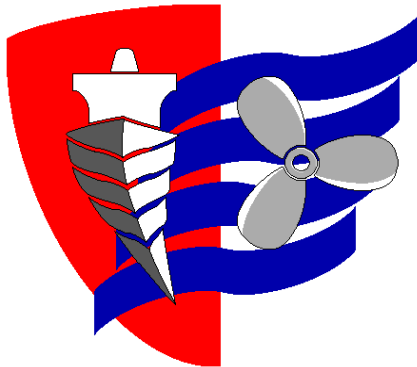


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**EVALUACIÓN DE COSTE Y BENEFICIO
AMBIENTAL DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD
EN BUQUES DE LÍNEA MOS. APLICACIÓN
PRÁCTICA A GULFSTREAM.MOS**

**COST AND ENVIRONMENT EVALUATION OF SPEED
REDUCTION IN MOS SHIPS. APPLICATION TO
GULFSTREAM.MOS**

**Para acceder al Título de Máster Universitario en
INGENIERÍA NÁUTICA Y GESTIÓN MARÍTIMA**

**Alumno: James Archibald Smith
Director: Jesús Miguel Oria Chaveli**

Diciembre – 2019

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Máster

**EVALUACIÓN DE COSTE Y BENEFICIO
AMBIENTAL DE REDUCCIÓN DE
VELOCIDAD EN BUQUES DE LÍNEA MOS.
APLICACIÓN PRÁCTICA A
GULFSTREAM.MOS**

**COST AND ENVIRONMENT EVALUATION
OF SPEED REDUCTION IN MOS SHIPS.
APPLICATION TO GULFSTREAM.MOS**

**Para acceder al Título de Máster Universitario en
INGENIERÍA NÁUTICA Y GESTIÓN MARÍTIMA**

Diciembre – 2019

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster 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 Máster, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

SUMARIO DE CONTENIDOS

I.-	RESUMEN Y PALABRAS CLAVE	3
II.-	INTRODUCCIÓN	5
III.-	MEMORIA DESCRIPTIVA.	7
III.1.-	Planteamiento del problema, hipótesis de partida y de resultado	7
III.1.1.-	Planteamiento del problema	7
III.1.2.-	Hipótesis de partida	8
III.1.3.-	Hipótesis de resultado	9
III.2.-	Herramientas de resolución	11
III.2.1.-	Fórmula de Barrass sobre consumo en función de la velocidad	11
III.2.2.-	Factor de conversión de la masa de combustible en masa de CO ₂	11
III.2.3.-	Time Charter Equivalent (TCE)	13
III.2.4.-	Marco Científico.....	15
III.2.4.1.-	Estrategia inicial para la reducción de GEI de los buques.	15
III.2.4.2.-	Red Transeuropea de Transporte (TEN-T) y las Autopistas de Mar.....	17
III.2.5.-	Otras herramientas.....	20
III.3.-	Metodología	21
III.3.1.-	Determinar el consumo del buque mediante la fórmula de Barrass.	21
III.3.1.1.-	Consumo de combustible en toneladas diarias	21
III.3.1.2.-	Consumo en una ruta <i>j</i>	22
III.3.2.-	Determinar el contenido de CO ₂ emitido a la atmosfera y el índice de eficiencia energética operacional EOOI.	23

III.3.3.-	Estudiar el carácter económico de la variación de la velocidad de servicio.....	24
III.3.3.1.-	Coste del combustible para la ruta j	24
III.3.3.2.-	Estudiar el Time Charter Equivalent TCE	25
IV.-	APLICACIÓN PRÁCTICA: GULFSTREAM.MOS	27
IV.1.-	Detalles de GULFSTREAM.MOS	27
IV.2.-	Consumo del buque Cap Finistere según Barrass.....	28
IV.2.1.-	Consumo en la ruta de la AdM Gulfstream.....	30
IV.3.-	Contenido de CO ₂ emitido e índice de eficiencia energética operacional	31
IV.4.-	Estudio económico de la reducción de velocidad en el Cap Finistere.....	32
IV.4.1.1.-	Coste de adquisición del combustible del Cap Finistere	32
IV.4.1.2.-	Estudio del TCE a velocidad inicial y final	34
V.-	CONCLUSIONES	39
VI.-	REFERENCIAS CITADAS	40

I.- RESUMEN Y PALABRAS CLAVE

Resumen

La prevención de la contaminación incrementa a diario como área de preocupación entre las distintas organizaciones internacionales. En el sector marítimo, la Organización Marítima Internacional (OMI) trabaja continuamente es su compromiso de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), uno de los puntos más importantes de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), de las Naciones Unidas, nº 13: Acción por el Clima.

La Unión Europea ve en el sector marítimo de la Comunidad una necesidad fomentar el uso de los denominados “*Motorways of the Sea (MOS)*”, conocidos en castellano como las Autopistas del Mar (AdM). El uso extendido de estas rutas conlleva grandes beneficios medioambientales y económicos.

Este trabajo pretende ofrecer una metodología para conocer los cambios medioambientales y económicos producidos por la reducción de la velocidad de servicio de un buque, una de las medidas operacionales propuestas por la OMI para la reducción de la emisión de CO₂ a la atmosfera.

La aplicación práctica de la metodología se lleva a cabo en una ruta de la Autopista del Mar “Gulfstream.mos”, demostrando los resultados obtenidos en cuanto a reducción del consumo de combustible, mejora de eficiencia energética, reducción de emisión de CO₂, así como de los aspectos económicos.

Palabras clave

Autopistas del Mar, Reducción de la velocidad, Reducción de emisiones de CO₂, Consumo de combustible

Abstract

Pollution prevention increments daily as an area of concern for the various international organizations. In the maritime sector, the International Maritime Organization (IMO) continuously works in its commitment to reduce Greenhouse Gas (GHG) emissions, one of the most important points of the United Nation's Sustainable Development Goals No. 13: Climate Action.

The European Union sees in the Community's maritime sector a necessity to promote the use of the so-called *Motorways of the Sea (MOS)*. An extended use of these routes entails significant environmental and economical benefits.

This project pretends to offer a methodology to recognize the environmental and economical changes due to reducing a ship's service speed, one of the operational measures proposed by the IMO to reduce CO₂ emissions.

The application of the methodology is carried out in a route of the "Gulfstream.mos" Motorway of the Sea, demonstrating the obtained results concerning fuel consumption reduction, improvement of energetic efficiency, CO₂ emission reduction, as well as the economical aspects.

Key words

Motorways of the Sea, Ship speed reduction, CO₂ emission reduction, Fuel consumption

II.- INTRODUCCIÓN

La transición a combustibles más ecológicos comienza a estar presente en las diferentes industrias. Las normativas de los organismos internacionales son cada vez más exigentes en cuanto a la prevención de la contaminación y los diferentes sectores deben adaptarse a los cambios y las exigencias reglamentarias.

Una de las grandes industrias que tiene que responder ante los cambios evidentes es el transporte marítimo, que depende de la Organización Marítima Internacional (OMI), pero también ante presiones de otras organizaciones, entre los que destacan los objetivos de las Naciones Unidas y, en particular, su objetivo 13: Acción por el Clima.

Parece que el objetivo a largo plazo del sector marítimo es que todos los buques acaben actualizándose y estén diseñados para operar, a diferencia de la actualidad, con combustibles mucho más ecológicos, como es el caso del gas natural licuado.

La realidad actual es que el porcentaje más amplio con diferencia de los buques de la flota mundial operan con combustibles fósiles. Por ello, la OMI trabaja continuamente en asegurar que estos buques sean lo más eficientes posibles y reduzcan su contribución a la emisión de gases de efecto invernadero (GEI).

Paralelamente, los organismos internacionales también trabajan en la reducción de la contaminación provocado por la red de transporte terrestre. Una de las medidas que lleva promoviendo la Unión Europea (UE) en los últimos años es la traslación de una gran parte del transporte rodado por carretera al sector marítimo. Es decir, lo que se pretende es conseguir que, en aquellas situaciones geográficas que lo permitan, los camiones realicen una gran parte de su viaje por mar a bordo de buques y se ahorren cientos o miles de kilómetros por la red de carreteras europeas.

Estas rutas realizadas por los buques son conocidas como “Motorways of the Sea (MOS), en castellano Autopistas del Mar (AdM), y son trayectos internacionales que conectan puertos europeos. Se crean estratégicamente con el fin de servir de conexión

del comercio entre países separados por mar. Los buques son del tipo RORO o ROPAX, que operan en rutas establecidas y bajo un horario predeterminado.

Como el fin de las AdM es mejorar la eficiencia energética del transporte internacional, parece de sentido común que los propios buques sean operados también de la forma más eficiente posible. Uno de los temas actuales en el sector marítimo respecto a la reducción de la emisión de GEI de los buques es la posibilidad de aplicar una reducción de su velocidad o potencia de operación, con el fin de disminuir su consumo de combustible fósil.

Las AdM, como se ha dicho, operan bajo un horario fijo y es esencial que los buques deben cumplir con estos lo mejor posible. Para ello la velocidad de servicio del buque, y en consecuencia la duración de la travesía tiene que ser un parámetro conocido. Por este motivo, el presente trabajo diseña una metodología aplicable a los buques que cubran las rutas de las AdM, con el fin de conocer una serie de datos importantes al aplicar una reducción en la velocidad de servicio.

Por un lado, la metodología permite conocer el beneficio ambiental de aplicar dicha medida operacional al buque, ya que se halla el ahorro que se produce en el consumo de combustible y, por tanto, la reducción en la emisión de GEI a la atmosfera y la mejora de la eficiencia energética operacional del buque.

Por otro lado, la metodología permite estudiar el carácter económico de aplicar la medida. Las navieras pueden bajar su coste de adquisición de combustible considerablemente al reducir la velocidad de servicio de los buques que operan, pero también se debe considerar que, al aumentar la duración de las travesías, se disminuye el rendimiento del buque.

Finalmente, este trabajo realiza una aplicación práctica de la metodología descrita al buque Cap Finistere, que opera en la AdM conocida como GULFSTREAM.MOS, que conecta los puertos de Bilbao y Santander con el puerto de Portsmouth.

III.- MEMORIA DESCRIPTIVA.

III.1.- Planteamiento del problema, hipótesis de partida y de resultado

III.1.1.- Planteamiento del problema

Las llamadas Autopistas del Mar (AdM) y su uso extendido son de gran atracción para la Unión Europea y, por ello, este lleva las últimas dos décadas promoviendo dichas rutas ante los comerciantes y transportistas. Las AdM suponen grandes ventajas, como una gran liberación de las carreteras europeas, que a su vez evitan costes externos creados por el transporte por carretera (la propia congestión del tráfico, contaminación, accidentes, etc.) y una reducción total de la emisión de gases de efecto invernadero, trasladando la red de transporte europeo a una situación de mayor eficiencia energética. [1]

Este Trabajo Fin de Máster (TFM) diseña una metodología para evaluar los beneficios y las desventajas de aplicar a los buques que navegan en las rutas conocidas como Autopistas del Mar, una reducción en su actual velocidad de servicio, con el fin de reducir su consumo de combustible y, por tanto, su emisión de CO₂ a la atmosfera.

El porcentaje de transporte por carretera sigue siendo muy alto y son necesarias medidas continuas para favorecer el transporte marítimo. La Unión Europea ya ha intentado motivar el uso de las autopistas mediante bonificaciones y ayudas económicas. Otra medida a contemplar es la reducción del coste del flete marítimo por una reducción de velocidad de los buques, suponiendo una reducción del consumo de combustible y, por tanto, también de los costes fijos de la naviera.

De una reducción de la velocidad también se puede derivar una menor actividad anual para las compañías marítimas, por lo que este trabajo también pretende realizar un estudio empírico de la viabilidad económica de las navieras. Además, de la metodología descrita se conoce el beneficio medioambiental por la reducción de gases de efectos invernadero emitidos a la atmosfera, que puede motivar a la UE también a

invertir en ayudas económicas a las propias navieras para llevar a cabo la medida de reducción de velocidad de sus buques.

En el capítulo de Aplicación Práctica se aplicará la citada metodología a la Autopista del Mar conocida como GULFSTREAM.MOS, que une los puertos españoles de Bilbao y Santander con el puerto de Portsmouth al Sur de Inglaterra.

III.1.2.- Hipótesis de partida

El presente estudio se apoya sobre unas premisas concretas para su justificación, por lo cual es importante definir el contexto en el que la metodología descrita es aplicable y en el que realmente cobra todo su sentido. Por ello, se enuncian las siguientes hipótesis de partida:

1. Los destinatarios de esta metodología son los buques que operan en rutas definidas como Autopistas del Mar.
2. Esta metodología solamente es de aplicación en caso de no disponer de datos más exactos sobre el consumo del buque, como por ejemplo datos reales recogidos a bordo durante un periodo considerable.
3. La metodología descrita no tiene en cuenta factores externos que actúan como variables en la determinación exacta del consumo específico de un buque en un cualquier momento dado (estado del mar, viento, corrientes, etc.)

El primero de los enunciados es importante porque la justificación de este estudio se basa sobre la idea de que, actualmente, la Unión Europea está intentando fomentar las Autopistas del Mar por los grandes beneficios que conllevan. Estos beneficios que busca la UE con las AdM se manifiestan sobre todo en tierra, en las carreteras, ya que se evita mucha congestión de tráfico y sus costes asociados y, por otra parte, se consigue una disminución de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmosfera. En definitiva, la motivación se halla en la fomentación de una red de transporte europeo más eficiente con un mejor comportamiento medioambiental.

Este estudio tiene como fin llevar más allá los beneficios mencionados en tierra y, ya que se quieren promover la implementación y el uso de Autopistas del Mar, conseguir que estas también sean más eficientes y que los buques tengan un menor impacto medioambiental.

Es evidente que las AdM son un tipo de ruta con un horario establecido con anterioridad y es esencial que, para la buena operatividad del transporte de mercancías entre países separados por mares, los buques cumplan con estos horarios.

La anterior afirmación también es importante ya que, en los últimos tiempos, se ha alzado la idea de que puede ser más lógico conseguir una reducción de la emisión de gases de efecto invernadero por la reducción de la potencia de propulsión de los buques, en lugar de su velocidad de servicio. Esto es entendible por el mero hecho de que la potencia producida por los motores es más fácilmente controlable que la velocidad. Dicho esto, y en relación con lo ya afirmado, en una AdM es esencial que los buques cumplan con el horario establecido y para ello, lo que se debe controlar es su velocidad.

Respecto al segundo enunciado, es evidente que un estudio medio ambiental y económico de la operatividad de un buque se ceñirá a la realidad cuanta mayor exactitud tengan los datos utilizados. En un estudio sobre la disminución de gases de efecto invernadero, la variable más importante es el consumo de combustible del buque, que dicta el contenido de CO₂ emitido a la atmosfera.

Los estudios que han dado frutos sobre como determinar el cálculo del consumo de un buque son numerosos. En este caso, se ha optado por un método que depende de la variable principal sobre la que se quiere actuar directamente, es decir, de la velocidad de servicio del buque.

III.1.3.- Hipótesis de resultado

La metodología descrita más adelante deberá lograr satisfacer una serie de resultados y objetivos, enunciadas a continuación:

1. Plasmar la variación en la eficiencia energética de un supuesto buque, por la aplicación de la medida operacional de reducción de la velocidad, uno de los consejos actuales de la OMI.
2. Verificar la reducción de la emisión a la atmosfera de gases de efecto invernadero en la realización del mismo trabajo de transporte del buque, como consecuencia de modificar la velocidad de servicio.
3. Determinar el beneficio económico para la naviera por la reducción del consumo del buque y, por tanto, del coste a asumir por la adquisición del combustible necesario para la operatividad del buque.
4. Determinar la variación en la actividad anual posible para la naviera al operar un buque a una velocidad menor y, por tanto, de la pérdida económica comercial.

Los enunciados anteriores responden a las preguntas más inmediatas que surgen al aplicar intencionadamente una reducción en la velocidad de servicio de un buque en una AdM. Por un lado, el lado medioambiental del estudio debe determinar cómo varia la eficiencia del buque y como se traduce esta variación en la emisión de GEI a la atmosfera.

Por otro lado, el aspecto económico de aplicar medidas a los buques de las empresas navieras, evidentemente, es de gran importancia. Por un lado, la disminución en la cantidad de combustible que tiene que adquirir la compañía para operar un buque se traduce a un ahorro en un coste que siempre se busca rebajar. Por el contrario, dependiendo de la programación anual de los buques, una disminución en la velocidad se puede traducir a una menor actividad anual.

III.2.- Herramientas de resolución

III.2.1.- Fórmula de Barrass sobre consumo en función de la velocidad

Para abordar este estudio es necesario una herramienta que permita, en primer lugar, determinar el consumo aproximado de un buque en función de su velocidad. Es necesario que la función dependa de la velocidad del buque, ya que es precisamente el parámetro sobre la que se va a actuar. Al disponer de dicha función, se puede conocer la diferencia de consumo entre distintas velocidades.

Esta metodología se va a basar en la fórmula del consumo de los buques en función de su velocidad, descrita por Barrass [2], dada por la siguiente expresión:

$$F(v) = \lambda v^3 \nabla^{2/3} \text{ toneladas (T)}$$

Donde:

- $F(v)$ representa la función del consumo de combustible del buque,
- λ es una constante del combustible, dependiente de la máquina instalada a bordo de cada buque,
- v representa la velocidad del buque en nudos,
- ∇ representa el desplazamiento del buque estudiado en toneladas,

Barrass también aclara los valores estimados de la constante de la máquina del buque, estableciendo que:

- Para máquinas de turbina de vapor, $\lambda = 1/110\,000$ aproximadamente
- Para máquinas diésel, $\lambda = 1/120\,000$ aproximadamente

III.2.2.- Factor de conversión de la masa de combustible en masa de CO₂

Una vez determinados los consumos de combustible para una velocidad inicial v_o y una velocidad modificada o final v_f , es necesario calcular como afecta esta variación en la emisión de gases de efecto invernadero GEI a la atmosfera.

Para hallar este valor para cada caso y demostrar la variación en la cantidad de GEI emitida, existe un factor de conversión que relaciona la masa de un determinado tipo de combustible con la masa de CO₂ emitido a la atmosfera.

La circular MEPC.1/Circ.684 [3] de la Organización Marítima Internacional sobre “*Directrices para la utilización voluntaria del indicador operacional de la eficiencia energética del buque (EEOI)*”, define este factor de conversión F_c como un factor de conversión adimensional, que relaciona el consumo de un tipo de combustible con equivalente emisión de CO₂, teniendo en cuenta el contenido de carbono de cada combustible. Los diferentes valores de C_f se dan de la siguiente manera:

Tabla 1: Factores de conversión de la masa de combustible en masa de CO₂

Tipo de Combustible	Referencia	Contenido Carbono	C_f (t-CO₂/t-Comb.)
1. Diesel/Gasoil (MGO)	ISO 8217-Grados DMX/DMC	0,875	3,2060
2. Fueloil Ligero (MDO)	ISO 8217-Grados RMA/RMD	0,86	3,1510
3. Fueloil Pesado	ISO 8217 Grados RME/RM	0.85	3,1144
4. Gas Licuado del Petróleo (GLP)	Propano	0,819	3,0000
	Butano	0,827	3,0300
5. Gas Natural Licuado (LNG)		0,75	2,7500

Fuente: MEPC.1/Circ.684

Desde el punto de vista del propio buque y el estudio de su evolución en la emisión de GEI durante las variaciones en su velocidad de servicio, interesa el índice de eficiencia energética operacional EEOI.

La propia circular MEPC.1/Circ.684, mencionada anteriormente, define este indicador, de una forma simplificada, como la relación entre la masa de CO₂ emitida por unidad de trabajo de transporte:

$$\text{Indicador EEOI} = M_{CO2} / (\text{trabajo de transporte})$$

La fórmula para determinar el índice EEOI en un viaje particular tiene en cuenta todos los combustibles y sus factores de conversión F_c usados a bordo, y la masa de la carga transportada y la distancia navegada, y viene dada por la siguiente expresión:

$$EEOI = \frac{\sum_j FC_j \cdot C_{Fj}}{m_{carga} \cdot D}$$

III.2.3.- Time Charter Equivalent (TCE)

El término TCE está basado en una fórmula utilizada por comerciantes marítimos para calcular el rendimiento neto por día de los buques operados. El TCE es calculado hallando la diferencia entre los ingresos por el flete y los costes variables de un viaje y dividiendo dicha diferencia neta entre la duración del flete [4].

$$TCE = \frac{Fl V}{d} - Cf - pF \text{ (€/día)}$$

De donde:

- Fl es el flete generado por el viaje,
- d la distancia del viaje en millas náuticas,
- V la velocidad del buque en millas diarias,
- Cf los costes fijos por día,
- p el precio de combustible por tonelada, y
- F el consumo diario específico para una potencia P determinada por una función de la velocidad v calculada a través de un estudio de la resistencia y propulsión del buque

Para abordar el presente trabajo que contempla el rendimiento del TCE, se supone que los costes fijos asociados al buque (personal, mantenimiento, seguros, etc.) se mantienen constantes a lo largo del estudio. Por otro lado, el método de determinación del consumo diario del buque puede ser determinada de diferentes maneras y, como

este estudio parte de la fórmula de Barrass, se puede expresar la función del TCE de la siguiente manera:

$$TCE = \frac{Fl V}{d} - Cf - pF \text{ (€/día)}$$

El TCE es usado en muchas ocasiones para hallar la velocidad óptima desde el punto de vista comercial/económico, es decir, se busca el TCE máximo, que representa la mayor diferencia entre los ingresos y los costes y, por tanto, el mejor rendimiento económico.

Maximizando el TCE no tiene en cuenta los efectos ambientales del consumo de combustible del buque y, por tanto, las emisiones de GEI a la atmosfera. Para contemplar juntamente los puntos de vista económico y ecológico, se ha abordado la cuestión en estudios anteriores como un problema de optimización basado en un modelo matemático gravitatorio.

Este modelo puede asumir que tanto al TCE como a la cuestión de emisión de GEI, se les asocia un factor de masa, que puede variar con el tiempo, y que responde a las exigencias actuales del mercado o a legislaciones medioambientales. Según el estudio de Kokarakis, el problema de optimización queda determinado por la maximización de la siguiente expresión [4] :

$$\text{Problema de Optimización } PO = M_c N_{TCE} + \frac{M_{CO_2}}{N_{CO_2}}$$

Donde N_{TCE} y N_{CO_2} son los valores calculados, en un viaje determinado, para el rendimiento económico diario según la expresión del TCE y la emisión de CO_2 a la atmosfera teniendo en cuenta el tipo de combustible y el factor de conversión, respectivamente.

M_c y M_{CO_2} son los factores de masa asociados en un momento dado a la gravedad ejercidas por los costes económicos y por las consideraciones ambientales. Como se

ha dicho, los valores de los factores de masa son variables a lo largo del tiempo y su determinación puede responder a diferentes motivaciones como el estado del mercado.

III.2.4.- Marco Científico

Son dos los conceptos que se relacionan en este estudio; por un lado, el fomento de las AdM por la Unión Europea y, por otro lado, el compromiso de la OMI para trabajar en la reducción del consumo de combustible y de la emisión de GEI a la atmosfera de los buques, específicamente, de la mejora de la eficiencia energética por la optimización o reducción de su velocidad de servicio. Las siguientes herramientas ubican este estudio en el centro del contexto científico que le rodea y que proporciona parte de su sentido y de su justificación.

III.2.4.1.- Estrategia inicial para la reducción de GEI de los buques.

La OMI trabaja desde hace tiempo en la mejora de la eficiencia energética del sector del transporte marítimo como parte de su contribución a la lucha contra el cambio climático, establecido por las Naciones Unidas como el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 13: Acción por el Clima [5]

Como parte de su trabajo, la Resolución MEPC.304(72) [6] de la OMI contiene su *“Estrategia inicial para la reducción de gases de efecto invernadero de los buques”*. En esta se plasman los trabajos y resoluciones que contienen las directrices actuales sobre reducción de GEI de los buques y, además, los próximos objetivos a corto y largo plazo de la Organización.

Una de las medidas que se refleja en esta Estrategia es el análisis del uso de la optimización de la velocidad y de la reducción de la velocidad de los buques, teniendo en cuenta su impacto en factores como la distorsión del mercado.

Con el fin de ayudar a los operadores a implantar un sistema que permita gestionar la eficiencia energética de sus buques y de monitorizar su eficacia a lo largo del tiempo, la OMI estableció la obligatoriedad de los buques de mayor de 400 GT a contar con un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP).

La Resolución MEPC.282(70) [7] del Comité de Protección del Medio Marino, sobre *“Directrices de 2016 para la elaboración de un plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)”*, contiene una serie de orientaciones y ayudas para la elaboración de un SEEMP, exigida en la regla 22 del Anexo VI del Convenio MARPOL.

En su punto 5, *“Orientaciones sobre las mejores prácticas para el funcionamiento eficiente de los buques en cuanto al consumo de combustible”*, se establecen una serie de medidas de mejora de eficiencia energética para tener en cuenta por todos los participantes de la cadena de transporte.

Entre las medidas contempladas se encuentran las *“Operaciones con consumo eficiente de combustible”* (punto 5.2), entre las cuales se encuentra la medida de *“Optimización de la velocidad”*, que cuenta con una serie de puntos destinados a mejorar la eficiencia energética del buque actuando sobre la velocidad de servicio.

Concretamente, la Comité de protección del Medio Marino afirma que con la aplicación de dicha medida operacional:

“Optimizando la velocidad se pueden obtener ahorros considerables. Sin embargo, por velocidad óptima se entiende la velocidad a la cual se consume el nivel mínimo de combustible por tonelada/milla para dicho viaje. No significa la velocidad mínima; navegando a una velocidad inferior a la velocidad óptima se consume más combustible.”

También se entiende que, en el proceso de optimización, se debería tener en cuenta los horarios de llegada a los puertos y la disponibilidad de atraques en estos. Parece evidente que no tiene sentido navegar a una velocidad alta, con el consumo elevado de combustible que conlleva, si al llegar al destino se va a tener que esperar la disponibilidad de atraque.

Sin embargo, las rutas de línea que operan bajo un horario fijo se encuentran bajo otro escenario. Los buques de estos tienen preferencia y en casos normales no deben estar

pendientes de la disponibilidad de los puertos. Esto significa que a dichas rutas se les puede establecer una velocidad que será entendida como fija.

La reducción voluntaria de la velocidad es una medida operacional llevada a cabo en todos los mercados de la industria marítima, pero es más común en aquellos en que los buques de por sí operan a velocidades más elevadas, como es el caso de los portacontenedores, RORO y ROPAX.

Las razones que motivan a las navieras a aplicar esta medida suelen estar orientados al carácter económico de la empresa y no tanto al beneficio medioambiental. Precios elevados de combustible y el estado del mercado global son factores muy determinantes en la decisión de aplicar esta medida [8]. De hecho, la disminución de la emisión de CO a la atmosfera de 885 millones de toneladas en 2007 a 796 toneladas en 2012 se debió a la reducción de la velocidad media de la flota como consecuencia del estado del mercado por la crisis de 2008 [9].

Otras consideraciones de la Resolución MEPC.282(70) incluyen un aumento gradual al iniciar la arrancada del buque, manteniendo la carga del motor dentro de unos ciertos límites; y procurar fomentar, por parte de los armadores, el uso de la velocidad óptima de los buques fletados para que estos naveguen con la máxima eficiencia energética cuando estos son operados bajo custodia del fletador.

III.2.4.2.- Red Transeuropea de Transporte (TEN-T) y las Autopistas de Mar

La Unión Europea trabaja continuamente en mejorar su red de transporte para asegurar un transporte internacional eficiente y sostenible a través de sus carreteras, ferrocarriles, ríos o canales, y entre puertos mercantes conectados por rutas marítimas.

La política sobre la implementación y desarrollo de estas vías de transporte la recoge y la dirige la Red Transeuropea de transporte (TEN-T), cuyo fin es velar por la interconexión de puntos críticos de la Red, de promover los avances técnicos en el transporte. Sus directrices quedan establecidas en el Reglamento (EU) 1315/2013 [10].

El Reglamento (UE) N° 1315/2013 Del Parlamento Europeo Y Del Consejo de 11 de diciembre de 2013 sobre las orientaciones de la Unión para el desarrollo de la Red Transeuropea de Transporte, en su Artículo 21, establece en su Sección 4: *“Infraestructura de transporte marítimo y autopistas del mar”*, las directrices sobre la red marítima internacional.

El Artículo 21 del Reglamento define las Autopistas del mar como *“...rutas marítimas de corta distancia, puertos, infraestructura y equipos marítimos asociados e instalaciones...”* y establece que estas *“...contribuirán a la realización de un espacio europeo de transporte marítimo sin barreras.”*

Según el mismo artículo, las AdM comprenderán:

- a) enlaces marítimos que se establezcan entre los puertos marítimos en la propia Red o, en el caso de tratarse de una importancia estratégica para la Unión, entre un puerto de la Red y un puerto de un tercer país;
- b) *“instalaciones portuarias, terminales de mercancías, plataformas logísticas y plataformas multimodales de mercancías situadas fuera de la zona del puerto, pero asociadas con las operaciones portuarias, tecnologías de la información y la comunicación (TIC) tales como los sistemas electrónicos de gestión logística, y procedimientos de seguridad y protección, administrativos y aduaneros en al menos un Estado miembro;”*
- c) *“infraestructura de acceso terrestre y marítimo directo.”*

En cuanto a los proyectos relacionados con las autopistas del mar en la Red transeuropea de Transporte, deberán ser propuestas y acompañadas por el interés común de al menos dos Estados miembros de la Unión. Los contratos entre las Partes interesadas referentes a dichos proyectos podrán comprender uno de los siguientes casos:

“a) un enlace marítimo y sus conexiones con las zonas del interior dentro de la red básica entre dos o más puertos de la red básica; o

b) un enlace marítimo y sus conexiones con las zonas del interior entre un puerto de la red básica y puertos de la red global, con un especial hincapié en las conexiones con las zonas de interior de los puertos de las redes básica y global.”

El Artículo 23 del Reglamento sobre *“Prioridades para el desarrollo de la infraestructura marítima”*, plasma la necesidad de promover la infraestructura marítima, incluyendo el fomento de las AdM y, además, de medidas específicas para mejorar el comportamiento medioambiental de estas.

El Artículo 43 incluye a las autopistas del mar en la definición de los corredores de la red básica, que se entienden como los flujos de larga distancia más importantes de la Red, compuestos por un transporte multimodal que cruce al menos dos fronteras y que, en la medida posible, conste de tres modos de transporte, incluyendo en aquellos casos que procesa, las autopistas del mar.

Uno de los pilares más importantes de las autopistas del mar, tal y como refleja el coordinador europeo para las autopistas del mar [11], es el pilar medioambiental. Desde sus inicios, la red TEN-T visiona un sistema de transporte con objetivos ambiciosos en materia de reducción de emisiones en el transporte.

El proyecto de las AdM, como el principal componente de la industria y el tráfico marítimo de la Red, también comparte estos objetivos y ha apoyado proyectos enfocados a ayudar y orientar a los operadores de buques en la reducción de emisiones y en la instalación de sistemas dirigidos a la mejora medioambiental, como los Sistemas de Limpieza de Gases de Escape.

Respecto a los futuros objetivos, el coordinador de las AdM afirma que los medioambientales seguirán siendo de vital importancia. Ante las legislaciones cada vez más estrictas sobre el estándar de emisiones de gases de efecto invernadero, el

coordinador ve la descarbonización del sector del transporte marítimo con una de las necesidades más importantes y difíciles hasta la fecha.

Por ello, afirma que el proyecto AdM debe tomar una iniciativa ante este cometido y debe seguir promoviendo medidas de eficiencia en los motores marinos, además de otras medidas generales dirigidos a la reducción de las emisiones de GEI. Como objetivos a larga distancia, destaca aquellos dirigidos a la transición hacia los combustibles más ecológicos y a las tecnologías innovadoras.

III.2.5.- Otras herramientas

Este trabajo se apoya en el programa Microsoft Excel para la creación de gráficos que apoyan la metodología descrita y la descripción de los resultados obtenidos en el apartado de aplicación práctica. Este estudio se apoya, principalmente, en la construcción de diagramas de dispersión para la representación en el sistema de coordenadas cartesianas de los valores de diferentes variables.

III.3.- Metodología

III.3.1.- Determinar el consumo del buque mediante la fórmula de Barrass

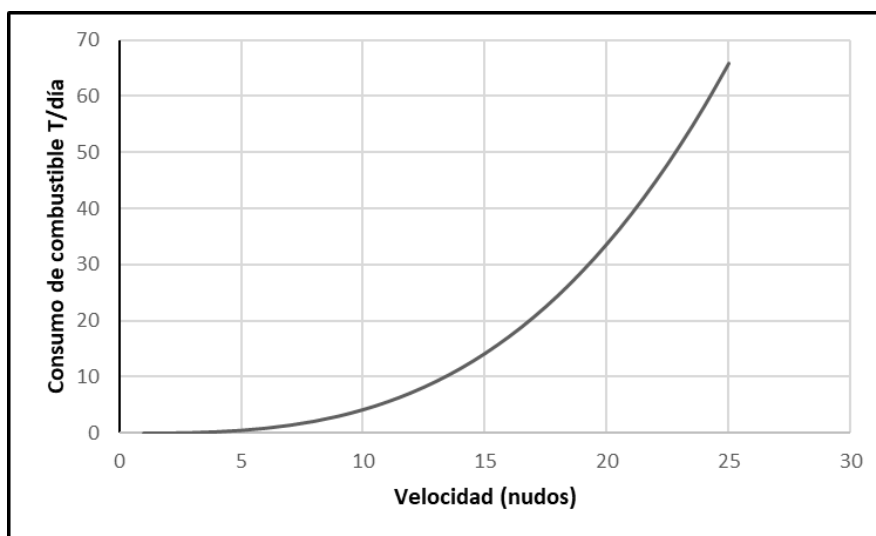
III.3.1.1.- Consumo de combustible en toneladas diarias

Recordando que, según Barrass, la fórmula del consumo de un buque en función de su velocidad y expresada en toneladas de combustible diarias es la siguiente:

$$F(v) = \lambda v^3 \nabla^{2/3} \text{ toneladas (t)}$$

Conociendo dichos valores de un buque se puede representar la gráfica que define la función dada, que presenta un aspecto similar a la siguiente:

Ilustración 1: Consumo de combustible en T/día en función de la velocidad del buque



Fuente: Elaboración Propia

Al tener una velocidad de servicio inicial y una velocidad de servicio modificada o reducida, se tiene:

$$F(v_o) = \lambda v_o^3 \nabla^{2/3} \text{ toneladas (t)}$$

$$F(v_f) = \lambda v_f^3 \nabla^{2/3} \text{ toneladas (t)}$$

Tratándose de un estudio para un mismo buque, se tiene que la constante de la máquina del buque λ y el desplazamiento ∇ no varían a lo largo del estudio.

De esta forma, al reducir en una cantidad determinada la velocidad de un buque, la diferencia en el consumo de combustible para dichas velocidades distintas quedará determinada por lo siguiente:

$$\Delta F = F(v_o) - F(v_f)$$

$$\Delta F = \lambda v_o^3 \nabla^{2/3} - \lambda v_f^3 \nabla^{2/3}$$

$$\Delta F = \lambda \nabla^{2/3} [v_o^3 - v_f^3]$$

III.3.1.2.- Consumo en una ruta j

Considerando el buque estudiado realizando una ruta j , el consumo total en dicha ruta queda determinada por el consumo diario del buque por la duración de la navegación. Para la velocidad de servicio inicial, se tiene:

$$F_j(v_o) = t \cdot (\lambda v_o^3 \nabla^{2/3}) \text{ toneladas (t)}$$

Mientras que, para la velocidad de servicio reducida, en el que aumenta la duración del trayecto:

$$F_j(v_f) = (t + \Delta t) \cdot \lambda v_f^3 \nabla^{2/3} \text{ toneladas (t)}$$

De esta forma, la diferencia de combustible en dicha ruta al aplicar una reducción de velocidad es:

$$\Delta F_j = t \cdot \lambda v_o^3 \nabla^{2/3} - (t + \Delta t) \cdot \lambda v_f^3 \nabla^{2/3} \text{ toneladas (t);}$$

$$\Delta F_j = \lambda \nabla^{2/3} [t \cdot v_o^3 - (t + \Delta t) \cdot v_f^3] \text{ toneladas (t)}$$

III.3.2.- Determinar el contenido de CO₂ emitido a la atmosfera y el índice de eficiencia energética operacional EEOI.

Para estudiar la evolución del factor ambiental que se manifiesta en la reducción de la velocidad del buque en una ruta (j), se recurre al factor de conversión de la masa de combustible a masa de CO₂ que, observando la formula del índice de eficiencia energética operacional, queda determinada por la siguiente expresión:

$$M_{CO_2} = \sum_j FC_j \cdot C_{F_j}$$

Es decir, el contenido de carbono emitido a la atmosfera en la ruta j es igual a la suma de todos los combustibles consumidos multiplicados por sus factores de conversión respectivos.

Relacionando el factor de conversión con la expresión del consumo de combustible de un buque en una ruta particular deducida por la fórmula de Barrass, se tiene:

$$M_{CO_2} = t \cdot (\lambda v_o^3 \nabla^{2/3}) \cdot C_{F_j},$$

quedando para la misma ruta con una velocidad reducida:

$$M_{CO_2} = (t + \Delta t) \cdot \lambda v_f^3 \nabla^{2/3} \cdot C_{F_j},$$

Y siendo la diferencia entre ambos casos:

$$\Delta M_{CO_2} = t \cdot \lambda v_o^3 \nabla^{2/3} \cdot C_{F_j} - (t + \Delta t) \cdot \lambda v_f^3 \nabla^{2/3} \cdot C_{F_j};$$

$$\Delta M_{CO_2} = \lambda \nabla^{2/3} C_{F_j} [t \cdot v_o^3 - (t + \Delta t) \cdot v_f^3]$$

Desde el punto de vista del buque y de la naviera, es más interesante reflejar el contenido de CO₂ emitido a la atmosfera en relación con la distancia navegada y las unidades de masa de carga transportada que, efectivamente, es lo que refleja el índice de eficiencia energética operacional.

$$EEOI = \frac{tv^3\lambda\nabla^{2/3}C_{Fj}}{m * D}$$

Como hemos dicho, para el buque y la ruta al que se le aplica esta metodología, la constante de la máquina λ y el desplazamiento ∇ no varían. La única variable es la velocidad de servicio del buque, luego se puede entender, para este caso, el indicador EEOI como función de la velocidad y representar su gráfica.

Como:

$$EEOI = \frac{tv^3\lambda\nabla^{2/3}C_F}{m \cdot D}$$

y:

$$t = \frac{D}{v}$$

Se tiene que:

$$EEOI(v) = \frac{\frac{D}{v}v^3\lambda\nabla^{2/3}C_F}{m \cdot D}$$

III.3.3.- Estudiar el carácter económico de la variación de la velocidad de servicio

III.3.3.1.- Coste del combustible para la ruta j

Una vez conocido el consumo de combustible necesario para operar en una ruta j , es esencial para el estudio económico calcular el coste de adquisición y ver como este varía al alterar la velocidad de servicio del buque.

El cálculo es sencillo y solo hace falta conocer el precio de la tonelada de combustible en el puerto donde el buque realiza *bunkering*. Cabe destacar que, como es un cálculo

dependiente del precio del combustible, su valor puede variar con el tiempo acorde con la evolución del precio del crudo.

$$\text{Coste de adquisición } C_{j_o} = P_T \cdot F_j(v_o)$$

$$\text{Coste de adquisición } C_{j_f} = P_T \cdot F_j(v_f)$$

Diferencia del coste de adquisición de combustible para la ruta j :

$$\Delta C_j = C_{j_o} - C_{j_f}$$

III.3.3.2.- Estudiar el Time Charter Equivalent TCE

Recordando la expresión de TCE:

$$TCE = \frac{Fl V}{d} - Cf - pF \text{ (€/día)}$$

Se tiene que la única variable en el estudio de una ruta j es la velocidad de servicio. Además, relacionando las expresiones deducidas de consumo según la fórmula de Barrass, se deduce que para una velocidad de servicio inicial:

$$TCE_j = \frac{Fl V_0}{d} - Cf - p \cdot \left(\lambda v_o^3 \nabla^{\frac{2}{3}} \right) \text{ (€/día)}$$

Y para una velocidad de servicio reducida:

$$TCE_j = \frac{Fl V_f}{d} - Cf - p \cdot \left(\lambda v_f^3 \nabla^{\frac{2}{3}} \right) \text{ (€/día)}$$

Para una naviera puede ser de gran interés hallar la diferencia en el beneficio que provoca el cambio en el TCE entre dos velocidades de servicio distintas en un periodo más largo, como mensual o anualmente.

Hay que tener en cuenta que la actividad comercial total va a variar al aumentar la duración de una ruta. Para una AdM en la que la ruta y el horario es fijo y dependiente

de la velocidad de servicio del buque, la actividad mensual, por ejemplo, va a depender de la cantidad de viajes que permite a realizar dicha velocidad.

Luego para estudiar la actividad económica para un determinado periodo, por ejemplo, de un mes (30 días) y a velocidad de servicio inicial:

$$\text{Beneficio mensual} = \frac{30}{t} \cdot TCE_j \text{ (€/mes)}$$

Y a velocidad de servicio reducida:

$$\text{Beneficio mensual} = \frac{30}{t + \Delta t} \cdot TCE_j \text{ (€/mes)}$$

IV.- APLICACIÓN PRÁCTICA: GULFSTREAM.MOS

En este apartado se aplica la metodología descrita anteriormente, al caso en concreto de la Autopista del Mar conocida como “GULFSTREAM.MOS”, referida de aquí en adelante como Gulfstream. El proyecto Gulfstream se basaba en la idea de poner en marcha una autopista del mar entre el norte de España y el Sur de Reino Unido. El objetivo de dicha autopista del mar es conectar cualquier punto de carga en España y Portugal con puntos de descarga en el Reino Unido (y viceversa), aliviando la congestión en Francia.

Para ello se procede, en primer lugar, a recoger todos los detalles necesarios respecto a la ruta en cuestión para, posteriormente, realizar los cálculos necesarios.

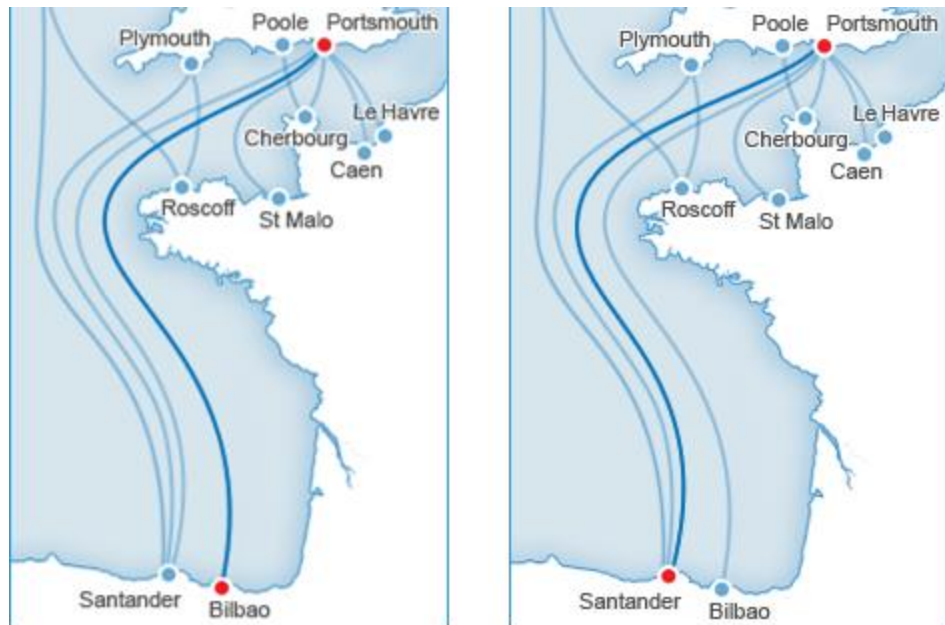
IV.1.- Detalles de GULFSTREAM.MOS

Actualmente la autopista de mar Gulfstream la cubre la naviera Brittany Ferries con cuatro buques distintos: Cap Finistere, Pont Aven, Baie de Seine y Connemara. Los anfitriones de dicho proyecto son los puertos españoles de Bilbao y Santander y los puertos del Sur de Inglaterra Portsmouth y Plymouth.

Los buques que intervienen en el proyecto son de diferentes características y realizan diferentes rutas, por lo que cada uno le debería corresponder un estudio independiente, en lo que concierne a este trabajo. Este trabajo tomará como objetivo de estudio el buque Cap Finistere y su ruta particular.

Los puertos que intervienen en dicha ruta y que son el presente objeto de estudio son el Puerto de Bilbao, el Puerto de Santander y el Puerto de Portsmouth. Se tomará como puerto de inicio y final, para el desarrollo de este apartado del trabajo, el Puerto de Bilbao. La ruta en cuestión estudiada corresponde a la ruta del mes de diciembre 2019 del buque proporcionada por la naviera.

Ilustración 2: Rutas Gulfstream.MOS entre Portsmouth, Santander y Bilbao



Fuente: Brittany Ferries

Tomando como inicio y final de la ruta el puerto de Bilbao, el buque Cap Finistere recorre el siguiente recorrido:

- Bilbao → Portsmouth
- Portsmouth → Santander
- Santander → Portsmouth
- Portsmouth → Bilbao

IV.2.- Consumo del buque Cap Finistere según Barrass

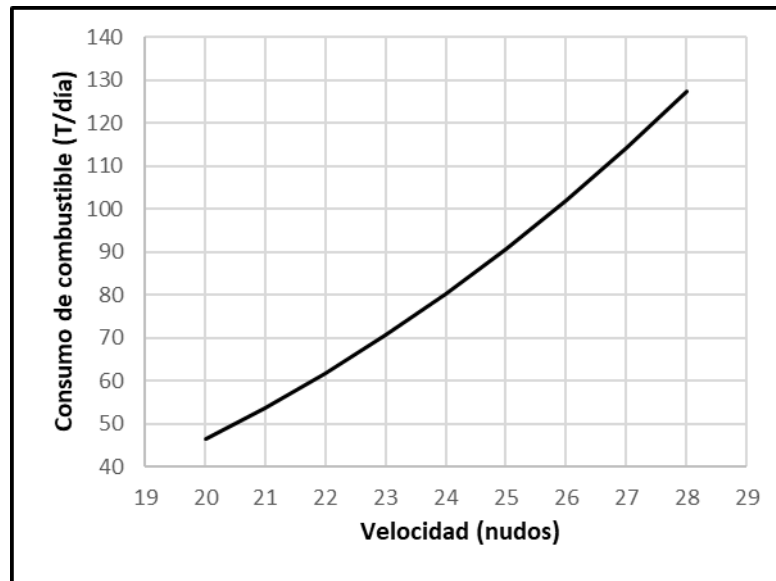
De la base de datos IHS se tiene los siguientes datos del buque Cap Finistere [12]:

- Peso Muerto: 6.515 t
- Desplazamiento máximo: 20.150 t
- Máquina: Motores Diesel
- Velocidad de Servicio: 28 nudos
- Combustible: Diesel (MGO)

A efectos de este estudio se va a considerar que la constante de la máquina λ es 1/110000, el desplazamiento del buque 16.120 T (80% del desplazamiento máximo).

De la fórmula de Barrass y los datos del buque se obtiene el siguiente gráfico de consumo:

Ilustración 3: Consumo de combustible en función de la velocidad de un buque



Fuente: Elaboración Propia

Aplicando una reducción de velocidad del 10% de la velocidad de servicio (≈ 3 nudos) se obtiene que el consumo de combustible diario:

$$F(28) = 127,35 \text{ t/día}$$

$$F(25) = 90,6 \text{ t/día}$$

Por lo tanto, la diferencia de consumo diario al reducir la velocidad de servicio del buque de 28 nudos a 25 es de:

$$F(28) - F(25) = 36,7 \text{ t/día}$$

Es decir, con una reducción de la velocidad del 10%, se obtiene un ahorro del consumo de combustible del buque Cap Finistere de aproximadamente 33 toneladas diarias; un 28.8 %. Como se ha aproximado la velocidad reducida a 25 nudos por la conveniencia

de no tener que navegar a una velocidad con decimales, el porcentaje de ahorro arrastra este error.

En realidad, tomando los datos exactos, el ahorro que supone una reducción de velocidad del 10% es del 27,1%. Esto último concuerda con diversas fuentes, como es el caso del artículo científico “*Effect of Ship Speed Reduction on Ship Emissions*” de Gusti y Semin, que apuntan a que la regla general que relaciona la potencia producida con el cubo de la velocidad se traduce a un 27% de ahorro en el consumo al reducir la velocidad en un 10% [13].

IV.2.1.- Consumo en la ruta de la AdM Gulfstream

La ruta en cuestión consta de 3 puertos y dos trayectos diferentes: entre Portsmouth y Bilbao, por un lado, y entre Portsmouth y Santander. Las distancias entre dichos puertos vienen descritas a continuación:

- *Portsmouth - Bilbao: 555,08 millas náuticas*
- *Portsmouth - Santander: 531,89 millas náuticas*

Para este estudio se va a definir la ruta *j* como un viaje de ida y vuelta, que consta de cada tramo anterior navegado dos veces, suponiendo una distancia total de 2.173,94

La velocidad de servicio actual del buque Cap Finistere, operando en la autopista Gulfstream, es de 28 nudos. Teniendo en cuenta esta velocidad y las distancias mencionadas anteriormente, se tiene que:

- *Tiempo Bilbao – Portsmouth: 555,08mn / 24kn = 19,82 horas*
- *Tiempo Santander – Portsmouth: 531,89mn / 24kn = 18,99 horas*

Luego el consumo de combustible por trayectos a la velocidad de servicio inicial de 28n es:

$$F_{A@B}(v(28)) = \frac{t}{24} \cdot \frac{1}{110000} \cdot 28^3 \cdot 16120^{\frac{2}{3}}$$

- Consumo Bilbao – Portsmouth: 105,2 toneladas de combustible
- Consumo Santander – Portsmouth: 100,7 toneladas de combustible

Y a velocidad de servicio con una reducción del 10%:

$$F_{A\oplus B}(v(25)) = \frac{t + \Delta t}{24} \cdot \frac{1}{110000} \cdot 25^3 \cdot 16120^{\frac{2}{3}}$$

- Consumo Bilbao – Portsmouth: 74,85 toneladas de combustible
- Consumo Santander – Portsmouth: 71,72 toneladas de combustible

De esta manera, una ruta completa a la velocidad de servicio inicial supone un consumo total de:

$$F_j(28) = 105,2 \cdot 2 + 100,7 \cdot 2 = 411,8 \text{ (t)}$$

Y a velocidad de servicio reducida:

$$F_j(25) = 74,85 \cdot 2 + 71,72 \cdot 2 = 293,2 \text{ (t)}$$

Suponiendo un ahorro de combustible de:

$$\Delta F_j = F_j(28) - F_j(25) = 411,8 - 293,2 = 118,6 \text{ toneladas de combustible}$$

IV.3.- Contenido de CO₂ emitido e índice de eficiencia energética operacional

Recordando que la emisión de CO₂ por el consumo del buque depende del tipo de combustible utilizado y su factor de conversión, se tiene que el factor de conversión a aplicar al buque Cap Finistere es de 3.206

Teniendo en cuenta los valores calculados de consumo de la ruta estudiada, se tiene que el contenido de CO₂ emitido a la velocidad de servicio inicial:

$$M_{CO_2} = F_j(28) \cdot C_{F_j} = 411,8 \cdot 3,206 = 1320,4 \text{ toneladas de CO}_2 \text{ (t.CO}_2\text{)}$$

Y para la velocidad de servicio reducida:

$$M_{CO_2} = F_j (25) \cdot C_{F_j} = 293,2 \cdot 3,206 = 939,9 \text{ (t.CO}_2\text{)}$$

Suponiendo una diferencia de masa de CO₂ emitido a la atmosfera de:

$$\Delta M_{CO_2} = 1320,4 - 939,9 = 380,6 \text{ (t.CO}_2\text{)}$$

Desde el punto de vista de la eficiencia del buque en cuanto a trabajo de transporte, se debe aplicar el índice EEOI, que relaciona el contenido de CO₂ emitido con la masa de la carga transportada y la distancia navegada en la ruta estudiada.

La masa transportada se va a considerar igual al 80% del tonelaje de peso muerto del buque (6515 * 0,8 = 5212 T). Tomando la distancia total de la ruta del Cap Finistere y los valores calculados de la masa de CO₂ emitida, se tiene que el EEOI del buque a la velocidad de servicio inicial es de:

$$EEOI_o = \frac{M_{CO_2}}{m \cdot D} = \frac{1305,6}{5212 \cdot 2173,94} \cdot 10^6 = 115,22 \text{ gCO}_2/\text{t} \cdot \text{mn}$$

Y el índice de eficiencia energética operacional con una reducción del 10% de la velocidad de servicio:

$$EEOI_f = \frac{M_{CO_2}}{m \cdot D} = \frac{929,3}{5212 \cdot 2173,94} \cdot 10^6 = 82 \text{ gCO}_2/\text{t} \cdot \text{mn}$$

IV.4.- Estudio económico de la reducción de velocidad en el Cap Finistere

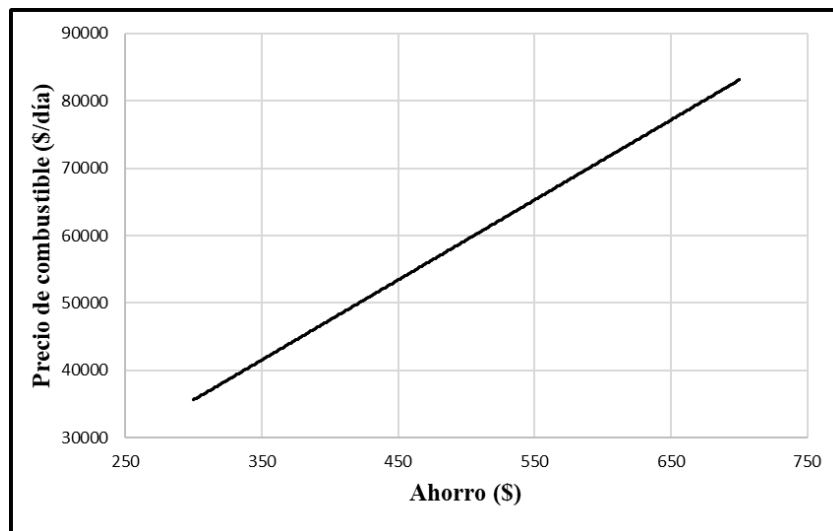
IV.4.1.1.- Coste de adquisición del combustible del Cap Finistere

Calculados los consumos de la ruta del buque Cap Finistere en la AdM Gulfstream según la velocidad de servicio, se puede calcular el coste que le supone a la naviera adquirir el combustible necesario para cubrir dicha operación.

Como ya se ha dicho anteriormente, el precio del combustible es variable y, por ello, el ahorro en su adquisición también va a variar con el tiempo. Esto puede suponer un cambio de actitud de las navieras hacia la operatividad de sus buques.

Un precio bajo del combustible puede incentivar a las compañías navieras a preferir aumentar la velocidad de servicio para ahorrar en tiempo, en vez de ahorrar en el coste de combustible. En cambio, a medida que el precio sube, también lo hace el posible ahorro al reducir la velocidad. Esta situación puede motivar a los operadores a reducir la velocidad de servicio y ahorrar en el coste de combustible.

Ilustración 4: Ahorro en el coste de combustible según su precio



Fuente: Elaboración Propia

En el caso estudiado, el armador del Cap Finistere tiene que hacer frente a un precio de combustible de en torno a los 630 \$/t, según la media de los precios del MGO en Europa a 16 de noviembre de 2019 [14]. Multiplicando por los consumos específicos para cada velocidad de servicio y por el factor de conversión a euros de la misma fecha, se tiene que el coste a asumir es de:

$$P_{j_o} = P_T \cdot F_j(v_o) = 630 \cdot 0.91 \cdot 411,8 = 236.085 \text{ €}$$

$$P_{j_f} = P_T \cdot F_j(v_f) = 630 \cdot 0.91 \cdot 293,1 = 168.034 \text{ €}$$

Diferencia del coste de adquisición de combustible para la ruta j :

$$\Delta P_j = P_{j_o} - P_{j_f} = 236.085 - 168.034 = 68.051 \text{ €}$$

IV.4.1.2.- Estudio del TCE a velocidad inicial y final

Recordando la fórmula general del TCE para una ruta determinada con el consumo del buque expresado según la fórmula de Barrass, se tiene:

$$TCE_j = \frac{Fl V}{d} - Cf - p \cdot \left(\lambda v^3 \nabla^{\frac{2}{3}} \right) (\text{€/día})$$

Para definir los costes C_f del buque se recurre a lo que apuntan diversos estudios que afirman que el coste del combustible de un buque ROPAX supone entre el 60% y el 65% del total de los costes operacionales [15]. Los buques tipo ROPAX son buques relativamente rápidos y, por lo tanto, su consumo representa el coste más significativo a que deben hacer frente los operadores.

De esta forma, considerando que el coste del combustible supone el 60% del coste total y, por tanto, los costes C_f suponen el 40%, la anterior expresión queda de la siguiente forma:

$$TCE_j = \frac{Fl V}{d} - \frac{40}{60} \cdot p \cdot \left(\lambda v^3 \nabla^{\frac{2}{3}} \right) - p \cdot \left(\lambda v^3 \nabla^{\frac{2}{3}} \right) (\text{€/día})$$

La ruta del buque Cap Finistere tiene la particularidad de constar de dos trayectos distintos, cubiertos en ambos sentidos entre los tres puertos:

- Bilbao ↔ Portsmouth
- Portsmouth ↔ Santander

Dicho esto, la distancia de los trayectos es prácticamente idéntica, siendo la diferencia entre ambos aproximadamente 20 millas, un porcentaje menor al 5%, por lo que se supone que el precio del flete va a ser prácticamente igual y, en definitiva, también el rendimiento económico del buque.

Luego se define el trayecto individual con las siguientes características:

- $d = 555$ millas
- $V = \text{velocidad de servicio} \cdot 24\text{h}$
- $p = 630\$ (573 \text{ €})$
- Consumo diario $= \left(\lambda v^3 \nabla^{\frac{2}{3}} \right) = 127,35 \text{ t}$

En el caso de la velocidad inicial:

$$TCE_i = \frac{Fl \cdot 28 \cdot 24}{555} - \frac{40}{60} (573 \cdot 127,35) - 573 \cdot 127,35$$

$$TCE_i = 1,22Fl - 121.619$$

Y en el caso de la velocidad de servicio reducida:

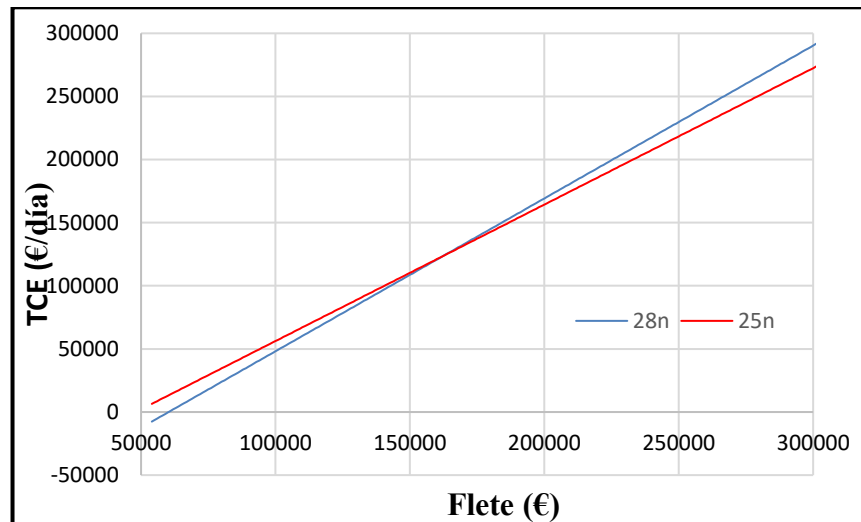
$$TCE_f = \frac{Fl \cdot 25 \cdot 24}{555} - \frac{40}{60} (573 \cdot 90,6) - 573 \cdot 90,6$$

$$TCE_f = 1,01Fl - 86.523$$

El flete o, en este caso, lo que factura la naviera por la venta de billetes y de metros lineales de carga es muy variable y puede depender de diferentes factores como la época del año, el precio del combustible y la competencia existente en la propia ruta en cuestión.

La siguiente gráfica representa los valores del TCE del buque en función de los ingresos y de la velocidad de servicio a la que navega; en uno de los casos a la velocidad inicial de 28 nudos y en la otra a la velocidad reducida de 25 nudos.

Ilustración 5: TCE en función del flete y velocidad; coste de combustible de 573 €/t

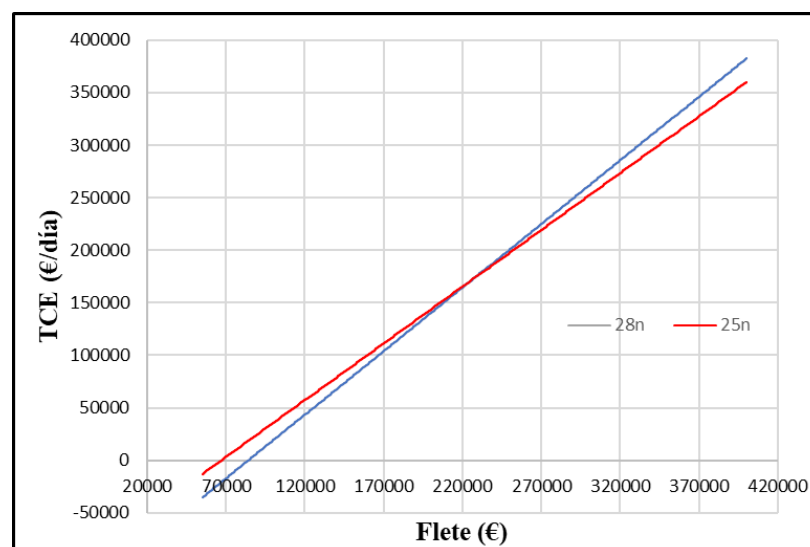


Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar como la función del TCE diario del buque navegando a 25 nudos comienza con valores superiores. Esto es debido al mayor coste al que se debe hacer frente al navegar a la velocidad superior. En cambio, la pendiente de la función del TCE del buque navegando a 28 nudos es mayor, por lo que acaba con valores superiores.

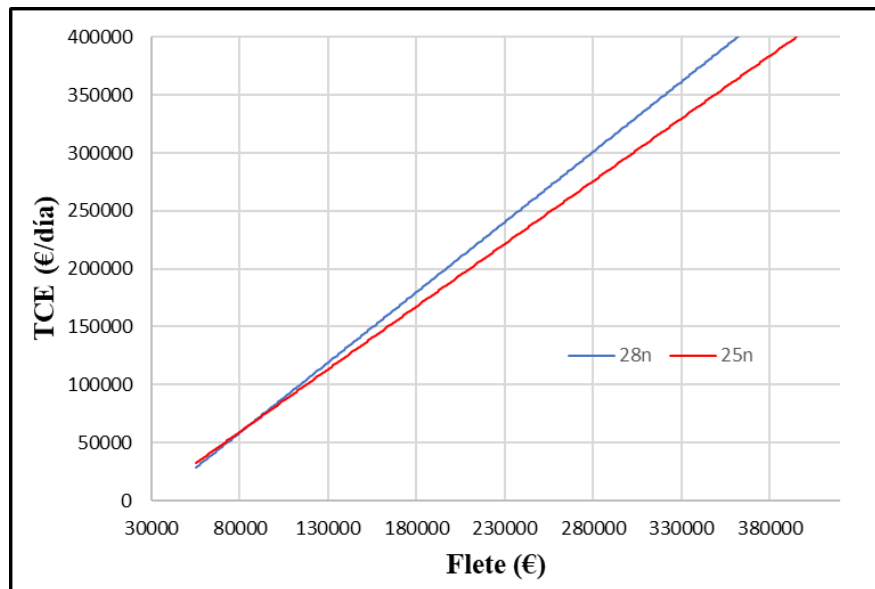
Esto último se puede observar fácilmente en las siguientes gráficas, que representan el TCE con un coste relativamente bajo de combustible de 300 €/t y un coste más elevado de 800 €/t.

Ilustración 6: TCE en función del flete y velocidad; coste de combustible de 800 €/t



Fuente: Elaboración Propia

Ilustración 7: TCE en función del flete y velocidad; coste de combustible de 300 €/t



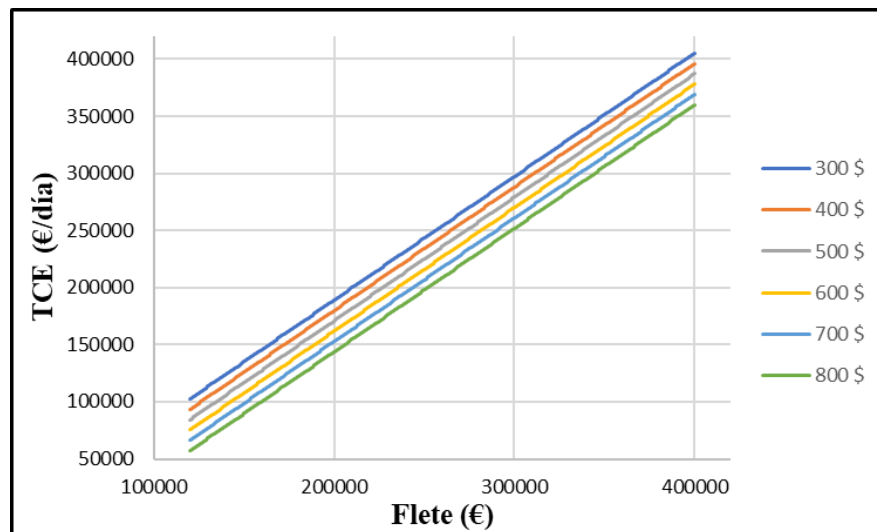
Fuente: Elaboración Propia

En ambos casos la pendiente del TCE del buque navegando a 28 nudos es mayor, por ser los parámetros de velocidad y coste de combustible más significantes. Entre las diferencias más importantes de ambos casos, cabe destacar la diferencia entre el corte de las rectas definidas por los TCE.

Cuando el coste del combustible es de 300 €/t, según incrementan los ingresos del buque, navegar a 28 nudos rápidamente resulta en mayor beneficio que navegar a 25 nudos, mientras que cuando el coste del combustible se sitúa en un valor relativamente alto de 800 €/t, el buque navegando a 28 nudos tiene mayor dificultad en hacer frente al coste elevado del consumo y necesita un mayor ingreso para resultar más beneficioso que la opción de navegar a 25 nudos.

Luego el precio del combustible juega un papel muy importante en el valor del TCE. Es evidente que un buque a la misma velocidad obtendrá unos valores más altos cuando el mercado ofrece un precio de combustible relativamente bajo y al contrario cuando es coste es alto. En ambos casos la pendiente del TCE del buque navegando a 28 nudos es mayor, por ser los parámetros de velocidad y coste de combustible más significantes.

Ilustración 8: TCE en función de Flete y coste de combustible



Fuente: Elaboración Propia

En las situaciones en que el coste del combustible lo permita y los ingresos del buque son más bien altos, los operadores de los buques tenderán a querer operar a velocidades más altas. Esta motivación tenderá a disminuirse según aumenta el precio del combustible.

Esta tendencia a operar a mayores velocidades y, por tanto, con una mayor emisión de CO₂ a la atmosfera puede ser combatida de diferentes medidas, por ejemplo, por la propia imposición de normativas más restrictivas, o bien por la ayuda económica mediante subvenciones que ya realiza la Unión Europea, en parte, para motivar a los operadores de buques participantes del proyecto de las Autopistas del Mar.

V.- CONCLUSIONES

- **Primera:** Aplicar una reducción de la velocidad de servicio del buque Cap Finistere de 28 nudos a 25 nudos, supone un ahorro diario del consumo de combustible de aproximadamente de 33 toneladas, lo que confirma que la regla general que relaciona la potencia producida con el cubo de la velocidad se traduce a un 27% de ahorro en el consumo al reducir la velocidad en un 10%.
- **Segunda:** La anterior reducción de consumo de combustible supone una reducción de emisión a la atmosfera de CO₂ de 380 toneladas (aprox. un 30%) en un viaje de ida y vuelta, lo que justifica la reducción de la velocidad de servicio como una medida válida para la reducción de emisión de CO₂.
- **Tercera:** La relación entre velocidad y coste de combustible supone que el precio de éste puede condicionar la forma de operar los buques; un precio bajo puede suponer una tendencia a incrementar la velocidad para ahorrar en tiempo, mientras que un precio alto a reducirla para ahorrar en coste de combustible; sobre todo en buques que de por si operan a velocidades y consumos relativamente altas.
- **Cuarta:** Cuando el estado del mercado y el precio del combustible lo permiten, es difícil justificar económicamente la reducción de la velocidad, por lo que si las organizaciones internacionales quieren contar una media de reducir las emisiones de CO₂ de los buques, deberán implantar normativas más restrictivas o motivar a los operadores con subvenciones.

VI.- REFERENCIAS CITADAS

- [1] “Las autopistas del mar.” [Online]. Available: <https://www.iies.es/single-post/2015/09/22/Las-autopistas-del-mar>. [Accessed: 22-Oct-2019].
- [2] D. C. B. Barrass, *Ship Design and Performance for Masters and Mates*. Elsevier Ltd, 2004.
- [3] MEPC.1/Circ.684, “Directrices para utilización voluntaria del indicador operacional de la eficiencia energética del buque (EEOI),” 2009.
- [4] J. E. Kokarakis, V. Hatziyanni, G. Dienes, G. Vasilakis, and M. Adamis, “Contribution towards determination of the optimal ship speed,” *3rd Int. Symp. Sh. Oper. Manag. Econ. 2011*, pp. 281–290, 2011.
- [5] “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible.” [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Accessed: 16-Nov-2019].
- [6] MEPC.304(72), “Estrategia inicial de la OMI sobre la resolución de las emisiones de GEI procedentes de los buques,” 2018, pp. 1–11.
- [7] MEPC.282(70), “Directrices de 2016 para la elaboración de un Plan de Gestión de la Eficiencia Energética del Buque (SEEMP),” 2016, pp. 1–22.
- [8] H. N. Psaraftis, “Speed optimization vs speed reduction: The choice between speed limits and a Bunker Levy,” *Sustain.*, vol. 11, no. 8, 2019.
- [9] T. W. P. Smith *et al.*, “Third IMO Greenhouse Gas Study 2014,” *Int. Marit. Organ.*, p. 327, 2014.
- [10] P. Europeo, *Reglamento UE N°1315/2013 sobre orientaciones de la Unión para el desarrollo de la Red Transeuropea de Transporte*. Unión Europea UE, 2013.

- [11] B. Simpson, “Motorways of the Sea. Detailed implementation plan of the European Coordinator,” no. April, p. 45, 2018.
- [12] B. Ferries, B. A. I. Sa, and J. B. Snc, “IHS Fairplay Vessel Detail Report IHS Fairplay Vessel Detail Report,” 2015.
- [13] A. P. Gusti and Semin, “Effect of ship speed on ship emissions,” *Asian J. Sci. Res.*, vol. 11, no. 3, pp. 428–433, 2018.
- [14] “World Bunker Prices - Ship & Bunker.” [Online]. Available: <https://shipandbunker.com/prices>. [Accessed: 14-Nov-2019].
- [15] H. Kramer *et al.*, “HOLISHIP D1.1 Market Analysis,” vol. 4, no. 689074, pp. 52–56, 2018.