU Emissions Trading Scheme presents the most immediate opportunity to apply this methodology, it can also be applied to policies being developed at the International Maritime Organization and in other regions and countries that aim to reduce shipping's climate impacts.

The WTW carbon dioxide equivalent factors developed in this briefing cover existing marine fuels but could be expanded to new fuels including hydrogen and ammonia, two fuels where the WTT component is particularly important when evaluating their life-cycle climate consequences. No matter which fuel is used, WTT emissions will depend on the feedstock and production pathway. In addition, the TTW emissions will depend on whether the fuel is used in a fuel cell, combusted in an engine, or used in some other way. As new fuels and energy sources for shipping are researched and developed, it will be important to develop WTW emission factors that encompass their full life-cycle emissions in order to accurately judge their climate credentials.

Emission factors used in the estimations of emissions from combustion

In the calculations the numbers are used with the highest available accuracy. In these tables though, they are only shown rounded off.

In the tables, dotted cells indicate combinations of fuel and source without consumption.

CO_2, SO_2 and heavy metals - Stationary and mobile combustion

Table B1. General emission factors for CO_2, SO_2 and heavy metals

	CO_2 tonne/tonne[2]	SO_2[1] kg/tonne[2]	Pb g/tonne[2]	Cd g/tonne[2]	Hg g/tonne[2]	As g/tonne[2]	Cr g/tonne[2]	Cu g/tonne[2]
Coal	2.52	*16*[3]	*0.2*[3]	*0.003*[3]	*0.05*[3]	*0.089*[3]	*0.065*[3]	*0.087*[3]
Coke	3.19	18	*0.2*[3]	*0.003*[3]	*0.05*[3]	*0.089*[3]	*0.065*[3]	*0.087*[3]
Petrol coke	3.59	18	*0.2*	*0.003*	*0.05*	*0.089*	*0.065*	*0.087*
Charcoal	0	0.32	0.8	0.38	0.02	0.01	0.68	0.18
Motor gasoline	3.13	**0.001**	**0.03**[4]	0.01	0,0084	0.05	0.05	1.7
Aviation gasoline	3.13	0.4	675.7	0.01	0	0.05	0.05	1.7
Kerosene (heating)	3.15	**0.346**	0.07	0.01	0.03	0.05	0.04	0.05
Jet kerosene	3.15	**0.274**	0.07	0.01	0.03	0.05	0.05	0.05
Auto diesel	3.17[5]	**0.015**[6]	0.1	0.01	0,0023	0.05	0.05	1.7
Marine gas oil/diesel	3.17	**1.158**	0.1	0.01	0.05	0.05	0.04	0.05
Light fuel oils	3.17	**0.928**	0.1	0.01	0.05	0.05	0.04	0.05
Heavy distillate	3.17	**4.375**	0.1	0.01	0.05	0.05	0.04	0.05
Heavy fuel oil	3.2	**17.84**[7]	1	0.1	0.2	0.057	1.35	0.53
Natural gas (1000 Sm^3)	1.99/**2.34**[8]	0	0.00025	0.002	0.001	0.004	0.021	0.016
LPG	3	0	0	0	0	0.004	0.021	0.016
Refinery gas	2.8	0	0	0	0	0.004	0.021	0.016
CO gas	1.571	0	0	0	0	0.004	0.021	0.016
Fuel gas	2.5	0	0	0	0	0.004	0.021	0.016
Landfill gas	0	0.019	0	0	0	0.004	0.021	0.016
Biogas	0	0	0.00025	0.0017	0.001	0.0038	0.021	0.016
Fuel wood	0	0.2	0.05	0.1	0.010244	0.159	0.152	0.354
Wood waste	0	0.37	0.05	0.1	0.010244	0.159	0.152	0.354
Wood pellets	0	0.37	0.05	0.1	0.1	0.159	0.152	0.354
Wood briquettes	0	0.37	0.05	0.1	0.1	0.159	0.152	0.354
Black liquor	0	0.37	0.05	0.1	0.010244	0.159	0.152	0.354
Municipal waste	**0.5498**[9]	1.4	**0.00304**	**0.00015**	**0.00016**	0.022	0.001	0.000985
Special waste	3.2	9.2	14	0.6	0.2	1	31	25

[1] Applies to 2015 for petroleum products; the factors change yearly, in accordance with changes in the sulphur content in the products.
[2] For natural gas: 1000 Sm^3.
[3] Exceptions: Direct-fired furnaces in cement production = 9.1 and small stoves in households = 20.
[4] From 1997 - considerably higher earlier years. Earlier used factors are not shown in this Appendix.
[5] From 2006 the emission factor has been corrected for use of bio diesel, which not causes emissions of CO_2: 2006: 3.159, 2007: 3.114, 2008: 3.029, 2009: 3.007, 2010: 2.992, 2011: 3.006, 2012: 2.989, 2013: 2.989, 2014: 3.000, 2015: 2.990.
[6] Applies to road traffic. Weighted average of duty-free and dutiable auto diesel.
[7] Stationary combustion.
[8] Respectively dry gas (domestic use) and rich gas (continental shelf).
[9] The factor increases through the period, from 0.4874 in 1990. Exact figures can be given at request.
Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B2 and B5. Bold numbers are different for different years, see table B3, B4 and B5.
Source: Rosland (1987), (Norwegian pollution control authority (1990), (Sandgren *et al.* (1996), Finstad *et al*. (2001) Finstad et al. (2002) and Finstad *and Rypdal* (2003).

Table B2. Exceptions from the general emission factors for heavy metals: Solid fuels in small stoves (households)

	Pb g/tonne	Cd g/tonne	Hg g/tonne	As g/tonne	Cr g/tonne	Cu g/tonne
Coal	2.5	0.15	0.3	1.2	0.9	1.2
Coke	2.5	0.15	0.3	1.2	0.9	1.2

Table B3. Time series for variable emission factors for SO_2 (kg/tonne)

Years	V11 Motor gasoline	V13 Kerosene (heating)	V14 Jet kerosene	V15 Auto diesel				V17 Marine gas oil/diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil (LS-oil)	V20 Heavy fuel oil (NS-oil)
	General	General	General	General	M.1A3B.1 Passenger cars	M.1A3B.2 Light duty vehicles	M.1A3B.3 Heavy duty vehicles	General	General	General	General	General
1980	1	0.2	0.2	6.6	.	.	.	6.6	6.6	15	19	46
1987	0.7	0.4	0.4	4.4	.	.	.	4.4	4.4	9	19	44
1989	0.6	0.4	0.4	3.4	.	.	.	3.4	3.4	7.6	18.2	40
1990	0.6	0.3	0.3	3.2	.	.	.	3.2	3.2	6	17	39.4
1991	0.6	0.38	0.38	2.8	.	.	.	2.8	2.8	4.6	16.8	43.6
1992	0.6	0.32	0.32	2.6	.	.	.	2.6	2.6	4.4	16.4	42.6
1993	0.6	0.42	0.42	2.2	.	.	.	2.2	2.2	4.4	16.2	45.8
1994	0.6	0.36	0.36	1.4	.	.	.	1.4	1.4	4.2	14.2	44.8
1995	0.24	0.46	0.46	1.4	.	.	.	1.4	1.4	4.6	11.8	43.4
1996	0.22	0.46	0.5	1.2	.	.	.	1.2	1.2	3.8	12.6	46.6
1997	0.16	0.46	0.46	1.2	.	.	.	1.2	1.2	3.8	12.6	47.2
1998	0.16	0.42	0.42	0.8	.	.	.	1.8	1.8	4.2	12.4	42.8
1999	0.22	0.32	0.32	0.6	.	.	.	1.6	1.6	4.4	12.8	39
2000	0.18	0.36	0.36	1.4	0.1174	0.1174	0.1174	1.8	1.8	4.6	14.4	31
2001	0.18	0.46	0.46	0.8	0.0885	0.0885	0.0885	1.8	1.8	4.8	13.2	44.4
2002	0.2	0.32	0.32	0.6	0.0708	0.0708	0.0708	1.6	1.2	4.8	12	43.8
2003	0.1	0.3	0.3	0.8	0.0748	0.0748	0.0748	2	0.8	4.6	14	44.2
2004	0.06	0.3	0.3	0.8	0.0748	0.0748	0.0748	1.8	0.8	5	14.2	44.2
2005	0.01	0.28	0.28	0.8	0.0278	0.0278	0.0278	1.8	0.8	4.6	13.6	39.2
2006	0.01	0.27	0.27	1.38	0.0393	0.0393	0.0393	2	1.38	4.44	10.4	26.2
2007	0.01	0.296	0.296	0.73	0.0244	0.0244	0.0244	1.53	0.73	4.17	17.8	20
2008	0.01	0.286	0.286	0.786	0.0285	0.0285	0.0285	1.562	0.986	3.098	17.5	28.5
2009	0.01	0.302	0.371	0.016	0.016	0.016	0.016	1.069	0.949	4.31	17.4	27.8
2010	0.01	0.324	0.294	0.015	0.015	0.015	0.015	1.184	0.978	4.31	17.5	28
2011	0.01	0.334	0.296	0.015	0.015	0.015	0.015	1.196	0.984	4.32	17.8	28.4
2012	0.01	0.326	0.294	0.015	0.015	0.015	0.015	1.038	0.658	4.295	17.5	27.4
2013	0.009	0.298	0.252	0.014	0.014	0.014	0.014	1.026	0.642	3.957	15.4	26.4
2014	0.01	0.342	0.252	0.014	0.014	0.014	0.014	1.054	0.648	4.263	15.5	27.0
2015	0.01	0.346	0.274	0.015	0.015	0.015	0.015	1.158	0.928	4.375	17.8	28.6

Table B4. Time series for variable emission factors for heavy metals, stationary combustion. g/tonne

			1990-1991			1992-		
Sector	Source	Fuel	Pb	Cd	Hg	Pb	Cd	Hg
General	S.03	V51	0.0085	0.00047	0.00035	0.00304	0.00015	0.00016

Table B5. Exceptions with time series for variable emission factors for natural gas combusted by oil exploration, tonne CO_2/1000 Sm^3 natural gas

Sector	Source	Fuel	Component	1990-1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002*
230600.1	S.02	V31	CO_2	2.34	2.29	2.3	2.3	2.31	2.5	2.48	2.47	2.45
230600.1	S.1B2C	V31	CO_2	2.34	2.42	2.34	2.34	2.34	2.48	2.52	2.42	2.47

*For the years after 2002 reported emissions are used

Aviation - CH_4, N_2O, NO_X, NMVOC, CO, particles and PAH

Table B6. General emission factors for aviation

Source	Fuel	CH_4 kg/ tonne	N_2O kg/ tonne	NO_X kg/ tonne	NMVOC kg/ tonne	CO kg/ tonne	NH_3 kg/ tonne	TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$ kg/tonne	Dioxins µg I-TEQ/ tonne
M.1A3A.111 Jet/turboprop 0-100 m	V14 Jet kerosene	***0.129***	0.1	*12.968*	*1.164*	*10.952*	0	0.064	0.06
M.1A3A.112 Jet/turboprop 100-1000 m	V14 Jet kerosene	***0.129***	0.1	*12.968*	*1.164*	*10.952*	0	0.064	0.06
M.1A3A.12 Jet/turboprop cruise	V14 Jet kerosene	0	0.1	*14.650*	*0.707*	*11.351*	0	0.102	0.06
M.1A3A.211 Helicopter 0-100 m	V14 Jet kerosene	*3.2*	0.1	6.67	*28.8*	*36.6*	0	0.025	0.06
M.1A3A.212 Helicopter 100-1000 m	V14 Jet kerosene	*3.2*	0.1	6.67	*28.8*	*36.6*	0	0.025	0.06
M.1A3A.22 Helicopter cruise	V14 Jet kerosene	0	0.1	6.67	*32*	*36.6*	0	0.007	0.06
M.1A3A.311 Small aircraft 0-100 m	V12 Aviation gasoline	0.129	0.1	*12.968*	*1.164*	*10.952*	0	0.064	2
M.1A3A.312 Small aircraft 100-1000 m	V12 Aviation gasoline	0.129	0.1	*12.968*	*1.164*	*10.952*	0	0.064	2
M.1A3A.32 Small aircraft cruise	V12 Aviation gasoline	0	0.1	*14.650*	*0.707*	*11.351*	0	0.102	2

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B7, and bold numbers are different for different years, see table B8.
In the estimation update for CH_4, NO_X, NMVOC, CO and particles, which was based on the new EEA (2013) factors, no distinction are made between flight phases in 0-100 m altitude and 100-1000 m altitude. Furthermore, emission factors for jet/turboprop and small aircraft are weighted together.
Source: Finstad *et al*. (2001), Finstad *et al*. (2002) and EEA (2013).

Table B7. Exceptions from the general factors for aviation

Component	Emission factor	Fuel		Source	Sectors
CH_4	0.35	V14	Jet kerosene	M.1A3A.111-112, M1A3A.211-212	248422
NO_X	13.51	V14	Jet kerosene	M.1A3A.111, M1A3A.211	248422
NO_X	13.29	V14	Jet kerosene	M.1A3A.112, M1A3A.212	248422
NO_X	11.7	V14	Jet kerosene	M.1A3A.12, M.1A3A.22	248422
NMVOC	7.43	V14	Jet kerosene	M.1A3A.111, M1A3A.211	248422
NMVOC	7.36	V14	Jet kerosene	M.1A3A.112, M1A3A.212	248422
NMVOC	4.3	V14	Jet kerosene	M.1A3A.12, M.1A3A.22	248422
CO	23.67	V14	Jet kerosene	M.1A3A.111, M1A3A.211	248422
CO	23.15	V14	Jet kerosene	M.1A3A.112, M1A3A.212	248422
CO	20.9	V14	Jet kerosene	M.1A3A.12, M.1A3A.22	248422
CH_4	0.090	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.11x, M1A3A.31x	235100.2N
CH_4	0	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.12, M1A3A.32	235100.2N
NO_X	12.559	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.11x, M1A3A.31x	235100.2N
NO_X	13.857	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.12, M1A3A.32	235100.2N
NMVOC	0.810	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.11x, M1A3A.31x	235100.2N
NMVOC	0.246	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.12, M1A3A.32	235100.2N
CO	9.903	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.11x, M1A3A.31x	235100.2N
CO	2.547	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.12, M1A3A.32	235100.2N
TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$	0.074	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.11x, M1A3A.31x	235100.2N
TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$	0.142	V12, 14	Aviation gasoline, jet kerosene	M.1A3A.12, M1A3A.32	235100.2N

Table B8. Time series for variable emission factors for aviation. Factors for 1989, 1995, 2000 and 2012 are calculated as given in the table. Factors for 1990-1994, 1996-1999 and 2001-2011 are calculated by linear interpolation. Factors after 2012 are kept constant. In the 2012 calculation source M.1A3A.111 and M.1A3A.112 are weighted together.

		General			235100.2N		665100.2
Component	*Year*	*M.1A3A.111 (LTO 0-100 m)*	*M.1A3A.112 (LTO 100-1000 m)*	*M.1A3A.12 (cruise)*	*M.1A3A.111 (LTO 0-100 m)*	*M.1A3A.112 (LTO 100-1000 m)*	*M.1A3A.12 (cruise)*
CH_4	1989	0.086	0.014	0.000	0.041	0.007	0.000
	1995	0.858	0.141	0.000	0.086	0.014	0.000
	2000	0.175	0.029	0.000	0.144	0.025	0.000
	2012	0.129	0.129	0.000	0.090	0.090	0.000
NO_X	1989	6.772	13.049	12.119	7.762	14.958	12.755
	1995	9.296	17.913	11.001	7.745	14.924	11.989
	2000	7.579	14.605	14.032	7.327	14.884	11.750
	2012	12.968	12.968	14.650	12.559	12.559	13.857
NMVOC	1989	0.775	0.127	0.554	0.365	0.060	0.675
	1995	7.725	1.265	0.963	0.773	0.127	3.369
	2000	1.576	0.258	0.507	1.293	0.221	0.366
	2012	1.164	1.164	0.707	0.810	0.810	0.246
CO	1989	19.768	2.145	6.947	14.173	1.538	4.191
	1995	27.204	2.952	12.147	15.118	1.640	8.459
	2000	21.239	2.305	7.808	16.925	2.659	3.866
	2012	10.952	10.952	11.351	9.903	9.903	2.547
TSP, PM_{10}, $PM_{2.5}$	1989	0.039	0.039	0.094	0.048	0.048	0.658
	1995	0.056	0.056	0.102	0.075	0.075	1.325
	2000	0.057	0.057	0.155	0.075	0.075	1.325
	2012	0.064	0.064	0.102	0.074	0.074	0.142

Road traffic - CH_4, N_2O, NO_X, NMVOC, CO, NH_3, particles and PAH

Table B9. General emission factors for road traffic

Source	Fuel	CH_4 kg/tonne	N_2O kg/tonne	NO_X kg/tonne	NMVOC kg/tonne	CO kg/tonne	NH_3 kg/tonne	TSP, PM_{10} kg/tonne	$PM_{2.5}$ kg/tonne	Dioxins µg I-TEQ/tonne
M.1A3B.1 Passenger car	V11 Motor gasoline	**0.312**	**0.035**	**3.512**	**5.528**	**36.697**	**1.036**	**0.041**	**0.041**	**0.1**
	V15 Auto diesel	**0.012**	**0.084**	**9.222**	**0.485**	**2.695**	**0.019**	**0.273**	**0.259**	0.1
	V31 Natural gas	0	0	0.871	0.065	1.693	0	0.122	0.122	0.05
	V32 LPG	0	**0.045**	**1.163**	0	**11.999**	0	**0.033**	**0.033**	0.06
M.1A3B.2 Other light duty cars	V11 Motor gasoline	**0.525**	**0.085**	**6.386**	**9.704**	**100.020**	**0.821**	**0.083**	**0.083**	**0.1**
	V15 Auto diesel	**0.009**	**0.060**	**9.719**	**0.382**	**2.518**	**0.014**	**0.515**	**0.489**	0.1
M.1A3B.3 Heavy duty vehicles	V11 Motor gasoline	**0.576**	**0.044**	**27.969**	**16.767**	**22.266**	**0.018**	0	0	**0.1**
	V15 Auto diesel	**0.008**	**0.094**	**12.245**	**0.329**	**3.822**	**0.008**	**0.203**	**0.192**	**0.1**
	V31/V37 Natural gas/ Biogas	0	0	**8.274**	0	**5.901**	**0.008**	**0.026**	**0.026**	0.05
M.1A3B.41 Moped	V11 Motor gasoline	**24.707**	**0.052**	**3.254**	**108.829**	**193.621**	**0.052**	0	0	**0.1**
M.1A3B.42 Motorcycle	V11 Motor gasoline	**1.643**	**0.058**	**4.108**	**19.100**	**192.334**	**0.058**	0	0	**0.1**

Bold numbers are different for different years, but only the 2015 data are shown in this Appendix, except for CH_4 (table B10) and N_2O (table B11).
Source: Results from Statistiics Norway's use of HBEFA (INFRAS 2009) and Finstad *et al.* (2001).

Table B10. Average CH_4 emission factors for road traffic including cold start emissions and evaporation, g CH_4/ kg fuel

	V11 Motor gasoline					V15 Auto diesel		
	Passenger car	Other light duty cars	Heavy duty vehicles	Moped	Motorcycle	Passenger car	Other light duty cars	Heavy duty vehicles
1990 …………	1.641	1.865	0.576	12.878	3.600	0.109	0.097	0.082
1991 …………	1.602	1.869	0.580	12.952	3.423	0.105	0.094	0.082
1992 …………	1.557	1.838	0.581	12.968	3.256	0.096	0.089	0.078
1993 …………	1.512	1.777	0.582	12.999	3.055	0.077	0.074	0.068
1994 …………	1.457	1.703	0.583	13.027	2.896	0.084	0.085	0.073
1995 …………	1.396	1.609	0.586	13.082	2.774	0.081	0.082	0.071
1996 …………	1.270	1.472	0.576	12.862	2.585	0.076	0.076	0.066
1997 …………	1.218	1.425	0.592	13.219	2.815	0.078	0.078	0.066
1998 …………	1.104	1.290	0.576	12.871	2.895	0.074	0.071	0.056
1999 …………	1.016	1.202	0.573	14.392	3.047	0.071	0.066	0.052
2000 …………	0.964	1.147	0.588	17.636	3.173	0.067	0.063	0.049
2001 …………	0.850	1.001	0.564	19.949	3.052	0.057	0.054	0.043
2002 …………	0.775	0.916	0.563	23.218	3.061	0.050	0.049	0.040
2003 …………	0.699	0.846	0.557	25.096	2.958	0.045	0.045	0.038
2004 …………	0.624	0.777	0.549	25.748	2.792	0.039	0.041	0.035
2005 …………	0.591	0.758	0.573	26.933	2.770	0.035	0.038	0.034
2006 …………	0.543	0.713	0.579	26.893	2.576	0.030	0.033	0.032
2007 …………	0.518	0.686	0.596	27.214	2.394	0.026	0.029	0.029
2008 …………	0.485	0.646	0.597	26.787	2.138	0.023	0.024	0.026
2009 …………	0.457	0.613	0.594	26.293	2.011	0.020	0.021	0.022
2010 …………	0.426	0.579	0.585	25.648	1.896	0.017	0.017	0.018
2011 …………	0.411	0.575	0.593	25.840	1.861	0.016	0.016	0.015
2012	0.387	0.560	0.592	25.655	1.816	0.015	0.014	0.013
2013	0.364	0.546	0.589	25.428	1.765	0.014	0.012	0.012
2014	0.335	0.528	0.575	24.754	1.684	0.013	0.011	0.010
2015	0.312	0.525	0.576	24.707	1.643	0.012	0.009	0.008

Source: Results from Statistics Norway's use of HBEFA (INFRAS 2009)

Table B11. Average N_2O emission factors for road traffic including cold start emissions and evaporation, g N_2O/ kg fuel

	V11 Motor gasoline					V15 Auto diesel		Heavy duty vehicles
	Passenger car	Other light duty cars	Heavy duty vehicles	Moped	Motorcycle	Passenger car	Other light duty cars	
1990	0.099	0.109	0.044	0.052	0.057	0	0	0.033
1991	0.105	0.109	0.044	0.052	0.057	0	0	0.032
1992	0.110	0.111	0.044	0.052	0.057	0	0	0.031
1993	0.117	0.116	0.044	0.052	0.058	0	0	0.026
1994	0.125	0.123	0.045	0.052	0.058	0	0	0.030
1995	0.135	0.133	0.045	0.052	0.058	0.003	0.005	0.030
1996	0.146	0.142	0.044	0.052	0.057	0.009	0.012	0.030
1997	0.155	0.157	0.045	0.053	0.059	0.018	0.020	0.033
1998	0.153	0.160	0.044	0.052	0.057	0.027	0.026	0.032
1999	0.154	0.167	0.044	0.051	0.057	0.036	0.034	0.033
2000	0.160	0.180	0.045	0.053	0.059	0.046	0.041	0.033
2001	0.155	0.177	0.043	0.051	0.056	0.050	0.043	0.030
2002	0.156	0.203	0.043	0.051	0.056	0.056	0.046	0.029
2003	0.152	0.178	0.043	0.050	0.056	0.062	0.049	0.027
2004	0.147	0.167	0.042	0.049	0.055	0.066	0.052	0.026
2005	0.087	0.168	0.044	0.052	0.058	0.073	0.057	0.026
2006	0.083	0.164	0.044	0.052	0.059	0.076	0.060	0.025
2007	0.081	0.164	0.046	0.054	0.060	0.083	0.064	0.028
2008	0.077	0.155	0.046	0.054	0.060	0.086	0.065	0.031
2009	0.073	0.145	0.045	0.053	0.060	0.086	0.064	0.037
2010	0.067	0.132	0.045	0.052	0.059	0.083	0.060	0.047
2011	0.062	0.126	0.045	0.053	0.059	0.085	0.061	0.062
2012	0.056	0.116	0.045	0.053	0.059	0.087	0.062	0.073
2013	0.048	0.105	0.045	0.053	0.059	0.087	0.062	0.077
2014	0.040	0.093	0.044	0.051	0.057	0.086	0.061	0.088
2015	0.035	0.085	0.044	0.052	0.058	0.084	0.060	0.094

Source: Results from Statistics Norway's use of HBEFA (INFRAS 2009)

Navigation - CH_4, N_2O, NO_X, NMVOC, CO, particles and POPs

Table B12. General emission factors for navigation

	CH_4 kg/ tonne	N_2O kg/ tonne	NO_X kg/ tonne	NMVOC kg/tonne	CO kg/ tonne	NH_3 kg/ tonne	TSP, PM_{10} kg/ tonne	$PM_{2.5}$ kg/ tonne	Dioxins µg I-TEQ/ tonne
V17 Marine gas oil/diesel, V18 Light fuel oils	*0.23*	*0.08*	***43.76***	*2.4*	*2.9*	0	1.6	1.5	4
V19 Heavy distillate, V20 Heavy fuel oil	*0.23*	*0.08*	***43.76***	*2.4*	*2.9*	0	5.4	5.1	4
V31 Natural gas (1000 Sm^3)	**48.64**	0.07	4.0	0.814	2.143	0	0.032	0.032	0.05

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B13, and bold numbers are different for different years, see table B14-B16.
Source: Flugsrud and Rypdal (1996), Tornsjø (2001), Finstad *et al.* (2001), Finstad *et al*. (2002b), Finstad *et al.* (2003), Bremnes Nielsen and Stenersen (2010).

Table B13. Exceptions from the general factors for navigation

Component	Emission factor (kg/tonne)	Fuel		Sector
CH_4	0.8	V17	Marine gas oil/diesel	230600.1 -230600.3
CH_4	1.9	V20	Heavy fuel oil	230600.1 -230600.3
N_2O	0.02	V17	Marine gas oil/diesel	230600.1 -230600.3
NO_X	**36.60**	V17, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	230310.N
NO_X	54	V17, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, Heavy fuel oil	230600.1 -230600.3
NO_X	**46.58**	V17, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	248422
NMVOC	**1.4**	V17, 18, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	230310.N
NMVOC	**2.3**	V17, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	248422
NMVOC	5	V17	Marine gas oil/diesel, light fuel oils	230600.1 -230600.3
NMVOC	**5**	V19, 20	Heavy distillate, heavy fuel oil	230600.1 -230600.3
CO	7.9	V17, 18, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	230310.N
CO	**1.6**	V17, 18, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	230600.1
CO	7	V17, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	230600.1 -230600.3
CO	2.3	V17, 19, 20	Marine gas oil/diesel, light fuel oils, heavy distillate, heavy fuel oil	248422

Table B14. Time series for variable emission factors for navigation. NO_X

Sector	Fuel	1990-1999	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
General	V17-20		56.85	56.80	56.89	56.77	56.82	56.68	57.23	57.47	57.41	56.82

Sector	Fuel		2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
General	V17-20		57.82	56.51	55.90	55.55	54.61	53.25	51.90	50.54	49.18	47.83	46.47	45.11	43.76
230310.N	V17, 19, 20	52.11	52.12	51.69	51.58	51.48	50.93	49.90	47.41	45.17	43.64	43.36	40.94	37.97	36.60
248422	V17, 19, 20	50.17	49.82	48.95	48.74	48.52	48.31	48.09	47.88	47.66	47.44	47.23	47.01	46.80	46.58

Source: (Flugsrud *et al.* 2010)

Table B15. Time series for variable emission factors for navigation. CH_4

Sector	Fuel	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013-15
General	V31	31.43	31.43	31.43	49.99	52.71	54.55	54.43	36.81	38.83	41.65	42.73	40.59	46.83	48.64

Table B16. Time series for variable emission factors for navigation. NMVOC and CO

Sector	Fuel	NMVOC						CO	
		1980-1990	1980-1997	1980-1998	1991-	1998-	1999-	1980-1997	1998-
General	V17-20							3.1	2.9
230310.N	V17-20			1.5			1.4		
230600.1	V17-20							2	1.6
230600.1,230910	V19,20	6.4			5				
230600.1,230910	V 20								
248422	V17-20		2.2			2.3			

Other mobile sources including railways - CH_4, N_2O, NO_X, NMVOC, CO, NH_3, particles and POPs

Table B17. General emission factors for other mobile sources

		CH_4 kg/ tonne	N_2O kg/ tonne	NO_X kg/ tonne	NMVOC kg/ tonne	CO kg/ tonne	NH_3 kg/ Tonne	TSP, PM_{10} kg/ tonne	$PM_{2.5}$ kg/ tonne	Dioxins µg I-TEQ/ tonne
M.1A3C Railway	V01 Coal	0.28	0.04	3	1.1	3	0	1.6/1.14	0.82	1.6
	V15 Auto diesel	0.18	1.2	47	4	11	0.007	3.8	3.8	0.1
M.1A3E.21 Small boats 2 stroke	V11 Motor gasoline	5.1	0.02	6	240	415	0	8	8	**0.1**
M.1A3E.22 Small boats 4 stroke	V11 Motor gasoline	1.7	0.08	12	40	1 000	0	1	1	**0.1**
	V15 Auto diesel	0.18	0.03	54	27	25	0	4	4	0.1
M.1A3E.31 Motorized equipment 2 stroke	V11 Motor gasoline	6	0.02	**2**[1]	500	700	0	8	8	**0.1**
M.1A3E.32 Motorized equipment 4t	V11 Motor gasoline	*2.2*	*0.07*	10	110	1 200	0	1	1	**0.1**
	V15 Auto diesel	0.*17*	0.139	**13.0**	***1.0***	***6.1***	0.008	***0.2***	**0.2**	0.1
	V18 Light fuel oils	0.17	1.3	*50*	*6*	*15*	0.005	*7.1*	6.*75*	0.1

M.1A3E.1 Snow scooter has the same emission factors as M.1A3B.41 Moped, see table B9.
Bold numbers are different for different years, but only 2015 figures are presented here.
[1]Before 1995 the emission factor was 1.3.
Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B18–B19.
Sources: Bang (1993), Bang *et al.* (1999), Finstad *et al*. (2001), Finstad *et al*. (2002b), Finstad *et al*. (2003), Winther and Nielsen (2006), EEA (2013).

Table B18. Exceptions from the general factors for greenhouse gases and precursors for other mobile sources

Component	Emission factor (kg/tonne)	Fuel		Source	Sectors
CH_4	6.2	V11	Motor gasoline	M.1A3E.31 Motorized equipment 2 stroke	230100
CH_4	3.7	V11	Motor gasoline	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100
CH_4	7.7	V11	Motor gasoline	M.1A3E.31 Motorized equipment 2 stroke	230210
CH_4	8.1	V11	Motor gasoline	M.1A3E.31 Motorized equipment 2 stroke	330000
CH_4	5.5	V11	Motor gasoline	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	330000
CH_4	0.18	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	330000
N_2O	0.08	V11	Motor gasoline	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230500-233320
N_2O	0.132	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100-230210
NO_X	**15.1**	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100-230210
NO_X	54	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100
NO_X	52	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230210
NO_X	47	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230710-230892, 234910
NO_X	48	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	232360, 248422
NO_X	46	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	234110-234120
NMVOC	**1.8**	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100-230200
NMVOC	7.2	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100
NMVOC	5.7	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230210

NMVOC	4	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230710-230892,234910
NMVOC	4.8	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	232360, 248422
NMVOC	3.8	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	234110-234120
CO	**10.0**	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100-230210
CO	25	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100
CO	20	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230210
CO	11	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230710-230892, 234910
CO	17	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	234110-234120
CO	18	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	248422

Bold numbers are different for different years, time series for NO_x are presented in table B20.

Table B19. Exceptions from the general factors for other pollutants for other mobile sources

Component	Emission factor (kg/tonne)	Fuel		Source	Sectors
TSP, PM_{10}	**1.7**	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100-230210
TSP, PM_{10}	3.8	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230710-230892, 234910
TSP, PM_{10}	4.2	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	232360
TSP, PM_{10}	5.3	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	234110-234120
TSP, PM1$_0$	5.4	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	248422
$PM_{2.5}$	**1.6**	V15	Auto diesel	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230100-230210
$PM_{2.5}$	3.61	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	230710-230892, 234910
$PM_{2.5}$	3.99	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	232360
$PM_{2.5}$	5.04	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	234110-234120
$PM_{2.5}$	5.13	V18	Light fuel oils	M.1A3E.32 Motorized equipment 4 stroke	248422

Bold numbers are different for different years, but only 2015 figures are presented here.

Table B20. Time series for NO_X emission factors for use of auto diesel in motorized equipment 4t

Sector	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
General	46.3	46.4	46.4	46.4	46.5	46.6	46.7	46.8	46.0	43.9	41.9	40.2	37.8	35.0	31.8
230100-230210	27.1	27.0	26.7	26.5	26.4	26.4	26.5	26.6	26.6	26.5	26.4	26.2	25.8	25.4	24.9

Sector	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
General	28.6	24.8	21.6	19.8	18.5	17.1	16.1	15.3	14.5	13.5	13.0
230100-230210	24.1	23.3	22.3	21.3	20.3	19.3	18.3	17.5	16.8	15.9	15.1

Source: Winther and Nielsen (2006). Data for 2005 and later are extrapolations.

Table B21. Time series for variable emission factors for other mobile sources

Fuel	Component	1980-1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997-
V11 Gasoline	Dioxins	1.32	1.11	0.95	0.69	0.25	0.23	0.11	0.1

CH_4 - Stationary combustion

Table B22. General emission factors, kg CH_4/tonne fuel

Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood briquettes	V04 Charcoal	V31 Natural gas (1 000 Sm^3)	V33 Refinery gas
S.01 Direct-fired furnaces .	0.0281	0.285	0.105	.	.	.	.	.	5.9	*0.1775*	0.0486
S.02 Gas turbines ..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.91	.
S.03 Boilers	8.43	8.55	0.35	.	*0.1788*	0.0216	0.1901	*0.1703*	.	*0.1775*	0.0486
S.04 Small stoves	8.43	8.55	.	6.1463	.	.	5.184	.	6.0	.	.
S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.24	0.28

Source	V34 CO gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kerosene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Municipal waste	V52 Special waste
S.01 Direct-fired furnaces	0.0067	.	0.05	.	.	*0.431*	.	*0.431*	*0.406*	.	1.218
S.02 Gas turbines	.	*0.251*	.	.	.	-	.	.	.	.	.
S.03 Boilers	*0.0067*	*0.251*	0.05	*0.2305*	*0.431*	*0.431*	*0.431*	*0.431*	*0.406*	0.345	1.218
S.04 Small stoves	.	.	.	0.2305	0.431	.	0.431	0.431	.	.	.
S.1B2C Flares	.	0.37	0.054.	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B23.
Source: IPCC (2006), Sandgren *et al.* (1996), Karlsvik (1995) and The Norwegian oil industry association (1994).

Table B23. Exceptions from the general factors for CH_4, stationary combustion (kg CH_4/tonne fuel)

Emission factor		Fuel	Source	Sectors
0.1293	V13, V17, V18, V19	Kerosene (heating), marine diesel; light fuel oil, heavy distillate	S.01 Direct fired furnaces, S.03 Boilers	230500-233530
0.1218	V20	Heavy fuel oil	S.01 Direct fired furnaces, S.03 Boilers	230500-233530
0.0461	V32	LPG	S.03 Boilers	230500-233530
0.0403	V31	Natural gas (1000 Sm^3)	S.01 Direct fired furnaces. S.03 Boilers	230600.1- 230600.3, 230910, 234950
0.0355	V31	Natural gas (1000 Sm3)	S.01 Direct fired furnaces. S.03 Boilers	230500-233530
0	V34	CO gas	S.03 Boilers	231922
0.0502	V36	Landfill gas	S.02 Gas turbines, S.03 Boilers	230500-233530
0.4875	V42	Wood waste	S.03 Boilers	230500-233530
4.644	V45	Wood briquettes	S.03 Boilers	330000

N_2O - Stationary combustion

Table B24. General emission factors. kg N_2O/tonne fuel

Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood briquettes	V04 Char-coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Refinery gas
S.01 Direct-fired furnaces .	0.0422	0.0428	0.021	.	.	.	.	.	0.12	*0.0036*	0.0049
S.02 Gas turbines ..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	*0.0036*	.
S.03 Boilers	0.0422	0.0428	0.021	.	0.065	0.0144	0.0691	0.0619	.	*0.0036*	0.0049
S.04 Small stoves	0.0422	0.0428	.	0.082	.	.	0.0691	.	0.03	.	.
S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.02	0.024

Source	V34 Blast furn-ace gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kero-sene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Municipal waste	V52 Special waste
S.01 Direct-fired furnaces	0.0007	0.005	0.005	.	.	0.0259	.	0.0259	0.0244	.	0.1624
S.02 Gas turbines	.	0.005	.	.	.	0.0259	.	.	.	.	.
S.03 Boilers	0.0007	0.005	0.005	0.0046	0.0259	0.0259	0.0259	0.0259	0.0244	0.046	0.1624
S.04 Small stoves	.	.	.	0.0046	0.0259	.	0.0259	0.0259	.	.	.
S.1B2C Flares	.	0.0015	0.024	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B25.
Source: IPCC (2006), Sandgren *et al.* (1996) and The Norwegian oil industry association (1994).

Table B25. Exceptions from the general factors for N_2O. Stationary combustion (kg N_2O/1000 Sm^3 natural gas)

Emission factor	Fuel		Source	Sectors
0.0040	V31	Natural gas	S.01 Direct-fired furnaces, S.02 Gas turbines, S.03 Boilers	230600.1-230600.3, 230910,234950

NO_X - Stationary combustion

Table B26. General emission factors. kg NO_X/tonne fuel

Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood bri-quettes	V04 Char-coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Refinery gas
S.01 Direct-fired furnaces ..	16	20	20	.	.	.	.	.	2.68	*5.95*	5.4
S.02 Gas turbines ...	.	.	.	.	.	.	.	.	.	*6.27*	.
S.03 Boilers	*3*	*3*	3.4	.	0.9	0.9	1.3	1.3	.	2.55	*3*
S.04 Small stoves	*3*	*3*	.	**0.988**	.	.	1.1	.	1.4	.	.
S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	12	7

Source	V34 Blast furn-ace gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kerosene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Municipal waste	V52 Special waste
S.01 Direct-fired furnaces	5.4	.	5.4	.	.	70	.	*5*	*5*	.	5
S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	16	.	.	.	.	.
S.03 Boilers	*3*	0.01	*3*	2.3	3	*2.5*	*2.5*	*2.5*	*4.2*	1.365	*4.2*
S.04 Small stoves	.	.	.	2.3	2.5	.	2.5	2.5	.	.	.
S.1B2C Flares	.	0.17	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B27, and bold numbers are different for different years, see table B28.
Source: Rosland (1987). Fuel wood factor based on data from annual surveys on use of fuel wood in households.

Table B27. Exceptions from the general factors for NO_X. Stationary combustion. kg NO_X /tonne fuel

Emission factor	Fuel		Source	Sectors
24	V19, 20, 52	Heavy distillate, heavy fuel oil, special waste	S.01 Direct-fired furnaces	231910.2, 232350
6.13	V31	Natural gas (1000 Sm^3)	S.01 Direct-fired furnaces	232014
9.5	V19, 20	Heavy distillate, heavy fuel oil	S.01 Direct-fired furnaces	232360
8.681	V31	Natural gas (1000 Sm^3)	S.02 Gas turbines	230600.1
1,4	V31	Natural gas (1000 Sm^3)	S.1B2C Flares	230600.1
3	V17, 18, 19	Fuel oils	S.03 Boilers	230500-233320
4.5	V01	Coal	S.03 Boilers	230500-233320
3.4	V02	Coke	S.03 Boilers	230500-233320
5	V20, 52	Heavy fuel oil, special waste	S.03 Boilers	230500-233320
2.9	V35	Fuel gas	S.03 Boilers	232011-232050, 232411-232442
0.01	V34	CO gas	S.03 Boilers	233510-233530
6.27	V33	Refinery gas	S.02 Gas turbines	233511
1.4	V01, 02	Coal, coke	S.04 Small stoves	330000

Table B28. Time series for variable emission factors for NO_X. Stationary combustion. kg NO_X /tonne fuel

Sector	Source	Fuel	1980-1990	1991	1992-1994	1995	1996-1998	1999-2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
General	S.04	V41	0.982	0.981	0.982	0.981	0.982	0.981	0.985	0.984	0.987	0.988	0.987	0.988

Sector	Source	Fuel	2011	2012	2013	2014	2015
General	S.04	V41	0.986	0.985	0.988	0.989	0.988

Sector	Source	Fuel	1980-1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000-
230600.1	S.02	V31	8.223	8.172	8.234	8.444	8.617	8.874	9.128	9.185	9.528	9.087	8.681

NMVOC - Stationary combustion

Table B29. General emission factors. kg NMVOC/tonne fuel

Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood bri-quettes	V04 Char coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Re finery gas
S.01 Direct-fired furnaces	0	0	0	.	.	.	.	.	8.85	*0*	0.1
S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.24	.
S.03 Boilers	*1.1*	0.6	0.6		*1.30*		1.3	1.3	.	0.085	0.1
S.04 Small stoves	*1.1*	0.6	.	7.0	.	.	6.501	.	10	.	.
S.1B2C Flares .	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.06	13.5
	V34 CO gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kero sene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Munici-pal waste	V52 Special waste
S.01 Direct-fired furnaces	*0*	.	*0*	.	.	5	.	*0.3*	*0.3*	.	*0.3*
S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	0.03	.	.	.	.	.
S.03 Boilers	*0.1*	0	*0.1*	*0.1*	0.4	*0.4*	*0.4*	*0.4*	0.3	0.7	0.3
S.04 Small stoves	.	.	.	0.1	*0.4*	.	0.4	0.4	.	.	
S.1B2C Flares	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B30.
Source: Rosland (1987) and Sandgren *et al.* (1996).

Table B30. Exceptions from the general factors for NMVOC. Stationary combustion. kg NMVOC/tonne fuel

Emission factor	Fuel		Source	Sectors
0	V 19, 20, 52	Heavy distillate, heavy fuel oil, special waste	S.01 Direct-fired furnaces	231910.2, 232350
0.1	V34	CO gas	S.01 Direct-fired furnaces	231910.2
0.085034	V31	Natural gas (1000 Sm^3)	S.01 Direct-fired furnaces	232014
0.9	V19, 20	Heavy distillate, heavy fuel oil	S.01 Direct-fired furnaces	232360
0.8	V01	Coal	S.03 Boilers	230500-233320
0	V32, 34, 35, 42	LPG, CO gas, fuel gas, wood waste	S.03 Boilers	230500-233320, 231711, 232011-232050, 233510-233530
0.6	V17, 18, 19	Fuel oils	S.03 Boilers	330000
10	V01	Coal	S.04 Small stoves	330000
0.6	V13	Kerosene (heating)	S.04 Small stoves	330000

CO - Stationary combustion

Table B31. General emission factors. kg CO/tonne fuel

Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood briquettes	V04 Char coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Re finery gas
S.01 Direct-fired furnaces .	0	26.16	0	.	.	.	.	.	16.82.	0	0
S.02 Gas turbines ..	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1.7	.
S.03 Boilers	3	26.16	3	.	*15*	0	15	15	.	0	0
S.04 Small stoves	*3*	26.16	.	**93.4**	.	.	2.6	.	100	.	.
S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	*1.5*	*0*

Source	V34 CO gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kero sene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Municipal waste	V52 Special waste
S.01 Direct-fired furnaces .	*0*	.	*0*	.	.	5	.	*0.2*	*0.2*	.	*0.2*
S.02 Gas turbines ..	.	.	.	.	.	0.7	.	.	.	.	.
S.03 Boilers	0	0	0	*0.5*	2	*2*	2	2	*0.4*	2.8	*0.4*
S.04 Small stoves	.	.	.	0.5	*2*	.	2	2	.	.	.
S.1B2C Flares	.	0.04	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B32, and bold numbers are different for different years, see table B33.

Table B32. Exceptions from the general factors for CO. Stationary combustion. kg CO/tonne fuel

Emission factor	Fuel		Source	Sectors
0	V 19, 20, 52	Heavy distillate, heavy fuel oil, special waste	S.01 Direct-fired furnaces	231910.2, 232350, 232360
0.01	V34	CO gas	S.01 Direct-fired furnaces	231910.2
0.2	V20. 52	Heavy fuel oil, special waste	S.03 Boilers	230500-233320
0	V32, 42	LPG, wood waste	S.03 Boilers	230500-233320, 231711
6.5	V17, 18, 19	Fuel oils	S.03 Boilers	330000
100	V01, 02	Coal, coke	S.04 Small stoves	330000
6.5	V13	Kerosene (heating)	S.04 Small stoves	330000
1.7	V31	Natural gas (1000 Sm^3)	S.1B2C Flares	231922

Table B33. Time series for variable emission factors for CO. Stationary combustion. kg CO/tonne fuel

Sector	Source	Fuel	1980-1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
General	S.04	V41	149.1	148.4	146.3	142.6	137.6	131.0	122.2	111.5	115.5	111.9	110.6	107.9	105.0

Sector	Source	Fuel	2010	2011	2012	2013	2014	2015
General	S.04	V41	103.3	101.2	99.2	96.1	96.7	93.4

NH_3 - Stationary combustion

Table B34. General emission factors. kg NH_3/tonne fuel

Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood bri-quettes	V04 Char-coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Re-finery gas	V34 CO gas	V36 Land-fill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kero-sene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy dis-tillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Munici-pal waste	V52 Special waste
S.04 Small stoves	.	.	.	0.066	.	.	0.066	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
All other sources	0	0	0	.	0	0	0	0	1.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Particulate matter - Stationary combustion

Table B35. General emission factors. kg particle component/tonne fuel

Com-ponent	Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood briquettes	V04 Char coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Refinery gas
TSP	S.01 Direct-fired furnaces	*1.6*	1.6	1.6	.	.	.	.	.	4.43.	0.122	0.144
TSP	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.122	.
TSP	S.03 Boilers	*1.6*	1.6	1.6	.	*2.69*	0	2.69	2.69	.	0.122	0.144
TSP	S.04 Small stoves	4.2	2.85	3.5	**17.16**	.	.	1.1	.	2.4	.	.
TSP	S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.002	0.144
PM_{10}	S.01 Direct-fired furnaces	*1.14*	1.14	1.14	.	.	.	.	.	4.22	0.122	0.144
PM_{10}	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.122	.
PM_{10}	S.03 Boilers	*1.14*	1.14	1.14	.	*2.52*	0	2.52	2.52	.	0.122	0.144
PM_{10}	S.04 Small stoves	2.8	1.71	2.1	**16.82**	.	.	1.1	.	2.4	.	.
PM_{10}	S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.002	0.144
$PM_{2.5}$	S.01 Direct-fired furnaces	*0.82*	0.82	0.82	.	.	.	.	.	4.13	0.122	0.144
$PM_{2.5}$	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.122	.
$PM_{2.5}$	S.03 Boilers	*0.82*	0.82	0.82	.	*2,52*	0	2.52	2.52	.	0.122	0.144
$PM_{2.5}$	S.04 Small stoves	0.86	0.86	1.5	**16.31**	.	.	1.1	.	2.4	.	.
$PM_{2.5}$	S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.002	0.144

Com-ponent	Source	V34 CO gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kerosene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Municipal waste	V52 Special waste
TSP	S.01 Direct-fired furnaces	0.144	.	0.144	.	.	0.286	.	*	*	.	*5.68*
TSP	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	0.286	.	.	.	.	.
TSP	S.03 Boilers	0.144	0.144	0.144	0.136	0.296	0.286	0.286	*	*	*0.05*	*5.68*
TSP	S.04 Small stoves	.	.	.	0.136	*0.3*	.	0.3	.	.	.	.
TSP	S.1B2C Flares	.	0.144	.	.	.	.	.	.	.	.	.
PM_{10}	S.01 Direct-fired furnaces	0.144	.	0.144	.	.	0.143	.	*	*	.	*4.87*
PM_{10}	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	0.143	.	.	.	.	.
PM_{10}	S.03	0.144	0.144	0.144	0.136	0.148	0.143	*0.15*	*	*	*0.05*	*4.87*

	Boilers											
PM_{10} …	S.04 Small stoves	.	.	.	0.136	*0.16*	.	0.155	.	.	.	.
PM_{10} …	S.1B2C Flares	.	0.144	.	.	.	.	.	.	.	.	.
$PM_{2.5}$ …	S.01 Direct-fired furnaces	0.144	.	0.144	.	.	0.036	.	*	*	.	*3.2*
$PM_{2.5}$ …	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	0.036	.	.	.	.	.
$PM_{2.5}$ …	S.03 Boilers	0.144	0.144	0.144	0.136	0.037	*0.12*	*0.12*	*	*	*0.05*	*3.2*
$PM_{2.5}$ …	S.04 Small stoves	.	.	.	0.136	*0.12*	.	0.119	.	.	.	.
$PM_{2.5}$ …	S.1B2C Flares	.	0.144	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B37, and bold numbers are different for different years, see table B38.
* General emission factors for all sources for heavy distillate and heavy fuel oil are given in table B36 for all years.
Source: Finstad *et al*. (2003). Fuel wood factor based on data from annual surveys on use of fuel wood in households

Table B36. General particle emission factors for heavy distillate and heavy fuel oil for all sources. Factors dependent on sulphur content. kg particle component /tonne fuel

Fuel	Com-po-nent	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996-1997	1998	1999	2000-
	TSP	0.803	0.714	0.701	0.701	0.688	0.714	0.663	0.688	0.701	0.714
	PM_{10}	0.690	0.614	0.603	0.603	0.592	0.614	0.570	0.592	0.603	0.614
V19	$PM_{2.5}$	0.450	0.400	0.393	0.393	0.385	0.400	0.371	0.385	0.393	0.400
	TSP	1.350	1.339	1.316	1.304	1.190	1.053	1.098	1.087	1.110	1.201
	PM_{10}	1.161	1.151	1.131	1.121	1.023	0.905	0.944	0.934	0.954	1.033
V20	$PM_{2.5}$	0.761	0.754	0.741	0.735	0.671	0.593	0.619	0.613	0.625	0.677

Source: Finstad *et al*. (2003).

Table B37. Exceptions from the general factors for particles. Stationary combustion

Emission factor (kg TSP/tonne)	Emission factor (kg PM_{10}/tonne)	Emission factor (kg $PM_{2.5}$/tonne)	Fuel		Source	Sectors
4.06	2.4	1.4	V52	Special waste	S.01 Direct-fired furnaces	230500-233320
5.45	3.54	1.45	V01	Coal	S.01 Direct-fired furnaces	233530
4.2	2.8	0.86	V01	Coal	S.03 Boilers	230100
.	0.143 (V18)	0.036 (V17, 18)	V17, 18	Light fuel oils	S.03 Boilers	230500-233320
4.06	2.4	1.4	V52	Special waste	S.03 Boilers	230500-233320
5.45	3.54	1.45	V01	Coal	S.03 Boilers	233530
0.5	0.5	0.5	V51	Municipal waste	S.03 Boilers	253800
0.3	0.155	0.119	V13	Kerosene (heating)	S.04 Small stoves	330000

Table B38. Time series for variable emission factors for particles. Stationary combustion. kg particle component /tonne fuel

Component	Source	Fuel	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001
TSP ………	S.04	V41	22.24	22.24	22.24	22.25	22.26	22.25	22.26	22.27	22.24	22.05	21.68	21.22
PM_{10} ………	S.04	V41	21.80	21.80	21.80	21.80	21.81	21.81	21.81	21.83	21.79	21.61	21.25	20.79
$PM_{2.5}$ ………	S.04	V41	21.13	21.13	21.13	21.14	21.15	21.14	21.15	21.16	21.12	20.95	20.60	20.16

			2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
TSP ………	S.04	V41	20.62	19.82	18.85	19.10	18.80	18.66	18.41	18.16	17.96	17.78	17.65	17.33
PM_{10} ………	S.04	V41	20.21	19.42	18.47	18.72	18.42	18.29	18.04	17.79	17.60	17.43	17.29	16.98
$PM_{2.5}$ ………	S.04	V41	19.59	18.83	17.91	18.15	17.86	17.73	17.49	17.25	17.06	16.89	16.77	16.46

			2014	2015
TSP	S.04	V41	17.35	17.16
PM_{10}	S.04	V41	17.00	16.82
$PM_{2.5}$	S.04	V41	16.48	16.31

POPs (Persistent Organic Pollutants) - Stationary combustion

Table B39. General emission factors for dioxins

Component	Source	V01 Coal	V02 Coke	V03 Petrol coke	V41 Fuel wood	V42 Wood waste	V43 Black liquor	V44 Wood pellets	V45 Wood bri-quettes	V04 Char-coal	V31 Natural gas (1000 Sm^3)	V33 Refinery gas
Dioxins µg I-TEQ/tonne	S.01 Direct-fired furnaces	1.6	1.6	1.6	.	.	.	.	.	2.95.	0.05	0
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.05	.
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.03 Boilers	1.6	1.6	1.6	.	1	1	1	1	.	0.05	0
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.04 Small stoves	10	10	10	5.9	.	.	5.9	.	10	.	.
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.1B2C Flares	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0.05	0

Component	Source	V34 CO gas	V36 Landfill gas	V35 Fuel gas	V32 LPG	V13 Kero-sene (heating)	V17 Marine gas oil/ diesel	V18 Light fuel oils	V19 Heavy distillate	V20 Heavy fuel oil	V51 Munici-pal waste	V52 Special waste
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.01 Direct-fired furnaces	0	.	0	.	.	4	.	0.1	0.1	.	4
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.02 Gas turbines	.	.	.	.	.	4	.	.	.	.	.
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.03 Boilers	0	0	1	*0.06*	0.1	0.1	*0.1*	*0.1*	*0.1*	0.02	4
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.04 Small stoves	.	.	.	0.06	0.06	.	0.2	.	.	.	.
Dioxins µg I-TEQ /tonne	S.1B2C Flares	.	0	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Numbers in italics have exceptions for some sectors, see table B42.
Source: Finstad *et al*. (2002).

Table B40. Exceptions from the general factors for POPs. Stationary combustion

Emission factor (ug dioxin/tonne)		Fuel	Source	Sectors
0.2	V18, 19	Heavy distillate, heavy fuel oil	S.03 Boilers	330000

References

Bang, J. (1996): *Utslipp av NMVOC fra fritidsbåter og bensindrevne motorredskaper (Emissions of NMVOC from leisure craft and gasoline-powered equipment),* Oslo: National institute of technology

Bang, J., Flugsrud, K., Haakonsen, G., Holtskog, S., Larssen, S., Maldum, K.O., Rypdal, K. and Skedsmo, A. (1999): *Utslipp fra veitrafikk i Norge. Dokumentasjon av beregningsmetode, data og resultater (Emissions from road traffic in Norway - Method for estimation, input data and emission estimates)*, Report 99:04, Oslo: Norwegian pollution control authority

Bremnes Nielsen, J. and Stenersen, D. (2009): *Analysis of NOx emission factor for ships, 2009*, MT22 F09-150, Marintek

EEA (2013): *EMEP-EEA air pollutant emission inventory guidebook.* http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013

Finstad, A., Haakonsen, G., Kvingedal, E. and Rypdal, K. (2001): *Utslipp til luft av noen miljøgifter i Norge - Dokumentasjon av metode og resultater (Emissions of some hazardous chemicals to air in Norway - Documentation of methodology and results),* Report 2001/17, Statistics Norway
http://www.ssb.no/emner/01/04/10/rapp_200117/rapp_200117.pdf

Finstad, A., Haakonsen, G. and Rypdal, K. (2002): *Utslipp til luft av dioksiner i Norge - Dokumentasjon av metode og resultater (Emissions to air of dioxins in Norway - Documentation of methodology and results),* Report 2002/7, Statistics Norway
http://www.ssb.no/emner/01/04/10/rapp_200207/rapp_200207.pdf

Finstad, A. and Rypdal, K. (2003): *Utslipp til luft av kobber, krom og arsen i Norge - Dokumentasjon av metode og resultater (Emissions to air of copper, chromium and arsenic in Norway - Documentation of methodology and results),* Report 2003/7, Statistics Norway
http://www.ssb.no/emner/01/04/10/rapp_200307/rapp_200307.pdf

Flugsrud, K. and Rypdal, K. (1996): *Utslipp til luft fra innenriks sjøfart, fiske og annen sjøtrafikk mellom norske havner (Emissions to air from domestic shipping, fisheries and other maritime traffic between Norwegian ports)*, Report 96/17, Statistics Norway
http://www.ssb.no/emner/01/04/rapp_9617/rapp_9617.pdf

Flugsrud, K., Hoem, B. and Aasestad, K. (2010): *Utslipp til luft av NO_x fra innenriks sjøfart og fiske (NO_x emissions to air from domestic navigation and fishing),* Report 40/2010, Statistics Norway
http://www.ssb.no/emner/01/04/10/rapp_201040/rapp_201040.pdf

INFRAS (2009): *Handbook emission factors for road transport (HBEFA)* http://www.hbefa.net/

IPCC (2006): *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,* Institute for Global Environmental Strategies (IGES)

Karlsson, M.L., Wallin, P.A. and Gustavsson, L. (1992): *Emissioner från biobrensle-eldade anläggningar mellan 0,5 och 10 MW (Emissions from biofuel plants between 0,5 and 10 MW),* SP report 1992:46, Borås: Swedish national testing and research institute.

Karlsvik, E. (1995): *Round robin test of a wood stove-emissions,* Report STF12 F95012, Trondheim: SINTEF

Norwegian institute for air research and Norwegian institute for water research (1995): *Materialstrømsanalyse av PAH, 1995 (Material flow analysis of PAHs, 1995),* Report O-92108, Kjeller and Oslo: NILU/NIVA

The Norwegian oil industry association (1994): *Anbefalte retningslinjer for utslippsberegning. Identifisering, kvantifisering og rapportering av forbruks- og utslippsdata fra aktiviteter i norsk oljevirksomhet (Recommended guidelines for emission calculations. Identification, quantification and reporting of data on consumption and emissions from activities in the Norwegian oil and gas sector),* Stavanger: The Norwegian oil industry association

Norwegian pollution control authority (1990): *Klimagassregnskap for Norge. Beskrivelse av utslippsmengder, drivhusstyrke og utslippsfaktorer. Bidrag til den interdepartementale klimautredningen (Greenhouse gas inventory for Norway. Emission figures, global warming potentials and emission factors. Contribution to the interministerial climate report),* Report 1990, Oslo: Norwegian pollution control authority

Rosland, A. (1987): *Utslippskoeffesienter. Oversikt over koeffesienter for utslipp til luft og metoder for å beregne disse (Emission factors. Overview of factors for emissions to air and methods of calculating),* Report 15.08.1987, Oslo: Norwegian pollution control authority

Sandgren, J., Heie, A. and Sverud, T. (1996): *Utslipp ved håndtering av kommunalt avfall (Emissions from municipal waste management),* Report 96:16, Oslo: Norwegian pollution control authority

Tornsjø, B. (2001): *Utslipp til luft fra innenriks sjøfart, fiske og annen sjøtrafikk mellom norske havner (Emissions to air from fishing fleet and sea traffic between Norwegian harbours),* Report 2001/6, Oslo: Statistics Norway

Winther, M. and Nielsen, O.-K. (2006): *Fuel use and emissions from non-road machinery in Denmark from 1985-2004 - and projections from 2005-2030*, Environmental project no. 1092 2006, National environmental research institute, Danish ministry of the environment

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION

E

4 ALBERT EMBANKMENT
LONDON SE1 7SR
Telephone: +44 (0)20 7735 7611 Fax: +44 (0)20 7587 3210

MEPC.1/Circ.896
14 December 2021

2021 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI AND EEXI

1 The Marine Environment Protection Committee, at its seventy-seventh session (22 to 26 November 2021), approved the *2021 Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI and EEXI*, as set out in the annex.

2 Member Governments are invited to bring the annexed Guidance to the attention of their Administrations, industry, relevant shipping organizations, shipping companies and other stakeholders concerned.

3 The Committee agreed to keep this Guidance under review in light of experience gained in its application.

4 This circular supersedes MEPC.1/Circ.815.

***

ANNEX

2021 GUIDANCE ON TREATMENT OF INNOVATIVE ENERGY EFFICIENCY TECHNOLOGIES FOR CALCULATION AND VERIFICATION OF THE ATTAINED EEDI AND EEXI

TABLE OF CONTENTS

1 General

1.1 The purpose of this guidance is to assist manufacturers, shipbuilders, shipowners, verifiers and other interested parties relating to Energy Efficiency Design Index (EEDI) and Energy Efficiency Existing Ship Index (EEXI) of ships to treat innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI, in accordance with regulations 5, 6, 7, 8, 9 and 20 of Annex VI to MARPOL. Although the term EEDI only is used through the whole guidance, it applies to both the EEDI and the EEXI calculations, as applicable.

1.2 There are EEDI Calculation Guidelines and EEDI Survey Guidelines. This guidance does not intend to supersede those guidelines but provides the methodology of calculation, survey and certification of innovative energy efficiency technologies, which are not covered by those guidelines. In the case that there are inconsistencies between this guidance and these guidelines, those guidelines should take precedence.

1.3 This guidance might not provide sufficient measures of calculation and verification for ships with diesel-electric propulsion, turbine propulsion and hybrid propulsion systems on the grounds that the attained EEDI Formula shown in EEDI Calculation Guidelines may not be able to apply to such propulsion systems.

1.4 The guidance should be reviewed for the inclusion of new innovative technologies not yet covered by the guidance.

1.5 The guidance also should be reviewed, after accumulating the experiences of each innovative technology, in order to make it more robust and effective, using the feedback from actual operating data. Therefore, it is advisable that the effect of each innovative technology in actual operating conditions should be monitored and collected for future improvement of this guidance document.

2 Definitions

2.1 *EEDI Calculation Guidelines* means *2018 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships* (resolution MEPC.308(73), as amended).

2.2 *EEDI Survey Guidelines* means *2014 guidelines on survey and certification of the energy efficiency design index (EEDI)* (resolution MEPC.254(67), as amended by resolution MEPC.261(68) and resolution MEPC.309(73)).

2.3 P_p is the propulsion power and is defined as ΣP_{ME} (In case where shaft motor(s) are installed, $\Sigma P_{ME} + \Sigma P_{PTI(i),\text{shaft}}$, as shown in paragraph 2.2.5.3 of EEDI Calculation Guidelines).

2.4 In addition to the above, definitions of the words in this guidance are the same as those of MARPOL Annex VI, EEDI Calculation Guidelines and EEDI Survey Guidelines.

3 Categorizing of Innovative Energy Efficiency Technologies

3.1 Innovative energy efficiency technologies are allocated to category (A), (B) and (C), depending on their characteristics and effects to the EEDI formula. Furthermore, innovative energy efficiency technologies of category (B) and (C) are categorized to two sub-categories (category (B-1) and (B-2), and (C-1) and (C-2), respectively).

Category (A): Technologies that shift the power curve, which results in the change of combination of P_P and V_{ref}: e.g. when V_{ref} is kept constant, P_P will be reduced and when P_P is kept constant, V_{ref} will be increased.

Category (B): Technologies that reduce the propulsion power, P_P, at V_{ref}, but do not generate electricity. The saved energy is counted as P_{eff}.

> ***Category (B-1)***: Technologies which can be used at any time during the operation and thus the availability factor (f_{eff}) should be treated as 1.00.
>
> ***Category (B-2)***: Technologies which can be used at their full output only under limited condition. The setting of availability factor (f_{eff}) should be less than 1.00.

Category (C): Technologies that generate electricity. The saved energy is counted as P_{AEeff}.

> ***Category (C-1)***: Technologies which can be used at any time during the operation and thus the availability factor (f_{eff}) should be treated as 1.00.
>
> ***Category (C-2)***: Technologies which can be used at their full output only under limited condition. The setting of availability factor (f_{eff}) should be less than 1.00.

(C) Emission reduction through the auxiliary power reduction by generating electricity for normal maximum sea load(P_{AEeff})

(B) Emission reduction through the propulsion power reduction (P_{eff})

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^{M} f_j\right)\left(\sum_{i=1}^{nME} \boxed{P_{ME(i)}} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}\right) + \left(P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}*\right) + \left(\left(\prod_{j=1}^{M} f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} \boxed{P_{PTI(i)}} - \boxed{\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)}\right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}\right) - \boxed{\left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} **\right)}}{f_i \cdot f_c \cdot Capacity \cdot f_w \cdot \boxed{V_{ref}}}$$

(A) The combination of P_P and V_{ref} as reflected in the power curve (knot-kW curve)

Innovative Energy Efficiency Technologies				
Reduction of Main Engine Power			Reduction of Auxiliary Power	
Category A	*Category B-1*	*Category B-2*	*Category C-1*	*Category C-2*
Cannot be separated from overall performance of the vessel	Can be treated separately from the overall performance of the vessel		Effective at all time	Depending on ambient environment
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
– low friction coating – bare optimization – rudder resistance – propeller design	– hull air lubrication system (air cavity via air injection to reduce ship resistance) (can be switched off)	– wind assistance (sails, Flettner-Rotors, kites)	– waste heat recovery system (exhaust gas heat recovery and conversion to electric power)	– photovoltaic cells

4 Calculation and Verification of effects of Innovative Energy Efficiency Technologies

4.1 General

4.1.1 The evaluation of the benefit of any innovative technology is to be carried out in conjunction with the hull form and propulsion system with which it is intended to be used. Results of model tests or sea trials of the innovative technology in conjunction with different hull forms or propulsion systems may not be applicable.

4.2 Category (A) technology

4.2.1 Innovative energy efficiency technologies in category (A) affect P_P and/or V_{ref} and their effects cannot be measured in isolation. Therefore, these effects should not be calculated nor certified in isolation in this guidance but should be treated as a part of vessel in EEDI Calculation Guidelines and EEDI Survey Guidelines.

4.3 Category (B) technology

4.3.1 The effects of innovative energy technologies in category (B) are expressed as P_{eff} which would be multiplied by C_{FME} and SFC_{ME} (in the case of $P_{PTI(i)}$ >0, the average weighted value of ($SFC_{ME} \cdot C_{FME}$) and ($SFC_{AE} \cdot C_{FAE}$)) and f_{eff}, and then be deducted from the EEDI formula. In the case of category (B-1) technology, f_{eff} is 1.00.

4.3.2 Guidance on calculation and verification of effects of Category (B) innovative technologies is given in annex 1.

4.4 Category (C) technology

4.4.1 The effects of innovative energy technologies in category (C) are expressed as P_{AEeff} which would be multiplied by C_{FAE}, SFC_{AE} and f_{eff}, and then be deducted from the EEDI formula. In the case of category (C-1) technology, f_{eff} is 1.00.

4.4.2 Guidance on calculation and verification of effects of Category (C) innovative technologies is given in annex 2.

4.5 Average weighted value in the case of $P_{PTI(i)}$ >0

4.5.1 In the case of $P_{PTI(i)}$ >0, both Category (B) and Category (C) technologies might deduct the value of $P_{PTI(i)}$. In such case, following values are to be used for average weighted value in calculating $\Sigma(f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{F.}\ SFC)$ in attained EEDI formula:

For shaft power(s):
$(\Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)}) \ / \ (\Sigma P_{ME(i)} + \Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$,
where, if $(\Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$ is taken negative value, the value $(\Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$ should be fixed to zero; and

For main engine(s):
$\Sigma P_{ME(i)} \ / \ (\Sigma P_{ME(i)} + \Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$,
where, if $\Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)}$ is taken negative value, the value $(\Sigma P_{PTI(i),shaft} - \cdot\Sigma P_{AEeff} \cdot \eta_{GEN} \cdot \eta_{PTI(i)})$ should be fixed to zero.

ANNEX 1[1]

GUIDANCE ON CALCULATION AND VERIFICATION OF EFFECTS OF CATEGORY (B) INNOVATIVE TECHNOLOGIES

1 AIR LUBRICATION SYSTEM (CATEGORY (B-1))

1.1 Summary of innovative energy efficient technology

1.1.1 An air lubrication system is one of the innovative energy efficiency technologies. Ship frictional resistance can be reduced by covering the ship surface with air bubbles, which is injected from the fore part of the ship bottom by using blowers, etc.

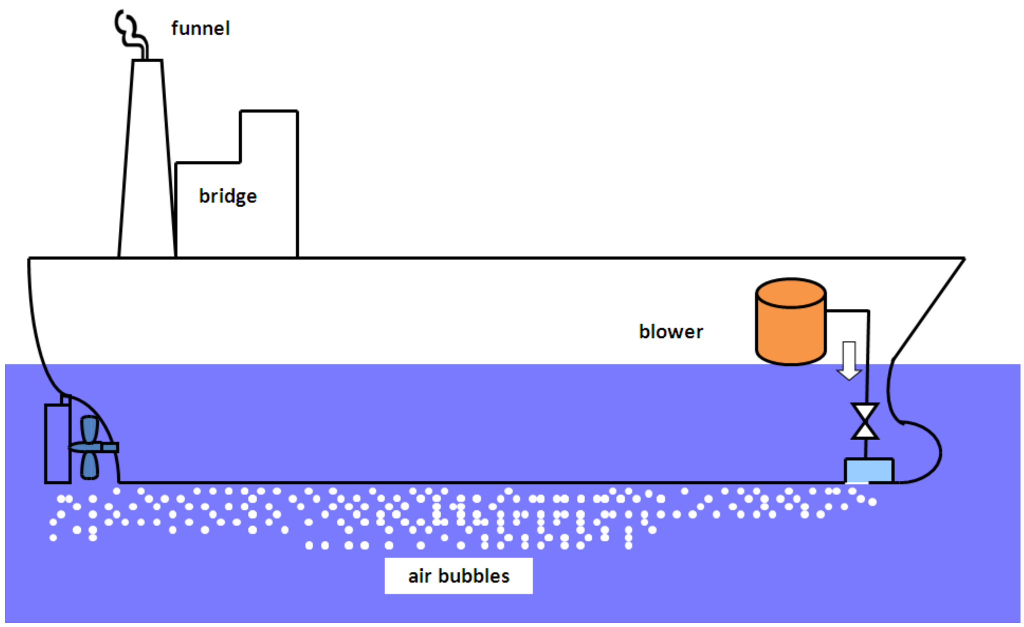


Figure 1 – Schematic illustration of an air lubrication system

1.2 Method of calculation

1.2.1 Power reduction due to air lubrication system

1.2.1.1 Power reduction factor P_{eff} due to an air lubrication system as an innovative energy efficiency technology is calculated by the following formula. The first and second terms of the right hand side represent the reduction of propulsion power by the air lubrication system and the additional power necessary for running the system, respectively. For this system, f_{eff} is 1.0 in EEDI formula.

$$P_{eff} = P_{PeffAL} - P_{AEeffAL} \frac{C_{FAE}}{C_{FME}} \frac{SFC_{AE}}{SFC_{ME}*} \quad (1)$$

* In the case of $P_{PTI(i)}$ >0, the average weighted value of ($SFC_{ME} \cdot C_{FME}$) and ($SFC_{AE} \cdot C_{FAE}$)

[1] All examples in this chapter are used solely to illustrate the proposed methods of calculation and verification.

1.2.1.2 P_{eff} is the effective power reduction in kW due to the air lubrication system at the 75% t of the rated installed power (MCR). In case that shaft generators are installed, P_{eff} should be calculated at the 75% MCR having after deducted any installed shaft generators in accordance with paragraph 2.2.5 of EEDI Calculation Guidelines. P_{eff} should be calculated both in the fully loaded and the sea trial conditions.

1.2.1.3 P_{PeffAL} is the reduction of propulsion power due to the air lubrication system in kW. P_{PeffAL} should be calculated both in the condition corresponding to the *Capacity* as defined in EEDI Calculation Guidelines (hereinafter referred to as "fully loaded condition") and the sea trial condition, taking the following items into account:

.1 area of ship surface covered with air;

.2 thickness of air layer;

.3 reduction rate of frictional resistance due to the coverage of air layer;

.4 change of propulsion efficiency due to the interaction with air bubbles (self-propulsion factors and propeller open water characteristics); and

.5 change of resistance due to additional device, if equipped.

1.2.1.4 $P_{AEeffAL}$ is additional auxiliary power in kW necessary for running the air lubrication system in the fully loaded condition. $P_{AEeffAL}$ should be calculated as 75% of the rated output of blowers based on the manufacturer's test report. For a system where the calculated value above is significantly different from the output used at normal operation in the fully loaded condition, the $P_{AEeffAL}$ value may be estimated by an alternative method. In this case, the calculation process should be submitted to a verifier.

1.2.2 Points to keep in mind in calculation of attained EEDI with air lubrication system

1.2.2.1 V_{ref} in paragraph 2.2.2 of EEDI Calculation Guidelines should be calculated in the condition that the air lubrication system is OFF to avoid the double count of the effect of this system.

1.2.2.2 In accordance with EEDI Calculation Guidelines, the EEDI value for ships for the air lubrication system ON should be calculated in the fully loaded condition.

1.3 Method of verification

1.3.1 General

1.3.1.1 Attained EEDI for a ship with an innovative energy efficient technology should be verified in accordance with EEDI Survey Guidelines. Additional information on the application of air lubrication system, which is not given in the EEDI Survey Guidelines, is contained below.

1.3.2 Preliminary verification at the design stage

1.3.2.1 In addition to paragraph 4.2.2 of EEDI Survey Guidelines, the EEDI Technical File, which is to be developed by a shipowner or shipbuilder, should include:

.1 outline of the air lubrication system;

.2 P_{PeffAL} : the reduction of propulsion power due to the air lubrication system at the ship speed of V_{ref} both in the fully loaded and the sea trial conditions;

.3 EDR_{full} : the reduction rate of propulsion power in the fully loaded condition due to the air lubrication system. EDR_{full} is calculated by dividing $P_{MEeffAL}$ by P_{ME} in EEDI Calculation Guidelines in the fully loaded condition (see figure 2);

.4 EDR_{trial} : the reduction rate of propulsion power in a sea trial condition due to the air lubrication system. EDR_{trial} is calculated by dividing $P_{MEeffAL}$ by P_{ME} in EEDI Calculation Guidelines in sea trial condition (see figure 2);

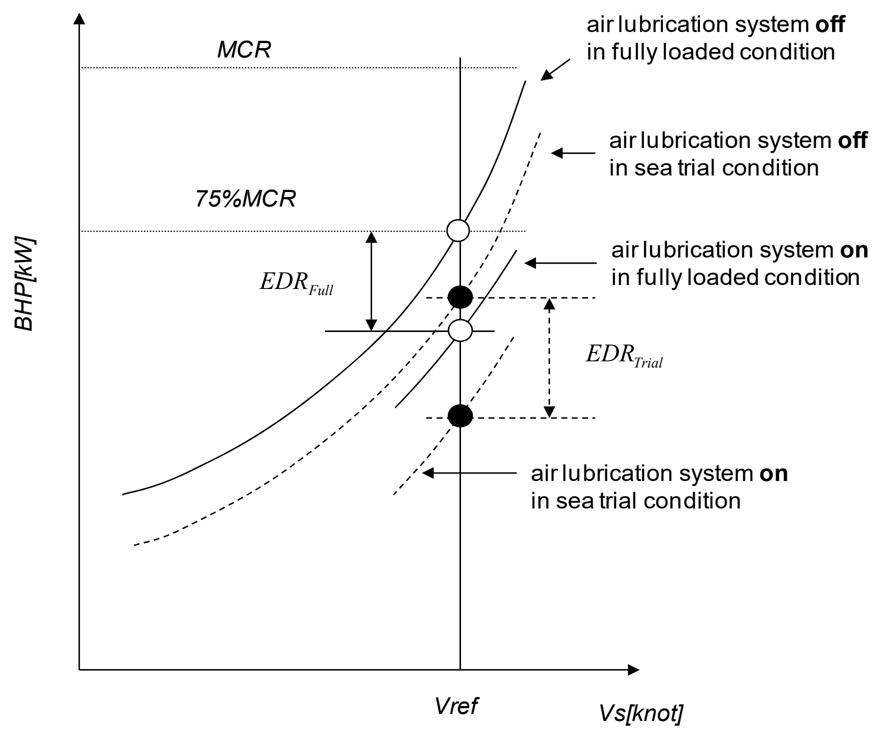


Figure 2 – Calculation of the reduction rate of propulsion power (EDR_{full} and EDR_{trial}) due to air lubrication system

.5 $P_{AEeffAL}$: additional power necessary for running the air lubrication system; and

.6 the calculated value of the EEDI for the air lubrication system ON in the fully loaded condition.

1.3.2.2 In addition with paragraph 4.2.7 of the EEDI Survey Guidelines, additional information that the verifier may request the shipbuilder to provide directly to it includes:

.1 the detailed calculation process of the reduction of propulsion power due to the air lubrication system: P_{PeffAL} ; and

.2 the detailed calculation process of the additional power necessary for running the air lubrication system: $P_{AEeffAL}$.

1.3.3 Final verification of the attained EEDI at sea trial

1.3.3.1 Final verification of the EEDI of ships due to the air lubrication system should be conducted at the sea trial. The procedure of final verification should be basically in accordance with paragraph 4.3 of the EEDI Survey Guidelines.

1.3.3.2 Prior to the sea trial, the following documents should be submitted to the verifier; a description of the test procedure that includes the measurement methods to be used at the sea trial of the ship with the air lubrication system.

1.3.3.3 The verifier should attend the sea trial and confirm the items described in paragraph 4.3.3 of the EEDI Survey Guidelines to be measured at the sea trial for the air lubrication system ON and OFF.

1.3.3.4 The main engine output at the sea trial for the air lubrication system ON and OFF should be set so that the range of the developed power curve includes the ship speed of V_{ref}.

1.3.3.5 The following procedure should be conducted based on the power curve developed for air lubrication system OFF.

.1 ship speed at 75% MCR of main engine in the fully loaded condition, V_{ref}, should be calculated. In case that shaft generators are installed, V_{ref} should be calculated at 75% MCR having after deducted any installed shaft generators in accordance with paragraph 2.2.5 of EEDI Calculation Guidelines; and

.2 in case that V_{ref} obtained above is different from that estimated at the design stage, the reduction rate of main engine should be recalculated at new V_{ref} both in the fully loaded and the sea trial conditions.

1.3.3.6 The shipbuilder should develop power curves for the air lubrication system ON based on the measured ship speed and output of the main engine at the sea trial. The following calculations should be conducted.

.1 the actual reduction rate of propulsion power ADR_{trial} at the ship speed of V_{ref} at the sea trial; and

.2 if the sea trial is not conducted in the fully loaded condition, the reduction rate of propulsion power in this condition should be calculated by the following formula:

$$1 - ADR_{Full} = (1 - EDR_{Full}) \times \frac{1 - ADR_{Trial}}{1 - EDR_{Trial}},$$

i.e.

$$ADR_{Full} = 1 - (1 - EDR_{Full}) \times \frac{1 - ADR_{Trial}}{1 - EDR_{Trial}} \qquad (2)$$

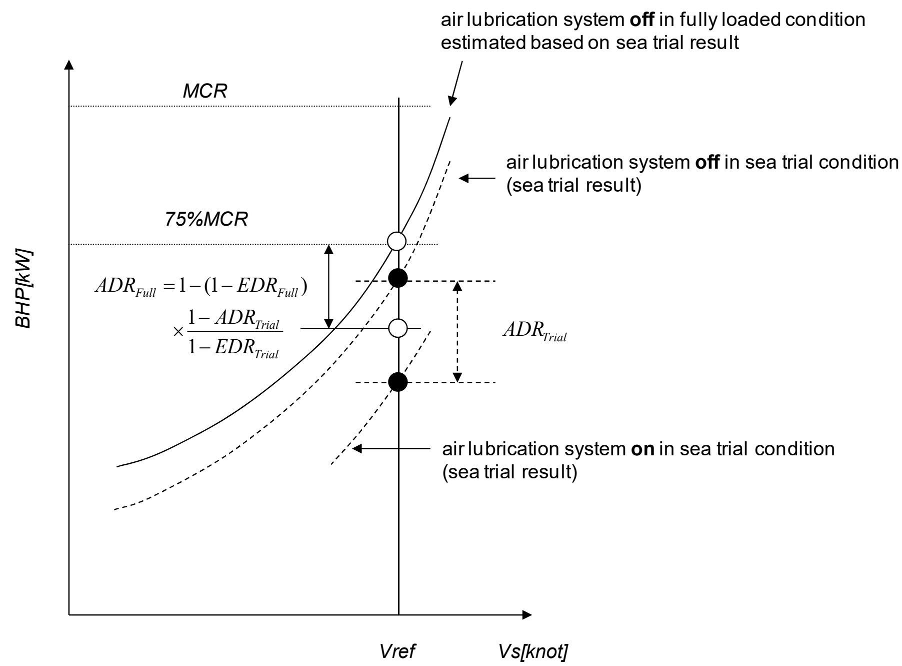


Figure 3 – Calculation of the actual reduction rate of propulsion power (ADR_{full} and ADR_{trial}) due to air lubrication system

1.3.3.7 The reduction of propulsion power due to the air lubrication system $P_{MEeffAL}$ in the fully loaded and the sea trial conditions should be calculated as follows:

$$P_{PeffAL\_Full} = ADR_{Full} \times P_P \tag{3}$$

$$P_{PeffAL\_Trial} = ADR_{Trial} \times P_P \tag{4}$$

1.3.3.8 The shipowner or the shipbuilder should revise the EEDI Technical File, as necessary, by taking the result of the sea trial into account. Such revision should include the following contents:

.1 V_{ref}, in case that it is different from that estimated at the design stage;

.2 the reduction of propulsion power P_{PeffAL} at the ship speed of V_{ref} in the fully loaded and the sea trial conditions for the air lubrication system ON;

.3 the reduction rate of propulsion power due to air lubrication system (ADR_{full} and ADR_{trial}) in the fully loaded and the sea trial conditions; and

.4 the calculated value of the EEDI for the air lubrication system ON in the fully loaded condition.

2 WIND ASSISTED PROPULSION SYSTEM (CATEGORY B-2)

2.1 Summary of innovative energy efficient technology

2.1.1 Wind assisted propulsion systems (WAPS) belong to innovative mechanical energy efficient technologies which reduce the CO_2 emissions of ships. There are different types of wind propulsion technologies (sails, wings, kites, etc.) which generate forces dependent on wind conditions. This technical guidance defines the available effective power of WAPS as the product of the reference speed and the sum of the wind assisted propulsion system force and the global wind probability distribution.

2.1.2 Secondary effects when applying the wind assisted propulsion system which might increase the ship resistance are ignored for the purpose of these guidelines. With this simplification effects as for instance additional drag due to leeway, rudder angle and heel or reduced propeller efficiency in light running condition are ignored without significant loss of accuracy. Nonetheless, the corresponding forces are considered to rule out conditions that do not allow a safe operation of the ship, for instance due to exceeding heel angles.

2.2 Definitions

2.2.1 For the purpose of these guidelines, the following definitions should apply:

.1 *available effective power* is the multiplication of effective power P_{eff} and availability factor f_{eff} , as defined in the EEDI calculation;

.2 *wind assisted propulsion systems (WAPS)* belong to innovative mechanical energy efficient technologies which reduce the CO_2 emissions of ships. These proposed guidelines apply to wind propulsion technologies that directly transfer mechanical propulsion forces to the ship's structure (sails, wings, kites, etc.);

.3 *wind propulsion system force matrix* is a two-dimensional matrix which expresses the force characteristic of a wind assisted propulsion system dependent on ship speed, wind speed and the wind angle relative to heading;

.4 *global wind probability matrix* contains data of the global wind power on the main global shipping routes based on a statistical survey of worldwide wind data and represents the probability of wind conditions;

.5 *wind speed* is the speed of the wind in m/s measured at 10 m above sea level;

.6 *wind direction* is the North-oriented direction of the wind measured at 10 m above sea level and is subdivided into eight sectors (North, North-East, East, South-East, South, South-West, West, North-West);

.7 *wind angle* is the angle of the wind relative to the ship's heading at 10 m above sea level subdivided into 72 sectors of 5°-steps (0°, 5°,..., 355°); and

.8 the *main global shipping network* is a network of global shipping routes with the highest frequency of journeys.

2.3 Available effective power of wind assisted propulsion systems (WAPS)

2.3.1 The available effective power of wind assisted propulsion systems as innovative energy efficient technology is calculated by the following formula:

$$(f_{eff} \cdot P_{eff}) = \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{q} W_k}\right) \cdot \left(\left(\frac{0.5144 \cdot V_{ref}}{\eta_D} \sum_{k=1}^{q} F(V_{ref})_k \cdot W_k\right) - \left(\sum_{k=1}^{q} P(V_{ref})_k \cdot W_k\right)\right)$$

with $F_1 - F_k \geq 0 \wedge F_{k-1} - F_k \geq 0$

(sorting all force matrix elements in descending order)

and $\sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2} \wedge \sum_{k=1}^{q} W_k \geq \frac{1}{2}$
(defining q: the number of elements added in the formula)

Where:

.1 (f_{eff} * P_{eff}) is the available effective power in kW delivered by the specified wind assisted propulsion system. f_{eff} and P_{eff} are combined in the calculation because the product of availability and power is a result of a matrix operation, addressing each wind condition with a probability and a specific wind propulsion system force;

.2 the factor 0.5144 is the conversion factor from nautical miles per hour (knots) to metres per second (m/s);

.3 V_{ref} is the ship reference speed measured in nautical miles per hour (knots), as defined in the EEDI calculation guidelines.

.4 η_D is the total efficiency of the main drive(s) at 75% of the rated installed power (MCR) of the main engine(s). η_D shall be set to 0.7, if no other value is specified and verified by the verifier;

.5 $F(V_{ref})_k$ is the force matrix of the respective wind assisted propulsion system for a given ship speed V_{ref}. Each matrix element represents the propulsion force in kilo newton (kN) for the respective wind speed and angle. The wind angle is given in relative bearings (with 0° on the bow);

.6 W_k is the global wind probability matrix. Each matrix element represents the probability of wind speed and wind angle relative to the ships heading. The sum over all matrix elements equals 1 and is non-dimensional; and

.7 $P(V_{ref})_k$ is a matrix with the same dimensions as $F(V_{ref})_k$ and W_k and represents the power demand in kW for the operation of the wind assisted propulsion system.

2.3.2 The fore term of the formula defines the additional propulsion power to be considered for the overall EEDI calculation. The term contains the product of the ship specific speed, the force matrix and the global wind probability matrix. The aft term contains the power requirement for the operation of the specific wind assisted propulsion system which has to be subtracted from the gained wind power.

2.4 Wind propulsion system force matrix $F(V_{ref})_k$

2.4.1 Measurement of the wind propulsion coefficients

2.4.1.1 The wind propulsion system force matrix is a table describing the average wind propulsion coefficients corresponding to the global wind probability matrix. Therefore, the measurement of the wind propulsion coefficients has to be carried out at first in order to obtain the wind propulsion system force matrix.

2.4.1.2 Various methods can be used to determine the aerodynamic forces of a wind assisted ship, depending firstly on the type of wind assisted propulsion system, but also size limitations and successful validation for the methods already shown in literature. The methods include:

.1 wind tunnel model test;

.2 CFD/numerical calculations; and

.3 full scale test.

2.4.1.3 The forces are to be determined for the combination of wind assisted propulsion system and ship unless that is not practical due to technical or economic reasons. In the latter case the conditions of 2.4.1.4 apply.

2.4.1.4 In the case of the installation of multiple wind assisted propulsion systems, the forces may be determined for the devices in isolation and by the summing the coefficients of each units comprising the system, provided that a validated method is in place to account for interaction effects between wind propulsors and between the ship and the wind propulsors.

2.4.1.5 Wind propulsion devices are to be analysed at their operational Reynolds number, as this has been shown to affect their performance.

2.4.1.6 The wind tunnel model test is a major method for measuring the aerodynamic force of a wind assisted ship propulsion system under typical states. Appendix 1 of this annex describes the testing methods of wind tunnel model tests. If the wind propulsion coefficients are measured by the wind tunnel model test, it should be conducted in accordance with the appendix 1.

2.4.1.7 For some types of wind assisted propulsion system wind tunnel model tests are not appropriate for measuring the wind propulsion coefficients. Therefore, numerical calculations, such as CFD-computation, can be accepted for estimating the wind propulsion coefficients, but the condition and the model of the numerical calculation should be referred to experimental representative results and the numerical calculation is to be carried out in accordance with defined quality and technical standards (ITTC 7.5-03-01-02 and ITTC 7.5-03-01-04 at their latest revisions or equivalent). If both of wind tunnel model tests and numerical calculation are inappropriate to estimate the coefficient, other testing method may be acceptable with the approval of the verifier.

2.4.1.8 When a test or calculation for determining the wind propulsion coefficients is carried out, the procedure of the test or calculation should be submitted to the verifier in advance of conducting the test or calculation. In addition, the detail report of the test and calculation procedure should also be submitted to the verifier after the test. The verifier may request the submitter to provide further documents/information as necessary to verify the wind propulsion coefficients.

2.4.1.9 The test of a ship model without wind assisted propulsion system mainly measures the wind forces of the ship model pointing to the bow under different wind directions. The test of a ship model with wind assisted propulsion system mainly measures the maximum wind propulsion of the ship model pointing to the bow under different wind directions, which is then used to calculate the wind propulsion coefficient of the wind propulsion system. The coefficients of the wind assisted propulsion system should be determined at a series of wind angles ranging from 0° to 360°, spaced by an interval of 5°.

2.4.1.10 A single wind tunnel test may be accepted for several identical wind assisted propulsion systems and identical ships. The verifier may request that supporting documentation be produced.

2.4.2 Wind tunnel test methods and data processing

Option 1: Test on a ship model fitted with the full wind assisted propulsion system

2.4.2.1 When the wind tunnel test is carried out with the ship model and the wind assisted propulsion system model, the test method should follow the specifications given in appendix 1. The wind forces acting on the ship model are normalized as:

$$C_{Fx} = F_x / (0.5\ \rho\ V^2\ A)$$

2.4.2.2 The wind propulsion coefficients[2] of the wind assisted propulsion system can be determined as:

$$\varDelta C_{Fx} = C_{Fx\text{-}with\ WPS} - C_{Fx\text{-}without\ WPS}$$

Where:

.1 C_{Fx} is the wind force coefficient of the model pointing to the bow;

.2 F_x is the wind force of the model pointing to the bow;

.3 $\varDelta C_{Fx}$ is the wind propulsion coefficient of the wind assisted propulsion system;

.4 ρ is the air density of the model test;

.5 V is the wind velocity of the model test;

.6 A is the total projected area of the wind assisted propulsion system; and

.7 the subscript "with WAPS" means the state with wind assisted propulsion system of the ship model, while "without WAPS" means the state without wind assisted propulsion system of the ship.

[2] The force coefficients are dimensionless, the units for their calculation can be freely chosen, but must be consistent with each other.

Option 2: Test with a single wind assisted propulsion unit

2.4.2.3 When the wind tunnel test is carried out with a single wind propulsion unit, the test method should follow the specifications given in appendix 1. The wind propulsion coefficients[3] of the model can be determined as:

$$C_{Fx} = F_x / (0.5\ \rho\ V^2\ A)$$

Where:

.1 C_{Fx} is the wind force coefficient of the model pointing to the bow;

.2 F_x is the wind force of the model pointing to the bow;

.3 ρ is the air density of the model test;

.4 V is the wind velocity of the model test; and

.5 A is the total projected area of the wind assisted propulsion system.

2.4.2.4 The wind propulsion coefficients ΔC_{Fx} of a multi-unit wind assisted propulsion system can be calculated by summing the coefficients of the units comprising the system, weighted by the effects of interaction and masking by superstructures.

For options 1 and 2: Calculation of the average power consumption coefficients of the active wind assisted propulsion system during the wind tunnel test

2.4.2.5 The power consumption of the wind assisted propulsion system should be measured and the power consumption matrix should be filled based on the measured values and the systems control plan.

2.4.3 Calculation of the wind propulsion system force matrix

2.4.3.1 The wind propulsion coefficients[4] of the ship's wind assisted propulsion system can be used to predict the wind propulsion system force matrix. Apparent wind is defined as the combination of wind relative to the ground and wind created by the ship's velocity. The steps to calculate the wind propulsion system force matrix are as follows:

.1 determine the velocity of the ship V_{ref};

.2 select the average wind speed corresponding to terms in W_k, the global wind probability matrix at 10 m height. For example, the average wind speed corresponding to the first wind speed range (0-1 m/s) of the wind probability matrix is selected as 0.5 m/s, the average wind speed corresponding to the second wind speed range (1-2 m/s) is selected as 1.5 m/s, etc.;

.3 extrapolate the wind speed to the reference height of the wind assisted propulsion systems taken as the aerodynamic centre of effort height or half height from the waterline:

---

3 The force coefficients are dimensionless, the units for their calculation can be freely chosen, but must be consistent with each other.

4 The force coefficients are dimensionless, the units for their calculation can be freely chosen, but must be consistent with each other.

$$v_{Zref} = v_{10m}\left(\frac{z_{ref}}{10}\right)^{\alpha} \; for \; z_{ref} < 300m$$

$$v_{Zref} = v_{10m}\left(\frac{300}{10}\right)^{\alpha} \; for \; z_{ref} \geq 300m$$

Where:

.1 z_{ref} is the reference height above the water line, to be equal to the point of mid-height of each sail, Flettner, etc. in wind assisted propulsion system;

.2 v_{10m} is the wind velocity at 10 m above sea level;

.3 v_{Zref} is the resulting wind velocity at the reference height; and

.4 α is taken as 1/9 conforming to ITTC recommendations.[5]

.4 according to the corresponding average wind speed, wind direction angle and the velocity of the ship, calculate the relative wind speed V_k and the relative wind direction angle of the ship;

.5 according to the relative wind direction angle, and the corresponding relationship between the relative wind direction angle and the wind propulsion coefficient ΔC_{Fx} obtained from the test, calculate the average wind propulsion coefficients $(\Delta C_{Fx})_k$ of the wind assisted propulsion system corresponding to W_k; and

.6 according to the average wind propulsion coefficient of the wind assisted propulsion system, calculate the terms of the wind propulsion system force matrix $F(V_{ref})_k$ of the full scale ship corresponding to W_k by following formula:

$F(V_{ref})_k = (\Delta C_{Fx})_k * (0.5\ \rho\ V_k^2\ A)$

Where:

.1 $(\Delta C_{Fx})_k$ is the average wind propulsion coefficients corresponding to W_k;

.2 ρ is the average air density in shipping environment, ρ=1.225 kg/m^3;

.3 V_k is the relative wind velocity of the full-scale ship corresponding to W_k;

.4 A is the total projected area of the wind assisted propulsion system;

.5 the settings of the wind propulsor may be varied in order to find the best $(\Delta CFx)_k$; this may be done using interpolation provided that increments in settings are sufficiently small;

5 International Towing Tank Conference (ITTC), "ITTC – Recommended Procedures and Guidelines; Preparation, Conduct and Analysis of Speed/Power Trial," International Towing Tank Conference (ITTC), 7.5-04-01-01.1, 2017.

Annotation: ITCC provides no guidance for wind speeds above an altitude above 300 m. However, it is assumed in this guideline to be constant above 300 m altitude.

.6 the settings and deployment of the wind assisted propulsion system must adhere to the operational constraints as defined for the system (e.g. a maximum operational wind speed, if lower than provided by the global wind probability matrix, > Bf 8, 19 m/s);

.7 the potential wind drag induced by the system is to be accounted for, such as in unusable wind directions close to head wind and when the systems is not operational due to exceedance of operational limits; and

.8 if $F(V_{ref})_k$ exceeds the resistance of the ship, such that the propeller thrust would be negative, $F(V_{ref})_k$ is to be limited at the resistance value.

2.4.4 Consideration of the operational limits of the wind assisted propulsion system and the lateral forces and yawing moments

2.4.4.1 Force $F(V_{ref})_k$ must be calculated only when it is within the operational domain applicable to the wind assisted propulsion system. These operational limitations can be caused at a minimum by wind conditions or by the total forces generated by the wind assisted propulsion system and applied to the ship.

2.4.4.2 $F(V_{ref})_k$ must be zero for any pair (wind direction; wind force) not in conformity with the operational domain of the wind assisted propulsion system validated by the verifier in the operations manual of the wind assisted propulsion system and the ship.

2.4.4.3 The lateral forces exerted by the wind assisted propulsion system on the ship and the resulting yawing moment can affect the performance of the system, and therefore the EEDI calculation. The lateral forces on the ship and the yawing moments applied by the wind assisted propulsion system to the ship should therefore be documented by the shipbuilder and/or propulsion system manufacturer and observed by the verifier. They can be obtained without additional effort during the tests described in paragraph 2.4.1 of the present circular.

2.4.4.4 Conformity with the operational domain requires that for any pair (wind direction; wind force), and in consideration of the total forces generated by the wind assisted propulsion system (i.e. including lateral forces to the vessel and yawing moments), the strength of the wind assisted propulsion system, the forces at the embedment and the list of the ship conform with the structural design file and the stability file of the ship, respectively. Where the lateral forces and yawing moment are particularly significant, the verifier may request course keeping and rudder angle demonstrations to validate conformity with the operational domain.

2.5 The global wind probability matrix W_k

2.5.1 Wind probabilities

2.5.1.1 Wind conditions are not constant. Winds vary their speed and direction with time. Wind expectations are unequal in different regions of the earth.

2.5.1.2 However, every wind expectation can be expressed in a distinctive wind probability pattern for every particular position on the globe. There is always a certain probability for a certain wind direction and wind speed to occur. These probabilities are documented in wind charts. With this approach each geographical region has a distinctive wind chart.

2.5.2 Wind angles relative to the ship

2.5.2.1 For a wind assisted propulsion system, it is irrelevant if the wind is coming from North or South. Only the wind angle relative to a ship's heading is of importance. As a consequence, the wind directions given in the weather data have to be recalculated for ship headings on a trading route when applied to wind assisted propulsion systems, where 0° means the ship's bow, 90° its starboard side, 180° the stern and 270° port side.

2.5.3 Main global shipping network

2.5.3.1 To determine a global wind probability chart for the wind assisted propulsion system's EEDI calculation, the average of all wind conditions along the main global shipping routes is required.

2.5.3.2 Figure 1 shows the main global shipping network used to determine the global wind conditions. Along the shown routes, 106 wind condition charts were analysed. These charts are based on 868,500 individual wind data.

2.5.3.3 The wind condition charts for each position were first recalculated in ship heading coordinates and then averaged to form a global wind condition chart. The results are visualized in figure 2, the complete chart (the global wind probability matrix) is shown as the table in appendix 2 of this annex.

2.5.3.4 Each element of the matrix W_k represents the probability of the specific wind speed and wind angle relative to the ship. The sum of all matrix elements is one (1.0), representing 100% of all wind conditions.

2.5.3.5 The results show that winds to the bow or the stern occur more often than winds to the sides. There are two possible reasons to explain this phenomenon:

.1 shipping routes and global weather systems are more East-West than North-South oriented; and

.2 shipping routes and winds are influenced by shore lines, so they tend to be parallel in some regions.

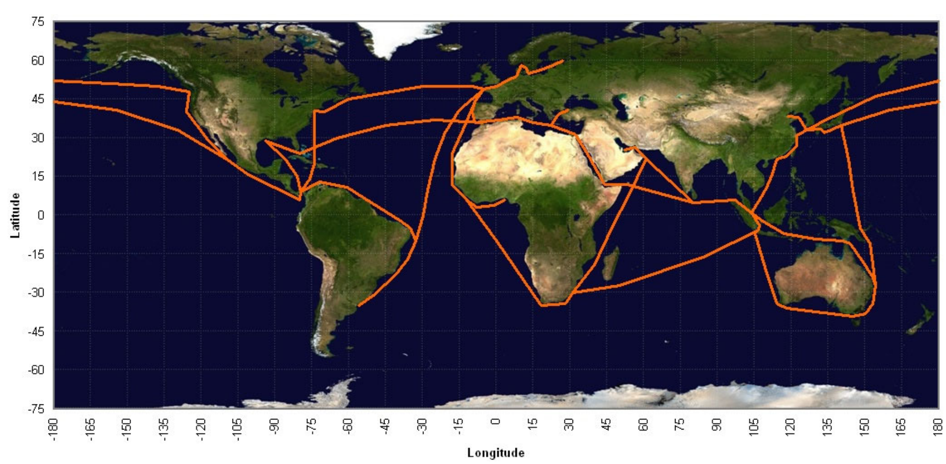


Figure 1 – The main global shipping network used for the wind chart

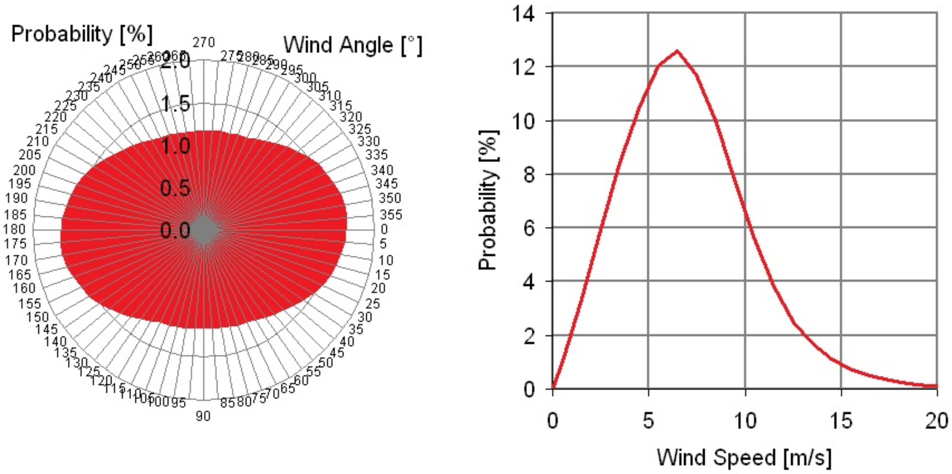


Figure 2 – Resulting wind curves on the main global shipping routes relative to the ship

2.6 Effective CO_2 reduction by wind assisted propulsion systems

2.6.1 For the calculation of the CO_2 reduction, the resulting available effective power (f_{eff} * P_{eff}) has to be multiplied with the conversion factor C_{FME} and SFC_{ME} , as contained in the original EEDI formula.

2.7 Verification of wind assisted propulsion systems in the EEDI certification process

2.7.1 General

2.7.1.1 Verification of EEDI with innovative energy efficient technologies should be conducted according to the EEDI Survey Guidelines. Additional items concerning innovative energy efficient technologies not contained in EEDI Survey Guidelines are described below.

2.7.2 Preliminary verification at the design stage

2.7.2.1 In addition to paragraph 4.2.2 of EEDI Survey Guidelines, the EEDI Technical File which is to be developed by the shipowner or shipbuilder should include:

.1 Outline of wind assisted propulsion systems; and

.2 Calculated value of EEDI due to the wind assisted propulsion system.

2.7.2.2 In addition to paragraph 4.2.7 of the EEDI Survey Guidelines, additional information from the shipbuilder may be requested by the verifier. It includes:

.1 Detailed calculation process of the wind propulsion system force matrix $F(V_{ref})_k$ and results of performance tests.

2.7.2.3 In order to prevent undesirable effects on the ship's structure or main drive, the influences of added forces on the ship should be determined during the EEDI certification process. Elements in the wind propulsion system force matrix may be limited to ship specific restrictions, if necessary. The technical means to restrict the wind propulsion system's force should be verified as part of the performance test.

2.7.2.4 If more than one innovative energy efficient technology is subject to approval in the EEDI certification, interactions between these technologies should be considered. The appropriate technical papers should be included in the additional information submitted to the verifier in the certification process.

2.7.3 Final verification of the attained EEDI

2.7.3.1 The total net power generated by wind assisted propulsion systems should be confirmed based on the documentation in the EEDI Technical File. For final verification, EEDI verifier should check that the configuration of the installed wind assisted propulsion system agrees with the system as described in the EEDI Technical File.

APPENDIX 1

METHOD OF WIND TUNNEL MODEL TEST

In accordance with section 2.4.1 of the present circular, two test methods are defined:

.1 option 1: test on a ship model fitted with the full wind assisted propulsion system; and

.2 option 2: test on a complete model of a single wind propulsion unit.

Option 1: Test on a ship model fitted with the full wind assisted propulsion system

1 Model

1.1 The wind assisted propulsion system model and the hull model should be made similarly to the real form, but appendages which do not affect the aerodynamic characteristics can be omitted from the model (e.g. handrails, windlass, etc.).

1.2 The draught condition of the hull model should be corresponding to the *Capacity* as defined in EEDI Calculation Guidelines.

1.3 The hull model is connected with the turntable by force balance, and the wind direction angle of the ship model is changed by changing the angle of the turntable.

2 Test condition

2.1 In addition to geometric similarity, the dynamic similarity criterion must be satisfied in the wind matrix wind tunnel model test of a ship's wind assisted propulsion system. That is, when the test wind speed is higher than a certain critical wind speed, the dimensionless wind coefficient tends to be stable, and the flow around the model is similar to the real ship. The measured wind coefficient can be directly extrapolated to the real ship. During the test, the critical wind speed is determined by a variable wind speed test.

2.2 In the wind tunnel model test, spires and roughness elements are arranged at the front of the test section, and the wind field of the atmospheric boundary layer on the ocean surface at the model scale for wind matrix test is obtained. Reynolds number of the test should be more than 1.0 x 10^6. The Reynolds number, *Re*, is expressed by the following formula:

$$\mu$$

where ρ and μ are the density and viscosity of the air, respectively, U is the wind speed, L_{pp} is the length between perpendiculars of the model ship.

2.3 The blockage ratio should not be more than 5%. The ratio is calculated by the transverse projected area of the model divided by the cross-sectional area of wind tunnel.

3 Test method

3.1 At the same hull wind direction, the wind propulsion coefficients of the wind assisted propulsion system are different at different angles of attack. In order to obtain the maximum wind propulsion coefficients of the wind assisted propulsion system at each hull wind direction angle, the test scheme should include:

.1 measurements of the aerodynamic force characteristics of the ship model without wind assisted propulsion system at a series of wind angles ranging from 0° to 360°, spaced by an interval of 5°, potentially extended to 10° only for beam to stern;

.2 measurements of the aerodynamic force characteristics of the ship model with wind assisted propulsion system at a series of wind angles ranging from 0° to 360°, spaced by an interval of 5° or 10°, attack angles of the wind assisted propulsion system range from 0° to 180°, spaced by an interval of 5° or 10° in every wind angle of the ship model. Smaller intervals of attack angles should be needed around the maximum wind propulsion coefficients; and

.3 in the case where the measurements are carried out with spaced by an interval of 10°, each intermediate force characteristic (i.e. F_X at 5°, 15°, 25°…) should be interpolated by using the measurement results.

3.2 In the case where the shape of the ship and wind assisted propulsion system are symmetrical on starboard side and port side, the wind propulsion coefficients are also symmetrical and thus, the measurements at a series of wind angles ranging from 0° to 180° or 180° to 360° can be omitted.

3.3 If the wind assisted propulsion system has a changeable and controllable structure, such as sails and rotors, the model of the wind assisted propulsion system can be arranged as the wind angle, the rotor speed, or other controllable structure to maximize the gained wind force or to minimize the wind resistance.

Option 2: Test on a complete model of a single wind propulsion unit

4 Model

4.1 The effects of the hull and superstructures should be taken into account by corrective actions taking into account the masked area and distance. If several wind propulsion units are installed on board the ship, the aerodynamic interactions between them should be taken into account by corrective actions. The verifier may request documentation from the test author to verify that these effects have been taken into account.

4.2 The wind propulsion unit model is connected to the turntable by means of a force balance, and the wind direction angle of the ship model is changed by changing the angle of the turntable.

5 Test conditions

5.1 In addition to geometric similarity, the dynamic similarity criterion must be satisfied in the wind matrix wind tunnel model test of a ship's wind assisted propulsion system. That is, when the test wind speed is higher than a certain critical wind speed, the dimensionless wind coefficient tends to be stable, and the flow around the model is similar to the real ship. The measured wind coefficient can be directly extrapolated to the real ship. During the test, the critical wind speed is determined by a variable wind speed test.

5.2 The maximum Reynolds number of the test should be more than 5.0×10^5. The Reynolds number, Re, is expressed by the following formula:

$$Re = \rho \,.\, U \,.\, C / \mu$$

where ρ and μ are the density and viscosity of the air, respectively, U is the wind speed, C is the mean chord length of the wind propulsion unit.

5.3 The blockage ratio should not be more than 5%. The ratio is calculated by the transverse projected area of the model divided by the cross-sectional area of wind tunnel.

6 Test method

6.1 In order to obtain the maximum wind propulsion coefficients of the wind assisted propulsion system at each ship wind direction angle, the test scheme should include measurements of the aerodynamic force characteristics for:

.1 a range of permissible angles of attack on the wind propulsion unit; and

.2 a range of permissible settings (profile camber, rotation speed, suction rate, reduced area, etc.).

6.2 The propulsive force on the ship is the aerodynamic force measured on the wind propulsion unit pointing to the bow.

APPENDIX 2

GLOBAL WIND PROBABILITY MATRIX W_k

Table 1 – Normalized global wind chart showing the probability of wind conditions relative to the ship's heading along the main global trading routes

Wind Speed [m/s] \ Wind Angle [°]	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115
<1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<2	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
<3	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
<4	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011
<5	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
<6	0.0021	0.0020	0.0020	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015
<7	0.0022	0.0022	0.0021	0.0020	0.0020	0.0019	0.0018	0.0017	0.0017	0.0016	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015
<8	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019	0.0019	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014
<9	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0016	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012
<10	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009
<11	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006
<12	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
<13	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
<14	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
<15	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<16	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<17	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<18	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>=25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Wind Speed [m/s] \ Wind Angle [°]	120	125	130	135	140	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195	200	205	210	215	220	225	230	235
<1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<2	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
<3	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008
<4	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011
<5	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013
<6	0.0015	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0020	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014
<7	0.0016	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0021	0.0021	0.0022	0.0022	0.0023	0.0022	0.0022	0.0022	0.0021	0.0020	0.0020	0.0019	0.0018	0.0017	0.0017	0.0016	0.0015	0.0014
<8	0.0015	0.0015	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0020	0.0021	0.0021	0.0021	0.0020	0.0020	0.0020	0.0019	0.0019	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0014	0.0014
<9	0.0012	0.0012	0.0013	0.0014	0.0014	0.0015	0.0016	0.0016	0.0016	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0016	0.0016	0.0016	0.0015	0.0014	0.0014	0.0013	0.0013	0.0012
<10	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
<11	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008
<12	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005
<13	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
<14	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
<15	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
<16	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<17	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>=25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Wind Speed [m/s] \ Wind Angle [°]	240	245	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295	300	305	310	315	320	325	330	335	340	345	350	355
<1	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<2	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
<3	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009
<4	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
<5	0.0013	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
<6	0.0014	0.0014	0.0014	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0015	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0020	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021
<7	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0015	0.0015	0.0016	0.0016	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0021	0.0021	0.0022	0.0022	0.0023	0.0022
<8	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0016	0.0017	0.0017	0.0018	0.0019	0.0020	0.0020	0.0021	0.0021	0.0021
<9	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0014	0.0014	0.0015	0.0016	0.0016	0.0016	0.0017	0.0017	0.0017
<10	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0009	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0013	0.0013	0.0013
<11	0.0008	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007	0.0007	0.0007	0.0008	0.0008	0.0008	0.0009	0.0009	0.0009	0.0010
<12	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0007
<13	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
<14	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
<15	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
<16	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<17	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
<18	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001
<19	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<20	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<21	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<22	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<23	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<24	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
>=25	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

ANNEX 2[6]

GUIDANCE ON CALCULATION AND VERIFICATION OF EFFECTS OF CATEGORY (C) INNOVATIVE TECHNOLOGIES

1 WASTE HEAT RECOVERY SYSTEM FOR GENERATION OF ELECTRICITY (CATEGORY (C-1))

1.1 Summary of innovative energy efficient technology

1.1.1 This chapter provides the guidance on the treatment of high temperature waste heat recovery systems (electric generation type) as innovative energy efficiency technologies related to the reduction of the auxiliary power (concerning $P_{AEeff(i)}$). Mechanical recovered waste energy directly coupled to shafts need not be measured in this category, since the effect of the technology is directly reflected in the V_{ref}.

1.1.2 Waste heat energy technologies increase the efficiency utilization of the energy generated from fuel combustion in the engine through recovery of the thermal energy of exhaust gas, cooling water, etc. thereby generating electricity.

1.1.3 There are the following two methods of generating electricity by the waste heat energy technologies (electric generation type):

.1 (A) method to recover thermal energy by a heat exchanger and to drive the thermal engine which drives an electric generator; and

.2 (B) method to drive directly an electric generator using power turbine, etc. Furthermore, there is a waste heat recovery system which combines both of the above methods.

6 All examples in this chapter are used solely to illustrate the proposed methods of calculation and verification.

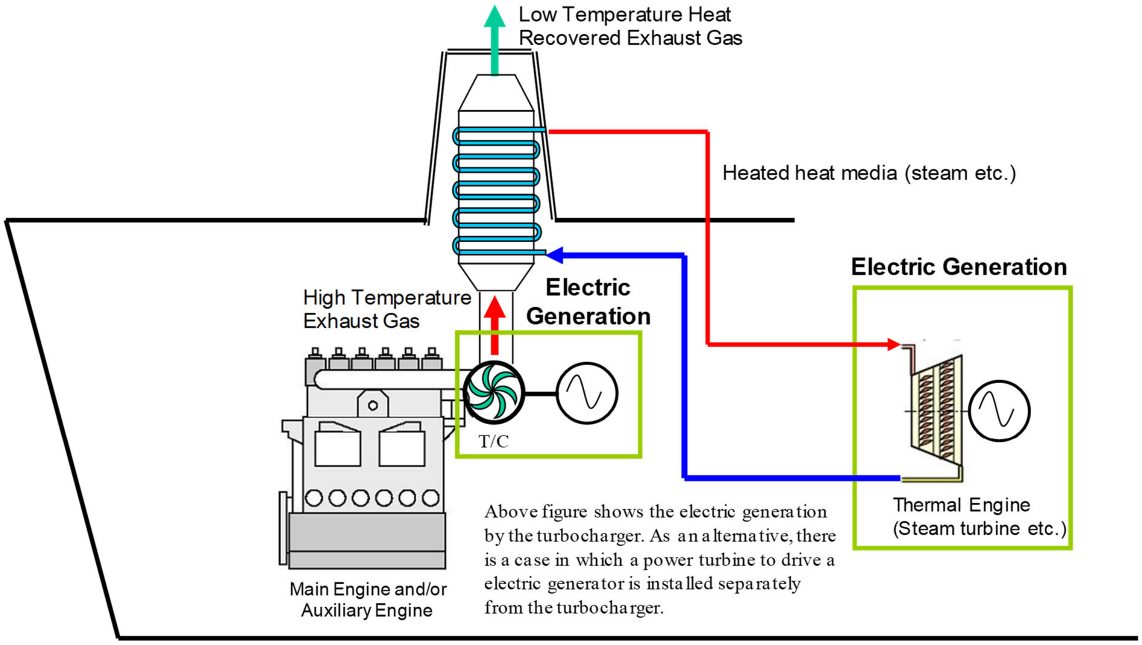


Figure 1 – Schematic illustration of Exhaust Heat Recovery

1.2 Method of calculation

1.2.1 Power reduction due to waste heating recovery system

1.2.1.1 The reduction of power by the waste heat recovery system is calculated by the following equation. For this system, f_{eff} is 1.00 in EEDI formula.

$$P_{AEeff} = P'_{AEeff} - P_{AEeff\_loss} \tag{1}$$

In the above equation, P'_{AEeff} is power produced by the waste heat recovery system. P_{AEeff_Loss} is the necessary power to drive the waste heat recovery system.

1.2.1.2 P_{AEeff} is the reduction of the ship's total auxiliary power (kW) by the waste heat recovery system under the ship performance condition applied for EEDI calculation. The power generated by the system under this condition and fed into the main switch board is to be taken into account, regardless of its application on board the vessel (except for power consumed by machinery as described in paragraph 1.2.1.4 of this chapter).

1.2.1.3 P'_{AEeff} is defined by the following equation.

$$P'_{AEeff} = \frac{W_e}{\eta_g}, \tag{2}$$

where:

W_e : Calculated production of electricity by the waste heat recovery system
η_g : Weighted average generator efficiency

1.2.1.4 P_{AEeff} is determined by the following factors:

.1 temperature and mass flow of exhaust gas of the engines, etc.;

.2 constitution of the waste heat recovery system; and

.3 efficiency and performances of the components of the waste heat recovery system.

1.2.1.5 P_{AEeff_Loss} is the power (kW) for the pump, etc. necessary to drive the waste heat recovery system.

1.3 Method of verification

1.3.1 General

1.3.1.1 Verification of EEDI with innovative energy efficient technologies should be conducted according to the EEDI Survey Guidelines. Additional items concerning innovative energy efficient technologies not contained in EEDI Survey Guidelines are described below.

1.3.2 Preliminary verification at the design stage

1.3.2.1 In addition to paragraph 4.2.2 of EEDI Survey Guidelines, the EEDI Technical File which is to be developed by the shipowner or shipbuilder should include:

.1 diagrams, such as a plant diagram, a process flow diagram, or a piping and instrumentation diagram outlining the waste heat recovery system, and its related information such as specifications of the system components;

.2 deduction of the saved energy from the auxiliary engine power by the waste heat recovery system; and

.3 calculation result of EEDI.

1.3.2.2 In addition to paragraph 4.2.7 of the EEDI Survey Guidelines, additional information that the verifier may request the shipbuilder to provide directly to it includes:

.1 exhaust gas data for the main engine at 75% MCR (and/or the auxiliary engine at the measurement condition of SFC) at different ambient air inlet temperatures, e.g. 5°C, 25°C and 35°C; which consist of:

  .1 exhaust gas mass flow for turbo charger (kg/h);

  .2 exhaust gas temperatures after turbo charger (C°);

  .3 exhaust gas bypass mass flow available for power turbine, if any (kg/h);

  .4 exhaust gas temperature for bypass flow (C°); and

  .5 exhaust gas pressure for bypass flow (bar).

.2 in the case of system using heat exchanger, expected output steam flows and steam temperatures for the exchanger, based on the exhaust gas data from the main engine;

.3 estimation process of the heat energy recovered by the waste heat recovery system; and

.4 further details of the calculation method of P_{AEeff} defined in paragraph 1.2.1 of this chapter.

1.3.3 Final verification of the attained EEDI at sea trial

1.3.3.1 Deduction of the saved energy from the auxiliary engine power by the waste heat recovery system should be verified by the results of shop tests of the waste heat recovery system's principal components and, where possible, at sea trials.

1.3.3.2 In the case of systems for which shop tests are difficult to be conducted, e.g. in case of the exhaust gas economizer, the performance of the waste heat recovery system should be verified by measuring the amount of the generated steam, its temperature, etc. at the sea trial. In that case, the measured vapour amount, temperature, etc. should be corrected to the value under the exhaust gas condition when they were designed, and at the measurement conditions of *SFC* of the main/auxiliary engine(s). The exhaust gas condition should be corrected based on the atmospheric temperature in the engine-room (Measurement condition of *SFC* of main/auxiliary engine(s); i.e. 25°C), etc.

2 PHOTOVOLTAIC POWER GENERATION SYSTEM (CATEGORY (C-2))

2.1 Summary of innovative energy efficient technology

2.1.1 Photovoltaic (PV) power generation system set on a ship will provide part of the electric power either for propelling the ship or for use inboard. PV power generation system consists of PV modules and other electric equipment. Figure 1 shows a schematic diagram of PV power generation system. The PV module consists of combining solar cells and there are some types of solar cell such as "Crystalline silicon terrestrial photovoltaic" and "Thin-film terrestrial photovoltaic", etc.

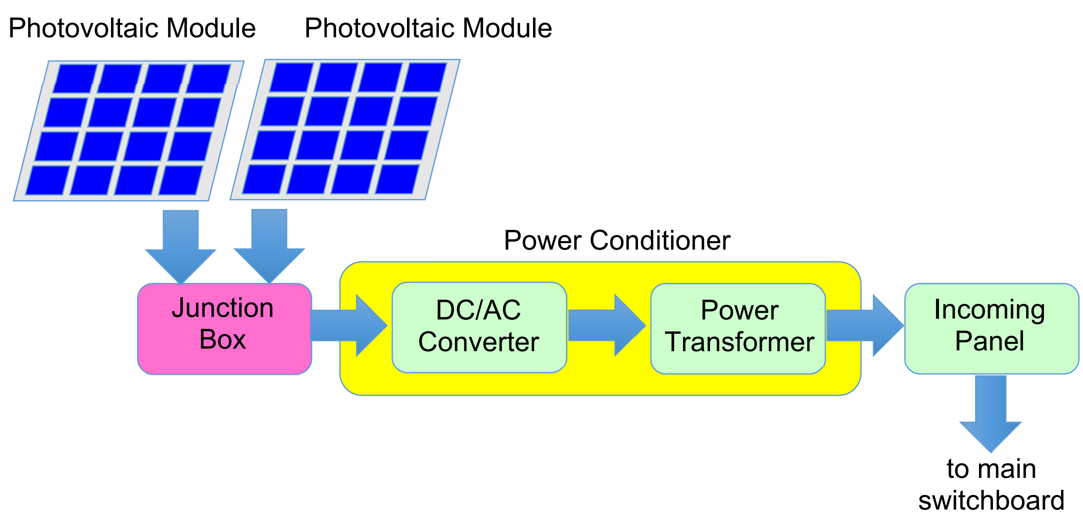


Figure 1 – Schematic diagram of photovoltaic power generation system

2.2 Method of calculation

2.2.1 Electric power due to photovoltaic power generation system

2.2.1.1 The auxiliary power reduction due to the PV power generation system can be calculated as follows:

$$f_{eff} \cdot P_{AEeff} = \{f_{rad} \times (1 + L_{temp} / 100)\} \times \{P_{max} \times (1 - L_{others} / 100) \times N / \eta_{GEN}\} \quad (1)$$

where $f_{eff} \cdot P_{AEeff}$ is the total net electric power (kW) generated by the PV power generation system.

2.2.1.2 Effective coefficient f_{eff} is the ratio of average PV power generation in main global shipping routes to the nominal PV power generation specified by the manufacturer. Effective coefficient can be calculated by the following formula using the solar irradiance and air temperature of main global shipping routes:

$$f_{eff} = f_{rad} \times (1 + L_{temp} / 100) \quad (2)$$

2.2.1.3 f_{rad} is the ratio of the average solar irradiance on main global shipping route to the nominal solar irradiance specified by the manufacturer. Nominal maximum generating power P_{max} is measured under the Standard Test Condition (STC) of IEC standard.[7] STC specified by manufacturer is that: Air Mass (AM) 1.5, the module's temperature is 25°C, and the solar irradiance is 1000 W/m^2. The average solar irradiance on main global shipping route is 200 W/m^2. Therefore, f_{rad} is calculated by the following formula:

$$f_{rad} = 200\ \mathrm{W/m^2} \div 1000\ \mathrm{W/m^2} = 0.2 \quad (3)$$

2.2.1.4 L_{temp} is the correction factor, which is usually in minus, and derived from the temperature of PV modules, and the value is expressed in per cent. The average temperature of the modules is deemed 40°C, based on the average air temperature on main global shipping routes. Therefore, L_{temp} is derived from the temperature coefficient f_{temp} (percent/K) specified by the manufacturer (see IEC standard[7]) as follows:

$$L_{temp} = f_{temp} \times (40°\mathrm{C} - 25°\mathrm{C}) \quad (4)$$

2.2.1.5 P_{AEeff} is the generated PV power divided by the weighted average efficiency of the generator(s) under the condition specified by the manufacturer and expressed as follows:

$$P_{AEeff} = P_{max} \times (1 - L_{others} / 100) \times N / \eta_{GEN}, \quad (5)$$

where η_{GEN} is the weighted average efficiency of the generator(s).

2.2.1.6 P_{max} is the nominal maximum generated PV power generation of a module expressed in kilowatt, specified based on IEC Standards.[7]

[7] Refer to IEC 61215 "Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval" for Crystalline silicon terrestrial PV modules, and to IEC 61646 "Thin-film terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval" for Thin-film terrestrial PV modules.

2.2.1.7 L_{others} is the summation of other losses expressed by percent and includes the losses in a power conditioner, at contact, by electrical resistance, etc. Based on experiences, it is estimated that L_{others} is 10% (the loss in the power conditioner: 5% and the sum of other losses: 5%). However, for the loss in the power conditioner, it is practical to apply the value specified based on IEC Standards.[8]

2.2.1.8 *N* is the numbers of modules used in a PV power generation system.

2.3 Method of verification

2.3.1 General

2.3.1.1 Verification of EEDI with innovative energy efficient technologies is conducted according to EEDI Survey Guidelines**.** This section provides additional requirements related to innovative technologies.

2.3.2 Preliminary verification at the design stage

2.3.2.1 In addition to paragraph 4.2.2 of EEDI Survey guidelines, the EEDI Technical File which is to be developed by the shipowner or shipbuilder should include:

.1 outline of the PV power generation system;

.2 power generated by the PV power generation system; and

.3 calculated value of EEDI due to the PV power generation system.

2.3.2.2 In addition to paragraph 4.2.7 of the EEDI survey guidelines, additional information that the verifier may request the shipbuilder to provide directly to it includes:

.1 detailed calculation process of the auxiliary power reduction by the PV power generation system; and

.2 detailed calculation process of the total net electric power ($f_{eff} \cdot P_{AEeff}$) specified in section 2.2 in this guidance.

2.3.3 Final verification of the attained EEDI at sea trial

2.3.3.1 The total net electric power generated by PV power generation system should be confirmed based on the EEDI Technical File. In addition to the confirmation, it should be confirmed whether the configuration of the PV power generation systems on ship is as applied, prior to the final verification.

___

[8] IEC 61683 "Photovoltaic systems – Power conditioners – Procedure for measuring efficiency".

CII（Carbon Intensity Indicator）

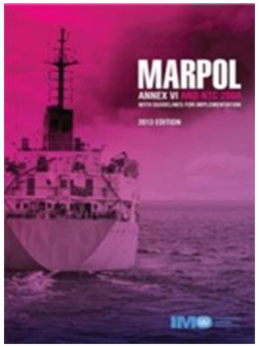
Marine GHG Certification Department

Oct, 2021

Current Regulations (SEEMP & IMO DCS)

ClassNK

- **Application**: Ships of 5,000GT and above,engaged in international voyage



- **Reporting period**:

  Calendar year, i.e. 1 January until 31 December inclusive

- **Requirements for IMO DCS**:

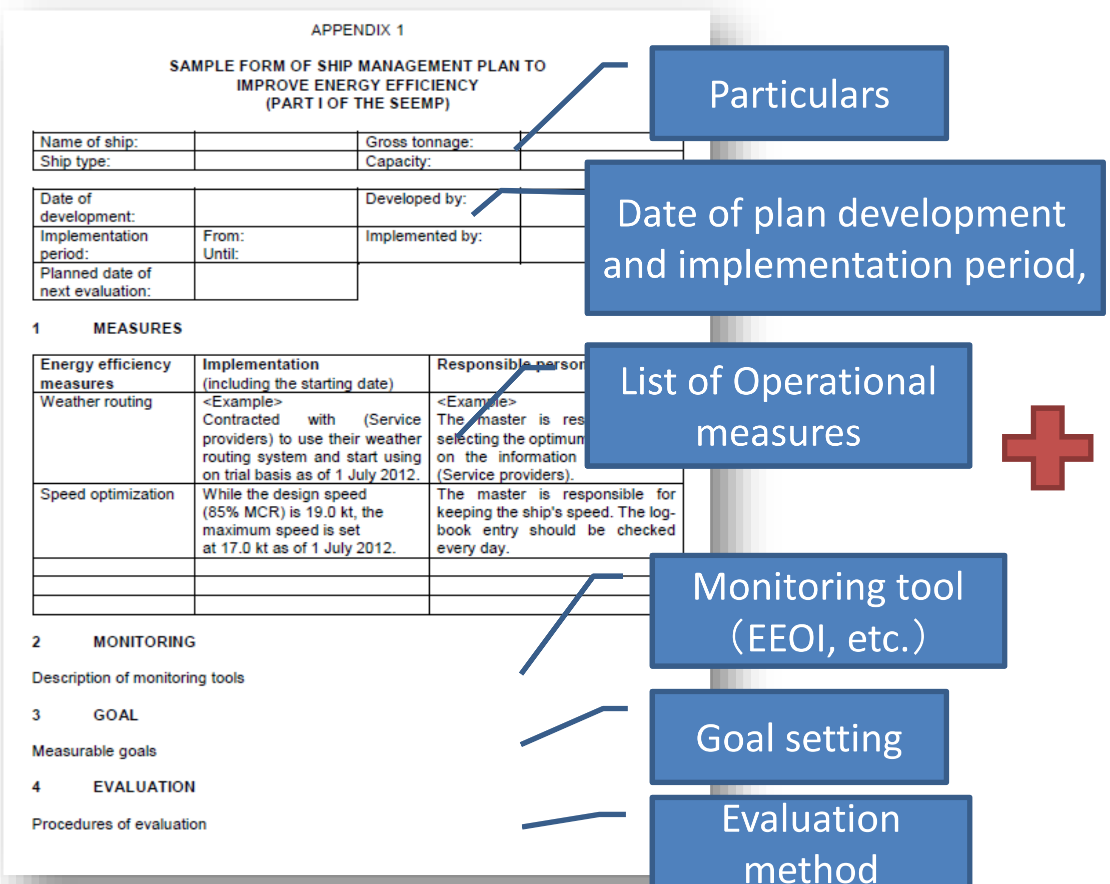
1. Revisions of SEEMP to add the Ship Fuel Oil Consumption Data Collection Plan (DCP)which includes a description of the methodology for data collecting and the reporting processes.
2. **Data collection on board from 2019.**
3. Reporting the collected data to the Administration or RO.
4. Verification of the reporting data by the Administration or RO.
5. Retaining the Statement of Compliance issued by administrator or RO onboard, and keeping the relevant data.

Technical Information(TEC-1139) provides general explanations of the requirements on IMO DCS as well as the relevant procedures for its implementation

Data Collection Plan (SEEMP part II)

ClassNK

- SEEMP shall include DCP: Data Collection Plan in accordance with MEPC.282(70)
- Confirmation of Flag/RO is necessary prior to data collection
  ※ Existing Ships：By 31st December 2018
  ※ <u>New ships on or after 1 March 2018: By the delivery date</u>


APPENDIX 1

SAMPLE FORM OF SHIP MANAGEMENT PLAN TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY (PART I OF THE SEEMP)

Name of ship:		Gross tonnage:	
Ship type:		Capacity:	

Date of development:		Developed by:	
Implementation period:	From: Until:	Implemented by:	
Planned date of next evaluation:			

1 MEASURES

Energy efficiency measures	Implementation (including the starting date)	Responsible person
Weather routing	<Example> Contracted with (Service providers) to use their weather routing system and start using on trial basis as of 1 July 2012.	<Example> The master is res[...] selecting the optimum [...] on the information (Service providers).
Speed optimization	While the design speed (85% MCR) is 19.0 kt, the maximum speed is set at 17.0 kt as of 1 July 2012.	The master is responsible for keeping the ship's speed. The log-book entry should be checked every day.

2 MONITORING

Description of monitoring tools

3 GOAL

Measurable goals

4 EVALUATION

Procedures of evaluation

DCP Items

1. Ship Particulars
2. Revision history
3. Internal combustion engines, other engines and fuels used
4. Emission factor
5. Monitoring method of fuels
6. Monitoring method of distance travelled
7. Monitoring method of hours underway
8. Reporting procedure
9. Data quality management process

ClassNK

Data collection on-board

Data to be collected according to developed DCP from 1 January, 2019.


Bunker Delivery Note

MARPOL Annex VI requires that the following information be included in the bunker delivery note provided to the receiving ship.

Name and IMO number of receiving ship	
Port	
Date of commencement of delivery	
Name, address and telephone number of marine fuel oil supplier	

- Fuel oil consumed by each fuel type
  - Method 1 : Bunker Delivery Notes (BDN)
    $FOC_{annual} = ROB_{calendar\text{-}start} + \Sigma\ BDN - ROB_{calendar\text{-}end}$
  - Method 2 : Flow meter
    $FOC_{annual} = \Sigma\ FOC_{daily\ (flow\ meter)}$
  - Method 3 : Fuel tank monitoring
    $FOC_{annual} = \Sigma\ FOC_{daily\ (tank\ reading)}$

- Distance travelled over ground in nautical miles
- Hours underway

※"Distance travelled" and "hours underway" should be aggregated duration "while the ship is underway under its own propulsion" as defined

Short-term Measures for GHG Reduction

ClassNK

1. EEXI — Technical Approach

2. **SEEMP Update**

3. **CII Rating**

Operational Approach

CII: Carbon Intensity Indicator

Proposals for Operational Approach by the stakeholders in MEPC75

SEEMP Update (periodical Audit)
（Shipowners country, Finland, Japan）

Fuel consumption rating
（China）

Mandatory Speed/FOC limitation
（EU, Environmental Organization, Island countries）

Gentle ⟷ strict

1. Adopted CII related guidelines

1. Guidelines on operational carbon intensity indicators and the calculation methods (CII guidelines, G1)

2. Guidelines on the reference lines for use with operational carbon intensity indicators (CII Reference line guidelines, G2)

3. Guidelines on the operational carbon intensity reduction factors relative to reference lines (CII Reduction factor guidelines, G3)

4. Guidelines on the operational carbon intensity rating of ships (CII Rating Guidelines, G4)

ClassNK

CII Rating（5000GT and above / EEDI applied ship types）

- Rating each vessels by CII from 2023 consumption data (CII Guideline, G1)

- CII and “A” – “E” rating will be added on SOC of IMODCS in accordance with Reference Line (G2), Reduction Factor (G3) and Rating guideline (G4)

- Low rated vessels (“E” or “D” on 3 consecutive years) should develop a plan of corrective actions and the plan should be approved by the Administration or RO

2. Consideration of following guidelines are postponed;

    1. Some correction factors and voyage exclusions when calculating CII of each ship

    2. Update of SEEMP guidelines

    (SEEMP to be updated before 1.Jan.2023)

    - Periodical Audit (at ISM audit)

    - CII related update

⇨ Further information will be updated on ClassNK Technical Information when any development happens

CII Calculation (G1)

ClassNK

Ship types	Calculation method	Note
Bulk carriers, Tankers, Container ships, Gas carriers, LNG carriers, Ro-ro cargo ships, General cargo ships, Refrigerated cargo carrier Combination carriers	$\frac{\mathrm{CO2}\ Emission}{Deadweight \times Distance\ sailed}$	Deadweight: Corresponding to Maximum Summer load draft = the value on IEE Cert supplement
cruise passenger ships Ro-ro cargo ships (vehicle carriers) Ro-ro passenger ships	$\frac{\mathrm{CO2}\ Emission}{Gross\ Tonnage \times Distance\ sailed}$	

CII Reference Line (G2)

ClassNK

$$CII\ ref = a\ Capacity^{-c}$$

Ship Type		Capacity	a	c
Bulk Carrier	DWT ≥ 279,000	279,000	4745	0.622
	DWT < 279,000	DWT	4745	0.622
Gas Carrier	DWT ≥ 65,000	DWT	14405E+7	2.071
	DWT < 65,000	DWT	8104	0.639
Tanker		DWT	5247	0.610
Container ship		DWT	1984	0.489
General cargo ship	DWT ≥ 20,000	DWT	31948	0.792
	DWT < 20,000	DWT	588	0.3885
Refrigerated cargo carrier		DWT	4600	0.557
Combination carrier		DWT	40853	0.812
LNG Carrier	DWT ≥ 100,000	DWT	9.827	0
	100,000 > DWT ≥ 65,000	DWT	14479E+10	2.673
	DWT < 65,000	65,000	14479E+10	2.673
Ro-ro cargo ship (VC)		GT	5739	0.631
Ro-ro cargo ship		DWT	10952	0.637
Ro-ro passenger ship		GT	7540	0.587
Cruise passenger ship		GT	930	0.383

Required CII (G3)

ClassNK

$$Required\ CII = \frac{100 - Z}{100} CII_{Ref}$$

Table 1: Reduction factor (Z%) for the CII relative to the 2019 reference line
Year Reduction factor relative to 2019

Year	Reduction Factor (Z)
2023	5%
2024	7%
2025	9%
2026	11%
2027	**
2028	**
2029	**
2030	**

Reduction factor Z will be starting from 5% in 2023 and 2% will be added yearly

**Z factors for the years of 2027 to 2030 to be further strengthened and developed taking into account the review of the short-term measure.

CII Rating (G4)

ClassNK

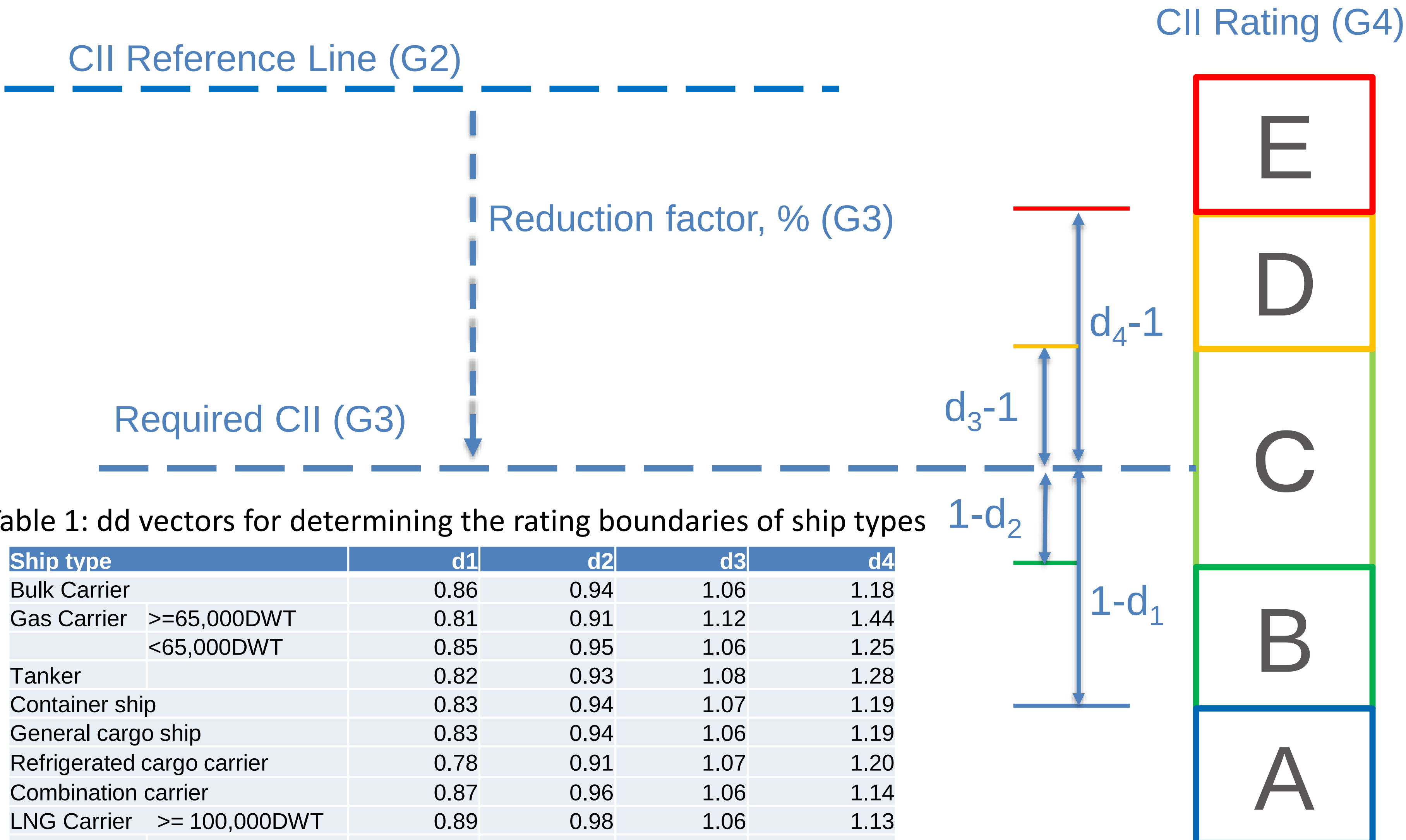


Table 1: dd vectors for determining the rating boundaries of ship types

Ship type		d1	d2	d3	d4
Bulk Carrier		0.86	0.94	1.06	1.18
Gas Carrier	>=65,000DWT	0.81	0.91	1.12	1.44
	<65,000DWT	0.85	0.95	1.06	1.25
Tanker		0.82	0.93	1.08	1.28
Container ship		0.83	0.94	1.07	1.19
General cargo ship		0.83	0.94	1.06	1.19
Refrigerated cargo carrier		0.78	0.91	1.07	1.20
Combination carrier		0.87	0.96	1.06	1.14
LNG Carrier	>= 100,000DWT	0.89	0.98	1.06	1.13
	<100000DWT	0.78	0.92	1.10	1.37
Ro-ro cargo ship (VC)		0.86	0.94	1.06	1.16
Ro-ro cargo ship		0.66	0.9	1.11	1.37
Ro-ro passenger ship		0.72	0.90	1.12	1.41
Cruise passenger ship		0.87	0.95	1.06	1.16

CII Calculation example

ClassNK

Items	
Ship type	Bulk Carrier
Deadweight	62000
Gross tonnage	33255
Distance Travelled (NM)	60045
CO2 emissions (ton)	17447
Attained CII (G1)	4.69
a (G2)	4745
c (G2)	0.622
CII ref (G2)	4.96
Required CII (G3, 2023)	4.71
Attained CII / Required CII	1.00
Rating (2023)	**C**

Data source from IMODCS fuel reporting (started from emission of 2023)

Attained CII (g/ton mile)

$$= \frac{17447\ (ton)}{62000 \times 60045\ (ton\ mile)} \times 10^6 = 4.69$$

CII ref = $4745 \times 62000^{-0.622} = 4.96$

Rating (on 2023 reduction factor)

Required CII $= 4.96 \times \frac{100-5}{100} = 4.71\ (2023)$

$$\frac{Attained\ CII}{Required\ CII} = 0.99 < d3\ (1.06)$$

Effect of reduction factor

ClassNK

Items	
Ship type	Bulk Carrier
Deadweight	62000
Gross tonnage	33255
Distance Travelled (NM)	60045
CO2 emissions (ton)	17447
Attained CII (G1)	**4.69**
a (G2)	4745
c (G2)	0.622
CII ref (G2)	4.96

If the vessel keep their emission score same, the rating will be slightly worse year by year

Reporting Year	Reduction factor (%)	Required CII	Rating
2023	5	4.71	C
2024	7	4.61	C
2025	9	4.51	C
2026	11	4.41	**D**

Integration of CII on ClassNK MRV Portal

- CII rating will be added to IMODCS annual report

IMODCS annual report

Reporting period

Start date	2020/02/13	End date	2020/12/31

Ship Particulars

Name of ship *		
IMO No. *		
Company *		
FLAG / PORT *		Singapore / Singapore
Distinctive number or letters * (Call sign / Official Number)		[illegible]
Ship type *		Gas Carrier
Gross tonnage *		48122
Net tonnage *		14437
Deadweight *		54823
EEDI (gCO2/t.nm) *		5.85
Ice class (if applicable)		
Power output (rated power)(kW)	Main Power Propulsion *	13000
	Auxiliary Engine(s) *	4110 (Please input the total output of all the Auxiliary Engines. e.g

Consumption Data

		Actual reported value
Distance Travelled (nm)		79536
Hours underway (h)		5281
Fuel oil consumption (t)	Diesel/Gas Oil (Cf:3.206)	631
	LFO (Cf:3.151)	0
	HFO (Cf:3.114)	7987
	LPG(Propane) (Cf:3.000)	
	LPG(Butane) (Cf:3.030)	
	LNG (Cf:2.750)	
	Methanol (Cf:1.375)	
	Ethanol (Cf:1.913)	
Method used to measure fuel oil consumption		method using Bunker Fuel Oil Tank Monitoring

CII result

CII	
Attained CII	6.17
Required CII	7.23
CII Rating (2023)	B

Corrective action plan
(if rating is “E” or “D” for three years in a row)

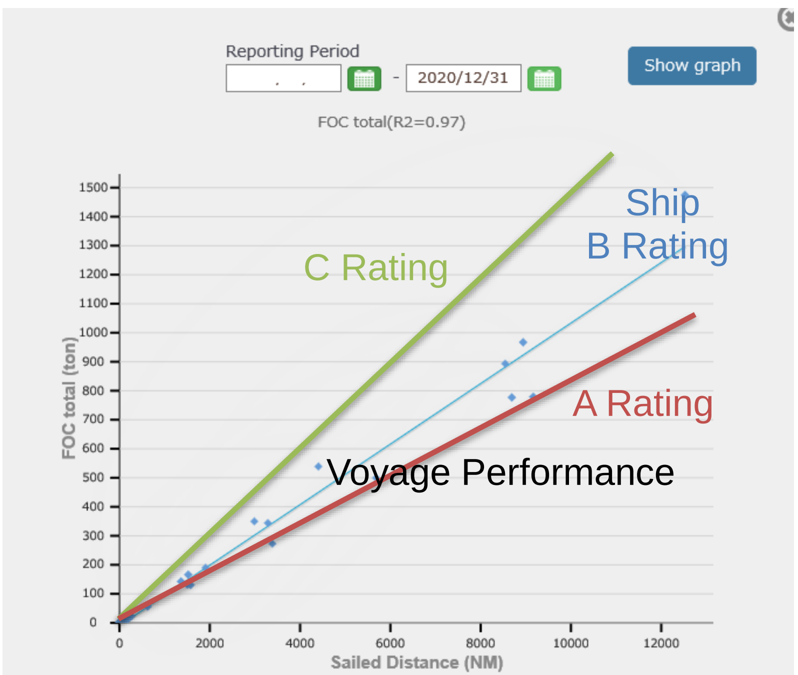
- Tick corrective actions to be made
- Document will be Automatically generated on the system

Integration of CII on ClassNK MRV Portal

ClassNK

- CII rating estimation function will be implemented

	Error Mark	V/No.	Departure Dep.Time(UTC)	Departure Port	Arrival Arr.Time(UTC)	Arrival Dep.Time(UTC)	Arrival Port
☑		80	2018/08/09 13:42	El dekheila	2018/08/11 20:12	2018/08/17 03:52	GREEK
☑		81	2018/08/17 03:52	GREEK	2018/08/27 13:54	2018/08/30 23:18	Schiedam
☑		81	2018/08/30 23:18	Schiedam	2018/08/31 12:42	2018/09/25 14:24	Calais
☑		82	2018/09/25 14:24	Calais		2018/10/20 18:12	



CII rating estimation

Users can easily understand the ship's estimated rating on-demand

Integration of CII on ClassNK MRV Portal

ClassNK

- CII rating fleet / historical analysis

Vessel	Attained CII (Required CII) 2019	Attained CII (Required CII) 2020	Attained CII (Required CII) 2021	Attained CII (Required CII) 2022
NK Bulker	3.47 (3.22)	3.52 (3.15)	3.43 (3.09)	3.22 (3.05)
NK Maru	…			
…	…			
…	…			
…	…			
…	…			
…	…			

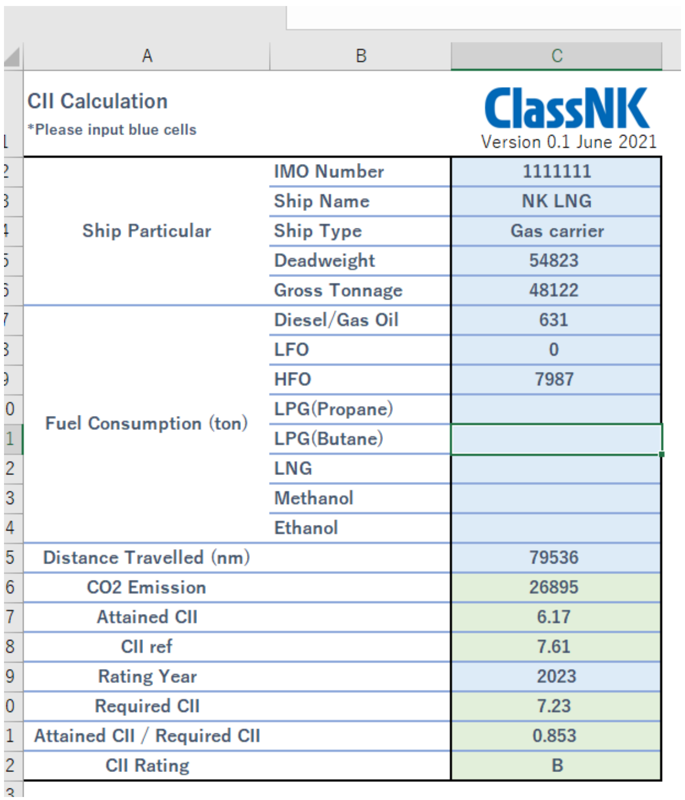
Users can understand the CII result for all vessels
User also can download the detailed data set and use it for further analysis

ClassNK Action for the time being

ClassNK

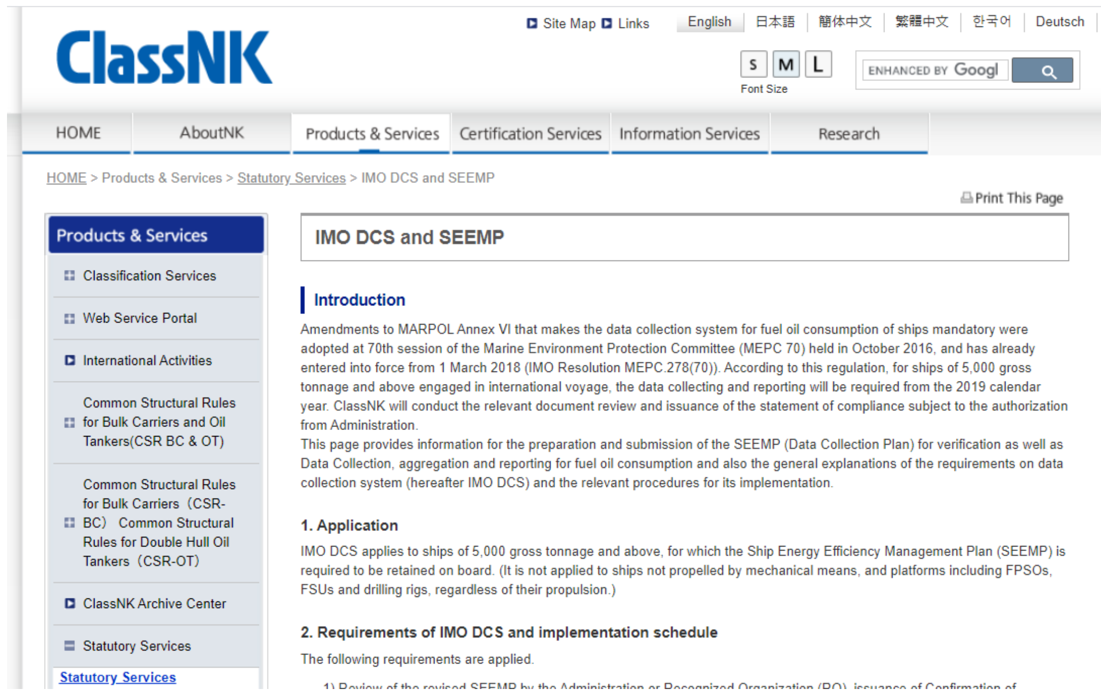
- CII calculation excel sheet will be available on ClassNK Homepage as a tentative manner until ClassNK MRV Portal update
- Support for SEEMP Revision will be announced when further updates are made by IMO

CII calculation sheet



CII Calculation *Please input blue cells		ClassNK Version 0.1 June 2021
Ship Particular	IMO Number	1111111
	Ship Name	NK LNG
	Ship Type	Gas carrier
	Deadweight	54823
	Gross Tonnage	48122
Fuel Consumption (ton)	Diesel/Gas Oil	631
	LFO	0
	HFO	7987
	LPG(Propane)	
	LPG(Butane)	
	LNG	
	Methanol	
	Ethanol	
Distance Travelled (nm)		79536
CO2 Emission		26895
Attained CII		6.17
CII ref		7.61
Rating Year		2023
Required CII		7.23
Attained CII / Required CII		0.853
CII Rating		B

IMODCS / SEEMP information



https://www.classnk.or.jp/hp/en/activities/statutory/seemp/index.html

Contact

Marine GHG Certification Department

Email: dcs@classnk.or.jp

Tel: +81-3-5226-3025