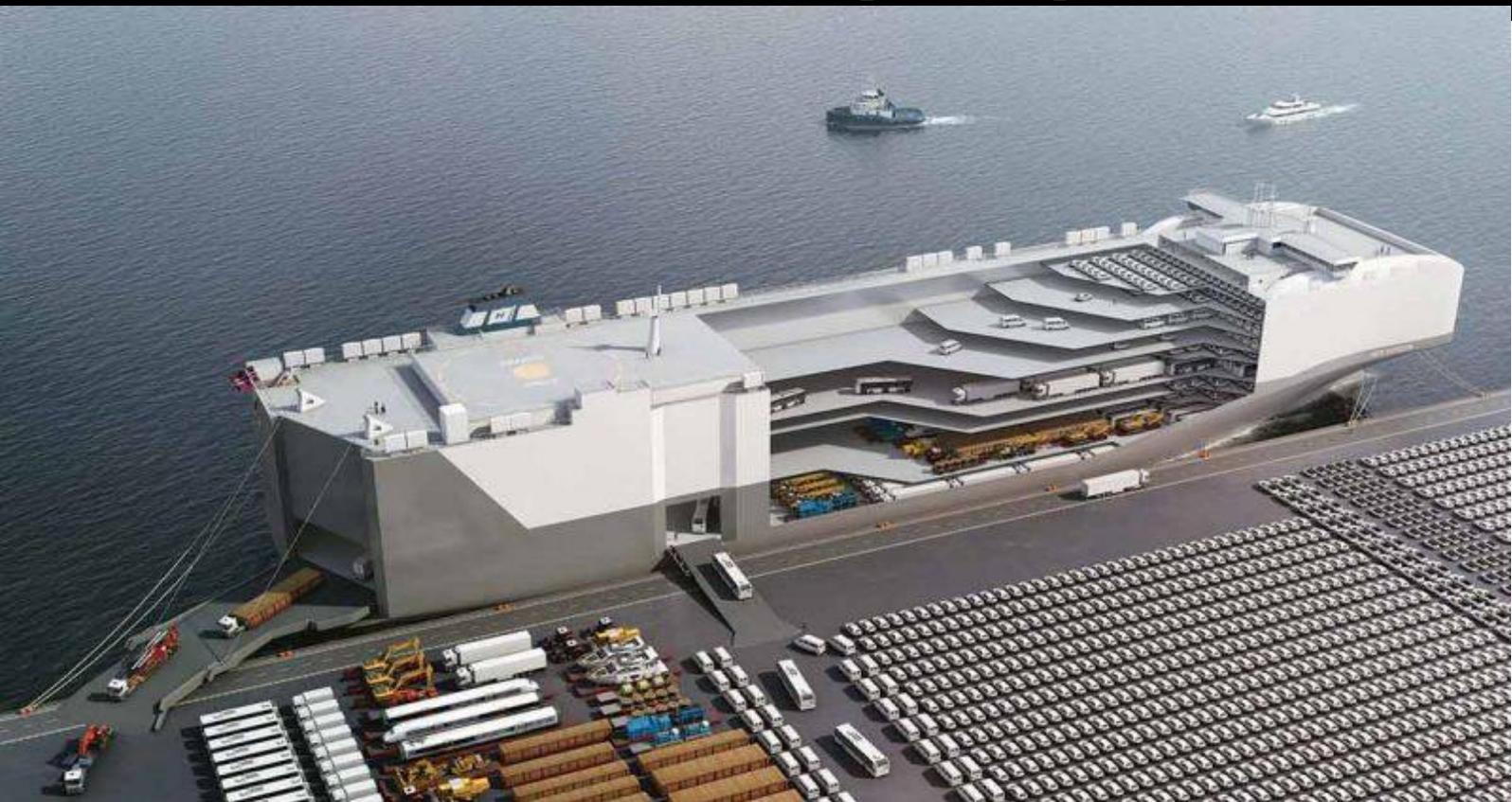


Grado en Arquitectura Naval e Ingeniería  
de Sistemas Marinos.  
Trabajo fin de Grado 2021  
Universidad Politécnica de Cartagena.

# Caracterización del tráfico de buques Car-Carrier en los puertos españoles e incidencia sobre el flete del cambio de combustible consumido por el buque.



# TFG

AUTORA: Andrea Carla Marín Onteniente  
TUTOR: Jerónimo Antonio Esteve Pérez





## ÍNDICE

ÍNDICE.....	3
INDICE DE ILUSTRACIONES .....	5
INDICE DE TABLAS.....	7
AGRADECIMIENTOS.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
BLOQUE I. TRÁFICO MARÍTIMO .....	11
1.Introducción.....	12
2. Revisión de la literatura: Factores asociados al tráfico de buques car-truck carrier y producción de vehículos en España.....	13
2.1 Tráfico marítimo de buques Car Carrier.....	13
2.2 España como productor del vehículo.....	17
3. Identificación y análisis de puertos base. Sistema portuario español. Metodología. .	17
3.1 Análisis del sistema portuario español.....	18
3.2 Análisis individualizado por puerto.....	20
3.2.1 Metodología de análisis de la componente estacional del tráfico de buques Car-truck Carrier en los puertos. ....	20
3.2.1 Puerto de Barcelona .....	22
3.2.2 Puerto de Valencia .....	24
3.2.3 Puerto de Pasajes.....	28
3.2.4 Puerto de Santander.....	30
3.2.5 Puerto de Vigo.....	32
3.2.6 Puerto de Tarragona. ....	34
4.Evoluciones agregadas y posiciones competitivas de los puertos base.....	37
4.1 Metodología de cálculo.....	37
4.1.1Tasa de variación anual .....	37
4.1.2 Cuota de mercado.....	37
4.2 Posiciones competitivas.....	38
BLOQUE II. Remotorización del buque .....	42
1.Introducción.....	43
2. Evolución histórica de la flota de buques Car-Carrier. ....	44
2.1 Tipos de buques RO-RO.....	47
2.1.1 Car-Carrier .....	47
2.1.2 Ferry.....	48



2.1.3 Ro/Pax.....	48
2.1.4 Ro-Ro/Container .....	48
2.1.4 Roto-Loader .....	48
2.1.5 Convencional / RoRo (ConvRo).....	49
3. Transporte marítimo. Rutas de transporte. ....	49
3.1 Marco legislativo. MARPOL.....	52
3.2 Ámbito del convenio y Código técnico. ....	57
4. Selección del buque a analizar.....	58
4.1 Determinación de la potencia propulsiva del buque. ....	60
4.1.1 Potencias y rendimientos. ....	61
4.1.2. Método y cálculo de la potencia. ....	68
4.2 Resultados: Aplicación del Método Holtrop y selección del Motor.....	80
5. Selección de la ruta a analizar. ....	99
5.1. Cálculo del consumo y autonomía del buque. ....	100
5.2 Remotorización.....	103
5.2.1 Cambios tecnológicos en motores marinos.....	103
5.2.2 Innovaciones en fases de desarrollo. ....	106
5.2.3 Opciones viables de remotorización. ....	108
5.2.4 Bunkers y precios. ....	109
5.3 Resultados.....	112
5.3.1 Opción zona ECA (Optimizada) .....	112
5.3.2 opción zona ECA (Minimizada). ....	115
5.4 Comparativa y selección.....	118
6. Conclusiones.....	120
Bibliografía.....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>



## INDICE DE ILUSTRACIONES

<u>Ilustración 1. Ranking de países productores de vehículos.</u>	13
<u>Ilustración 2. Taxonomía de principales factorías españolas</u>	18
<u>Ilustración 3. Taxonomía del hinterland junto a puertos clave.</u>	21
<u>Ilustración 4. Vista aérea, terminal de vehículos del puerto de Barcelona.</u>	23
<u>Ilustración 5. Perfil de estacionalidad puerto de Barcelona.</u>	24
<u>Ilustración 6. Vista aérea del puerto de Valencia.</u>	25
<u>Ilustración 7. Perfil de estacionalidad puerto de Valencia.</u>	27
<u>Ilustración 8. Vista aérea del puerto de Pasajes.</u>	28
<u>Ilustración 9. Perfil de estacionalidad puerto de Pasajes.</u>	30
<u>Ilustración 10. Vista aérea puerto de Santander.</u>	31
<u>Ilustración 11. Perfil de estacionalidad puerto de Santander.</u>	32
<u>Ilustración 12. Vista aérea puerto de Vigo.</u>	34
<u>Ilustración 13. Perfil de estacionalidad puerto de Vigo.</u>	35
<u>Ilustración 14. Perfil de estacionalidad puerto de Tarragona.</u>	37
<u>Ilustración 15. Matriz de posiciones competitivas.</u>	40
<u>Ilustración 16. Posiciones competitivas en el embarque.</u>	42
<u>Ilustración 17. Posiciones competitivas en desembarque.</u>	42
<u>Ilustración 18. Buque Comet (1953)</u>	45
<u>Ilustración 19. Buque Empire Baltic</u>	46
<u>Ilustración 20-Buque Wallenius Wilhelmsen.</u>	47
<u>Ilustración 21. Configuración de un Car-Carrier</u>	48
<u>Ilustración 22. Densidad de tráfico marítimo mundial (2012)</u>	52
<u>Ilustración 23. Estimación de las vías marítimas de tráfico car-carrier.</u>	53
<u>Ilustración 24. Mapa mundial zonas ECA y SECA.</u>	56
<u>Ilustración 25. Zona SECA.</u>	56
<u>Ilustración 26. Limitaciones de NOx.</u>	57
<u>Ilustración 27. Previsión estimada de emisiones.</u>	58
<u>Ilustración 28. Buque seleccionado.</u>	60
<u>Ilustración 29. Representación de cargas estimadas.</u>	61
<u>Ilustración 30. Aproximación de disposición de la carga.</u>	62
<u>Ilustración 31. Interacción casco-propulsor.</u>	62
<u>Ilustración 32. Partes de una línea de eje.</u>	63
<u>Ilustración 33. Relación de rendimientos y potencias en sist. propulsión</u>	66
<u>Ilustración 34. Gráfica obtenida de resistencia total-velocidad.</u>	83
<u>Ilustración 35. Gráfica de la potencia efectiva – Velocidad.</u>	83
<u>Ilustración 36. Motor M 32 C.</u>	84
<u>Ilustración 37. Motor C280-12</u>	84
<u>Ilustración 38. Motor Wartsila 32.</u>	85
<u>Ilustración 39. Motor Weskpoor 8tms410</u>	85
<u>Ilustración 40. Coeficientes recomendados para la hélice por Lloyds Register.</u>	87
<u>Ilustración 41. Estimación del Huelgo</u>	87
<u>Ilustración 42. Gráfica KQ-Kt-J para Z=3.</u>	89
<u>Ilustración 43. -Gráfica KQ-KT-J para Z=4.</u>	92
<u>Ilustración 44. Gráfica J-(KT/J2).</u>	92
<u>Ilustración 45. Gráfico de BHP necesaria – BHP instalada</u>	93



<u>Ilustración 46. imagen aérea del trayecto de la ruta a realizar</u> .....	96
<u>Ilustración 47. Imagen ampliada de la zona seca a navegar.</u> .....	97
<u>Ilustración 48. Gráfico de la obtención del consumo específico.</u> .....	98
<u>Ilustración 49. Evolución de las emisiones.</u> .....	100
<u>Ilustración 50. Buque E-SHIP.</u> .....	104
<u>Ilustración 51. Precios por zonas geográficas.</u> .....	108
<u>Ilustración 52. Trayecto Barcelona- Emdem zona ECA optimizada.</u> .....	109
<u>Ilustración 53. Ruta Barcelona-Endem zona ECA minimizada</u> .....	111
<u>Ilustración 54. Consumos de los motores en función del combustible.</u> .....	114
<u>Ilustración 55. Comparación de las variaciones y diferencias de los precios.</u> .....	115
<u>Ilustración 56. Motor Rolls Royce seleccionado.</u> .....	116



## INDICE DE TABLAS.

<u>Tabla 1. Vehículos movidos por puerto durante la serie temporal.</u> .....	22
<u>Tabla 2. Vehículos movidos por operaciones en la serie temporal</u> .....	26
<u>Tabla 3. Coeficientes obtenidos para la determinación del modelo de puerto.</u> .....	26
<u>Tabla 4. Vehículos movidos por P. Barcelona.</u> .....	27
<u>Tabla 5. Vehículos por operación puerto de Valencia.</u> .....	28
<u>Tabla 6. Coeficientes calculados para la determinación de modelo de puerto.</u> .....	29
<u>Tabla 7. Evolución de vehículos movidos por Valencia</u> .....	30
<u>Tabla 8. Vehículos movidos por operación en la serie temporal.</u> .....	31
<u>Tabla 9. Coeficientes calculados para la determinación del modelo de puerto.</u> .....	31
<u>Tabla 10. Evolución de vehículos movidos por puerto de Pasajes.</u> .....	32
<u>Tabla 11. Vehículos movidos por operaciones.</u> .....	33
<u>Tabla 12. Coeficientes calculados para la determinación de modelo de puerto.</u> .....	34
<u>Tabla 13. Evolución del tráfico de vehículos puerto de Santander.</u> .....	35
<u>Tabla 14. Vehículos por operación</u> .....	36
<u>Tabla 15. Evolución del tráfico puerto de Vigo.</u> .....	38
<u>Tabla 16. Vehículos por operación</u> .....	38
<u>Tabla 17. Coeficientes calculados para la determinación del modelo de puerto.</u> .....	39
<u>Tabla 18. Evolución del tráfico puerto de Tarragona.</u> .....	40
<u>Tabla 19. Relación de colores con Autoridades Portuarias para interpretar la posición competitiva.</u> .....	43
<u>Tabla 20. Características del buque.</u> .....	62
<u>Tabla 21. Capacidad de carga del buque</u> .....	63
<u>Tabla 22. Altura entre cubiertas</u> .....	63
<u>Tabla 23. Tabla para estimar Rendimiento mecánico.</u> .....	69
<u>Tabla 24. Valores para estimar K en función de Lpp.</u> .....	70
<u>Tabla 25. Estimación de las revoluciones en función del desplazamiento.</u> .....	70
<u>Tabla 26. Tabla de rangos de aplicación método Holtrop y Mennen</u> .....	72
<u>Tabla 27. Coeficientes de valores para Cster</u> .....	75
<u>Tabla 28. Valor de factor de formas según los apéndices</u> .....	75
<u>Tabla 29. Resultados obtenidos de los rangos de aplicación del método Holtrop y Mennen</u> .....	80
<u>Tabla 30. Datos inicio para la realización de los cálculos</u> .....	80
<u>Tabla 31. Resultados de la resistencia viscosa</u> .....	81
<u>Tabla 32. Resultados de la resistencia de fricción</u> .....	81
<u>Tabla 33. Resultado resistencia por apéndices</u> .....	81
<u>Tabla 34. Resultado de la resistencia por olas y coeficientes necesarios para su cálculo</u> .....	82
<u>Tabla 35. Resultado resistencia por bulbo</u> .....	82
<u>Tabla 36. Resultados de la resistencia por inmersión del espejo.</u> .....	82
<u>Tabla 37. Resistencia de correlación</u> .....	83
<u>Tabla 38. Resultados de resistencias y cálculo de la total al avance</u> .....	83
<u>Tabla 39. Resultado de los rendimientos cuasi-propulsivo por diferentes fórmulas</u> .....	84
<u>Tabla 40. Resultado de las potencias.</u> .....	84
<u>Tabla 41. Resultados de los coeficientes propulsivos, estela y succión</u> .....	88
<u>Tabla 42. Resultados obtenidos.</u> .....	90
<u>Tabla 43. Estimación del propulsor.</u> .....	90



<u>Tabla 44. Resultados para los Z palas.</u> .....	93
<u>Tabla 45. Propulsor seleccionado.</u> .....	93
<u>Tabla 46. Resultados de los parámetros antes descritos en función del grado de avance, J</u> .....	97
<u>Tabla 47. Datos de las millas de navegación entre puertos.</u> .....	98
<u>Tabla 48. Capacidad de combustible del buque</u> .....	99
<u>Tabla 49. Consumo obtenido.</u> .....	100
<u>Tabla 50. Aplicaciones técnicas para la regulación de las emisiones de los motores ..</u>	104
<u>Tabla 51. Alternativas de motores para la remotorización y consumos.</u> .....	107
<u>Tabla 52. Contenido en S de los combustibles</u> .....	108
<u>Tabla 53. Precios del combustible estimados.</u> .....	110
<u>Tabla 54. Tabla de duración del trayecto optimizada zona eca</u> .....	111
<u>Tabla 55. Tabla de cálculo de consumos según el motor</u> .....	112
<u>Tabla 56. Duración del trayecto con zona eca minimizada</u> .....	113
<u>Tabla 57 Cálculo del coste según motor</u> .....	115
<u>Tabla 58. Coste por milla navegada según el combustible.</u> .....	116



## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por su apoyo incondicional,

A mis profesores, por saber transmitir la pasión de la enseñanza,

Al ámbito naval, por hacer de este duro recorrido un mundo lleno de curiosidades.

En especial a Jerónimo, por su paciencia, por creer en esa colaboración de investigación que desembocó en este proyecto fin de estudios.

Cartagena, 6 de Abril de 2021.



## INTRODUCCIÓN

Este trabajo fin de grado tuvo origen en una colaboración de investigación enfocada al tráfico marítimo Car-Carrier, nacido de la necesidad de hacer hincapié en un tipo de tráfico marítimo específico; El tráfico de vehículos en régimen de mercancía. Interés originado tras la posición que ocupa España entre las 10 potencias de producción de vehículos a nivel mundial.

El proyecto se estructura en dos bloques. El primero de ellos, se centra en identificar los principales puertos que tienen tráfico Car-Carrier en el territorio nacional. Identificación basada en la caracterización de su tráfico, análisis de su evolución y volúmenes de tráfico. Análisis que nos permitirá encontrar las posiciones competitivas de cada uno de los puertos con tráfico car-carrier. El estudio es llevado a cabo con la base de datos englobada en la serie temporal determinada 2007-2019.

En segundo lugar, y como complemento a este primer bloque se realiza, el bloque II, el cual engloba las nuevas tendencias en el uso de combustible marino para cumplir con la normativa EURO 6 de nuevas emisiones referentes a las emisiones de gases de efecto invernadero. Para ello, se remotorizará un buque Car-Carrier con el fin de valorar las diversas alternativas de propulsión que le permitan operar por las zonas más restrictivas y estimar la incidencia que tiene el cambio de combustible en el flete.



# BLOQUE I. TRÁFICO MARÍTIMO



## 1.Introducción.

El transporte marítimo de carga rodada se puede dividir en dos grandes segmentos. Por un lado, el tráfico de vehículos en régimen de pasaje y de vehículos que transportan mercancías, el cual se desarrolla, fundamentalmente, con buques tipo *ferry*, *Ro-Pax* o *Roll-on / Roll-off* (Ro-Ro). Por otro lado, se sitúa el tráfico de vehículos en régimen de mercancía, asociado, fundamentalmente, con la importación y exportación de vehículos nuevos. Este tráfico se realiza con los buques denominados *pure car-truck carrier* o *pure car carrier* o buques “cocheros” en terminología española, que están diseñados para proporcionar una carga y descarga rápida de los vehículos por medio de rampas. Este artículo centra la atención en el tráfico de buques *car-truck carrier / car carrier* en puertos españoles.

El transporte marítimo juega un papel clave en la logística mundial de automóviles conectando a fabricantes de automóviles con los mercados de venta de los mismos. El comercio mundial de automóviles por vía marítima creció notablemente durante el periodo de 1996 a 2013, con una tasa de crecimiento media anual del 5,98%. Adicionalmente, el transporte mundial de automóviles por vía marítima evolucionó desde los 8 millones en 1996 a los 21 millones en 2016 [1].

La industria automovilística es un sector clave para España, ya que en 2018 tuvo una participación del 8,6% en el PIB y generó el 9% del empleo total sobre la población activa [2]. España durante 2018 fue el noveno productor mundial de vehículos con 2,82 millones de vehículos fabricados. El líder en producción de vehículos a nivel mundial durante 2018 fue China con 27,8 millones de vehículos, véase Figura 1. Respecto a la producción en Europa, Alemania fue el líder con 5,12 millones de vehículos, ocupando España la segunda posición como productor europeo [1]. En 2019, España ha experimentado una tasa de crecimiento de un 0.1% junto con Brasil que ha experimentado el 2.2% a diferencia de los otros países que comparten el ranking top 10 de principales productores de vehículos por país.

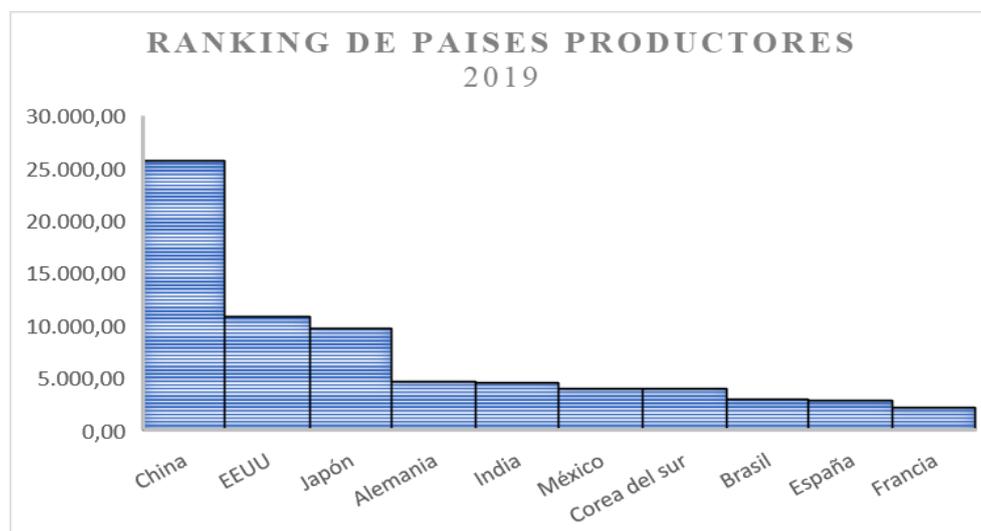


ILUSTRACIÓN 1. RANKING DE PAÍSES PRODUCTORES DE VEHÍCULOS.



De 2,82 millones de vehículos fabricados en España durante 2019, 2,3 millones se destinaron a exportación. El destino de las exportaciones de vehículos fabricados en España durante 2019. El principal destino de las exportaciones españolas fue Europa con un 91,15% del total. Concretamente, los principales países a los que se exportó fueron, por orden, Francia, Alemania, Reino Unido e Italia, que en su conjunto concentraron el 60,3% de las exportaciones. La segunda región de destino de las exportaciones de vehículos fue el continente americano con un 4,25%; cuyos principales destinos fueron Estados Unidos de América y México, pues concentraron el 2,7%.

Derivado de la importancia de España como productor de vehículos a nivel europeo y mundial, con gran parte de la producción destinada a exportación, y de la importancia del transporte marítimo en la logística mundial de automóviles, resulta de interés desarrollar un estudio sobre el tráfico de buques *car carrier* / *car-truck carrier* en los puertos españoles. El sector del transporte marítimo de automóviles constituye un segmento importante de la industria marítima, sin embargo, en la literatura especializada en transporte marítimo no ha recibido la debida atención [3, 4]. Contrariamente, en la literatura especializada en transporte marítimo se pueden encontrar numerosos trabajos focalizados en el tráfico de contenedores [5, 6], graneles líquidos [7, 8] y sólidos [9, 10]. Los objetivos de este primer bloque son:

1. Identificar los principales puertos españoles con tráfico de buques *car-truck carrier* / *car carrier*,
2. Conocer las posiciones competitivas de los puertos españoles con tráfico de buques *car-truck carrier*,
3. Determinar si este tráfico marítimo tiene estacionalidad, y en caso afirmativo, en qué grado

## 2. Revisión de la literatura: Factores asociados al tráfico de buques *car-truck carrier* y producción de vehículos en España.

### 2.1 Tráfico marítimo de buques *Car Carrier*.

El transporte marítimo de automóviles ha estado profundamente influenciado por el proceso de contenerización, ya que ambas cargas generaron buques diseñados específicamente para las características de una carga unitizada, en este caso, vehículos y contenedores, respectivamente. En ese proceso de especialización de los buques, las relaciones de colaboración entre navieras y compañías automovilísticas fueron clave para adaptar los nuevos buques a las necesidades de la industria [3]. En este sentido, el papel pionero de las compañías estadounidenses en el desarrollo de la contenerización está bien documentado [11], sin embargo, el papel clave de las empresas japonesas y europeas en la innovación en el transporte de automóviles sigue siendo menos conocido. Antes de la especialización de los buques, los automóviles se transportaban en las bodegas de buques de carga general y se manejaban de la misma manera que otras cargas generales [12].



Actualmente, un porcentaje muy pequeño de automóviles se transportan en contenedores. Hoy en día, la mayoría de los automóviles nuevos y otros tipos de vehículos se transportan en lo que a menudo se describe como garajes flotantes, formalmente conocidos como buques *car carrier* puros o buques *car-truck carrier* puros. Los buques *car carrier* puros aparecieron en la década de 1960 y se convirtieron gradualmente en el medio dominante para el transporte de vehículos [13]. Desde principios de la década de 1960, la innovación en transporte de automóviles se ha asociado con un reducido número de navieras japonesas, coreanas y escandinavas. Los primeros buques *car carrier* japoneses fueron diseñados para optimizar el transporte de coches pequeños. Estos buques, denominados *pure car carrier* (PCC), se construyeron desde la década de 1960 hasta la década de 1980. Por el contrario, las principales navieras europeas de transporte de vehículos evolucionaron a partir de líneas de *ferry* con buques diseñados para transportar cargas rodadas más variadas, dando lugar a los *car-truck carrier* puros actuales. Este tipo de buque, además de coches, también transportan cargas de gran tamaño y pesadas, como maquinaria de construcción y equipamiento agrícola, y camiones, que tienen sus propios patrones comerciales.

Fundamentalmente, el transporte de automóviles por vía marítima es un servicio exclusivo para la industria de fabricación de automóviles. De hecho, el crecimiento mundial de la flota de *Car Carrier* fue promovido significativamente por el desarrollo de la industria de fabricación de automóviles. El crecimiento constante de la industria mundial de fabricación de automóviles ha provocado que el comercio marítimo mundial de automóviles haya aumentado de manera sólida durante un largo periodo de tiempo. Los *cars carriers* se han convertido en el mejor medio para el transporte de automóviles. Las principales navieras de buques *car carrier* cooperan estrechamente con los fabricantes mundiales de automóviles y coordinan su estrategia de desarrollo para proporcionar suficiente capacidad de buques y un servicio de alta calidad para satisfacer su demanda de transporte.

Las rutas marítimas de transporte de automóviles más importantes son desde Asia a Europa y Norte América. Históricamente, los exportadores de automóviles más importantes se encuentran en Lejano Oriente, donde China, Japón y Corea del Sur son los principales exportadores de esta región. En el caso de Europa y Norte América su función es doble, ya que son tanto importantes exportadores como importadores de automóviles. Como se puede deducir de las principales rutas marítimas de transporte de vehículos, el comercio de vehículos tiene un ámbito mundial y altamente globalizado. Estas características son positivas para el tráfico de buques *car-truck carrier* porque aumenta la demanda de toneladas por milla, así mismo, ofrece mayores oportunidades de negocio para los fabricantes de automóviles y más opciones a los consumidores.

En 2018 la flota mundial de *car-truck carriers* estaba formada por 786 buques, teniendo el mayor buque una capacidad de 8.500 coches [14]. Este tipo de buque requiere de una construcción especializada. Por ejemplo, el diseño de las cubiertas debe garantizar el máximo espacio de carga, flexibilidad y eficiencia. La gestión técnica de estos buques también es especializada. Las tripulaciones deben ser competentes en los sistemas característicos de los buques *car-truck carrier* (operaciones con rampas, cubiertas elevables y sistemas de ventilación en cubierta), así como, competentes en la estiba y desestiba de los vehículos.



Actualmente una gran mayoría de la flota global de *car-truck carriers* es operada por grandes navieras que fletan sus buques directamente con fabricantes de automóviles y otros proveedores de carga. La escala de las operaciones, relaciones y experiencia requerida, por lo tanto, limita el número de participantes en este mercado a solo las compañías navieras más grandes y experimentadas con este tipo de buque. Este tráfico marítimo se basa en contratos de varios años consecutivos entre navieras y fabricantes de vehículos, y no existe un mercado *spot* como existe en otros sectores de transporte marítimo. El sector demostró una buena adaptabilidad durante la crisis financiera, desguazando más de 160 buques, y mostró moderación en lo que se refiere al número de nuevos buques encargados durante los años de la crisis económica en comparación con otros sectores de transporte marítimo [15].

En el mercado de buques *car-truck carrier*, desde el punto de vista de operación de los buques, existen tres esquemas de participación en este tráfico marítimo [16]:

- ❖ **Operadores principales:** Grandes navieras que controlan la mayor parte de la capacidad de este tipo de buques. Ya sea por sí mismos o por compañías subsidiarias por fletamento de buques. Ejemplo de grandes navieras son: *Grimaldi*, *NYK*, *MOL* y *K-LINE*.
  
- ❖ **Operadores pequeños:** Son aquellas pequeñas navieras que se dedican a operar en mercados con menor volumen. Ofreciendo servicios de transporte de automóviles en mercados emergentes como el de segunda mano con destino el Norte de África. Ejemplo: *Sallaum Lines* y *Abou Merhi*.
  
- ❖ **Propietarios fletantes:** Propietarios que ceden sus buques para que los fleten por tiempo o viajes determinados. Ejemplo: *Ray shipping*, *Zodiac*, *Maritime Afency*.

Centrándonos en las relaciones de colaboración existentes entre los fabricantes de los vehículos y las navieras de explotación Car-Carrier, encontramos tres modelos principales de colaboración;

### **Modelo Japonés:**

En el modelo japonés, el consorcio japonés controla la cooperación entre fabricantes de automóviles y navieras. Concretamente, el consorcio japonés posee conjuntamente las acciones de las compañías que fabrican automóviles y de las navieras de buques *car-truck carrier* para establecer alianzas comerciales mediante la participación accionarial.

El consorcio japonés promovió simultáneamente el desarrollo de fabricantes de automóviles y navieras. Por ejemplo, cuando Toyota desarrolló una estrategia de expansión de capacidad y un plan de exportación de automóviles, las navieras ajustaron los desarrollos de sus flotas basándose en esa estrategia. Por otro lado, las navieras japonesas también se



coordinaron entre ellas para desplegar capacidad de transporte suficiente en las principales rutas de importación y exportación de automóviles.

### **Modelo surcoreano**

Los principios del modelo surcoreano consisten en que los fabricantes de automóviles poseen directamente acciones de las navieras. Hyundai comenzó a desarrollar su propia flota de buques *car-truck carrier* cuando sus exportaciones de automóviles aumentaron a gran escala. Sin embargo, el Grupo Hyundai vendió el 80% de su participación accionarial a la empresa matriz de *Wallenius Wilhelmsen* en 2002 debido al colapso financiero del Grupo Hyundai después de la crisis económica del sudeste asiático y pasó a llamarse EUKOR.

El grupo automovilístico *Hyundai Kia* posee una participación del 20% en EUKOR. Actualmente, la naviera EUKOR es propiedad de *Wilh. Wilhelmsen ASA* (40%), *Wallenius* (40%) y *Hyundai Motor Company* y *Kia Motors Corporation* (20%). Así mismo, *EUKOR* participa en el transporte marítimo de automóviles *Hyundai* y *Kia* destinados a exportación desde Corea del Sur [16].

En 2010, *Hyundai Glovis Company Limited*, en la que *Hyundai Kia Automotive Group* poseía una participación del 20%, adquirió *CIDO Shipping Company Limited*, aumentando así la flota de *car-truck carriers* que presta servicios a la logística de exportación del grupo *Hyundai Kia Automotive*. La actividad principal de *Hyundai Glovis* son los servicios de logística y distribución, de esta manera, el grupo *Hyundai Kia Automotive* ha establecido una completa cadena logística de automóviles en el mar a través de su participación en compañías navieras.

### **Modelo europeo**

El modelo europeo se basa en la cooperación estratégica a largo plazo entre fabricantes de automóviles y navieras de forma independiente. A diferencia del consorcio y la participación, los fabricantes de automóviles subcontratan el transporte de los automóviles a terceros por medio de contratos a largo plazo. Los fabricantes de automóviles y las navieras solo se concentran en sus respectivos negocios principales y coordinan sus desarrollos mediante la cooperación estratégica. Por ejemplo, *Wallenius Wilhelmsen* y *HOEGH Auoliners* establecieron una cooperación estratégica con *Volkswagen*, *General Motors*, *Ford* y *Daimler AG* mediante contratos de fletamento a largo plazo.

La característica más destacada de los tres modelos es que debe establecerse una cooperación estratégica estable a largo plazo entre las navieras y los fabricantes de automóviles. Esta es una relación simbiótica. Por un lado, la naviera puede desarrollar su flota de acuerdo con el plan de expansión y exportación de los fabricantes de automóviles. Por otro lado, los fabricantes de automóviles necesitan que las navieras proporcionen suficiente capacidad de transporte, frecuencias adecuadas y fletes razonables. Esta colaboración apoya el desarrollo del transporte marítimo mundial de automóviles a largo plazo. Esta es una de las razones importantes por las cuales el mercado de buques *car-truck carrier* fue el que mejor se recuperó de la crisis financiera en comparación con el mercado de buques portacontenedores, graneleros y petroleros.



## 2.2 España como productor del vehículo.

La producción de vehículos en España está asociada a 11 marcas distribuidas en 10 factorías, véase Tabla 1. El transporte marítimo, por sus características propias y su capacidad, se torna en un modo de transporte vital para el sector del automóvil tanto para los tráficos de importación como para la exportación de los vehículos que se producen en España. La logística de automóviles en España requiere de intermodalidad tanto en tráficos de exportación como de importación.

Durante 2019 el transporte por carretera fue el medio dominante para importar y exportar vehículos a través de los puertos españoles. Concretamente, el 64,6% de los vehículos destinados a exportación llegaron a los puertos por carretera, mientras que, para los vehículos importados fue del 94,7%. El restante 35,4% de los vehículos exportados y el 5,3% de los importados, fueron transportados en ferrocarril hacia y desde el puerto, respectivamente. En 2019, la producción de vehículos en España cerró con un total de 2.822.632 vehículos fabricados, lo que representa un ligero crecimiento del 0,1% respecto al año anterior, junto con Brasil fueron los únicos países que cerraron la producción anual con crecimiento respecto al año anterior.

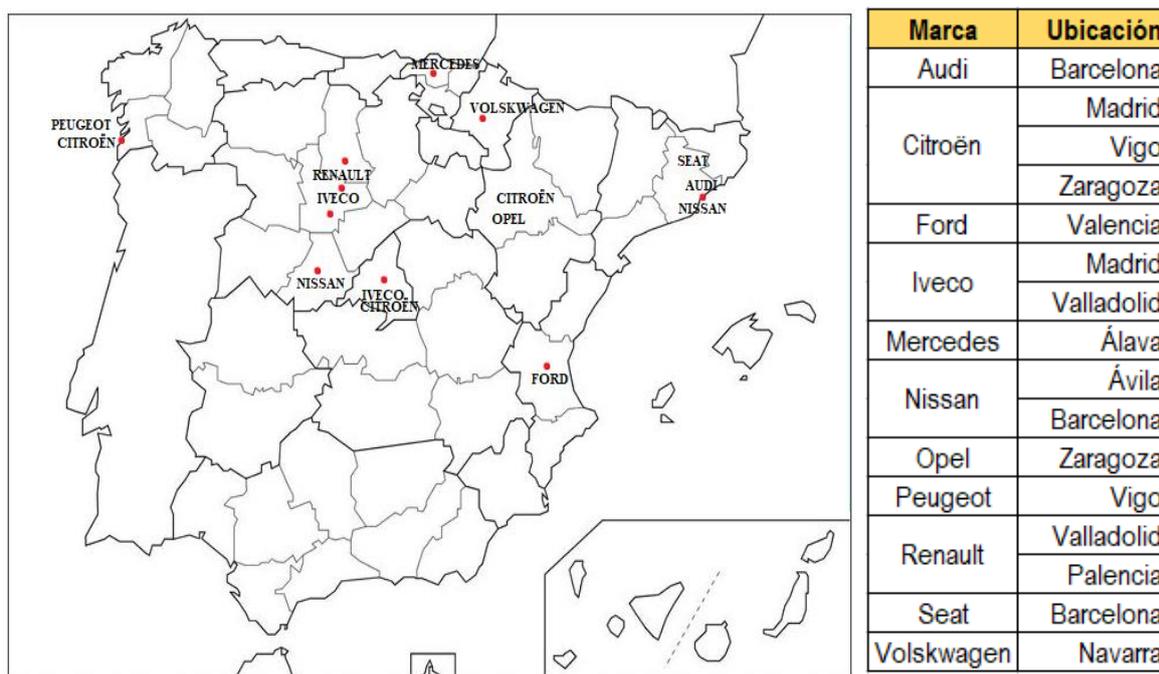


ILUSTRACIÓN 2. TAXONOMETRÍA DE PRINCIPALES FACTORÍAS ESPAÑOLAS

## 3. Identificación y análisis de puertos base. Sistema portuario español. Metodología.

El sistema portuario dentro de su amplio litoral de 8.000 km está posicionado como la costa más longeva de la Unión Europea. Cuenta con una posición geoestratégica positiva, gracias a la proximidad de las rutas marítimas mundiales relevantes. Está formado por 48 puertos gestionados por 28 Autoridades Portuarias.



La gestión del puerto cuenta con la coordinación y control de eficiencia corresponde al Organismo Público Puertos del Estado, órgano dependiente del Ministerio de Fomento y que tiene atribuida la ejecución de la política portuaria del Gobierno.

Los puertos suponen un elemento básico en la ordenación del espacio litoral y en la articulación de territorios más amplios. Así mismo, su importancia económica, vinculada fundamentalmente al comercio internacional, lo que conlleva un papel dentro de la logística de las rutas de transporte marítimo esencial para la conexión entre las mismas.

La idea central es exponer los principales puertos españoles que presenten un volumen relevante de este tipo de tráfico marítimo, Car -Carrier específicamente, aquel que transporte el vehículo como régimen de mercancía. Mostrar sus características, posiciones competitivas y evolución de estos. Siendo de interés que las autoridades portuarias destacan este tipo de transporte en sus estadísticas anuales desde 2015.

En los siguientes subapartados se desarrolla el análisis correspondiente a la identificación de los puertos españoles con tráfico de buques *car-truck carrier*, la determinación de sus posiciones competitivas el cálculo de sus patrones de estacionalidad, el cálculo de previsiones de tráfico mediante la aplicación de simulaciones de Monte Carlo, y la caracterización de la operativa durante la escala en puerto de este tipo de buque.

### 3.1 Análisis del sistema portuario español.

Para identificar los puertos con tráfico de buques *car-carrier* se empleó como variable de análisis el número de vehículos movidos mensualmente en régimen de mercancía en los puertos españoles durante el periodo 2005-2019. No se pudieron analizar años anteriores a 2011 porque no están disponibles las estadísticas de esos años, por lo que el análisis se centrara en el periodo temporal 2011-2019. Concretamente, se empleó la estadística que hace referencia a los siguientes tipos de vehículos, turismos, autobuses y camiones. De los 46 puertos de interés general que configuran el Sistema Portuario Español, los puertos de Barcelona, Pasajes, Santander, Tarragona, Valencia y Vigo son los que concentran mayoritariamente el tráfico de buques *car-truck carrier* en España [17].

El análisis fue llevado a cabo con los puertos de Barcelona, Pasajes, Santander, Tarragona, Valencia y Vigo. [4,5,6,7,8 y9] La selección de estos está basada en la identificación del tráfico marítimo car-Carrier con exportación de vehículos en régimen de mercancía, dejando a un lado aquellos puertos que tienen un elevado valor de estas rutas, pero consideradas de tránsito con vehículos que no cumplen con la etiqueta de vehículo en régimen de mercancía. junto por la proximidad a las factorías principales del territorio nacional, estos puertos formaran el Hinterland seleccionado llevado a estudio.

Durante el periodo de 2011 a 2019, el tráfico de vehículos en régimen de mercancía creció a una tasa media anual del 6,3%, acumulando siete años consecutivos de crecimiento desde 2012 a 2019. Además, desde 2015 se ha superado la barrera de los 2,5 millones de vehículos importados y exportados, conjuntamente, a través de puertos españoles, véase Tabla 2. El puerto de Barcelona es el que mayor número de vehículos ha movido durante el periodo analizado, con 6.16 millones, seguido del puerto de Valencia con 5.1 millones. Adicionalmente, el puerto de Barcelona fue el principal puerto en movimiento de vehículos de 2011 a 2017, sin embargo, en 2018 el liderazgo lo tomó el puerto de Valencia. Posición que recupero Barcelona en 2019.



TABLA 1. VEHÍCULOS MOVIDOS POR AUTORIDAD PORTUARIA.

<b>Vehículos movidos por puerto</b>						
<b>Año</b>	<b>BARCELONA</b>	<b>PASAJES</b>	<b>SANTANDER</b>	<b>TARRAGONA</b>	<b>VALENCIA</b>	<b>VIGO</b>
2007	34.003	98	4.564	455	S/D	3.603
2008	43.038	11	4.887	179	S/D	7.447
2009	25.064	S/D	2.199	2.279	S/D	2.809
2010	29.053	64.514	5.180	2262	5320	177.639
2011	632.017	25.4813	319.143	71.973	407.844	460.952
2012	670.949	197.712	270.885	57.286	413.177	434.030
2013	709.645	201.122	315.701	63.054	465.419	497.365
2014	753.276	222.568	377.454	59.876	492.279	421.502
2015	886.980	245.184	4.609.91	113.879	686.555	441.304
2016	917.617	248.549	494.051	153.314	773.694	457.476
2017	836.720	234.708	496.495	200.360	793.093	486.305
2018	809.158	254.673	488.144	194.738	818.225	451.111
2019	777.177	273.275	466.158	211.205	720.857	481.277
<b>Total</b>	<b>7.124.697</b>	<b>2.197.227</b>	<b>3.705.852</b>	<b>1.130.860</b>	<b>5.576.463</b>	<b>43.22.820</b>

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

En lo que a tráfico de exportación se refiere, existe una vinculación directa entre cada factoría y el puerto a través del cual ésta exporta parte de su producción. Es decir, la ubicación de la factoría forma parte del hinterland concerniente al tráfico de vehículos en régimen de mercancía del puerto. En la ilustración 2, se puede observar la situación relativa entre las diferentes factorías de vehículos existentes en España y los 6 puertos con tráfico de buques *car-truck carrier*.

El transporte marítimo es complementario al transporte por carretera, las infraestructuras que rodean los puntos clave (puertos), forman parte de un plan de control estratégico del transporte que busca el equilibrio modal de logística.

Fundamentalmente, la producción destinada a exportación es transportada a través del puerto más cercano a la factoría. En particular, para Ford es el puerto de Valencia, el puerto de Vigo para Citroën, los vehículos de las marcas Audi, Nissan y Seat emplean Barcelona, el puerto de Santander para los vehículos Iveco, Nissan y Renault fabricados en Castilla y León, el puerto de Tarragona para la factoría Opel en Zaragoza, y el puerto de Pasajes para las factorías de Mercedes y Volkswagen.



ILUSTRACIÓN 3. TAXONOMETRÍA DEL HINTERLAND JUNTO A PUERTOS CLAVE.

### 3.2 Análisis individualizado por puerto

La variable de análisis empleada de la serie temporal que engloba el periodo 2006-2019 de datos aportados por las Autoridades Portuarias de las unidades de vehículos operados en puerto por los puertos base seleccionados. Basándonos en el periodo temporal analizado se obtienen que para la clasificación de los puertos base se definen cuatro segmentos cada uno correspondiente a una operación en puerto: Embarque, desembarque, embarque en tránsito y desembarque en tránsito. Este primer análisis consiste en atribuir a cada puerto una posición en función del volumen de vehículos operados por segmento. Tomando como referencia la base de datos de unidades de vehículos por puerto. A continuación, véase un análisis descriptivo de cada puerto.

#### 3.2.1 Metodología de análisis de la componente estacional del tráfico de buques Car-truck Carrier en los puertos.

En este apartado se procede a determinar si el tráfico de buques car-truck Carrier en los puertos españoles tiene componente estacional y, en caso, afirmativo calcular el perfil de estacionalidad que este tráfico tiene en cada puerto. La variable utilizada para realizar el análisis fue la cifra total de vehículos movidos en régimen de mercancía. Apoyado el cálculo definido en el tema 5 de. “*Series temporales. Departamento de métodos cuantitativos e informáticos. Facultad de ciencias de la empresa. UPCT.*” [10]

En primer lugar, El análisis de la serie temporal consiste en determinar el tipo de modelo del puerto: aditivo o multiplicativo. Mediante el método numérico basado en el análisis de la variabilidad de las diferencias y cocientes estacionales.

La diferencia estacional,  $d_{ij}$ , se define como la diferencia entre dos datos de la misma estación, en este caso mes, correspondiente a dos años consecutivos  $i-1$  e  $i$ . Se calcula según la siguiente expresión:



$$d_{ij} = Y_{ij} - Y_{i-1j}, \quad (1)$$

donde  $Y_{ij}$  es el valor de la serie en el año  $i$  y mes  $j$ .

En cuanto al cociente estacional  $k_{ij}$  se define como el cociente entre dos datos de la misma estación, en este caso mes, correspondientes a dos años consecutivos  $i-1$  e  $i$ . Calculándose según la siguiente expresión,

$$k_{ij} = \frac{Y_{ij}}{Y_{i-1j}}, \quad (2)$$

donde  $Y_{ij}$  es el valor de la serie en el año  $i$  y mes  $j$ .

Una vez calculados los valores  $d_{ij}$  y  $k_{ij}$ , se calculan los coeficientes de variación de cada uno de ellos, definidos por las expresiones (3) y (4). Si  $C.V.(d) \leq C.V.(k)$  se elige esquema aditivo, en caso contrario multiplicativo.

$$C.V.(d) = \frac{\sigma_d}{\bar{d}}. \quad (3)$$

$$C.V.(k) = \frac{\sigma_k}{\bar{k}}. \quad (4)$$

Las expresiones (3) y (4) con la serie temporal de vehículos en régimen de mercancía de cada puerto, se ha obtenido que las series temporales de los seis puertos se ajustan a un modelo multiplicativo. En un modelo multiplicativo, la componente estacional de la serie temporal se mide con un índice denominado índice de variación estacional (IVE), expresado en tanto por ciento y que representa la fluctuación del valor de la serie respecto al valor de la tendencia media del año. Para el cálculo del IVE se ha empleado el método de la razón a la media móvil. La aplicación de este método requiere en primer lugar calcular las medias móviles para la serie temporal, en este caso al estar formada por datos mensuales, las medias móviles calculadas son de amplitud  $h=12$ . El siguiente paso ha consistido en calcular mensualmente el cociente de los valores originales de la serie por las medias móviles obtenidas, aplicando para ello la expresión (5).

$$\bar{e}_{it} = \frac{Y_{it}}{tc_{it}}, \quad (5)$$



siendo  $Y_{it}$  la observación en el año  $t$  y el mes  $i$  y  $tc_{it}$  la media móvil en el año  $t$  y el mes  $i$ .

A continuación, se han calculado las medias sobre dichos cocientes para cada uno de los meses, según,

$$\bar{e}_i = \frac{1}{N-1} \sum \frac{Y_{it}}{tc_{it}}, \quad (6)$$

donde  $N$  es el número de años (en este caso 8) e  $i$  variando entre 1 y 12 al disponer de 12 meses.

Previamente obtenidos estos parámetros se ha calcula el IVE para cada mes  $i$  según la expresión (7).

$$IVE (\text{mes } i) = \frac{\bar{e}_i}{1/12 \sum \bar{e}_i} \cdot 100 \quad (7)$$

El tráfico de buques Car- Carrier en los puertos españoles tiene componente estacional. Para cada puerto en su correspondiente subapartado mostrara la representación gráfica de los perfiles de estacionalidad obtenidos para cada uno de los puertos clave. Los meses de temporada alta están identificados por valores superiores a cien mientras que los de temporada baja lo serán identificados por ser inferiores a 100.

Los perfiles de estacionalidad obtenidos están directamente ligados a las ratios mensuales de producción de vehículos en las diferentes factorías de automóviles de España. La Figuras que representa la producción mensual de vehículos en España durante el periodo de la serie temporal, mostraran los meses de mayor producción y así, los meses valle.

### 3.2.1 Puerto de Barcelona

El puerto de Barcelona es uno de los puertos líderes del levante español situado al noreste de la península cuenta con 828.9 hectáreas y más de 20 km de muelles y atraques. Constituido por 35 terminales especializadas. Líder en el tráfico de vehículos en el mediterráneo, cuenta con dos terminales especializadas de vehículos; *Auto Terminal* y *Setram*. Espacios verticales con capacidad para 24.000 plazas, conexas 5 vías ferroviarias de carga, 5 rampas ro-ro 1.200 metros lineales de atraque y con proyección para nuevos espacios destinados a la distribución de automóviles.



ILUSTRACIÓN 4. VISTA AÉREA TERMINAL DE VEHÍCULOS DEL PUERTO DE BARCELONA

Estratégicamente situado en el mediterráneo, con tráfico marítimo vía línea regular con puertos como *AMBERES (BEANR)*, *AMSTERDAM (NLAMS)*, *BANGKOK (THBKK)*, *BEIRUT (LBBEY)*, *BRISTOL (GBBRS)*, *BUENOS AIRES (ARBUE)* etc. Conectada vía marítima con Latino América, Reino Unido, Norte de Europa, Países bajos.

Las cifras del puerto de Barcelona en la serie temporal 2007-2019, desglosadas en las operaciones de: Embarque, desembarque, embarque en tránsito y desembarque en tránsito son las mostradas en la *Tabla 2*

TABLA 2. VEHÍCULOS MOVIDOS POR OPERACIÓN

<i>Autoridad Portuaria de Barcelona (20011-2019)</i>	
<i>Operación</i>	<i>vehículos movidos</i>
<i>Embarque</i>	4.375.247
<i>Desembarque</i>	1.702.315
<i>Em. Tránsito</i>	494.504
<i>Des. Tránsito</i>	421.473

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Tras el análisis de la componente estacional del puerto de Barcelona, éste presenta se un perfil multiplicativo.

TABLA 3. COEFICIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DE MODELO DE PUERTO.

CV dij	CV cij	Modelo
6	0,3868	MULTIPLICATIVO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

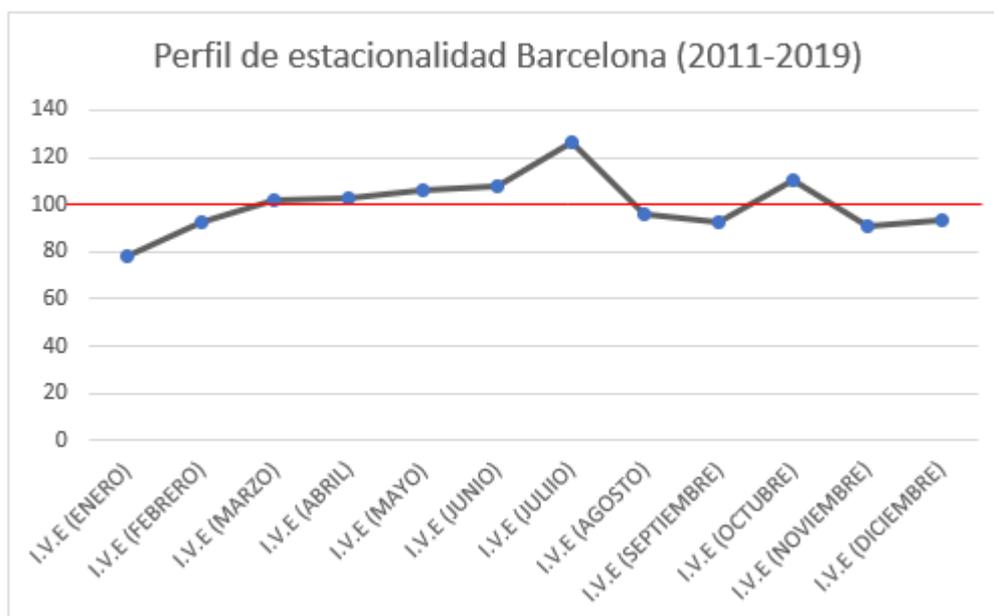


ILUSTRACIÓN 5. PERFIL DE ESTACIONALIDAD PUERTO DE BARCELONA.

El puerto de Barcelona, presenta su mes de más producción en el mes de julio que precede a septiembre, el mes valle de la serie temporal en producción.

TABLA 4. VEHÍCULOS MOVIDOS POR EL PUERTO DE BARCELONA.

Evolución del tráfico de vehículos puerto de Barcelona												
Año	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2010	10.661	202	193	340	793	1.163	3.185	5246	38.203	41.667	40.455	35.531
2011	37.744	41.415	47.085	46.068	38.460	40.237	39.767	21.848	29.399	45.420	39.493	34.016
2012	27.336	38.815	39.352	31.047	35.183	35.562	47.620	20.152	39.195	44.521	35.697	39.550
2013	40.175	44.632	50.976	39.812	50.320	50.319	45.399	22.064	37.843	43.684	34.429	37.712
2014	34.228	36.875	44.324	37.325	35.379	37.181	41.322	19.013	34.054	33.849	36.230	31.722
2015	32.030	39.478	35.876	34.838	37.023	49.447	44.143	19.592	38.201	36.626	37.976	36.074
2016	32.224	39.396	37.364	44.997	41.458	44.102	40.666	20.100	45.596	36.880	34.107	40.586
2017	28.809	41.250	45.018	39.590	44.255	49.100	47.705	22.966	41.577	48.386	40.284	37.365
2018	31.252	39.401	41.605	35.933	44.661	45.691	41.807	19346	25979	40241	40979	44216
2019	32.771	42.738	41.020	41.078	40.552	38.955	43.115	26.647	37.248	46.440	44.967	45.746

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 3.2.2 Puerto de Valencia

El puerto de Valencia conocido como Valencia Port., es uno de los puertos claves del litoral español, está posicionado como quinto puerto con más tráfico de Europa y como primero de España situado en la cuenca del mediterráneo. Canaliza tráfico de cualquier tipo de mercancía de todos los sectores de la economía. Entre sus principales clientes



destacan los sectores del mueble y madera, textil, calzado, agroganadero y alimentario. Automóvil, químico y maquinaria.



ILUSTRACIÓN 6. VISTA AÉREA DEL PUERTO DE VALENCIA.

Valencia Port dispone de instalaciones especializadas de alto rendimiento para todo tipo de tráfico: terminal pública de contenedores, terminales polivalentes, terminales de automóviles y carga rodada, terminal de pasajeros y cruceros turísticos, contando a su vez con terminales para graneles sólidos y líquidos.

Su posición geoestratégica ofrece tiempos reducidos en el transporte terrestre. Y una amplia posibilidad para la redistribución de mercancías con origen y destino en la Península.

Así mismo es el puerto comercial de mayor proximidad con el eje Suez-Gibraltar, una de las rutas principales interoceánicas. A su vez con una elevada concentración y distribución del tráfico del Mediterráneo occidental.[14]

Con el objetivo de ampliar su alcance marítimo ofrece una completa red de conexiones a los principales puertos del mundo a través de:

- Más de 100 líneas regulares, entre las que se encuentran las de las principales compañías marítimas internacionales.
- Múltiples conexiones regionales que dotan de una gran capilaridad al transporte de mercancías por Valencia Port.

Conectada vía marítima con todo el mediterráneo y mar negro, Europa atlántica, España. África occidental, países bálticos, golfo arábico, mar rojo y lejano oriente.

El volumen de vehículos movidos desde 2011 hasta la actualidad:



TABLA 5. VEHÍCULOS MOVIDOS POR OPERACIÓN.

<i>Autoridad Portuaria de Valencia (2011-2019)</i>	
<i>Operación</i>	<i>vehículos movidos</i>
<i>Embarque</i>	<i>3.230.401</i>
<i>Desembarque</i>	<i>1.834.667</i>
<i>Em. Tránsito</i>	<i>249.548</i>
<i>Des. Tránsito</i>	<i>26.1847</i>

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Valencia Port, durante la serie temporal, claramente es puntero en Embarque de vehículos, por lo tanto, el 57.93% de las unidades movidas son exportadas. El 32,90% Desembarcadas o importadas, mientras que el tránsito resta el 9.17% de las unidades movidas.

En 2018 Valencia Port muestra su punto álgido con un total de 818.225 unidades movidas en sus instalaciones frente a 2010 que presenta su menor esplendor con 407.844 vehículos movidos.

Tras el análisis de su componente estacional Valencia Port presenta un modelo aditivo

TABLA 6. COEFICIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DE MODELO DE PUERTO.

CV dij	CV cij	Modelo
2,70	3,50	ADITIVO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El puerto de Valencia tiene como mes de menos producción agosto, frente a mes álgido que es marzo. Podría establecer el primer semestre de mayor productividad en movimientos de tráfico Car Carrier. Como contrastación, en datos numéricos, como agosto se válida como mes valle de la producción y actividad en el puerto de valencia. *Véase tabla 7.*

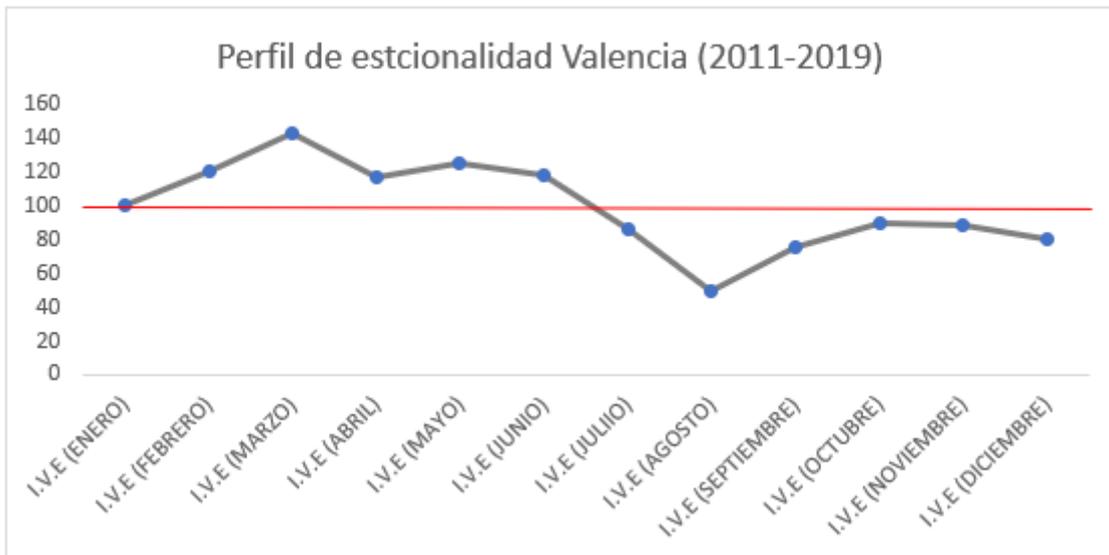


ILUSTRACIÓN 7. PERFIL DE ESTACIONALIDAD PUERTO DE VALENCIA.

Valencia, presenta febrero, marzo, mayo, junio como meses con mayores operaciones de vehículos en régimen de mercancía. Acentuado el mes de agosto como el mes de menor operatividad coincidiendo con el resto de los puertos salvo, el puerto de Barcelona.

Respecto a la evolución de la serie temporal muestra una tendencia lineal positiva con una bondad de ajuste del 0.92 respaldando el liderazgo de este puerto como clave del transporte marítimo

Durante 2012 el puerto de Valencia presenta un descenso de vehículos únicamente del 1 % seguido de un progresivo crecimiento que muestra para 2018 el doble de vehículos en las operaciones en puerto en 2011

TABLA 7. VEHÍCULOS MOVIDOS POR EL PUERTO DE VALENCIA.

Evolución del tráfico de vehículos puerto de Valencia												
Año	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2010	10.661	202	193	340	793	1.163	3.185	5.246	38.203	41.667	40.455	35.531
2011	37.744	41.415	47.085	46.068	38.460	40.237	39.767	21848	29.399	45.420	39.493	34.016
2012	27.336	38.815	39.352	31.047	35.183	35.562	47.620	20.152	39.195	44.521	35.697	39.550
2013	40.175	44.632	50.976	39.812	50.320	50.319	45.399	22.064	37.843	43.684	34.429	37.712
2014	34.228	36.875	44.324	37.325	35.379	37.181	41.322	19.013	34.054	33.849	36.230	31.722
2015	32.030	39.478	35.876	34.838	37.023	49.447	44.143	19.592	38.201	36.626	37.976	36.074
2016	32.224	39.396	37.364	44.997	41.458	44.102	40.666	20.100	45.596	36.880	34.107	40.586
2017	28.809	41.250	45.018	39.590	44.255	49.100	47.705	22.966	41.577	48.386	40.284	37.365
2018	31.252	39.401	41.605	35.933	44.661	45.691	41.807	19.346	25.979	40.241	40.979	44.216
2019	32.771	42.738	41.020	41.078	40.552	38.955	43.115	26.647	37.248	46.440	44.967	45.746

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



### 3.2.3 Puerto de Pasajes.

Situado en el centro del Golfo de Bizkaia, a 15 kilómetros de la frontera francesa y directamente conectado con el Corredor Atlántico de la Red Transeuropea de Transporte, el Puerto de Pasajes se convierte en un instrumento imprescindible para el desarrollo de la industria, el comercio y el turismo en su radio de influencia.

El puerto de Pasajes es elemento principal de las cadenas logísticas de la industria siderúrgica y del automóvil. Flexible, ágil y seguro, está capacitado para cubrir las necesidades de los barcos, las tripulaciones y los pasajeros.

La convivencia de Pasajes con su entorno es absolutamente vital ya que la adecuación de sus infraestructuras, adaptar los servicios a nuevos tráficos y, sobre todo, compatibilizar la actividad portuaria con el entorno urbano.



ILUSTRACIÓN 8. VISTA AÉREA DEL PUERTO DE PASAJES.

Sus conexiones ferroviarias y terrestres lo hacen especialmente recomendable para el SSS (Short Sea Shipping). Tres líneas regulares de buques RO-RO unen el puerto con el arco atlántico europeo (Southampton, Rotterdam, Zeebrugge, Portbury y Antwerpen), puerta de acceso al mercado económico común.

El volumen movido por Pasajes durante la serie temporal 2011-2019, movió un total de 2.032.266,053 vehículos por operación. **Véase tabla 8**

TABLA 8. VEHÍCULOS POR OPERACIÓN.

<i>Autoridad Portuaria de Pasajes (2011-2019)</i>	
<i>Operación</i>	<i>vehículos movidos</i>
<i>Embarque</i>	2.032.042
<i>Desembarque</i>	166.053
<i>Em. Tránsito</i>	29
<i>Des. Tránsito</i>	29

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

El 92.44% son vehículos embarcados, por lo que se destinaron a exportación, mientras que el 7.5% fue importado. Restando el 0.003% que tuvo carácter transitorio.



Con una componente estacional multiplicativa, presenta un perfil estacional con mes valle de producción en agosto y momento álgido en febrero. Como se puede observar en la *ilustración 9*.

TABLA 9. COEFICIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE PUERTO.

CV dij	CV cij	Modelo
19,71169116	0,224669128	MULTIPLICATIVO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

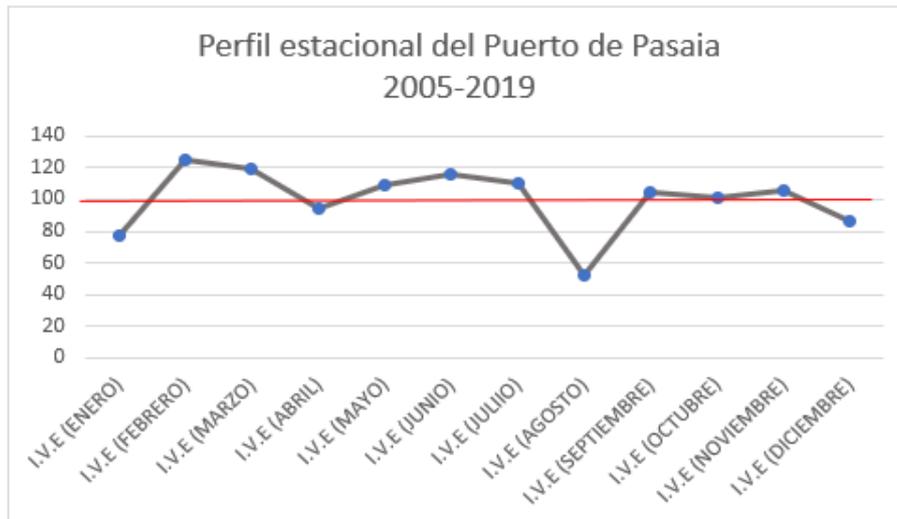


ILUSTRACIÓN 9. PERFIL DE ESTACIONALIDAD PUERTO DE PASAJES

La serie temporal de Pasajes, muestra cómo meses de más productividad febrero y marzo, frente a su estancamiento de agosto.

TABLA 10. VEHÍCULOS MOVIDOS POR EL PUERTO DE PASAJES.

Evolución del tráfico de vehículos puerto de Pasajes												
Año	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
2010				2	10			1	13	14.474	27.807	22.207
2011	17.797	23.311	27.196	22.719	24.221	22.812	25.404	7.536	23.972	22.929	21.674	15.242
2012	16.728	22.293	20.609	16.354	14.747	19.880	20.285	3.299	18.657	15.199	15.075	14.586
2013	12.558	23.389	23.101	14.925	21.220	16.999	19.692	5.900	16.660	16.253	17.396	13.029
2014	13.089	15.207	24.113	14.613	19.235	20.419	24.214	8.996	24.912	22.070	18.456	17.244
2015	15.443	22.149	26.528	19.150	23.230	21.651	23.523	8.353	21.263	23.100	23.145	17.649
2016	19.602	22.145	23.938	22.933	23.403	265.88	23.988	8.652	20.482	20.727	22.429	13.662
2017	14.829	23.407	23.444	15.427	22.759	23.407	18.836	9.134	23.785	19.793	20.239	19.648
2018	17.212	22.132	23.252	24.696	26.447	28.089	22.595	7.868	24.901	19.203	24.703	13.575
2019	19.590	25.772	28.662	20.531	24.885	285.95	30.886	6.659	22.915	19.194	22.634	22.952

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA



### 3.2.4 Puerto de Santander.

Situado en la bahía de Santander se encuentra, en localizado en Cantabria, el Puerto de Santander, es uno de los seis elementos primordiales del caso a estudio. Esencial por su situación estratégica de cara al atlántico norte español y así mismo con el norte y sur de Europa. Seleccionado por su proximidad a las industrias del automóvil.



ILUSTRACIÓN 10. VISTA AÉREA PUERTO DE SANTANDER.

Conectado con Zeebrugge, Rotterdam, Southampton, Pasajes y Le Havre, presenta 2 líneas regulares con frecuencia de dos escalas semanales, de tráfico car Carrier.

El volumen de vehículos movidos por el puerto de Santander por operación muestra que en el último año el puerto de Santander sufrió una tasa de variación negativa del -4.80% respecto a 2019.

TABLA 11. VEHÍCULOS POR OPERACIÓN.

<i>Autoridad Portuaria de Santander (2011-2019)</i>	
<i>Operación</i>	<i>vehículos movidos</i>
<i>Embarque</i>	2.382.202
<i>Desembarque</i>	1.311.115
<i>Em. Tránsito</i>	8.757
<i>Des. Tránsito</i>	9.636

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Santander presenta operaciones en tránsito, sin embargo, estas no son de relevancia respecto a las operaciones de embarque y desembarque. El embarque representa 64.18% de los vehículos movidos, el desembarque el 35.32% siendo el restante un 0.496% del tránsito de vehículos en sus instalaciones.

Centrándonos en el análisis de la componente estacional el Puerto de Santander, presenta un perfil estacionario de modelo multiplicativo.



TABLA 12. COEFICIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE PUERTO.

CV dij	CV cij	Modelo
3,854	0,211	MULTIPLICATIVO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

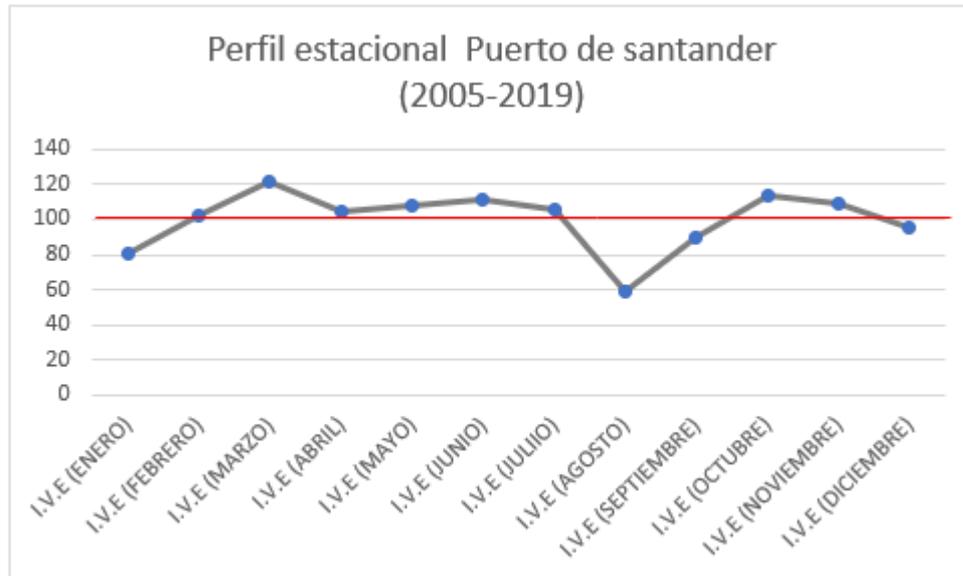


ILUSTRACIÓN 11. PERFIL DE ESTACIONALIDAD PUERTO DE SANTANDER.

El puerto de Santander, en común con los puertos antes previamente analizados, presenta como mes valle, el mes de agosto, frente al mes de mayor producción el mes de marzo.

La evolución del puerto de Santander presenta una línea de tendencia con una bondad de ajuste del 0.88, resultado que aporta relevancia al elevado potencial que presenta el puerto.

Durante su evolución muestra un déficit en 2012 con una caída del 9% sin embargo remonta con un crecimiento del 31% en 2017 con una tasa de variación positiva media del 8%. *Véase tabla 13.*



TABLA 13. VEHÍCULOS MOVIDOS POR EL PUERTO DE SANTANDER.

Evolución del tráfico de vehículos puerto de Santander												
Año	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
2010	10.661	202	193	340	793	1.163	3.185	5.246	38.203	41.667	40.455	35.531
2011	37.744	41.415	47.085	46.068	38.460	40.237	39.767	21.848	29.399	45.420	39.493	34.016
2012	27.336	38.815	39.352	31.047	35.183	35.562	47.620	20.152	39.195	44.521	35.697	39.550
2013	40.175	44.632	50.976	39.812	50.320	50.319	45.399	22.064	37.843	43.684	34.429	37.712
2014	34.228	36.875	44.324	37.325	35.379	37.181	41.322	19.013	34.054	33.849	36.230	31.722
2015	32.030	39.478	35.876	34.838	37.023	49.447	44.143	19.592	38.201	36.626	37.976	36.074
2016	32.224	39.396	37.364	44.997	41.458	44.102	40.666	20.100	45.596	36.880	34.107	40.586
2017	28.809	41.250	45.018	39.590	44.255	49.100	47.705	22.966	41.577	48.386	40.284	37.365
2018	31.252	39.401	41.605	35.933	44.661	45.691	41.807	19.346	25.979	40.241	40.979	44.216
2019	32.771	42.738	41.020	41.078	40.552	38.955	43.115	26.647	37.248	46.440	44.967	45.746

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Cabe que destacar, como alcanza su momento álgido empujado por el segmento en tránsito que había pasado desapercibido hasta 2014 dónde los tres años posteriores eleva drásticamente la actividad en puerto del tráfico car-Carrier en Santander.

### 3.2.5 Puerto de Vigo.

Puerto de Vigo, es uno de los elementos primordiales de la costa del noroeste de la península ibérica, Mirando al océano Atlántico. Así mismo presenta la zona franca de Vigo (ZFV) albergando un relevante entramado de empresas auxiliares de la industria del automóvil, liderada por PSA-Peugeot-Citroën. Siendo ZFV una de las tres únicas existentes, originada con el objetivo de potenciar el comercio del noroeste de la península ibérica. Convirtiendo a este puerto uno de los más interesantes para desglosar su tráfico Car-Carrier con el vehículo en régimen de mercancía.[11]

El Puerto de Vigo destaca por la calidad de sus servicios portuarios, ofrecido por un personal portuario altamente especializado.



ILUSTRACIÓN 12. VISTA AÉREA PUERTO DE VIGO.

Con una ubicación privilegiada en rutas marítimas, el Puerto de Vigo cuenta con más de 90 servicios marítimos regulares a los principales destinos de Europa, África y América. De ellos, destacan las líneas de tráfico *ro-ro*, tanto a nivel europeo, desarrollando un verdadero transporte marítimo de corta distancia o *short sea shipping*, como a nivel transoceánico. Mención especial requiere la Autopista del Mar, Vigo-Nantes- St. Nazaire, puesta oficialmente en marcha en enero de 2016 y que actualmente ya ha extendido su ámbito de alcance hacia el sur, hasta el puerto marroquí de Tánger.

Bajo la serie temporal seleccionada para estudio, el puerto de Vigo ha movido un total 4.329.228 vehículos. *Véase tabla 15.*

TABLA 14. VEHÍCULOS POR OPERACIÓN.

<i>Autoridad Portuaria de Vigo (2011-2019)</i>	
<i>Operación</i>	<i>vehículos movidos</i>
<i>Embarque</i>	3.410.371
<i>Desembarque</i>	289.188
<i>Em. Tránsito</i>	307.266
<i>Des. Tránsito</i>	322.403

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

De los cuales el 78.77% fueron exportados, el 6.68% importado, el restante fue tan sólo un mero tránsito es los muelles.

El puerto de Vigo presenta una serie estacional constante, posible derivación de los contratos con PSA ya que los volúmenes de vehículos que mueve oscilan entre los 30.000 vehículos anuales embarcados.

Presenta una actividad con similitudes al puerto de Santander donde la mayor actividad es mostrada en los meses de febrero, marzo, intermitente con mayo, junio, y tras la caída de agosto se obtiene de nuevo una mayor actividad en septiembre y octubre.

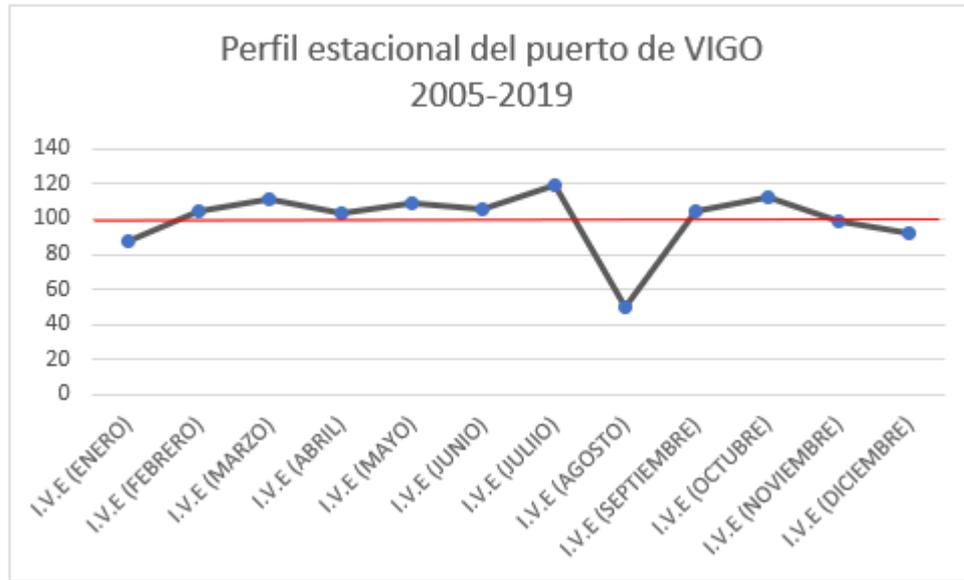


ILUSTRACIÓN 13. PERFIL DE ESTACIONALIDAD PUERTO DE VIGO.

Por otra parte, con respecto a la evolución en 2012 muestra un descenso pronunciado del 11 % consiguiendo remontar hasta un 23%, finalmente consigue con una estabilidad que le permite un crecimiento constante.

TABLA 15. VEHÍCULOS MOVIDOS POR EL PUERTO DE VIGO.

Evolución del tráfico de vehículos puerto de Vigo												
Año	Enero	Febr	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept	Oct	Novi	Dici
2010	10661	202	193	340	793	1163	3185	5246	38203	41667	40455	35531
2011	37744	41415	47085	46068	38460	40237	39767	21848	29399	45420	39493	34016
2012	27336	38815	39352	31047	35183	35562	47620	20152	39195	44521	35697	39550
2013	40175	44632	50976	39812	50320	50319	45399	22064	37843	43684	34429	37712
2014	34228	36875	44324	37325	35379	37181	41322	19013	34054	33849	36230	31722
2015	32030	39478	35876	34838	37023	49447	44143	19592	38201	36626	37976	36074
2016	32224	39396	37364	44997	41458	44102	40666	20100	45596	36880	34107	40586
2017	28809	41250	45018	39590	44255	49100	47705	22966	41577	48386	40284	37365
2018	31252	39401	41605	35933	44661	45691	41807	19346	25979	40241	40979	44216
2019	32771	42738	41020	41078	40552	38955	43115	26647	37248	46440	44967	45746

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

### 3.2.6 Puerto de Tarragona.

El puerto de Tarragona uno de los puntos neurálgicos de Cataluña, situado en el arco del mediterráneo y corredor del Ebro rodeado de una de las zonas industriales más relevantes del mediterráneo. En él confluyen las principales vías de comunicación, como consecuencia, es un punto estratégico para el comercio dentro del territorio nacional y Europa, canalizando exportaciones e importaciones con más de treinta rutas marítimas que lo conectan con los principales puertos del mundo.[12]

El área que comprende el núcleo comercial nace desde Cataluña, siguiendo con el valle del Ebro, Aragón, da La rioja y Navarra. Sin embargo, sus principales cargas no es la



rodada sino derivados del petróleo y agroalimentaria pero dada la triangulación de vértices industriales entre ellas la de automoción que comprende el puerto junto con Reus y Valls. Encontramos a Tarragona como la segunda área metropolitana de Cataluña con vocación exportadora. *Véase ilustración 3.*

Así mismo, el puerto de Tarragona en Cataluña tras el puerto de Barcelona el cual no es solo líder como puerto en Cataluña, sino que, a su vez en una gran potencia en España, hace de tarragona un foco de investigación respecto al tráfico car-Carrier.

El puerto de Tarragona durante la serie temporal movió un total de 1.132.096 vehículos.

TABLA 16. VEHÍCULOS POR OPERACIÓN.

<i>Autoridad Portuaria de Tarragona (2011-2019)</i>	
<i>Operación</i>	<i>vehículos movidos</i>
<i>Embarque</i>	<i>336.810</i>
<i>Desembarque</i>	<i>724.394</i>
<i>Em. Tránsito</i>	<i>33.462</i>
<i>Des. Tránsito</i>	<i>37.430</i>

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Presenta un carácter como puerto principalmente de importación, ya que el mayor volumen de los vehículos que mueve hace entrada en el Puerto, frente al 29.75% que sale. Sólo el 0.5% de los vehículos son de carácter transitorio. Respecto a su componente estacional el puerto de tarragona presenta un modelo multiplicativo.

TABLA 17. COEFICIENTES PARA LA DETERMINACIÓN DEL MODELO DE PUERTO

CV dij	CV cij	Modelo
4,888943533	0,633918015	MULTIPLICATIVO

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Como se observa en el siguiente gráfico, el perfil de estacionalidad de Tarragona presenta fluctuaciones de comportamiento similares, a las de sus homólogos anteriormente analizados, los meses de mayor producción son febrero y marzo, frente a agosto, mes por excelencia menos productivo en cada uno del puerto.

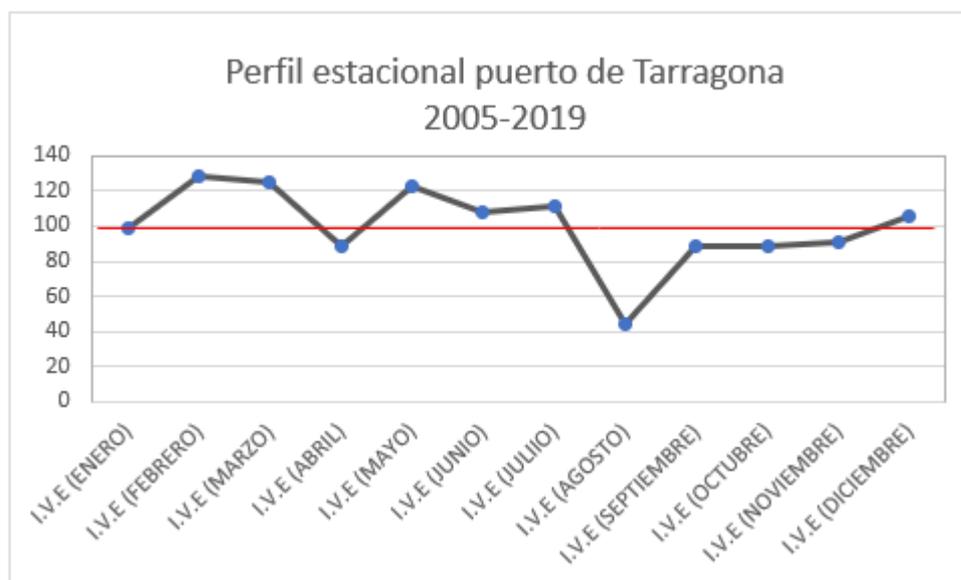


ILUSTRACIÓN 14. PERFIL DE ESTACIONALIDAD PUERTO DE TARRAGONA.

La evolución del puerto de Tarragona dentro del periodo seleccionado, presenta los mejores resultados de vehículos operados en 2016 tras remontar una caída en 2012 del 15 % respecto de 2011 en el segmento de embarques mientras que en desembarques muestra una pequeña caída en 2012 no tan pronunciada seguida de un crecimiento constante. **Véase tabla 18.**

TABLA 18. VEHÍCULOS MOVIDOS POR EL PUERTO DE TARRAGONA.

Evolución del tráfico de vehículos puerto de Tarragona												
Año	Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
2010	542	458	540	477	3			18		2	213	9
2011	4879	8837	6509	4821	5647	8264	7849	2834	5173	4796	7673	4691
2012	8370	9431	6154	5176	4140	6285	3806	1462	1719	3434	3971	3338
2013	2844	16971	8926	2750	3938	4038	4898	1447	5760	2795	3453	5234
2014	5158	4138	4628	5196	5554	5251	6013	3349	6741	4336	4338	5174
2015	6367	10564	12848	7266	13439	10603	8042	6774	10411	9447	7988	10130
2016	13079	14099	17502	12385	14288	15154	10593	8746	8931	10483	16009	12045
2017	15932	18403	19852	10312	24904	18214	17175	9469	15327	16593	15463	18716
2018	18231	16778	20422	13284	20471	15651	11795	10040	13169	17359	19435	18103
2019	14146	17220	22886	20210	22263	19446	16056	12537	14170	15079	15649	21543

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La recta de tendencia lineal presenta una bondad de ajuste del 0.865 augurando una posición del puerto como participante mayoritario del tráfico de vehículos en régimen de mercancía, posiblemente avalado por su puerto amigo, Barcelona.



## 4. Evoluciones agregadas y posiciones competitivas de los puertos base.

En este apartado se pretende exponer la posición competitiva que ocupa cada puerto durante el periodo analizado 2011-2019. Posicionando cada uno de ellos en función de su crecimiento dentro de la matriz (BCG), la cual define el segmento en el que se encuentra y opera cada uno de los puertos en lo que al tráfico Car-Carrier supone. Se diferenciando cuatro sectores dentro de la matriz: Participante minoritario, elevado potencial, participante estelar o finalmente como líder maduro.

La posición de cada uno de ellos depende únicamente de su evolución de la cuota de mercado y tasa de variación que presentan dentro del periodo de análisis. Para éste en particular se dividen en tres periodos para poder ver de una forma más detallada la evolución de estos. Así mismo pudiendo identificar el puerto de mayor crecimiento o en su defecto el que presente retroceso. Los ejes que delimitaran la matriz que muestra cada segmento en el que se encuentra cada uno de los puertos vendrá determinado por: el promedio de la cuota de mercado (siendo eje de abscisas) y promedio total ponderado (eje de ordenadas).

### 4.1 Metodología de cálculo.

#### 4.1.1 Tasa de variación anual

Partiendo de las unidades de vehículos para cada año, un aspecto del mundo del tráfico del vehículo en régimen de mercancía de gran interés consiste en conocer las variaciones que ha experimentado la variable objeto (unidades de vehículos) de análisis a lo largo del tiempo. Es por ello por lo que mediante la tasa de variación anual observamos los cambios de un año con respecto al anterior en cifras.

La tasa de variación anual, de aquí en adelante como  $\Delta V$  (variación de vehículos) se expresa como;

$$\Delta V = \frac{V_T}{V_{T-1}} - 1 \quad (8)$$

$$\Delta V = \left( \frac{V_T}{V_{T-1}} - 1 \right) * 100 \quad (9)$$

Siendo  $V_T$  la cantidad de unidades de vehículos de un año. Y,  $V_{T-1}$  la cantidad de vehículos del año consecutivo. Pudiendo ser expresada en tanto por uno o en tanto por cien.

#### 4.1.2 Cuota de mercado.

La cuota de mercado es la fracción o porcentaje que se tendrá del total de mercado disponible o del segmento del mercado que está siendo suministrado por el puerto

Puede ser expresado como el total de unidades de vehículos operados por el puerto anual partidos por las unidades totales del conjunto de puertos para ese mismo año



$$CM = \frac{V_i}{\sum V_i} \cdot x100 \quad (10)$$

a) Promedio de la cuota de mercado:

Este dato vendrá dado por la media aritmética de las cuotas de mercado de cada puerto base calculadas entre el número total de puertos, expresada en porcentaje.

$$X = \frac{\sum CM}{N} \quad (11)$$

Siendo  $N$  el número total de puertos.

b) Promedio total ponderado.

El límite vertical se define por la media total ponderada, el cual esta expresado por el cociente del sumatorio de los productos de la tasa de variación con la cuota de mercado de cada puerto base entre el promedio de la cuota de mercado calculada en el apartado anterior.

$$Y = \frac{\sum \Delta V \times CM}{X} \quad (12)$$

De esta manera disponemos los resultados obtenidos para el embarque y desembarque de los puertos base del sistema portuario español, ya que no se ha dispuesto de los datos en su totalidad del tránsito, es por ello por lo que el análisis se realiza para las dos operaciones con más peso de la serie temporal 2011-2019.

## 4.2 Posiciones competitivas.

Fleisher y Bensoussan [18] definen la posición competitiva de una compañía como la posición que ésta tiene en comparación con sus competidores en el mismo mercado o industria. El conocimiento de las posiciones competitivas permite a las compañías hacer planes tácticos para mantener o mejorar sus posiciones actuales o, incluso, valorar retirarse del mercado. Por lo tanto, el conocimiento de la posición competitiva de una compañía, y la de sus homólogos, es fundamental.

Para el caso particular de los puertos, la intensa competencia entre puertos puede asociarse con el contexto de la globalización comercial y la economía internacional, obligando a los puertos a reestructurar su gestión y operaciones para aumentar su competitividad y participación en el mercado.



Existen varios métodos para medir e identificar la posición competitiva de un conjunto de puertos, entre los que destaca la matriz de crecimiento-cuota de mercado o matriz de *Boston Consulting Group* (BCG). Esta matriz está dividida en cuatro sectores, cada uno de los cuales corresponde con una posición en el mercado. Para el periodo analizado, la frontera en el eje X está definida por el promedio de la cuota de mercado y la frontera en el eje Y queda definida por el promedio de la tasa de variación de todos los puertos analizados.

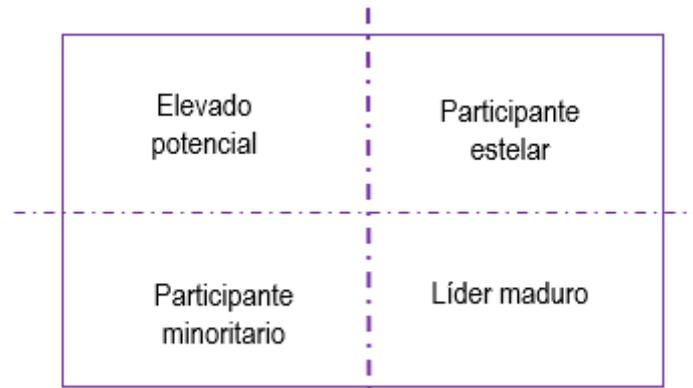


ILUSTRACIÓN 15, MATRIZ DE POSICIONES COMPETITIVAS.

Los participantes minoritarios y los participantes estelares representan los puertos menos y más auspiciosos, respectivamente. Los participantes estelares representan puertos dominantes con alta participación de mercado y alto crecimiento. Sin embargo, esta posición es difícil de mantener durante un largo plazo [19].

Los participantes minoritarios representan puertos con una tasa de crecimiento baja, inferior a la tasa media de crecimiento, tienen una pequeña participación en el mercado y un rendimiento general de los puertos que no es bueno en comparación con los restantes puertos. La posición de elevado potencial representa puertos con un alto crecimiento, pero una baja participación en el mercado; los puertos que pertenecen a esta categoría generalmente aún no han alcanzado el estado de madurez y podrían pasar a la posición de participante estelar si mejoran el rendimiento por medio de mantener su alta tasa de crecimiento y ganar participación de mercado a sus rivales con el tiempo. Por último, los líderes maduros dentro de esta matriz representan puertos que han alcanzado la madurez y tienen una posición estable con baja tasa de crecimiento y alta participación en el mercado. A través de estas cuatro categorías de la matriz de crecimiento-cuota de mercado,

El análisis competitivo se va a realizar para las operaciones más representativas en puertos como son el embarque y desembarque de los vehículos en puerto, ya que los movimientos en tránsito no aportaban una representación de peso por igual en los puertos base como para ser reflejado.

**Véanse las ilustraciones 16 y 17.** Muestran los resultados gráficos del análisis BCG para el embarque y desembarque de vehículos, respectivamente, dentro de la serie temporal 2011-2019. El análisis se ha dividido en tres bloques, cada uno engloba tres años (2011/13-2014/16-2017/19) para ver de forma más clara la posición competitiva de los cada uno de los puertos.



TABLA 19. CLAVE DE COLORES PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS AA.PP

AA. PP	COLOR BURBUJA
Vigo	Verde
Pasajes	Marrón
Tarragona	Amarillo
Santander	Rosado
Barcelona	Rojo
Valencia	Azul

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La dirección marcada con las flechas inicia con la serie 2011-2013 y finaliza con 2017-2019 mostrando la posición de cada puerto en cada instante definido. En el Embarque claramente destacan como puertos de peso en el mercado Valencia, Vigo y Barcelona. Y con gran crecimiento Santander. Tal y como reflejan los datos analizados anteriormente. Así mismo, ocurre de igual manera con Pasajes y Tarragona siendo los participantes minoritarios de las operaciones. Dada la posición se puede establecer base para futuras tomas de decisión de las Autoridades Portuarias (AA. PP), Invertir, afianzar, apostar o abandonar, en cuanto a lo que se refiere al Tráfico de vehículos en régimen de mercancía.

A diferencia con el embarque, Santander presenta en operaciones de desembarque de vehículos una posición consolidada como participante estelar / líder maduro, junto a Barcelona y Valencia mientras que Vigo, pasa de ser participante minoritario a gran potencial. Tarragona pega el gran salto obteniendo peso en la entrada de vehículos por el norte del mar mediterráneo.

Dependiendo del tipo de operación que se realice y según que tráfico en concreto, un mismo puerto puede presentar diferentes posiciones competitivas. Como se observa en las matrices anteriores, ninguno de los puertos ha realizado el camino idéntico al anterior lo que deja este análisis como una herramienta para identificar factores cualitativos en el proceso de evaluación y selección de una estrategia ya que aquí la variable tiempo es dinámica con respecto a la decisión a tomar, y la estrategia adecuada en un instante de tiempo, puede ser tanto exitosa como un fracaso según el momento de su implantación.

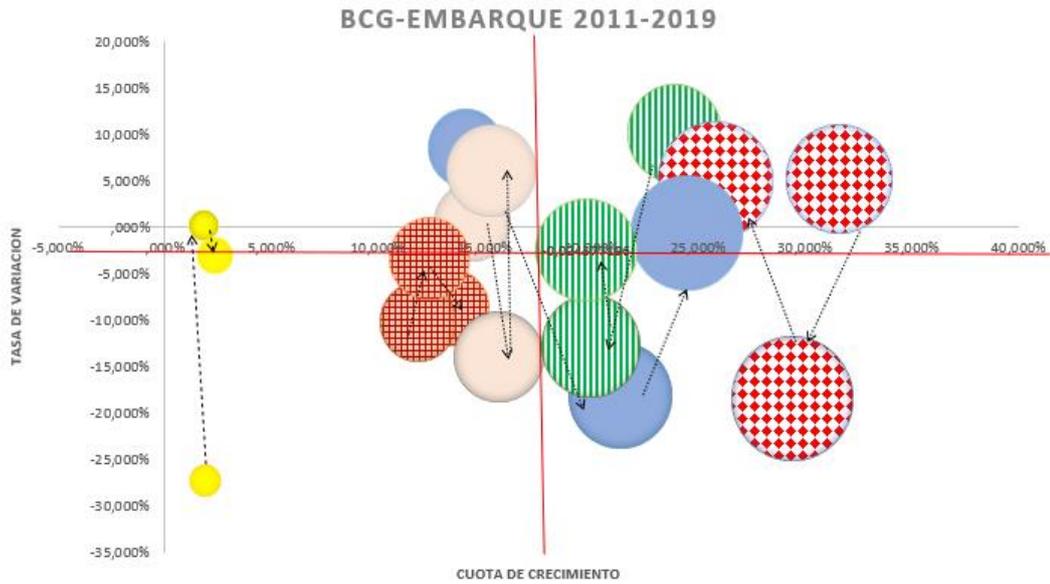


ILUSTRACIÓN 16, POSICIONES COMPETITIVAS EN EL EMBARQUE.

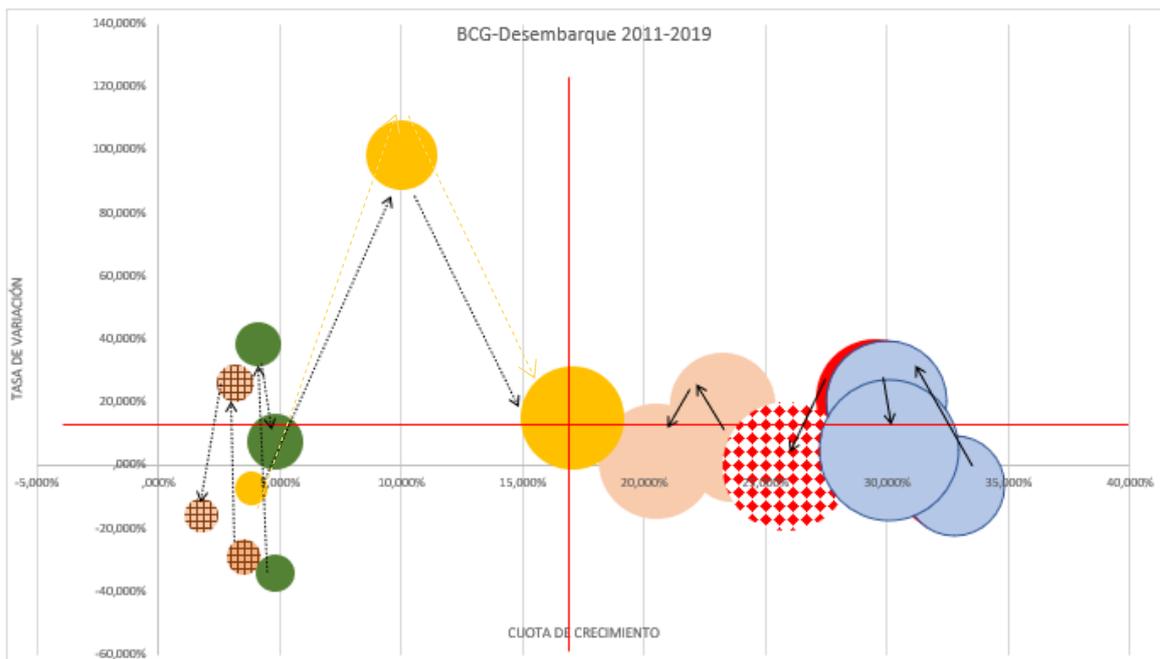


ILUSTRACIÓN 17. POSICIONES COMPETITIVAS EN DESEMBARQUE.



## BLOQUE II. Remotorización del buque



## 1.Introducción.

Dadas las últimas regulaciones de normativa a nivel mundial relativas a la emisión de azufre a la atmósfera en motores de combustión interna, muchas navieras se están viendo en la tesitura de adecuar su flota para poder seguir explotando ésta. El transporte e industria marítima tiende un estrecho lazo con; la conservación medio ambiental, contaminación del aire en forma de dióxido de azufre (SO<sub>x</sub>) , Monóxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y materia particulada (PM).

La lucha del comité de protección del medio ambiente junto con la OMI en su objetivo de la descarbonización total, aborda estrechamente al tráfico marítimo. En consecuencia, la propulsión marina, ha entrado en un proceso de innovación y desarrollo que permita cumplir las leyes de emisiones para que permita a la flota de buques operar con normalidad, hasta llegar a una solución plenamente en armonía con el medio ambiente. Es por ello, que las compañías navieras están empezando a tomar decisiones sobre su flota; remotorizar sus buques, desguzarlos o embarcarse en nuevas construcciones.

En base a todo ello, este segundo bloque, se realiza la remotorización de un Car-Carrier que navega en la ruta marítima que navega desde el sur al norte de Europa. La elección de la ruta tiene su base en los resultados obtenidos en el primer bloque. En la ruta marítima, se podrá observar la incidencia de la remotorización en el coste de realización de la misma, en cuanto al combustible usado.

Los objetivos de este bloque para realizar el análisis son:

1. Selección de un buque Car-Carrier. Cálculo de la resistencia al avance y potencia necesaria a instalar en el buque.
2. Selección de la ruta de tráfico marítima Ro-Ro.
3. Selección de un motor que cumpla con la normativa IMO TIER II.
4. Cálculo del coste de la ruta en base al combustible que no cumpla la normativa.
5. Revisión del Marco legislativo.
6. Remotorización del buque; selección de motores en base al cumplimiento del convenio VI, Marpol e IMO TIER III (Euro 6)
7. Cálculo del coste de la ruta a realizar con las diferentes alternativas propulsivas.



## 2. Evolución histórica de la flota de buques Car-Carrier.

Los primeros buques de carga rodada “Ro-Ro” de concepto moderno, surgieron a partir de los años 20-30. Con capacidad de 700 a 800 vehículos, y con el objetivo de transportar los primeros coches americanos a través de grandes lagos para su comercialización. Un buque de esta primera generación fue el “Comet” 1953 disponía de 2000 m lineales de carga, con acceso horizontal desde popa y el costado.



ILUSTRACIÓN 18. BUQUE COMET (1953)

Su gran evolución no llegó hasta la segunda guerra mundial (WWII) con el uso, para el desembarco de equipos bélicos, este tipo de buque se denominó LST (Landing Ships Tanks) y alcanzaron una capacidad de 2000 TPM. En 1946, al finalizar la guerra, *la Atlantic Steam Navigation Company* se hizo con tres de ellos para su uso comercial, renombrándolos como *Empire Baltic*, *Empire Cedric* y *Empire Celtic*, poniendo el germen de los futuros buques Ro-Ro. Esta segunda generación destacó por su flexibilidad, capacidad de integración con otros sistemas de transporte y velocidad de operación han hecho que este tipo de buques sea cada vez más popular en muchas rutas marítimas, aunque se centran en rutas de corta distancia como Países Nórdicos y canal de la Mancha.

La operatividad consistía en el transporte desde la fábrica, donde se cargan los camiones, hasta el almacén terminal donde se descargan, de esta manera, el radio de acción de los operadores terrestre aumenta. El Ro-Ro nos permite desplazar una mayor carga de volumen, aprovechando al máximo el espacio disponible mediante puntales de bodega ajustables. Como causa directa de este servicio, disminuyen considerablemente los gastos en gasolina, vehículos y conductores.

En contra de su éxito comercial, el hecho de la existencia de accidentes preocupantes. Después del Titánic, el hundimiento repentino y catastrófico del M/S Herald of Free Enterprise un viernes 6 de marzo de 1987 se considera como el peor accidente británico, junto con la pérdida todavía más trágica del M/S Estonia en septiembre de 1994. A consecuencia de estos incidentes, la Organización Marítima Internacional (OMI) aprobó una serie de modificaciones al Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar (SOLAS) que tienen como objeto garantizar que no se produzcan este tipo de accidentes.

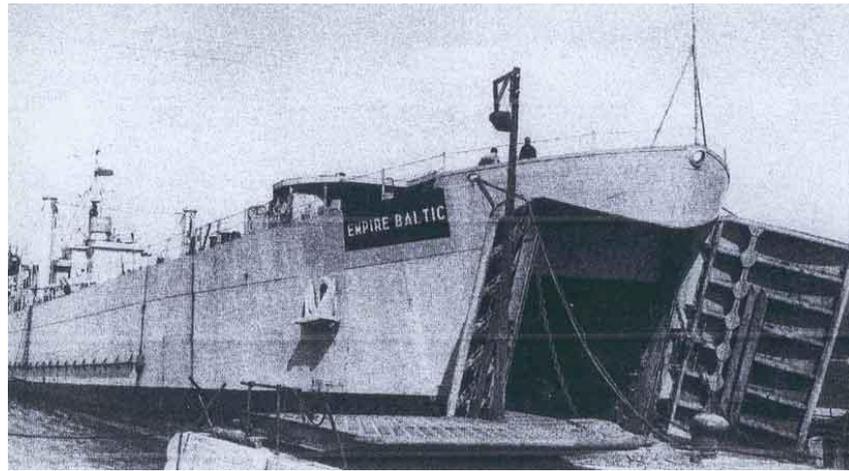


ILUSTRACIÓN 19. BUQUE EMPIRE BALTIC

Inconvenientes referidos a temas de seguridad y estanqueidad desembocó en nuevos proyectos Ro-Ro que llevaron a adaptar al buque al tráfico que desempeñaban.

El crecimiento del mercado japonés en los EE.UU. y Europa Occidental durante los años 1964-1965, se desarrollan los primeros buques PCC (Pure Car Carriers). Éstos se especializaban en el transporte de automóviles exclusivamente, y se distinguían de los PCTC (Pure Car Carriers Truck Carriers). Esta necesidad de abarcar nuevos mercados, con rutas transoceánicas provoca el nacimiento de la tercera generación de buques de carga rodada.

Caracterizados por la autosuficiencia, la autonomía, la eficacia del transporte y reducción de estancia en puerto. Empieza la economía de escala. También se produce un cambio estructural en el modelo de rampa de acceso, para la carga del buque. Dicha rampa se diseña para aumentar la flexibilidad en las operativas, llevando a cabo un papel fundamental en la globalización de este tipo de buques. Es entonces cuando la altura del muelle adquiere una nueva importancia, así como las variaciones de las mareas. Por eso se introducen rampas semi-orientables y orientables. De este modo, se supera el problema de la segunda generación, con esa exclusividad del uso para una única travesía determinada. Así se pretende que los buques puedan llegar a cualquier puerto, sin limitación alguna.

En diciembre de 2007, las compañías, **Wilh. Wilhelmsen** y **Wallenius Lines**, contrataron al astillero japonés, **Mitsubishi Heavy Industries** la construcción de una nueva serie de buques Ro-Ro denominada **Mark V**, diseñada para el transporte de grandes cantidades de carga rodada siendo un buque respetuoso con el medio ambiente.

Las medidas adoptadas en la fase de diseño para conseguir este objetivo pasaron por optimizar las formas del casco para reducir la resistencia al avance, reducir la descarga de gases contaminantes a la atmósfera o la protección reforzada contra derrames de vertidos. Tanto es así que la optimización de las formas, junto con el estudio pormenorizado de las líneas del timón consiguen un ahorro de entre el 15 y el 20% de combustible comparado con buques similares, mientras que en la cámara de máquinas está instalado un generador que aprovecha el calor de los gases de exhaustación para la generación de energía eléctrica. Como anteriormente he nombrado esta tercera generación:



- 1- Plantea movimientos entre cubiertas y acceso entre las mismas.
- 2- Capacidad del buque de aguantar en cualquier condición de marea y seguridad del trincaje de la carga.
- 3- Seguridad en función de las rutas a realizar. Minimizando la pérdida de espacio de carga sin sacrificio en la seguridad del buque.
- 4- Mejora hidrodinámica y de estabilidad.



ILUSTRACIÓN 20-BUQUE WALLENIUS WILHELMSSEN

El buque Ro-Ro, acrónimo del término en inglés ‘Roll On-Roll off’ sirve para referenciar a cualquier tipo de barco que transporta carga rodada, ya sean automóviles, camiones o vehículos industriales, entre otros.

Este sistema de transporte marítimo se beneficia de rampas, tanto presentes en el barco como fijas en tierra, para hacer práctica y segura la carga y descarga de los vehículos transportados.

La carga rodada accede al buque a través de las compuertas alojadas en popa o proa para facilitar el acceso y la rápida carga y descarga permite un radio de acción más amplio para los camiones y remolques, así los operadores de transporte terrestre pueden extender su radio de acción.

Servicio logístico perfecto para agilizar operaciones, minimizando averías por estiba y desestiba, lo cual supone un servicio rápido y seguro.

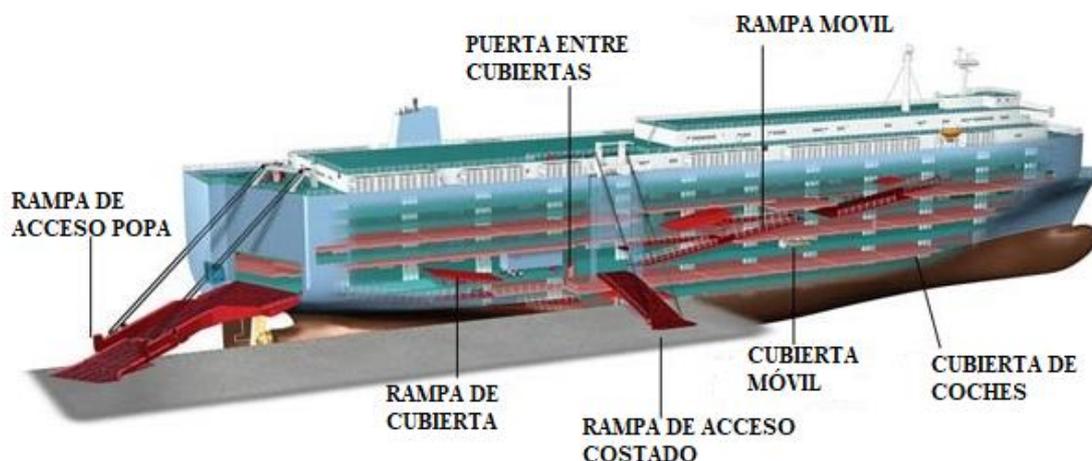


ILUSTRACIÓN 21. CONFIGURACIÓN DE UN CAR-CARRIER

## 2.1 Tipos de buques RO-RO

Durante la evolución del buque de carga rodada se han dado diferentes tipos de buques según la especialidad del tipo de transporte a realizar y capacidad a transportar. Entre ellos se encuentra:

- Car-Carrier
- Ferry:
- Ro/Pax
- Ro-Ro/Container
- Roto-Loader
- ConvRo

### 2.1.1 Car-Carrier

Construidos en su época por la necesidad de una demanda altísima del transporte de vehículos, lograron reducir de forma sustancial los daños que aparecían durante las travesías. Podemos considerar a este tipo de buque como el más grande, en lo que a la cabida de coches se refiere, dentro de su clasificación. Con capacidades para unos 2.000 o 3.000 coches a lo largo de sus cubiertas. Pero incluso, los más grandes del mundo llegan a transportar más de 7.000 coches repartidos en 12 cubiertas. Las rampas de los Pure Car Carrier se suelen construir con dos formas anguladas, para que el buque pueda atracar al muelle de forma paralela, sin necesidad de que haya un tacón en el atraque.



### 2.1.2 Ferry.

Sin duda este tipo de buque podemos calificarlo, como de los más conocidos del sector. Normalmente se usan para el transporte de coches, camiones y personas a lugares que no distan más de 300 millas entre sí. Este tipo de ferries Ro-Ro dedicados al transporte de coches, suelen tener un diseño un tanto arriesgado, en cuanto a que las grandes puertas externas están cercanas a la línea de flotación, con una cubierta para los vehículos de mayor tamaño. Suelen trabajar en líneas regulares y a diferencia del Car Carrier puros, el pasaje también puede introducir los coches en las cubiertas del buque. A su vez, los camiones también pueden llevar su propio chofer, independiente del de la terminal. Este hecho es importante a tener en cuenta, para la hora de hacer tanto la carga como la descarga.

### 2.1.3 Ro/Pax

El acrónimo RO-PAX es utilizado cuando nos referimos a un buque Ro-Ro, con capacidad para transportar más de doce pasajeros. Este tipo de buque se encuentra dentro la familia de los ya mencionados ferries. Se puede considerar un buque de pasaje, cuya principal función es el transporte descarga rodada. Su aplicación es para rutas cortas, permitiendo su uso para el transporte de personas, quienes pueden ser bien los conductores de los vehículos o bien pasajeros.

Son una alternativa a los grandes ferries, presentando un transporte menos masificado y a su vez con un elevado confort, tanto en lo relativo a estabilidad como sus instalaciones. Además, tienen la ventaja de acceder a puertos con restricciones de calado y eslora, aumentando la flexibilidad de su utilización.

### 2.1.4 Ro-Ro/Container

Este tipo de buque es una combinación entre un Portacontenedores y un buque Ro-Ro, de ahí viene su acrónimo CONRO. Este diseño híbrido incluye generalmente una cubierta inferior, únicamente dedicada al transporte de vehículos. Por otro lado, las cubiertas superiores tienen capacidad para almacenar los contenedores. Como se observa en el ejemplo de la fotografía, algunos están equipados con sus propias grúas, para poder hacer la carga y descarga de los contenedores, sin necesidad de las grúas pórtico de tierra. Esto le da un plus de flexibilidad en los puertos de destino, ya que no depende de los medios del puerto siguiente.

### 2.1.4 Roto-Loader

En este caso roto-loader no da nombre a un tipo de buque, sino a un sistema de carga, para el uso de mercancía rodada. Estos buques utilizan un elevador para cargar dicha mercancía. Ésta suele ser elevada por el sistema roto-loader y la introduce por encima del costado del buque y no a través de él. Para ello, se eleva



la carga hasta la altura necesaria, para después hacer un giro de 180°, sobre un bastidor giratorio. Finalmente, la hace descender al nivel de cubierta seleccionado, dentro de la bodega.

El sistema contiene una plataforma giratoria, que tiene dos pares de columnas verticales, para sostener dos elevadores. La principal ventaja sobre el resto que utilizan rampa, es el espacio que queda más aprovechado y la menor exposición de gases. De este modo, se logra reducir entre 3 y 4 veces la contaminación.

Por el contrario, su consumo es mayor y también produce una demora en el ciclo descarga, además de estar más limitado por el peso de ésta.

### 2.1.5 Convencional / RoRo (ConvRo)

Este tipo de buque combinado no es nada común. Tiene la singularidad de contar con un equipo de carga seca y con el acceso de carga rodada para una o más cubiertas. Este tipo de barco suele estar equipado con grandes escotillas, a través de las cuales se cargan ciertas cubiertas con el ya mencionado sistema Lo-Lo.

## 3. Transporte marítimo. Rutas de transporte.

El transporte representa una de las actividades humanas más importantes en todo el mundo. Es un componente esencial de la economía y desarrolla un rol importante en las relaciones espaciales entre dos puntos, en este caso geográficos. Su principal objetivo es cumplir con una demanda de movilidad. Generando vínculos valiosos entre regiones y actividades económicas.

El principal medio para salvaguardar la distancia son las rutas de transporte, autopistas del mar, itinerarios regulares que configuran la fisiografía del transporte marítimo, operando en su propio espacio; Ríos, mares u Océanos.

Autopistas marítimas, con el principal objetivo de eliminar muros en el transporte geográfico terrestre, son el puente invisible esencial en el “todo” del transporte mundial. Son rutas de punto de paso obligatorios situados estratégicamente de limitaciones físicas y fronteras políticas que crean arcos en la superficie de mares y océanos.

El continente asiático lidera las principales rutas marítimas de comercio, ya que el 70% del top de puertos en el mundo se encuentran en China. Esto tan sólo resalta la relevancia que tiene este país en el comercio y la logística internacional.

Hemos observado cómo su importante crecimiento ha cambiado el mercado de manera permanente y se ha convertido en el mayor proveedor del mundo entero.

Según Alberto Ruibal, Doctor en gestión de la logística en comercio internacional; “se han establecido rutas como redes globales que cubren principalmente el eje Este-Oeste-Este”. Rutas marítimas del lejano oriente Lejano Oriente – Mar Rojo – Canal de Suez – Mar Mediterráneo – Océano Atlántico – Canal de Panamá – Océano Pacífico – Sudeste Asiático – Océano Índico – Lejano Oriente. Por otra parte, en el eje Norte – Sur – Norte. (Ruibal, 2010 p.47)



Uno de los principales corredores estratégicos del transporte marítimo se encuentra en Asia, entre los océanos Índico y Pacífico, responsable del mayor tráfico mundial de productos petrolíferos y de barcos de transporte de contenedores. En ese sentido, “el Estrecho de Malaca, el de Ormuz y el de Bad-el Mandeb, juntamente con [el Mar de China Meridional, el Mar de China Oriental], el Golfo de Bengala y el cercano Mar de Arabia” (Olier, 2012, pp.149-151) adquieren dimensiones geoeconómicas relevantes por la confluencia y la necesidad cubrir intereses económicos y políticos de las potencias marítimas que operan en la región, tales como los Estados Unidos, China, Japón, India, además de los países del Sudeste Asiático, entre otros actores. En tales corredores, se hace imprescindible el orden del mar y la libertad de navegación, conforme con el derecho internacional.

En la *ilustración 22*, se observa la densidad de la flota comercial en sus cinco categorías destacadas, durante todo un año de observación, 2012. El principal objetivo era la medición de CO<sub>2</sub> cada hora que genera el transporte marítimo mundial. Gracias a ella, se puede hacer una fotografía aérea de las principales autopistas marítimas



ILUSTRACIÓN 22. DENSIDAD DE TRÁFICO MARÍTIMO MUNDIAL (2012)

Las categorías definidas en el mapa son:

- 1- **Color Amarillo, Transporte de contenedores:** El transporte marítimo de contenedores es el método óptimo de transporte de carga a través de rutas marítimas. La globalización actual del comercio ha sido posible gracias a la contenerización. La carga contenerizada se mueve desde un punto en tierra a otro punto en tierra a través de una red multimodal que une buques, terminales portuarias, camiones y trenes. En el corazón de esta red de servicio está la planificación, el seguimiento y la entrega de la carga y los sistemas de información necesarios para proporcionar seguridad y fiabilidad a los cargadores. Los contenedores son generalmente transportados por servicios de transporte marítimo en régimen de línea regular, con secuencias fijas de puertos de escala en una frecuencia de servicio regular, publicados por las compañías navieras en sus páginas web con antelación para atraer mercancías de cargadores.



- 2- **Color Azul, Transporte de graneles secos:** El transporte marítimo de graneles sólidos hace referencia al transporte de graneles sólidos. Su flota de graneleros tiene como objetivo responder a la necesidad de adaptarse a la heterogeneidad de los productos a granel, los diferentes tamaños de los cargamentos, las limitaciones de las rutas comerciales y las condiciones geográficas de los puertos de escala. Los graneleros son, por tanto, buques polivalentes en términos de tamaño y equipamiento. Estos buques pueden llevar una amplia gama de diferentes tipos de carga y con frecuencia son capaces de recoger carga de retorno para evitar el viaje en lastre, a excepción de los de mayor tamaño.

Los graneles principales son: carbón, mineral de hierro, grano, bauxita-alúmina y fosfatos, de los cuales, según Clarkson, se transportaron en 2010 por mar en todo el mundo unos 2.330 millones de t, más del 70% del total de los graneles sólidos.

- 3- **Color Rojo, Transporte de graneles líquidos:** El transporte marítimo de graneles líquidos hace referencia al transporte de crudo y derivados del petróleo. Su flota de tiene que ser especializada y como objetivo responder a la necesidad de adaptarse a la heterogeneidad de los productos a transportar.
- 4- **Color Morado, Transporte de vehículos:** El transporte de vehículos hace referencia al transporte de carga rodada, vehículos, camiones, autobuses etc. Su flota es especializada según la capacidad de carga del buque y de su operatividad como bien se ha descrito en el apartado 2.

Gracias al mapa de densidades de flujo de las diferentes categorías de tráfico marítimo descritas por UCL, se ha podido extraer de forma aproximada la red de transporte de líneas regulares que sigue el transporte de vehículos. Viendo su concentración en el Mar Báltico, Golfo de Botnia, Mar rojo, Mar del Norte, Mar de Japón, canal de la mancha, y costa oeste de América del Norte. Véase *ilustración 23*. En ella, se ha intentado trazar el flujo de transito que sigue la flota de transporte de vehículos, destacando con más énfasis, las zonas geográficas que muestran más afluencia. Hay que tener en cuenta que el tráfico no es constante a lo largo del año como se ha podido deducir en bloque I de este trabajo, donde el perfil de estacionalidad muestra vacíos temporales con respectos a otras épocas del año.



ILUSTRACIÓN 23. ESTIMACIÓN DE LA VÍAS MARÍTIMAS DE TRÁFICO CAR-CARRIER.

La flota mercante mundial está compuesta por aproximadamente unos 90.000 buques con un arqueado bruto superior a 100 t. Esto significa que existen unos 120.000 motores destinados específicamente a la propulsión instalados en los buques. De un estudio comparativo se ha obtenido que los sistemas de propulsión marina más comunes son; que alrededor del 95% de los buques, opera con motores de combustión interna o “diésel”, y que solamente el 5% emplea otros sistemas.

Esto implica que el transporte marítimo es uno de los principales emisores de los contaminantes a la atmosfera. Hoy en día, un factor a tener en cuenta en este tipo transporte, es la restricción a nivel mundial sobre las emisiones de contaminantes a la atmosfera, en concreto el dióxido de carbono, CO<sub>2</sub> y Óxidos de Azufre, SO<sub>x</sub>. Además de todo el marco legislativo que le rodea, del cual hablaremos más adelante.

Las emisiones de gases de escape en los grandes motores marinos están conformadas por nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y vapor de agua, con pequeñas cantidades de monóxido de carbono, óxidos de azufre y nitrógeno, hidrocarburos parcialmente quemados y partículas. Las emisiones de SO<sub>x</sub> y NO<sub>x</sub>, junto con el dióxido de carbono son de interés especial por sus efectos en la salud humana y en el medioambiente.

### 3.1 Marco legislativo. MARPOL

El objetivo de abordar la contaminación atmosférica ocasionada por los buques se abordó en 1973, con la adopción del convenio MARPOL. Casi paralelamente en 1972 en Estocolmo se estaban llevando a cabo la conferencia de Naciones Unidas sobre el medio humano, donde se empezó la lucha contra la acidificación, más conocido como la lluvia acida. En base a este término hay que señalar que se produce principalmente por la concentración de dióxido de azufre y el Óxido de nitrógeno que proceden de las emisiones de la automoción y tráfico marítimo.

En Ginebra en 1979 se procedió a la firma del convenio sobre la contaminación atmosférica transfronteriza, a larga distancia, firmado por 34 gobiernos y la Unión Europea. Es decir, se llevó a cabo la creación de una herramienta vinculante de carácter internacional y jurídico que tratara el problema de la contaminación.



Sendos protocolos posteriores fueron firmados con el objetivo de reducir la emisión de azufre (1985), Óxido de nitrógeno (1988), control de emisiones de compuestos orgánicos volátiles (1991) y una mayor reducción de las emisiones de azufre (1994).

En 1987 fue firmado el tratado de Montreal, llevado a cabo con el objetivo de la protección del medio ambiente para en la eliminación de aquellos elementos que inducen a la destrucción de la capa de ozono. Años más tarde en Copenhague (1992) se firmó de nuevo otro protocolo que se sumaba al de Montreal, prohibiendo sustancias de transición y para la eliminación gradual del clorofluorocarbono (CFC), y el bromuro de metilo.

El uso de los CFC en el transporte marítimo estaba ligado íntimamente con la refrigeración del buque, carga de contenedores, aislamiento de bodegas, sistemas de aire acondicionado en lugares de la habilitación de la tripulación.

En 1980, en la OMI, el comité de protección del medio ambiente (CPMM) planteó llevar a cabo el estudio de la calidad del fuel, con relación con las prescripciones en la descarga del anexo I y abordó el tema de la contaminación atmosférica. Además, la Segunda Conferencia Internacional para la Protección del Mar del Norte, celebrada en noviembre de 1987, emitió una declaración en la que los ministros de los Estados del Mar del Norte acordaron emprender acciones en el seno de los organismos competentes, como la OMI. "Con objeto de mejorar las normas de calidad de los combustibles pesados y apoyar activamente las tareas destinadas a reducir la contaminación marítima y atmosférica".[23]

En 1990, Noruega realizó ponencias al comité de protección del medio marino en las que ofrecía una visión general de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, en relación a:

- Las emisiones de dióxido de azufre de los buques se han estimado entre 4,5 y 6,5 millones de toneladas por año, es decir, un 4% de las emisiones mundiales de azufre. Las emisiones en mar abierto se difunden y los efectos son moderados, pero contribuyen significativamente a los problemas ambientales a lo largo de ciertas rutas, entre las que figuran el Canal de la Mancha, el Mar de la China Meridional y el Estrecho de Malaca.
- Las emisiones de óxido de nitrógeno de los buques se han estimado en unos 5 millones de toneladas por año, es decir, cerca del 7% del total mundial. Las emisiones de óxido de nitrógeno causan o agravan los problemas regionales, entre ellos el de la lluvia ácida, así como los problemas de salud en las zonas portuarias.
- Las emisiones de CFC de la flota mercante mundial se han estimado en 3000 - 6000 toneladas, es decir, entre el 1% y el 3% anual de las emisiones mundiales.
- Las emisiones de halones de los buques se han estimado en 300-400 toneladas, es decir, un 10% del total mundial.

En consecuencia, de todas esas deliberaciones, en 1991 se dio la resolución A.719 de la OMI sobre la prevención de la contaminación del aire por los buques. Esta resolución pidió al CPMM que redactara un proyecto de nuevo Anexo al MARPOL 73/78 sobre la prevención de la contaminación atmosférica. El nuevo proyecto de Anexo fue elaborado durante los seis años siguientes, adoptándose en la Conferencia de septiembre de 1997 mediante un Protocolo del Convenio en el que se incluyó el nuevo Anexo.



Este nuevo Anexo VI del MARPOL 73/78, entraría en vigor 12 meses después de la fecha en que haya sido aceptado por 15 Estados cuyas flotas mercantes combinadas representen no menos de 50% del tonelaje bruto de la marina mercante mundial. Hasta octubre de 1998 dos países habían ratificado el Anexo VI. [24]

El 18 de mayo del 2004, Samoa depositó su ratificación como Estado número 15 (junto con Bahamas, Bangladesh, Barbados, Dinamarca, Alemania, Grecia, Liberia, Islas Marshall, Noruega, Panamá, Singapur, España, Suecia y Vanuatu). No fue hasta dicha fecha, que el Anexo VI fue ratificado por el 54.57% del tonelaje de la flota mundial.

Entró en vigor el 19 de mayo de 2005, y se aplicó retroactivamente a los nuevos motores mayores de 130 kW instalados en buques construidos en a partir del 1 de enero del año 2000, o en los casos en los que se realicen conversiones de envergadura después de esta fecha. El objetivo de dicha regulación, fue para que el promedio de las emisiones de NOx de los buques de nueva construcción fuera un 30% menor a las emisiones en el año 1990.

La nueva disposición del Anexo VI, establece un límite máximo a escala mundial de 4,5% para el contenido de azufre del fuel y pide a la OMI que vigile el contenido medio de azufre a escala mundial del fuel, una vez que el Protocolo está en vigor. El cual se basa **“en reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques”** en vigor. En él se permiten establecer ciertas zonas especiales, **“zonas de control de las emisiones de óxido de azufre”** (“SOx Emission Control Areas”) en las que el control de las emisiones es más estricto.

En dichas zonas, el contenido de azufre del fuel utilizado a bordo de los buques no debe exceder del 1,0% desde julio de 2010. En su defecto, los buques deben contar con un sistema de limpieza de los gases de escape o bien utilizar cualquier otro método técnico que limite las emisiones de SOx a valores  $\leq 6$  g/kWh (como SO<sub>2</sub> en masa).

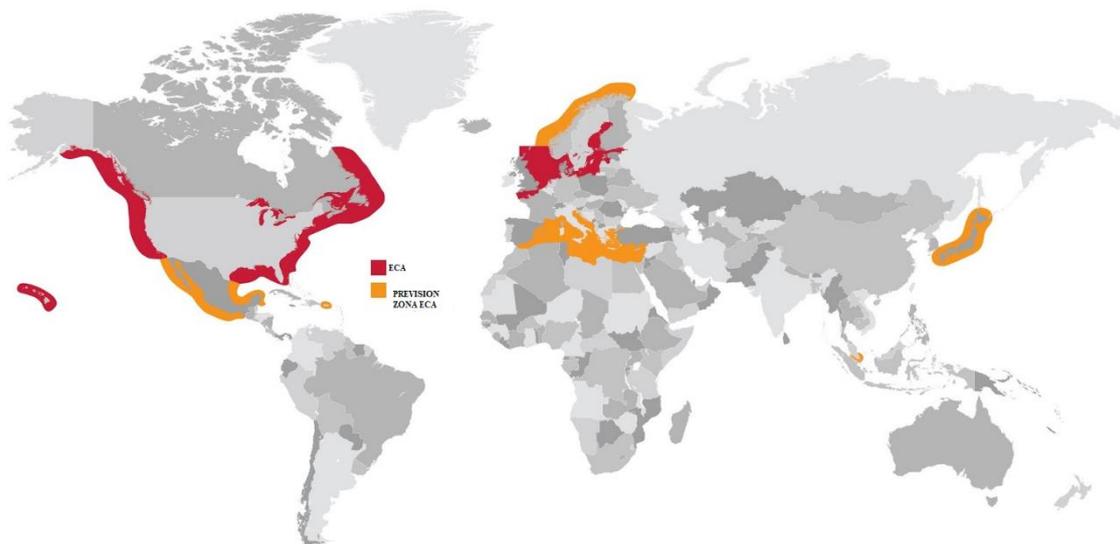


ILUSTRACIÓN 24. MAPA MUNDIAL ZONAS ECA Y SECA.



Los límites recogidos en el Tier I/II son de aplicación global, mientras que los recogidos en el Tier III son de aplicación en Zonas de Control de Emisiones de NOx. Las Zonas ECA establecidas son las siguientes:

- **Zona del mar Báltico** – definida en el Anexo I del Convenio MARPOL (solamente para los SOx);

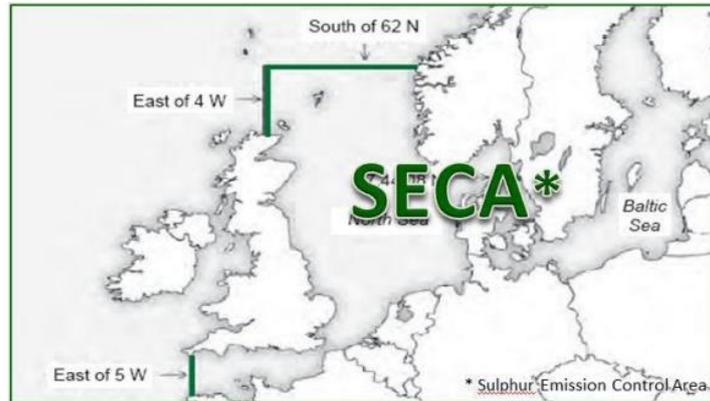


ILUSTRACIÓN 25. ZONA SECA

- **Zona del Mar del Norte** –definida en el Anexo V del Convenio MARPOL (solamente para los SOx);

- **Zona de Norteamérica (que entró en vigor el 1 de agosto de 2012)** – definida en el apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SOx, NOx y PM

Las emisiones de referencia de la IMO son referidas comúnmente con Tier I, II y III. La referencia Tier I estaba definida en la versión de 1997 del Anexo VI, mientras que las Tier II/III fueron introducidas en las Enmiendas adoptadas al Anexo VI en 2008. En octubre de 2008 se adoptan nuevas enmiendas al Anexo VI conocidas como Tier II/III que introducen:

- A. Nuevos requisitos en la calidad del Fuel a partir de julio de 2010.
- B. Nuevas referencias en las emisiones de NOx de los nuevos motores.
- C. Requisitos para los motores fabricados antes del año 2000

Estas nuevas premisas fueron aceptadas por 53 países (Incluidos los Estados Unidos de América), representando al 81,88% del tonelaje mundial. Su aplicación fue a partir de julio de 2010.[24]

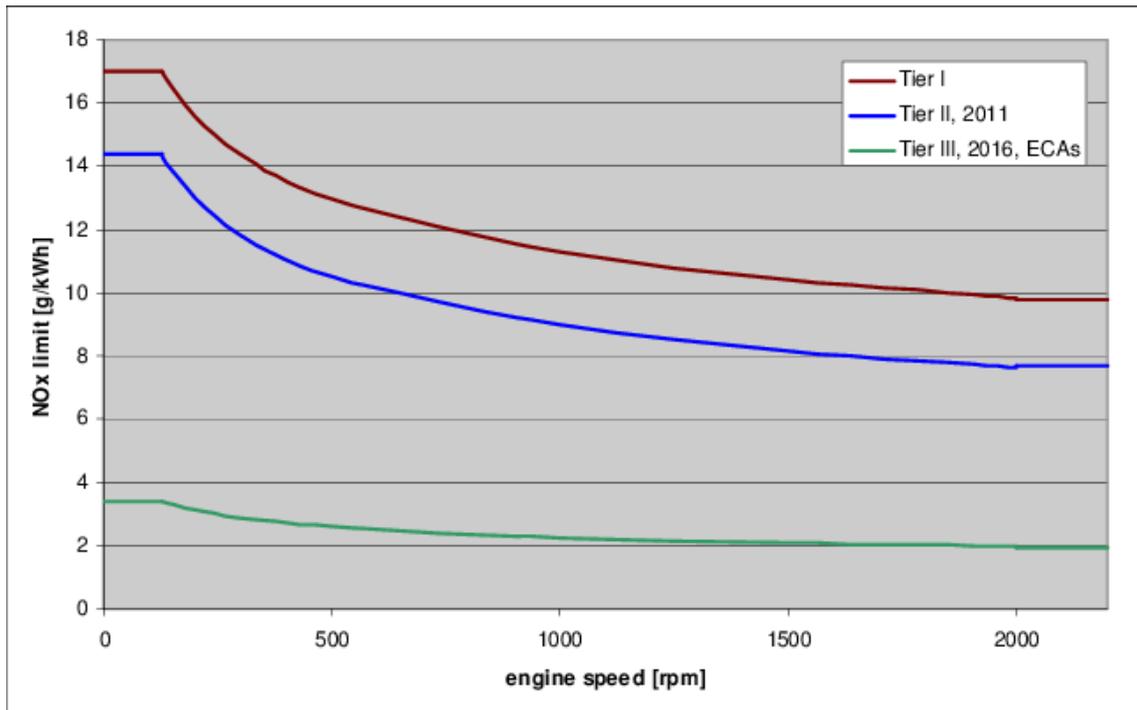


ILUSTRACIÓN 26. LIMITACIONES DE NOX.

En la *ilustración 26* se puede ver la evolución del límite de emisiones de NOx en función de las revoluciones por minuto. El límite Tier I, se aplica a motores diésel que se instalan en un buque construido el 1 de enero de 2000 o posteriormente, y antes de 1 de enero de 2011, y representa el nivel 17 g/kWh, como se estipula en el Anexo VI vigente. Para Tier II, los niveles de emisiones de NOx para un motor diésel instalado en un buque construido el 1 de enero de 2011 o posteriormente, se reducirían a 14.4 g/kWh. Para Tier III, los niveles de emisiones de NOx para un motor diésel instalado en un buque construido el 1 de enero de 2016 o posteriormente, se reducirían a 3.4 g/kWh, cuando el buque opere dentro de una zona de control de emisiones designada.

Las referencias a Tier I se vuelven aplicables a todos los motores a bordo de buques construidos entre el 1 de enero de 1990 y el 31 de diciembre de 1999, con una cilindrada unitaria mayor o igual a 90 litros y una potencia entregada mayor o igual a 5.000 kW, sujeto a la posibilidad de poder introducir en ellos ciertas modificaciones.

Haciendo referencias a Tier II se espera que se cumplan los límites, optimizando el proceso de combustión. La optimización del proceso se conseguirá mediante técnicas que modifican de motores. Como, por ejemplo; Limitando el avance a la inyección, la presión, la relación aire/combustible, el área de la tobera de inyección de combustible, la distribución de la válvula de escape y el volumen de compresión del cilindro.

En cuanto a Tier III se espera que se cumplan los límites mediante la aplicación de tecnologías de control de emisiones de NOx tales como varias formas de inducción de agua en el proceso de combustión (con fuel en el aire de barrido o en el cilindro), recirculación de gases de escape o reducción catalítica selectiva.

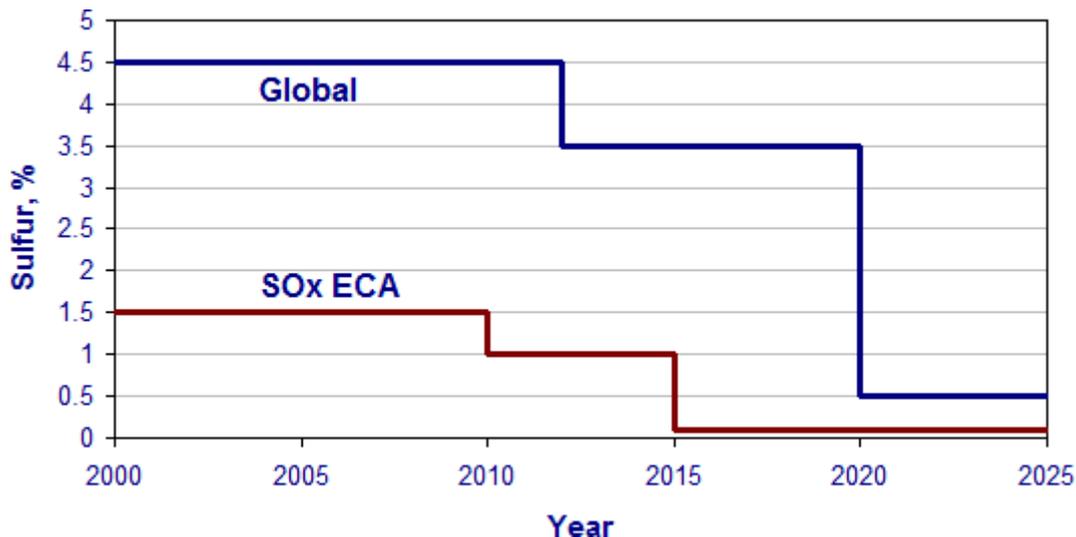


ILUSTRACIÓN 27. PREVISIÓN ESTIMADA DE EMISIONES.

La *ilustración 27*, muestra la evolución prevista del contenido de S en los combustibles con el paso de los años.

Las regulaciones del Anexo VI incluyen la reducción del contenido de azufre en los combustibles como medida para el control de las emisiones de SO<sub>x</sub>, e indirectamente el control sobre la emisión de partículas materiales. [25] El suministro del combustible, fuel con calidad especial bajo en azufre (ULSFO), permite navegar por las Zonas de Control de Emisiones de SO<sub>x</sub>.

### 3.2 Ámbito del convenio y Código técnico.

El ámbito de aplicación se dirige a todos los motores que deben atender a las exigencias del Código Técnico exceptuando los siguientes tipos de motores:

- Motores diésel de emergencia.
- Motores instalados a bordo de botes salvavidas o equipos previstos para ser utilizados en casos de emergencia.
- Motores instalados en buques dedicados únicamente a realizar viajes dentro de las aguas sometidas a la soberanía del Estado cuyo pabellón están autorizados a enarbolar, siempre que estén sometidos a otra medida de control de los NO<sub>x</sub> establecida por la administración. [26]

El código técnico es de carácter obligatorio, se aplica en motores diésel con potencias superiores a 130 kW instalados o con intención de ser instalados bajo el dominio del convenio VI.

Este código nos define los procedimientos para las pruebas de motores diésel en el cumplimiento de los límites de emisiones NO<sub>x</sub>. Antes de ser instalados a bordo los motores deben de ser ajustados conociendo en cada caso el límite que se le aplica y debe ser suministrado con el certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica.



En el código técnico se hace referencia al concepto “Grupo de motores o Familia de motores”, que se aplica a una serie de modelos de motores que tiene diseño y características similares, en los que se pueden realizar ajustes y modificaciones de carácter individual para su posterior adaptación y certificación.

La familia de motores suele estar representada por un modelo de motor, el cual se somete a pruebas de cualificación, mediante la comprobación, de componentes, ajustes técnicos de parámetro del motor que lo ajustan a las condiciones de límite de emisiones. Estas modificaciones certificarán el modelo del motor, si y sólo sí, el motor resultante modificado, pertenece al modelo instalado inicialmente. Esas familias de motores ya se pueden consultar en catálogos de WARTSILA,

#### 4. Selección del buque a analizar.

El buque seleccionado para el cambio de propulsión es un Ro-Ro del cual se sabe que tiene las siguientes características.

TABLA 20. CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE.

Características y dimensiones del buque.	
Eslora total, $L_T$	102,00 metros
Eslora entre perpendiculares, $L_{pp}$	93,50 metros
Eslora en la flotación, $L_F$	95,47 metros
Manga total, B	18,40 metros
Calado máximo, $T_{m\acute{a}x}$	6,50 metros
Coefficiente de bloque, $C_B$	0,650
Coefficiente de la maestra, $C_M$	0,955
Coefficiente de flotación, $C_F$	0,919
Coefficiente Prismático, $C_P$	0,659
Semiángulo de entrada a la flotación, $I_E$	34,354 °
Volumen de carena, $\nabla$	5.734,03 m <sup>3</sup>
F.W.A	161 mm
Tonelaje Bruto, GT	8.191 GT
Tonelaje Neto, NT	3.942 NT
Peso muerto, TPM	4.700 TPM
Peso en rosca, TPR	2.900 TPR
Velocidad en condición de carga, $V_{Load}$	13,5 nudos
Velocidad en condición de Lastre, $V_{Ballast}$	14 ,0 nudos

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

La capacidad del buque consta de seis cubiertas de cargas, distribuidas de la siguiente forma:



TABLA 21. CAPACIDAD DE CARGA DEL BUQUE.

Cubierta más baja (Lower hold)	11 trailers o 57 coches
Cubierta móvil nº1 (Moveable deck nº1)	51 coches
Cubierta principal carga (Main Cargo deck)	38 trailers o 164 coches.
Cubierta móvil nº2 (Moveable deck nº2)	104 coches
Cubierta más alta (Upper deck)	24 trailers o 138 coches
Cubierta móvil nº3 (Moveable deck nº3)	118 coches
Cubierta móvil nº4 (Moveable deck nº4)	139 coches.
Cubierta a la interperie (Covered weather)	89 coches

FUENTE: CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE.

La capacidad de carga total contempla entre cubiertas fijas y móviles, unos 83 tráileres más 853 coches. Si la carga fuese totalmente coches serían unos 1.404 en total.

El área de carga contempla unos 6.913 m<sup>2</sup> en total, conformados por 3.333 m<sup>2</sup> de cubiertas fijas, y 3.580 m<sup>2</sup> de cubiertas móviles.

Las alturas libres entre cubiertas;

TABLA 22. ALTURA ENTRE CUBIERTAS DEL BUQUE.

Cubierta más baja (Lower hold)	4,35/2,15metros
Cubierta móvil nº1 (Moveable deck nº1)	2,10 metros
Cubierta principal carga (Main Cargo deck)	4,90/3,25/2,25/1,65 metros
Cubierta móvil nº2 (Moveable deck nº2)	2,25/1,65 metros
Cubierta más alta (Upper deck)	4,35/2,15metros
Cubierta móvil nº3 (Moveable deck nº3)	1,65 metros
Cubierta móvil nº4 (Moveable deck nº4)	2,10 metros.
Rampa de entrada (Stern Door)	4,60metros

FUENTE: CARACTERÍSTICAS DEL BUQUE.

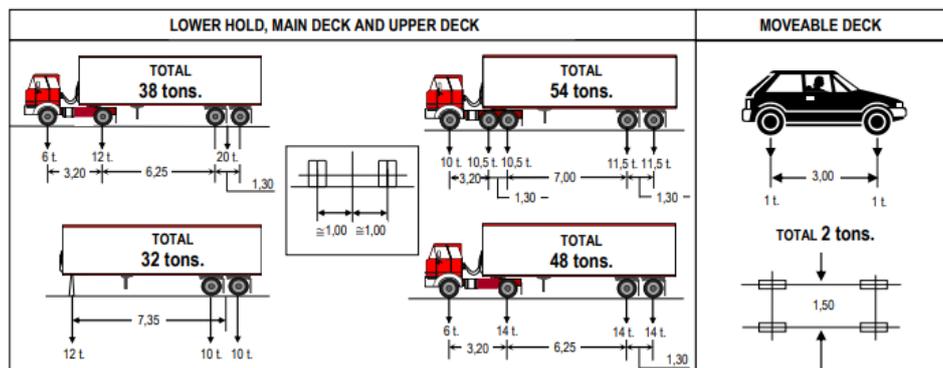


ILUSTRACIÓN 29. REPRESENTACIÓN DE CARGAS ESTIMADAS.



## 4.1 Determinación de la potencia propulsiva del buque.

La resistencia al avance del buque, es la fuerza necesaria para remolcar al mismo, a una velocidad determinada en agua tranquilas, sin que exista interferencia del buque remolcador.

Cuando un buque se mueve en el agua aparece una fuerza que se opone al movimiento, es decir, una resistencia al avance. El principal objetivo en la determinación de la propulsión del buque es vencer esta resistencia y para ello es preciso encontrar algún tipo de mecanismo que ejerza una fuerza en sentido opuesto. A esta fuerza propulsora se le denomina empuje, T.

Un esquema básico de la interacción casco-propulsor del buque es:

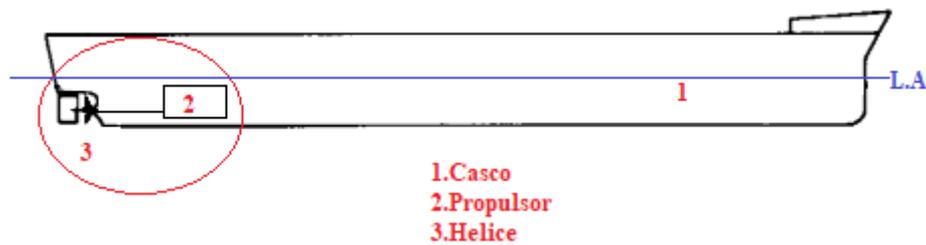


ILUSTRACIÓN 31, INTERACCIÓN CASCO-PROPULSOR.

Ampliando la selección anterior del conjunto 2-3, se observa el conjunto de líneas de eje de un buque, el encargado de proporcionar la potencia total del buque, proporcionando el T necesario para vencer la resistencia al avance y que el buque obtenga la velocidad de avance,  $V_A$ , adecuada para en su totalidad moverse a la velocidad deseada por el armador del buque.

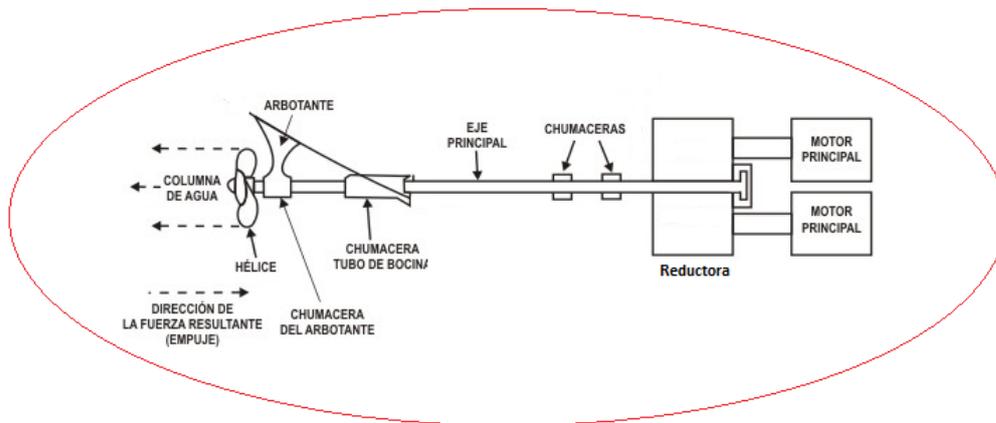


ILUSTRACIÓN 32. PARTES DE UNA LÍNEA DE EJE.

A pesar de los avances encontrados en la hidrodinámica, la forma más correcta de obtener la resistencia al avance consiste en recurrir a la experimentación con modelos físicos. Estos experimentos se realizan en canales de experiencias hidrodinámicas en los que se miden un conjunto de magnitudes físicas (resistencia al avance de la carena, par, empuje y revoluciones del propulsor, etc.) extrapolándolas después al campo del buque. Pero existen otras formas aproximadas, dichos métodos son analíticos son: series sistemáticas de formas y métodos numéricos estadísticos. Se usan cuando solo se conocen algunas características principales del buque en etapas iniciales del proyecto, no solo resultarían caros los métodos experimentales, sino que no serían posibles al no disponerse de un plano de formas del modelo a ensayar, por lo que se suele recurrir a modelos matemáticos (CFD) o métodos analíticos para hacer las primeras aproximaciones de la resistencia al avance.

Para poder desarrollar cualquiera de los métodos anteriores es necesario comprender y definir una serie de parámetros que nos definirán en su globalidad la propulsión del buque, como son las diferentes potencias, rendimientos, y coeficientes que la conforman.

#### 4.1.1 Potencias y rendimientos.

a) **Potencia efectiva o de remolque, EHP:**

$$EHP = \frac{R_T \times V}{75} \quad (13)$$

Dónde  $R_T$ , es la resistencia al avance en kg y  $V$ , la velocidad del buque en m/s.

La bondad, desde el punto de vista de eficiencia, de un sistema, viene dada por el concepto de rendimiento propulsivo,  $\eta_P$ , que se define por:



$$\eta_p = \frac{EHP}{POTENCIA\ DE\ LA\ MAQUINARIA} \quad (14)$$

Donde la potencia de la maquinaria viene definida de diferente forma según el tipo de la maquinaria.

**b) Potencia indicada, IHP:**

La potencia indicada, también denominada, Indicated Horses Power (IHP) de ahí su acrónimo, y queda expresada como:

$$IHP = \frac{pmi \times C \times N}{75} \quad (15)$$

Dónde *pmi*, es la presión media indicada, *C* es la cilindrada, *N* número de ciclos, que también está definido por el número de cilindros, *Z* y *n*, revoluciones por minuto.

$$N = \frac{Z \times n}{60} \quad (16)$$

**c) Potencia de freno, BHP:**

La potencia para definir es la utilizada en motores de combustión interna, también es denominada potencia nominal. Se determina en el banco de pruebas en el taller de los motores diésel. Consiste en medir la potencia en el plato de acoplamiento del cigüeñal al eje, mediante la aplicación de un par de frenado de tipo eléctrico, hidráulico o magnético. Se expresa como:

$$BHP = \frac{n \times Q_b \times 2 \times \pi}{75} \quad (17)$$

Dónde *BHP* se mide en C. V, caballos de vapor. *Q<sub>b</sub>*, es el par medido en el freno en kg x m y *n*, las revoluciones.

Existe una relación importante entre la potencia indicada y la potencia de freno;



$$BHP = IHP \times \eta_{mecanico} \quad (18)$$

Dónde  $\eta_{mecanico}$  es el rendimiento de la máquina, la cual incluye las pérdidas por rozamiento en los cilindros, bielas, y cigüeñal.

d) **Potencia en el eje, SHP:**

Esta es la potencia que se mide en las pruebas de mar en el caso de turbinas de vapor o de gas. Es medida a la entrada de la línea de ejes en la bocina. Se determina midiendo el par transmitido mediante un torsiómetro y tacómetro para las revoluciones. Se expresa como:

$$SHP = \frac{n \times Q_s \times 2 \times \pi}{75} \quad (19)$$

Dónde SHP se mide en C. V, caballos de vapor.  $Q_s$  es el par entregado por la maquinaria al eje medido por el torsiómetro en kg x m y n, las revoluciones.

Existe relación con la potencia de freno:

$$SHP = BHP \times \eta_K \quad (20)$$

Donde  $\eta_K$ , es el rendimiento mecánico de la reductora y la línea de eje, incluye las pérdidas de las chumaceras y bocinas.

e) **Potencia entregada a la hélice, DHP:**

Potencia que recibe directamente la hélice;

$$DHP = \frac{n \times Q_h \times 2 \times \pi}{75} \quad (21)$$

Dónde DHP se mide en C. V, caballos de vapor.  $Q_h$  es el par absorbido por la hélice kg x m y n, las revoluciones.



Está relacionada con la potencia al eje y la potencia al freno, por las siguientes expresiones:

$$DHP = SHP \times \eta_{mb} \quad (22)$$

$$DHP = BHP \times \eta_M \quad (23)$$

Donde  $\eta_{mb}$  es el rendimiento mecánico de la bocina, y  $\eta_M$  es el rendimiento mecánico de la línea de ejes completa.

**f) Potencia de empuje, THP;**

Es la potencia suministrada por la hélice, desplazándose respecto al agua a una velocidad de avance:

$$THP = \frac{T \times V_A}{75} \quad (24)$$

Donde T es el empuje de la hélice en KG,  $V_A$  es la velocidad de avance en m/s y THP medida en CV.

Está relacionada con la potencia absorbida por la hélice mediante la siguiente expresión;

$$THP = DHP \times \eta_B \quad (25)$$

Donde  $\eta_B$  es el rendimiento de la hélice tras la carena.

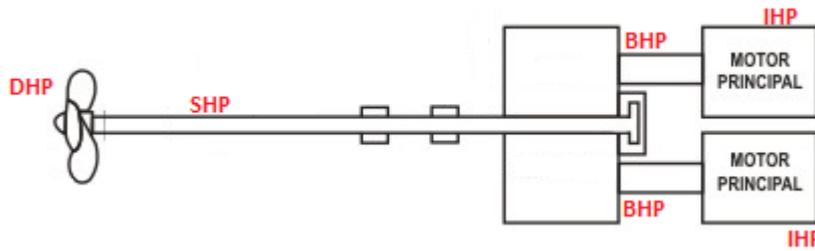


ILUSTRACIÓN 33. RELACIÓN DE RENDIMIENTOS Y POTENCIAS EN SUS. PROPULSIÓN

Véase ahora la **ilustración 33** donde de forma esquematiza se puede observar el lugar donde se miden las potencias definidas anteriormente.

Una vez vistas las diferentes potencias, se observa que cada máquina es tratada de forma diferente, por lo que el rendimiento propulsivo, tendrá diferentes valores en función de la maquinaria instalada. Esas diferencias se ven reflejadas en los valores que tendría la eficiencia. Es por ello por lo que el estudio de la propulsión se basa en el concepto de rendimiento cuasi-propulsivo,  $\eta_D$ , el cual solo tiene en cuenta elementos hidrodinámicos siendo independiente al tipo de maquinaria instalada. Éste se expresa como:

$$\eta_D = \frac{\text{Potencia efectiva}}{\text{Potencia entregada a la hélice}} = \frac{EHP}{THP} \quad (26)$$

Cumpliendo:

$$DHP = BHP \times \eta_M \quad (27)$$

$$\eta_P = \eta_D \times \eta_M \quad (28)$$

El rendimiento mecánico es el rendimiento de la línea de ejes, teniendo en cuenta la reductora sí da lugar.

Existen una serie valores para estimar el rendimiento mecánico en función de si hay que tener en cuenta el efecto de reducción o no, y la potencia instalada.



TABLA 23. ESTIMACIÓN DEL RENDIMIENTO MECÁNICO

Reducción	Potencia instalada (C.V)	$\eta_M$
No	BHP<1000	0,97
No	1000<BHP<10000	0,98
No	BHP>10000	0,985-0,99
Si	BHP<1000	0,94-0,95
Si	1000<BHP<10000	0,94-0,96
Si	BHP>10000	0,96-0,97

Cuando se trata de estimar la potencia a instalar en un buque a una velocidad de proyecto contratada, la expresión que nos daría la potencia necesaria a esa velocidad vendría dada por:

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_D \times \eta_M} \quad (29)$$

Para motores Diesel dado que su punto de funcionamiento viene fijado con respecto a un porcentaje de la potencia instalada entre un 85-90% al 100% de las revoluciones nominales, existe un coeficiente a tener en cuenta, en los cálculos a esa potencia,  $K_p$  que será 0.85 para buques lentos y 0.9 para buques fino y rápidos. Es decir, ahora vendrá dada por:

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_D \times \eta_M \times k_p} \quad (30)$$

Para el cálculo del coeficiente propulsivo existen diversas expresiones, algunas de las cuales, para buques de una hélice son:

### Formula de Lap

$$\eta_D = 0.885 - 0.0012 \times N \times \sqrt{L_{PP}}. \quad (31)$$

Donde N son las revoluciones del propulsor por minuto. Lpp, la eslora entre perpendiculares en metros.



**Fórmula de Parga;**

$$\eta_D = 0.84 - \frac{Nx\sqrt{L_{pp}}}{1800} + \left( \frac{\left(\frac{V}{C_B}\right)^2}{2400} \right) \quad (32)$$

Donde  $N$  son las revoluciones del propulsor por minuto.  $L_{pp}$ , la eslora entre perpendiculares en metros.  $V$ , la velocidad en nudos.

**Formula de Parga, Modificada**

$$\eta_D = Kx \left[ 0.84 - \left( \frac{Nx\sqrt{L_{pp}}}{1800} \right) + \left( \frac{\left(\frac{V}{C_B}\right)^2}{2400} \right) \right] \quad (33)$$

$C_B$  es el coeficiente de bloque y  $K$  es una constante en función de  $L_{pp}$  que su valor se estima según,

TABLA 24. VALORES PARA LA ESTIMACIÓN DE K.

Lpp	200	210	220	230	240	250	260	270
K	1,03	1,02	1,01	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99
Lpp	280	290	300	310	320	330	340	250
K	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98

**Fórmula del canal del Pardo:**

$$\eta_D = 0.943 - 0.000187x N x \sqrt{L_{PP}} + 0.023 x \frac{B}{T} - 0.2 x C_B + 0.00013 x N x C_B x \sqrt{L_{PP}}. \quad (34)$$

En los casos en los cuales no se conocen las revoluciones a las que gira la hélice, se puede hacer una primera aproximación y estimarlas de acuerdo con la siguiente tabla:



TABLA 25. ESTIMACIÓN DE LAS RPM

Desplazamiento (Tm.)	Revoluciones (rpm)
Menos de 1000	500
de 1000 a 2000	400
de 2000 a 3000	300
de 3000 a 5000	200
de 5000 a 7500	150
de 7500 a 12000	125
de 12500 a 25000	115
de 25000 a 50000	110
110 más de 50000	100

Siendo la estimación del rendimiento cuasi-propulsivo;

$$\eta_D = \eta_0 \times \eta_H \times \eta_R \quad (35)$$

$\eta_H$  es el rendimiento de la carena, y  $\eta_R$  es el rendimiento rotativo – relativo, se puede estimar con fórmulas estadísticas de aproximación.  $\eta_0$  es el rendimiento del propulsor aislado, que depende de las características del propulsor (hélice) como es su diámetro, relación H/D, relación  $A_E/A_0$ , numero de palas, punto de funcionamiento del mismo y no lo conocemos con exactitud hasta que no tengamos el propulsor seleccionado. Una vez conocido el rendimiento del propulsor aislado, se calcula el nuevo rendimiento propulsivo.

$$\eta_P = \eta_D \times \eta_M = \eta_0 \times \eta_H \times \eta_R \times \eta_M \quad (36)$$

#### 4.1.2. Método y cálculo de la potencia.

Los métodos analíticos no sustituyen, ni mucho menos, a los métodos experimentales ya que estos son más precisos en el cálculo de la resistencia, y además se dispondrá de otros muchos datos para el correcto diseño de la propulsión, de la disposición de apéndices, etc. pudiéndose hacer pequeñas modificaciones de las formas que mejoren el comportamiento hidrodinámico de la carena. Al aplicar uno de estos métodos se deberán elegir entre la información disponible siendo de especial interés que las características del buque que se va a analizar, respondan a las características para los buques en los cuales se desarrolló el método aplicado.

Los métodos analíticos se subdividen en dos: Series sistemáticas y métodos numéricos.



Una serie sistemática se desarrolla para optimizar las formas de la carena de un buque. Consiste en partir de unas formas patrón y basándose en ellas se desarrollan las variaciones sistemáticas, así como, de sus dimensiones principales como la de sus coeficientes geométricos adimensionales. La idoneidad de una serie sistemática es óptima cuando el buque estudiado prevea formas similares a las estudiadas en la serie y las relaciones adimensionales de las principales dimensiones del buque estén dentro de los rangos de variación cubiertos por la serie.

El método numérico se emplea para predecir la resistencia al avance y son de base estadística. Suelen seguir una serie determinada de pasos:

1. Se elige una base de datos apropiada evitando que contenga casos singulares.
2. Se eligen las variables independientes con mayor influencia en la magnitud que se está tratando de estimar: Resistencia.
3. Se selecciona el tipo de función de la dependencia que relacione la magnitud a estudiar con las variables independencias elegidas.
4. Se realizan ajustes de la curvatura para la obtención de los coeficientes de las funciones empleando las técnicas más adecuadas para cada tipo de función.

La predicción se basa en una regresión lineal, la cual será mejor, conforme mayor y precisa sea la base de datos de los buques en los que se base, y dependiendo del grado de semejanza entre los buques de la muestra y el buque considerado. Los diferentes métodos son:

- Método de Guldhamer y Harvald
- Método de Morton-Getler
- **Método de Holtrop y Mennen**
- Método de Amadeo García
- Método de Van Oortmerssen
- Método de Mercier-Savitsky
- Método de Ping-Zhong

De los métodos anteriores voy a centrarme en el utilizado en este TFG, que es el método de Holtrop y Mennen, como bien se ha nombrado anteriormente es un método estadístico basado en regresiones matemáticas de los resultados en el Canal de Wageningen, y con resultado de los buques construidos los cuales proporcionan estimaciones de la resistencia bastante satisfactoria.

La muestra de buques que se ha tomado de referencia para el desarrollo del método está formada por un amplio rango de tipo de buques, *véase tabla 26*, en los cuales entra el buque a analizar. Así mismo, es un procedimiento de predicción válido para buques con una o dos líneas de ejes.



TABLA 26. RANGOS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO.

Tipo de buque	$Fn_{m\acute{a}x}$	CP(Min-Máx)	L/B(Min-Máx)	B/T(Min-Máx)
Petroleros, bulkcarriers	0.24	0.73-0.85	5.1-7.1	2.14-3.2
Portacontenedores	0.45	0.56-0.75	5.3-8.0	2.4-4.0
Arrastreros, costeros, remolcadores	0.38	0.55-0.65	3.9-6.3	2.1-3.0
Cargueros	0.30	0.56-0.75	5.3-8.0	2.4-4.0
Roll-on Roll-off ferries	0.35	0.55-0.67	5.3-8.0	3.2-4.0

La resistencia al avance se calcula por el método de correlación de Hughes, basado en la descomposición de la resistencia. Su hipótesis se basa en que el coeficiente de resistencia total se divida en el coeficiente de resistencia viscosa y el coeficiente de resistencia por formación de olas.

$$C_T = C_V(Rn) + C_w(Fn) \quad (37)$$

A la relación entre el coeficiente de resistencia viscosa, con el coeficiente de fricción, se le denomina factor de forma y se expresa como:

$$(1 + k) = r = \frac{C_v}{C_F} \quad (38)$$

En el método de correlación de Hughes si se suponen conocidos,  $r_m$ , el factor de forma del modelo y el factor de forma del buque,  $r_b$ . La extrapolación del modelo al buque se facilita.

$$r_m = \frac{C_{vm}}{C_{Fm}} \text{ y } r_b = \frac{C_{vb}}{C_{Fb}} \quad (39)$$

$$C_{Tm} = C_{vm} + C_{wm} \quad (40)$$

$$C_{Tb} = C_{vb} + C_{wb} \quad (41)$$



$$C_{wm} = C_{Tm} - C_{vm} = C_{Tm} - r_m \times C_{Fm} \quad (42)$$

Sabiendo que los ensayos se realizan a número de Froude constante,  $F_n = \text{cte}$ . Obtenemos que el  $C_{wm} = C_{wb}$  por lo tanto:

$$C_{Tb} = C_{vb} + C_{wb} = r_b \times C_{FB} + C_{Tm} - r_m \times C_{Fm} \quad (43)$$

$C_{Tm}$  es conocido a través del ensayo de remolque, expresado como:

$$C_{Tm} = \frac{R_{Tm}}{\left(\frac{1}{2}\right) \rho_m \times S_m \times V_m^2} \quad (44)$$

$C_{Fx}$  es calculado por la línea de fricción de la ITT- 57, siendo “x” la referencia al sub-índice m para modelo y b para buque:

$$C_{Fx} = \frac{0.075}{(\log(R_{nx}) - 2)^2} \quad (45)$$

Siendo  $R_n$  el número de Reynold, calculado por la expresión:

$$R_{nx} = \frac{L_x \times V_x}{\nu_i} \quad (46)$$

Donde  $L$ , es la eslora del buque o modelo.  $V$ , la velocidad del buque o modelo y  $\nu_i$  la viscosidad cinemática, siendo la de agua dulce para el modelo ( $i=a$ . d), y agua salada para el buque ( $i=a$ . s).

El factor de forma del modelo,  $r_m$ , puede conocerse a través de diferentes métodos, el más común es el método de Prohaska.

El factor de formas del buque depende de términos como el de la curvatura transversal, longitudinal del buque, la resistencia de presión de origen viscoso, la separación de la capa límite, entre otros muchos de las formas del buque, que de modelo a buque difieren cuantitativamente:



$$r_m \neq r_b \quad (47)$$

Por lo que no existe ningún método para determinar el factor de formas del buque, ya que el ensayo debería realizarse en un ensayo de remolque con el mismo buque, lo cual no es para nada viable. Pero Hughes propuso la solución a este inconveniente, de manera que supuso a modelo y buque semejantes, es decir, a igualdad de número de Froude y totalmente independiente del número de Reynolds.

$$r_m = r_b = r \quad (48)$$

Por lo tanto;

$$C_{Tb} = r_b \times C_{FB} + C_{Tm} - r_m \times C_{Fm} \quad (49)$$

$$C_{Tb} = C_{Tm} - r_m \times (C_{FB} - C_{Fm}) \quad (50)$$

Asumiendo esa hipótesis asumimos el porcentaje de error que supone, ya que esa igualdad no es del todo cierta, pero supone menos riesgo que asumir el riesgo de igualar los coeficientes residuos de buque y modelo en el método de correlación de Froude.

Así mismo, hay que tener en cuenta la corrección aditiva  $\Delta C_F$ , que incluye fundamentalmente efectos de rugosidad, aumentos de la resistencia por estado de la mar, viento, guiñadas, efectos que surgen en las pruebas de mar.

$$C_{Tb} = C_{Tm} - r_m \times (C_{FB} - C_{Fm}) + \Delta C_F \quad (51)$$

Por lo que finalmente la resistencia al avance se expresa como:

$$R_{Tb} = \frac{1}{2} \times \rho_b \times S_b \times V_b^2 \times C_{Tb} \quad (52)$$



Volviendo al método Holtrop y Mennen la resistencia al avance se divide en las siguientes componentes;

$$R_T = R_V + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (53)$$

$R_T$  = Resistencia total.

$R_V$  = Resistencia viscosa.

$R_{AP}$  = Resistencia de los apéndices.

$R_W$  = Resistencia por formación de olas.

$R_B$  = Resistencia de presión producida por el bulbo.

$R_{TR}$  = Resistencia de presión de las popas de estampa cuando están sumergidas.

$R_A$  = Resistencia debida al coeficiente de correlación modelo-buque.

- Resistencia viscosa,  $R_V$ :

$$R_V = \frac{1}{2} \times C_F (1 + k_1) \times S_m \times v^2 \times f \quad (54)$$

El valor de  $(1+k_1)$  se obtiene estadísticamente por la expresión:

$$(1 + k_1) = 0.9 + 0.487118 \left(\frac{B}{L_F}\right)^{1.06806} \times \left(\frac{T}{L_F}\right)^{0.46106} \times \left(\frac{L_F}{L_R}\right)^{0.121563} \times \left(\frac{L_F^3}{\nabla}\right)^{0.36486} \times (-C_P) \quad (55)$$

Donde:

$$\frac{L_F}{L_R} = 1 - C_P + \frac{0.06 \times C_P \times lcb}{4 \times C_F - 1} \quad (56)$$

$C_P$  es el coeficiente prismático referido a la eslora en la flotación,  $lcb$ , es la posición longitudinal del centro de la carena a partir de la sección media como un porcentaje de  $L_F$ . Siendo positivo hacia proa.

El coeficiente  $C_{14}$ , pretende introducir la forma de popa en el factor de forma:



Para los diferentes valores que puede tomar de  $C_{stern}$  podemos tomar de referencia los siguientes:

$$C_{14} = 1 + 0.011C_{stern} \quad (57)$$

TABLA 27. ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE, C<sub>STER</sub>.

$C_{stern} = -25$	Popas tipo góndola
$C_{stern} = -10$	Cuadernas en V
$C_{stern} = 0$	Cuadernas normales
$C_{stern} = 10$	Cuadernas en U con popa Hogner

Cuando la superficie mojada del buque no es conocida, se puede estimar según la fórmula:

$$S_m = L(2T + B)C_M^{0.5} + \left(0,453 + 0,4425 C_B - 0,2862C_M - 0,003467 \frac{B}{T} + 0,3696 C_F\right) + 2,38 \frac{A_{BT}}{C_B} \quad (58)$$

Donde  $A_{BT}$  es el área transversal del bulbo, y  $C_F$  es el coeficiente de fricción calculada como se ha especificado antes, basada en la línea ITTC-57.

- Resistencia de los apéndices,  $R_{AP}$ :

La resistencia de los apéndices equivale a una serie de factores que de forma individual no se han tenido en cuenta, pero sí interfieren en la resistencia de avance del buque, estos apéndices se engloban en la siguiente tabla:

TABLA 28. VALORES PARA OBTENCIÓN DEL FACTOR DE FORMAS.

Tipo de apéndice	(1+k <sub>2</sub> )
Timón de 1 hélice	1.3 -1.5
Timón de 2 hélices	2.8
Timón y quillote	1.5-2.0
Quillote	1.5-2.0
Henchimientos protectores	3.0
Henchimientos integrados	2.0
Ejes	2.0-4.0
Aletas estabilizadoras	2.8
Domo	2.7
Quillas de balance	1.4



Aplicando la siguiente expresión:

$$R_{AP} = \frac{1}{2} \rho \times S_{AP} \times V^2 \times C_F \times (1 + k_2)_{eq} \quad (59)$$

Donde

$$(1 + k_2)_{eq} = \sum \frac{S_i (1 + k_2)_i}{S_i} \quad (60)$$

Donde  $S_i$  es la superficie mojada de cada apéndice. Y  $(1 + k_2)_i$  al factor de forma de cada apéndice.

- Resistencia por formación de olas,  $R_w$ ;

El cálculo de la resistencia por formación de olas, se realiza para números de Froude menores a 0.4 es decir,  $Fn \leq 0.4$

$$R_w = \rho g x \nabla x C_1 x C_2 x C_5 x e^{(m_1 x Fn^d + m_2 x \cos(\lambda x Fn^{-2}))} \quad (61)$$

$$C_1 = 2223105 x C_7^{3.78613} x \left(\frac{B}{T}\right)^{1.07961} x (90 - I_E)^{-1.37565} \quad (62)$$

Donde  $I_E$  es el semiángulo de entrada en la flotación, que si no es conocido se puede expresar como:

$$I_E = 1 + 89 \exp \left( -\left(\frac{L_F}{B}\right)^{0.80856} x (1 - C_F)^{0.30484} x (1 - C_p - 0.0225 x lbc)^{0.6367} \left(\frac{L_R}{B}\right)^{0.34574} x \left(\frac{100V}{L_F^{\frac{2}{3}}}\right)^{0.16302} \right) \quad (63)$$

Donde el coeficiente  $C_7$  según el valor con relación a  $\left(\frac{B}{L_F}\right)$ , toma:

$$C_7 = 0.0229577 x \left(\frac{B}{L_F}\right)^{0.33333} ; \text{ para } \left(\frac{B}{L_F}\right) \leq 0.11 \quad (64)$$



$$C_7 = \frac{B}{L_F}; \text{ para } 0.11 \leq \frac{B}{L_F} \leq 0.25 \quad (65)$$

$$C_7 = 0.5 - 0.0625 \frac{B}{L_F}; \text{ para } \frac{B}{L_F} > 0.25 \quad (66)$$

$$d = -0.9; C_2 = e^{-1.89\sqrt{C_3}} \quad (67)$$

$$C_3 = \frac{(0.56xA_{BT}^{1.5})}{BxTx(0.31x\sqrt{A_{BT}}+T_{pr}-h_b)} \quad (68)$$

$A_{BT}$  es el área transversal del bulbo en la vertical de la intersección de la flotación con el perfil de proa en metros cuadrados. Y  $h_b$ , es la altura sobre la base del c.d.g. de la sección del bulbo de proa en la perpendicular de proa.

$$C_5 = 1 - \frac{0.8xA_{TR}}{BxT_mx C_M} \quad (69)$$

$$m_1 = 0.014047x \frac{L_F}{T} - \frac{1.75254xV^{\frac{1}{3}}}{L}x - 4.79323 \frac{B}{L_F} - C_{16} \quad (70)$$

Donde  $C_{16}$ :

$$C_{16} = 8.07981xC_p - 13.8673x C_p^2 + 6.984388xC_p^3; \text{ Si } C_p \leq 0.8 \quad (71)$$

$$C_{16} = 1.73014 - 0.7067x C_p; \text{ Si } C_p > 0.8 \quad (72)$$



$$m_2 = C_{15} \times C_p^2 \times 0.4 \times e^{(-0.1Fn^2)} \quad (73)$$

Dónde  $C_{15}$ :

$$C_{15} = -1.69385; \text{ Si } L_F^3 / \nabla \leq 512 \quad (74)$$

$$C_{15} = -1.69385 + \frac{\left(\left(\frac{L_F}{\nabla^3}\right) - 8\right)}{2.36}; \text{ Si } 512 < L_F^3 / \nabla \leq 1727 \quad (75)$$

$$C_{15} = 0; \text{ Si } L_F^3 / \nabla \leq 1727 \quad (76)$$

$$\lambda = 1.446 \times C_p - 0.03 \times \frac{L_F}{B}; \text{ si } \frac{L_F}{B} \leq 12 \quad (77)$$

$$\lambda = 1.446 \times C_p; \text{ Si } \frac{L_F}{B} > 12 \quad (78)$$

Para  $Fn > 0.55$

$$R_{w.B} = \rho \times g \times \nabla \times C_{17} \times C_2 \times C_5 \times e^{(m_3 \times Fn^d + \cos(\lambda \times Fn^{-2}))} \quad (79)$$

$$C_{17} = 6919.3 \times C_M^{-1.3346} \times \left(\frac{\nabla}{L_F^3}\right)^{2.009977} \times \left(\frac{L_F}{B} - 2\right)^{1.40692} \quad (80)$$

$$m_3 = -7.2035 \times \left(\frac{B}{L_F}\right)^{0.326869} \times \left(\frac{T}{B}\right)^{0.605375} \quad (81)$$



$$m_4 = C_{15} \times 0.4 e^{(-0.034 \times Fn^{-3.29})} \quad (82)$$

Para  $0.4 < Fn < 0.55$

$$R_w = R_{wA0.4} + \frac{(10 \times Fn - 4) \times (R_{w \cdot B0.55} - R_{w \cdot 0.4})}{1.5} \quad (83)$$

- Resistencia de presión debida a la presencia del bulbo cerca de la flotación,  $R_B$ ;

$$R_B = 0.11 \times e^{-P_b^2} \times \frac{Fn_i^3 \times A_{BT}^{1.5} \times g \times \rho}{(1 + Fn_i^2)} \quad (84)$$

Dónde el coeficiente  $P_b$  es una medida para la parte que emerge de la proa y  $Fn_i$  es el número de Froude referido a la inmersión:

$$P_b = \frac{0.56 \times \sqrt{A_{BT}}}{T_{PR} - 1.5 \times h_B} \quad (85)$$

$$Fn_i = \frac{V}{\sqrt{g \times (T_{PR} - h_B - 0.25 \times \sqrt{A_{BT}}) + 0.15 \times V^2}} \quad (86)$$

- Resistencia debida a la inmersión del espejo,  $R_{TR}$ ;

De forma similar es la resistencia a la presión adicional debida a la parte sumergida de la estampa:

$$R_{TR} = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_{TR} \times C_6 \quad (87)$$

Donde

$$C_6 = 0.2 \times (1 - 0.2 \times Fn_{NT}); \text{ Si } Fn_{NT} < 5 \quad (88)$$



$$C_6 = 0; \text{ Si } Fn_{NT} > 5 \text{ o } = 5 \quad (89)$$

$$Fn_{NT} = \frac{V}{\sqrt{\frac{2 \times g \times A_{BT}}{B + B \times C_F}}} \quad (90)$$

- Resistencia debida a la correlación modelo-buque,  $R_A$ ;

Tienen en cuenta la rugosidad del casco y la resistencia del aire.

$$R_A = \frac{1}{2} \times S \times C_A \times v^2 \times f \quad (91)$$

Siendo  $C_A$ , el coeficiente de correlación del modelo del buque, en las condiciones de pruebas. La rugosidad estandarizada, 150 micrómetros estimada mediante la expresión:

$$C_A = 0.006 \times (L_F + 100)^{-0.16} - 0.00205 + 0.003 \times \left(\frac{L_F}{7.5}\right)^{0.5} \times C_B^4 \times C_2 \times (0.04 - C_4) \quad (92)$$

$$C_2 = e^{-1.89\sqrt{C_3}} \quad (93)$$

$$C_3 = 1 - \frac{0.8 \times A_{TR}}{B \times T_m \times C_M} \quad (94)$$

$$C_4 = \frac{T_{PR}}{L_F} \text{ si } \frac{T_{PR}}{L_F} \leq 0.04 \quad (95)$$

$$C_4 = 0.04 \text{ si } \frac{T_{PR}}{L_F} > 0.04 \quad (96)$$

Para predecir el valor de  $C_A$  para una rugosidad  $< 150 \mu\text{m}$  se puede utilizar la expresión:



$$\Delta C_A = \frac{0.105x(K_S)^{\frac{1}{3}} - 0.05579}{L_F^{\frac{1}{3}}} \quad (97)$$

#### 4.1.3 Cálculo de los coeficientes propulsivos

El cálculo de los coeficientes propulsivos con el método también se puede estimar también a través del método Holtrop y Mennen.

- Cálculo del coeficiente de succión,  $t$ ;

$$t = 0.25014x\left(\frac{B}{L}\right)^{0.28956} x \frac{(\sqrt{BxTx}D)^{0.2624}}{(1 - C_p + 0.0225 lcb)^{0.01762}} + 0.0015 C_{STERN} \quad (98)$$

- Cálculo del coeficiente de estela,  $w$ ;

$$w = C_9xC_{20}xC_Vx\left(\frac{L}{T_A}\right)x\left(0.050776 + 0.93405xC_{11}x\frac{C_V}{1 - C_{p1}}\right) \quad (99)$$

- Cálculo del coeficiente relativo-rotativo,  $\eta_R$ ;

$$\eta_R = 0.922 - 0.05908x\left(\frac{A_E}{A_0}\right) + 0.07424x(C_p - 0.0225lcb) \quad (100)$$

#### 4.2 Resultados: Aplicación del Método Holtrop y selección del Motor.

A la hora de la aplicación del método en primer lugar se debe especificar el tipo de agua dulce o salada para determinar a su vez la densidad del agua y la temperatura para poder establecer las aproximaciones de la viscosidad cinemática. La siguiente aproximación se establece según las expresiones:

$$v_{ad} = ((0.585x10^{-3}x(T - 12.0) - 0.03361)x(T - 12.0) + 1.2350)x10^{-6} \quad (101)$$



$$v_{as} = ((0.659 \times 10^{-3} \times (T - 1.0) - 0.05076) \times (T - 1.0) + 1.7688) \times 10^{-6} \quad (102)$$

Dónde T es la temperatura en grados centígrados en este caso 15°C. Se introducen los datos necesarios en la hoja de cálculo programada con el método y se obtiene:

TABLA 29. PROPIEDADES DEL AGUA A 15°C

<b>Propiedades del agua.</b>	
<b><math>\rho</math> as</b>	1025,900
<b><math>\nu</math> as</b>	1,187E-06
<b>Tª (°C)</b>	15,00

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

A continuación, nos aseguramos de que el buque que se lleva a análisis de la potencia cumple con los requisitos del rango de aplicación del método:

TABLA 30. VALORES OBTENIDOS PARA APLICACIÓN DEL MÉTODO.

<b>Roll-un Roff off</b>	
$F_n < 0,38$	CUMPLE
$0,55 < CP < 0,67$	CUMPLE
$5,3 L/B < 8,0$	CUMPLE
$3,2 < B/T < 4,0$	NO CUMPLE

FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

Los datos iniciales a introducir para el cálculo de la resistencia al avance del buque son:

TABLA 31. VALORES PARA INICIAR LOS CÁLCULOS.

<b>Características del buque</b>		
Eslora entre perpendiculares	L <sub>pp</sub> (m)	93,5
Eslora en la flotación,	L <sub>F</sub> (m)	95,47
Manga,	B (m)	18,4
Calado en popa,	T <sub>pp</sub> (m)	6,4
Calado medio,	T <sub>m</sub> (m)	6,4
Calado en proa,	T <sub>pr</sub> (m)	6,4
Volumen de carena,	$\nabla$ (m <sup>3</sup> )	5.762,398
Coficiente de bloque,	C <sub>B</sub>	0,633
Coficiente de la maestra,	C <sub>M</sub>	0,955
Coficiente prismático,	C <sub>P</sub>	0,659
Coficiente en la flotación,	C <sub>F</sub>	0,919
Semiángulo de entrada en la flotación	I <sub>E</sub> °	34,326
abscisa del centro de carena,	L <sub>cb</sub> %	-1,3400
Velocidad	V (nudos)	13,5
Bulbo de proa		Sí
Coficientes de formas de popa	C <sub>STERN</sub>	0
	A <sub>BT</sub>	8,997



	$h_b$	2,133
	$S_m$ (m <sup>2</sup> )	2945,150
	$A_{TR}$	3,23
Rugosidad de la carena	$k_s$ (μm)	150

Los resultados para la obtención de las diferentes resistencias que conforman la total al avance son:

TABLA 32. RESULTADOS RESISTENCIA VISCOSA.

Resistencia viscosa	
$R_n$	5,58E+08
$C_F$	0,00164
$L_F/L_R$	3,240
$C_{I4}$	1
$(1+K_i)$	1,263
$R_v$ (KN)	152,8613

TABLA 33. RESULTADOS RESISTENCIA DE FRICCIÓN.

Resistencia de Fricción	
$C_F$	0,00165
$R_n$	5,58E+08
$R_f$ (KN)	121,048

Apéndices implicados en el cálculo de la Resistencia de los apéndices:

Apéndices	$S_i$ (m <sup>2</sup> )	$(1+k_2)_i$	$S_i*(1+k_2)_i$
Timón buque 1 hélice	<b>10,0000</b>	1,4	14,0000
Timón buque 2 hélices	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Timón y quillote	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Quillote	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Arbotantes	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Henchimientos protectores	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Henchimientos integrados	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Ejes	<b>3,1400</b>	3	9,4200
Aletas estabilizadoras	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Domo	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Quilla de balance	<b>0,0000</b>	0	0,0000
Total	<b>13,140</b>	4,4	23,420

$(1+k_2)_{eq}$	1,782
----------------	-------



TABLA 34. RESULTADOS RESISTENCIA DE LOS APÉNDICES.

<b>Resistencia de los apéndices</b>	
$(1+k_2)_{eq}$	1,782
$R_{AP}$ (KN)	0,954

TABLA 35. RESULTADO DE RESISTENCIA POR OLAS.

<b>Resistencia por formación de olas</b>	
C7	0,193
C1	5,535
C3	0,025
C2	0,743
C5	1
C16	1,301
m1	-2,345
C15	-1,694
m2	-0,293
$\lambda$	0,797
$R_w$ (KN)	32,534

<b>BULBO DE PROA</b>	
$A_{bt}$ (m <sup>2</sup> )	8,997
$h_b$ (m)	2,133
$P_B$	0,525

TABLA 36. RESISTENCIA POR BULBO.

<b>Resistencia por protuberancia de Bulbo</b>	
$P_B$	0,525
$F_{n_i}$	1,075
$R_B$ (KN)	3,22E-04

TABLA 37. RESISTENCIA POR EL ESPEJO.

<b>R. Inmersión del espejo</b>	
$F_{NT}$	4,814
$C_6$	0,007
$R_{TR}$ (KN)	4,595



TABLA 38. RESISTENCIA POR CORRELACIÓN.

Resistencia de correlación	
C <sub>3</sub>	0,0247
C <sub>2</sub>	0,743
C <sub>4</sub>	0,04
C <sub>A</sub>	0,000529
R <sub>A</sub> (KN)	38,921

La resistencia total al avance total obtenida es la suma de las resistencias anteriores, a excepción de la resistencia de fricción, de tal forma que:

TABLA 39. RESULTADO RESISTENCIA TOTAL.

Resistencia total al avance	
Resistencia viscosa	152,861274
Resistencia de los apéndices	0,9546824
R. inmersión del espejo	4,59515269
Resistencia de correlación	3,89E+01
Resistencia por formación de olas	3,18E+01
Resistencia total al avance (kN)	229,116
Resistencia total al avance (kg)	23355,371

Se obtiene una resistencia total al avance, R<sub>T</sub> igual al **23.355,37** kg por lo que la potencia efectiva correspondiente es:

$$EHP = \frac{23355,37 \times 6.9}{75} = 2162,73 \text{ CV} \quad (103)$$

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_M \times \eta_D \times K_p} \quad (104)$$

El rendimiento cuasi-propulsivo, se obtiene a través de las expresiones nombradas anteriormente de Parga, Parga modificada o Canal del Pardo, ayudándonos a obtenerlo de una forma aproximada. El rendimiento mecánico será el estimado en la tabla en función de la potencia, y el coeficiente  $K_p$ , considerado como punto óptimo de funcionamiento del propulsor. Siendo 0.85 para buques lentos y llenos, y 0.9 para buques rápidos y finos.

Las revoluciones se pueden estimar según la tabla anteriormente mostrada, que, en función del desplazamiento del buque, se le estiman unas revoluciones, nuestro buque tiene un desplazamiento de 5912,220 kg



Desplazamiento (Tm.)	Revoluciones (rpm) N
de 5000 a 7500	150

El rendimiento mecánico, se define en función de la potencia de freno BHP. Suponiendo que lleva una reductora y que dicha potencia este entre 1000 y 10.000 c.v el rendimiento mecánico estimado estará comprendido entre el 0,94-0,96. El rendimiento estimado usado para los cálculos será de 0,95.

Reducción	Potencia instalada (C.V)	$\eta_M$
Si	1000<BHP<10000	0.94-0.96

TABLA 40. RENDIMIENTOS CALCULADOS.

<b>Rendimiento Cuasi-propulsivo</b>	
<b>Lap</b>	0,8559
<b>Parga</b>	0,792
<b>Pardo</b>	0,731

Aplicando los diferentes coeficientes en el cálculo de la potencia al freno obtenemos para cada caso:

TABLA 41. POTENCIAS AL FRENO OBTENIDAS.

<b>BHP (CV)</b>	
<b>LAP</b>	3132,089
<b>PARGA</b>	3382,046
<b>PARDO</b>	3669,390
<b>HOLTROP Y MENNEN</b>	3359,447

A continuación, se muestran las gráficas que relacionan la resistencia total y potencia efectiva del buque y la potencia efectiva en función de la velocidad en nudos según el método Holtrop y Mennen.

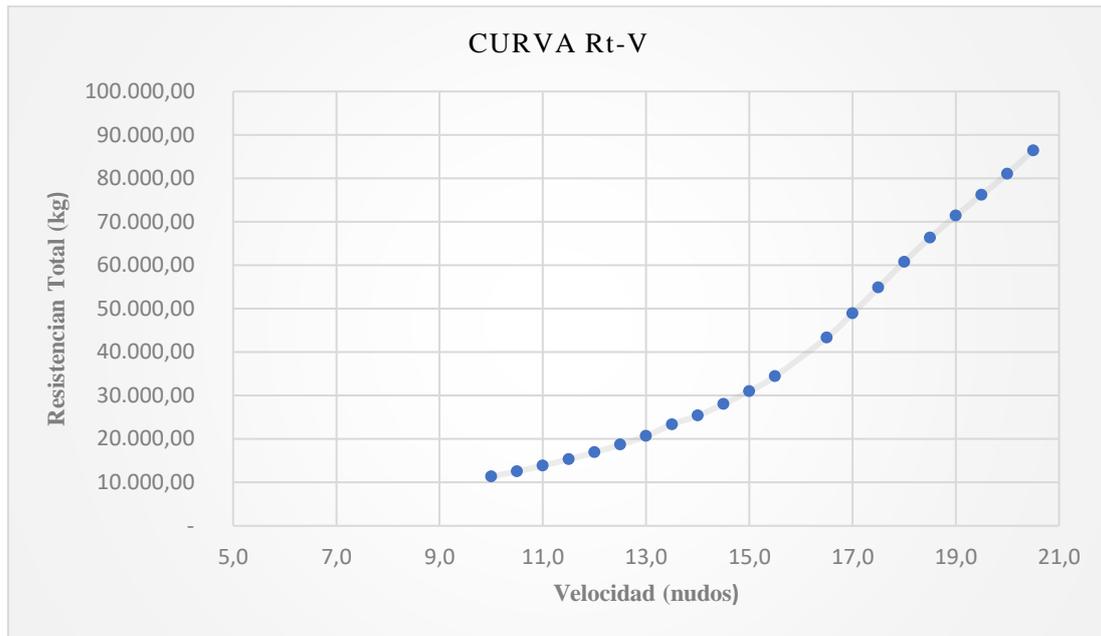


ILUSTRACIÓN 34. GRÁFICA DE LAS RESISTENCIA OBTENIDAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.

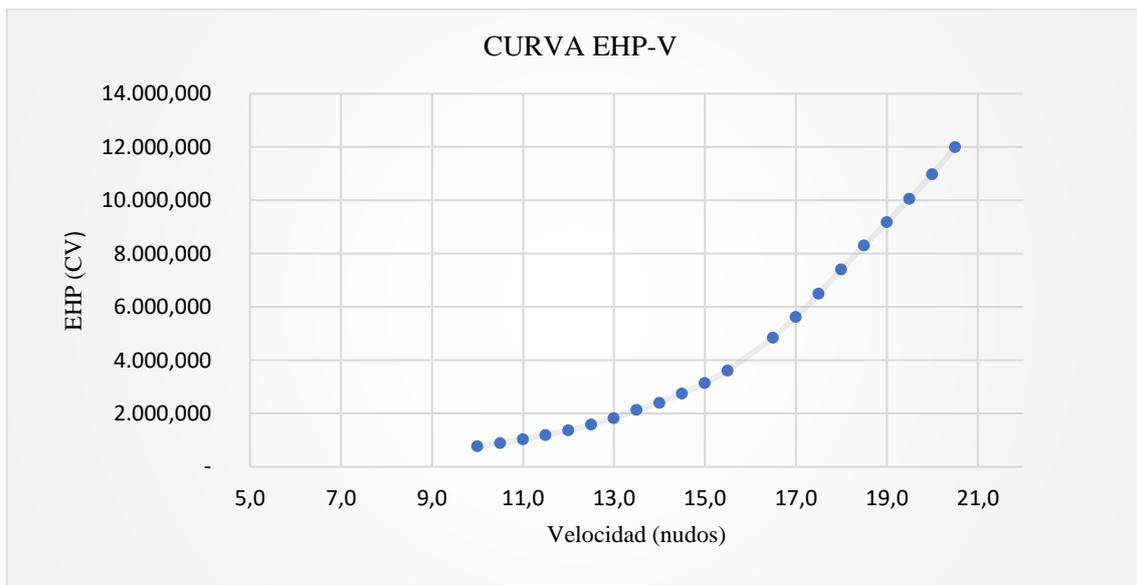


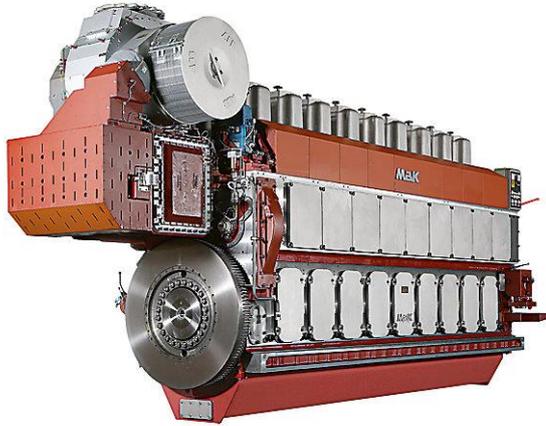
ILUSTRACIÓN 35. GRÁFICA DE LAS POTENCIAS EFECTIVAS OBTENIDAS EN FUNCIÓN DE LA VELOCIDAD.

Centrando el proyecto en el lado más desfavorable, es decir, aquella en la que necesitemos más potencia. Habrá que sobredimensionar el valor con el factor de 1.2, para hallar el punto óptimo de funcionamiento del motor que suele centrarse en torno al 80% del MCR. Así mismo se obtiene que la potencia necesaria a instalar es de **4402.056 CV** o **3282.613 Kw**

Para que el desarrollo del proyecto siga teniendo su armonía, en esta primera selección sólo se van a tener en cuenta motores que cumplan con las emisiones IMO TIER II.



Motor 1:



**M 32 C**

**Gama de potencia**

2880-4500 kW

**Gama de velocidad**

600 rev/min

**Emisiones**

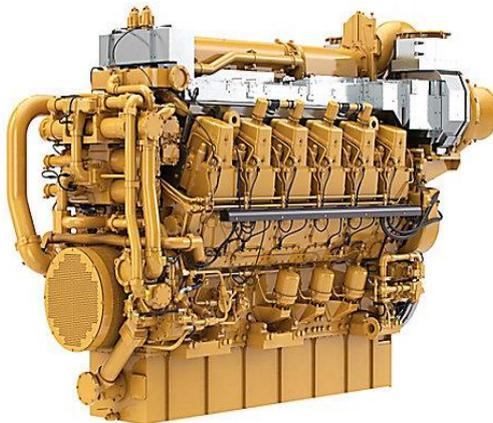
IMO II

**Combustible:**

MGO/MDO

ILUSTRACIÓN 36. MOTOR M 32 C

Motor 2:



**C280-12**

**Gama de potencia**

4640-5096 Bhp

3460-3800 bkW

**Gama de velocidad**

900 rev/min

**Emisiones:**

IMO II

**Combustible:**

Combustible destilado  
(1.4-20 cSt a38°)

ILUSTRACIÓN 37. MOTOR C280-12



Motor 3:



ILUSTRACIÓN 38. MOTOR WARTSILA 32

**WÄRTSILÄ 32**

**Modelo: 8L32**

**Gama de potencia:**

4480 kW

**Gama de velocidad:**

720 rev/min

**Emisiones:**

IMO II

**Combustible:**

HFO/MDF

Motor 4:

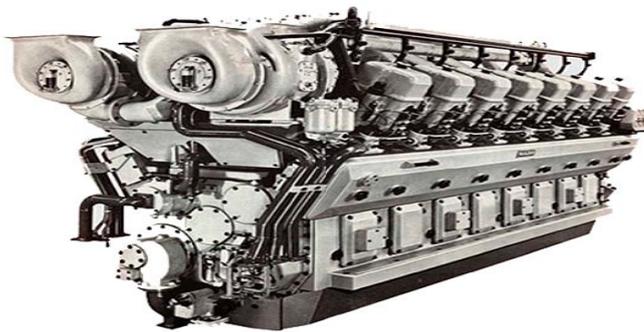


ILUSTRACIÓN 39. MOTOR WERKPOOR 8TMS410

**WERKSPoor 8TMS410**

**Gama de potencia:**

4117.63 Kw

**Gama de velocidades:**

570 Rev/min

**Emisiones:**

IMO II

**Combustible:**

HFO/IFO380

Es importante determinar la potencia instalada para la selección del propulsor, ya que es necesario conocer las revoluciones, coeficientes propulsivos y rendimiento rotativo-relativo que alcanzara el buque a la velocidad de proyecto. Teniendo en cuenta las formas del codaste, inmersión del eje y diámetro de la hélice.

Se selecciona el motor 4, modelo **Werkspoor 8TMS410** con una potencia instalada de 4117.63 Kw (5521.83 CV) para la velocidad de diseño 13.5 nudos (6.945 m/s), trabajando en el punto de 85% MCR de dicha potencia obtenemos 3499.98kW a unas revoluciones de 570 rpm. Se tiene en cuenta la reductora con relación de reducción 3:1 que lleva instalada el buque. Como bien se ha tenido en cuenta en cálculos anteriores de una reducción de por lo que en ese punto de trabajo del motor obtenemos 190 rpm.



Los coeficientes propulsivos se calculan mediante el método Holtrop y Mennen, para una amplia gama de velocidades:

TABLA 42. RESULTADO DE LOS COEFICIENTES DE ESTELA, SUCCIÓN Y RT

Velocidad		Resistencia total Rt (KN)	Coeficiente de estela w	Coeficiente de succión t
V (nudos)	V (m/s)			
10,0	5,1	113,626	0,272	0,176
10,5	5,4	125,748	0,272	0,176
11,0	5,7	138,960	0,272	0,176
11,5	5,9	153,451	0,271	0,176
12,0	6,2	169,423	0,271	0,176
12,5	6,4	187,125	0,272	0,176
13,0	6,7	206,925	0,271	0,176
13,5	6,9	229,117	0,271	0,1763
14,0	7,2	253,610	0,271	0,1763

Para la obtener el huelgo se utilizan los valores recomendados por la sociedad de clasificación Lloyd's Register of Shipping. El diámetro máximo de la hélice se obtendrá teniendo en cuenta la forma del codaste, y según la geometría de éste, la inmersión del eje y la distancia de la hélice al talón del codaste.

Huelgos hélice-carena recomendados.

(Lloyds Register of Shipping)

Número de palas	Huelgos para buques de una hélice (m)				Huelgos para buques de dos hélices (m)	
	a	b	c	d	e	f
3	1,20 K D	1,80 K D	0,12 D	0,03 D	1,20 K D	1,20 K D
4	1,00 K D	1,50 K D	0,12 D	0,03 D	1,00 K D	1,00 K D
5	0,85 K D	1,275 K D	0,12 D	0,03 D	0,85 K D	0,85 K D
6	0,75 K D	1,125 K D	0,12 D	0,03 D	0,75 K D	0,75 K D
Valor mínimo	0,10 D	0,15 D	t <sub>R</sub>		3 y 4 palas, 0,20 D 5 y 6 palas, 0,16 D	0,15 D
Símbolos						
C <sub>B</sub> = Coeficiente de bloque al calado de carga. L = Eslora en la flotación de verano desde la parte de proa de la roda hasta la parte de popa del codaste popel.				t <sub>R</sub> = Espesor del timón a 0,7R sobre el eje (m). P = Potencia en el eje (kW). R = Radio del propulsor (m). D = Diámetro del propulsor (m).		
$K = \left(0,1 + \frac{L}{3050}\right) \left(\frac{3,48 C_B P}{L^2} + 0,3\right)$						
$K = \left(0,1 + \frac{L}{3050}\right) \left(\frac{2,56 C_B P}{L^2} + 0,3\right)$						

ILUSTRACIÓN 40. COEFICIENTES RECOMENDADOS PARA LA HÉLICE POR LLOYDS REGISTER.

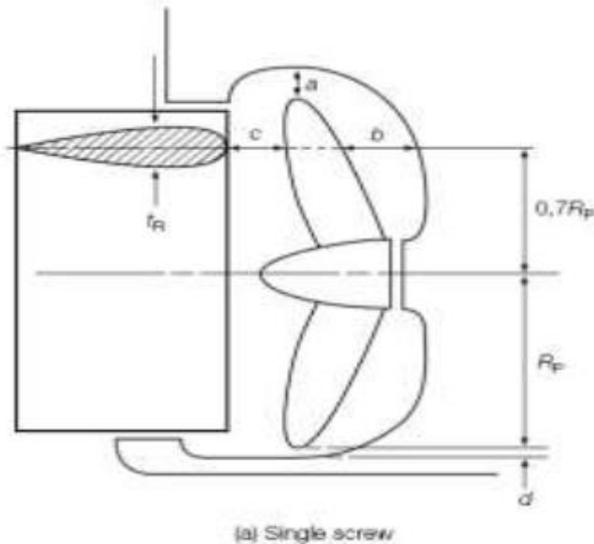


ILUSTRACIÓN 41. ESTIMACIÓN DEL HUELGO

El valor de los huelgos mínimos de la hélice recomendados se obtiene:

a	d
1.0KD	0.03D

El valor de K como bien se observa en la **tabla 42** es calculado a través de la expresión:

$$K = \left(0.1 + \frac{L}{3050}\right) \times \left(\frac{3.48 \times C_B \times P}{L^2}\right) + 0.3 \quad (105)$$

Donde P es la potencia en el eje en kW, anteriormente descrita, SHP.

Por lo tanto, suponiendo unos datos de formas de codaste como:

TABLA 43. RESULTADOS DE COEFICIENTES PARA LA OBTENCIÓN DEL HUELGO.

Huelgos hélice - carena recomendados (Lloyds Register of Shipping)						
Número de palas	Huelgos para buques de una hélice (m)				Huelgos para buques de dos hélices (m)	
	a	b	c	d	e	f
3	0,6833	1,0249	0,4584	0,1146	0,6352	0,6352
4	0,5694	0,8541	0,4584	0,1146	0,5293	0,5293
5	0,4840	0,7260	0,4584	0,1146	0,4499	0,4499
6	0,4271	0,6406	0,4584	0,1146	0,3970	0,3970
Valor mínimo	0,0569	0,5730	0		0,7640	0,5730



K (1 hélice)	0,14905969
K (2 hélice)	0,13857321

Los cálculos realizados mediante Holtrop contemplando un diámetro máximo de 3,8 metros siendo esta la distancia máxima real disponible en los huelgos, donde para a y b se obtienen valores:  $a=0,6833$  y  $b=1,0245$ .

Teniendo en cuenta que la distancia entre el eje y el codaste es de 2.5 metros, la hélice tendrá un Radio máximo de 1.8167 m.

El cálculo del coeficiente se ha realizado para distintas palas, los coeficientes propulsivos son los mostrados en la *tabla 43*. El rendimiento rotativo relativo, depende de la relación  $A_E/A_0$ , la cual depende a su vez de la selección de la hélice y las características de la misma.

TABLA 44. RESULTADOS DE LA SELECCIÓN DEL PROPULSOR

SELECCIÓN DEL PROPULSOR PERTENECIENTE A LA SERIE B DE WAGENINGEN					
BHP (CV)	5521	w	0,2717	Dest (m)	3,828
n (rpm)	190	t	0,1769	Ae/Ao	0,63
V (nudos)	13,5	$\eta_r$	1,0020	Ie (m)	3,9
EHP (CV)	2164,941	$\eta_m$	0,95	Pa-Pv	10100
		kp	0,85		
		kn	1		
		$\eta_H$	1,130		

Tras realizar los cálculos, y hallar los coeficientes propulsivos se obtienen las curvas  $K_T$ -J,  $K_Q$ -J y  $\eta_0$ -J para cada serie de hélices.

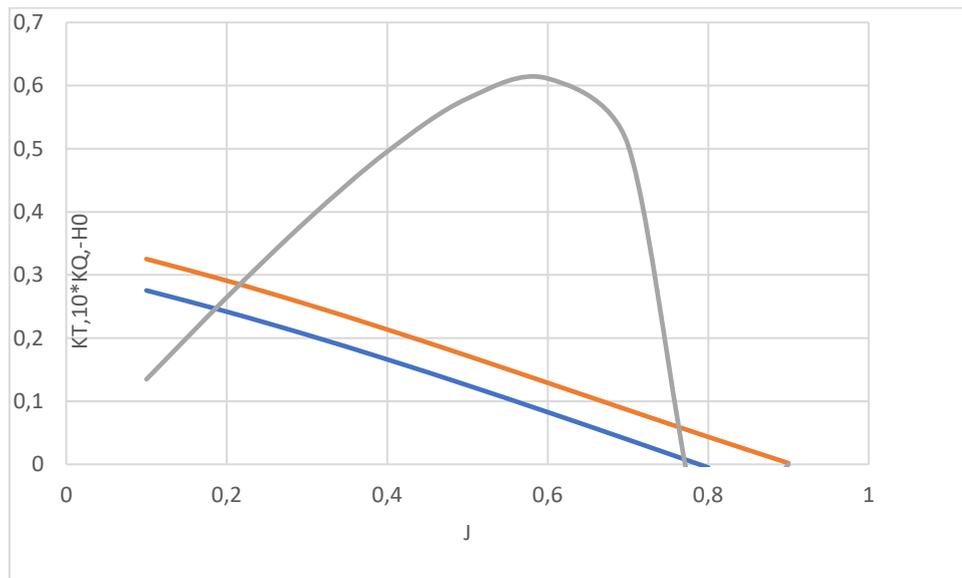


ILUSTRACIÓN 42. GRAFICA DIAGRAMA PARA Z=3.

De igual modo se programan las curvas BP-1/J para diferente número de palas,  $Z$ . Es esencial la relación  $A_E/A_0$ , y el número de palas, para el eficiente funcionamiento de la hélice y para evitar el fenómeno de la cavitación.

La consideración área disco se determina básicamente por cavitación, es decir para que este fenómeno no aparezca, se necesita un cierto valor mínimo de dicha relación. Debe escogerse la menor relación que sea posible, ya que el rendimiento del propulsor disminuye conforme dicha relación aumenta. Para la selección del número de palas, se debe tener en cuenta que menor número de palas, mejor rendimiento propulsivo se obtiene de la propulsión.

La cavitación es un fenómeno a evitar y esto se consigue seleccionando una relación suficientemente alta. Por lo que para una buena selección de la hélice la relación debe ser lo mínima posible dentro lo posible en cuanto al número de palas seleccionado. En cuando, a la vez se precisa seleccionar la opción que mayor rendimiento propulsivo te aporte.

Existen varios métodos de calcular esta relación mínima,  $(A_E/A_0)_{min}$ , entre ellos Método de Burril y el Método de Keller, este último es el utilizado en los cálculos. Teniendo en cuenta que la condición mínima para que aparezca cavitación, es que el  $A_E/A_0$  seleccionada, sea mayor que el  $(A_E/A_0)_{min}$ . Calculada mediante el método de Keller:

$$\left(\frac{A_E}{A_0}\right)_{min} = \frac{(1.03 + 0.3xZ)xT}{(P_0 - P_V)x D^2} + k \quad (106)$$

Donde  $Z$  es el número de palas,  $T$  el empuje calculado en (kg),  $K$  un coeficiente siendo 0.2 para buques de una hélice y 0.1 para buques de dos hélices.  $K=0.2$  en este caso.  $D$  es



el diámetro de la hélice,  $P_v$ , es la presión de vapor, y  $P_o = P_a + \rho g(h-r)$ , siendo  $h$  la inmersión del eje.  $\rho$ , la densidad del agua en la que navega,  $g$  la gravedad y  $P_a$ , la presión atmosférica.

Para encontrar el  $(A_E/A_0)_{\min}$ , primero se estima iterando con la relación  $A_E/A_0$  entre 0,60-0,75 para diferente número de palas, obteniendo mediante los cálculos de los diagramas  $B_p-1/J$ , los resultados por  $Z$  palas del rendimiento del propulsor aislado,  $H/D$ ,  $T$ ,  $(A_E/A_0)_{\min}$ . a partir del parámetro  $B_p$  en función de la potencia requerida para el buque, permitiendo de esta manera la optimización del diámetro.

$$B_p = \frac{(N \times \sqrt{DHP_{WAG}})}{V_A^{2.5}} \quad (107)$$

Donde  $N$ , son las revoluciones por minuto y  $DHP_{WAG}$ :

$$DHP_{WAG} = BHP \times \frac{1}{1.026} \times \frac{75}{76} \times \eta_M \times \eta_R \quad (108)$$

Y  $V_A$ , es la velocidad en nudos:

$$V_A = V \times (1 - w) \quad (109)$$

Para  $Z=3$  palas el resultado óptimo se ha encontrado para  $A_e/A_o = 0.63$ . Los valores obtenidos se muestran en la *tabla 45*.

TABLA 45. RESULTADO DE LA ITERACIÓN PARA  $Z=3$ .

3 palas			
<b>Z</b>	3	<b>Ae/Ao</b>	0,63
<b>D (m)</b>	3,8200	<b>BHPnec (CV)</b>	4653,213
<b>H/D</b>	0,649	<b>BHPinst (CV)</b>	5521
<b><math>\eta_0</math></b>	0,509	<b>Margen</b>	<b>15,718</b>
<b>T (Kg)</b>	33701,84		
<b>(Ae/Ao)min</b>	0,560	<b>NO CAVITA</b>	

Para  $Z=4$  palas el resultado óptimo se ha encontrado para  $A_e/A_o = 0.63$ . Los valores obtenidos se muestran en la *tabla 46*.



TABLA 46. RESULTADO DE LA ITERACIÓN PARA Z=4.

4 palas			
<b>Z</b>	4	<b>Ae/Ao</b>	0,63
<b>D (m)</b>	3,820	<b>BHPnec (CV)</b>	4605,354
<b>H/D</b>	0,729	<b>BHPinst (CV)</b>	5521
<b><math>\eta_0</math></b>	0,514	<b>Margen</b>	<b>16,584</b>
<b>T (Kg)</b>	34052,071		
<b>(Ae/Ao) min</b>	0,614	<b>NO CAVITA</b>	

En el caso de Z= 3 y Z=4 se observan resultados bastantes eficientes. Para la misma relación Ae/Ao, dan valores semejantes de rendimiento y empuje.

Para número de palas, Z=5, no se ha encontrado un resultado que evite el fenómeno de cavitación, por lo que se descarta como opción de selección. Véase tabla 46, los resultados para Z=5, Ae/Ao=0.85. En caso contrario, para Z=6, si se encuentra una solución donde la hélice no cavitaria.

TABLA 47. RESULTADOS DE LA ITERACIONES PARA z=5 Y z=6.

5 palas			
<b>Z</b>	5	<b>Ae/Ao</b>	0,85
<b>D (m)</b>	3,8200	<b>BHPnec (CV)</b>	14805
<b>H/D</b>	0,769	<b>BHPinst (CV)</b>	16677,279
<b><math>\eta_0</math></b>	0,5134	<b>Margen</b>	<b>-12,6462598</b>
<b>T (Kg)</b>	82070,276		
<b>(Ae/Ao) min</b>	1,3167	<b>CAVITA</b>	

6 palas			
<b>Z</b>	6	<b>Ae/Ao</b>	0,85
<b>D (m)</b>	3,8200	<b>BHPnec (CV)</b>	4678,080
<b>H/D</b>	0,708	<b>BHPinst (CV)</b>	5521
<b><math>\eta_0</math></b>	0,506	<b>Margen</b>	<b>15,267</b>
<b>T (Kg)</b>	33522,689		
<b>(Ae/Ao) min</b>	0,705	<b>NO CAVITA</b>	



Omitiendo los resultados para  $Z=5$  palas, los márgenes obtenidos para el resto de  $Z$ , se encuentran entorno 15-17%. Los márgenes obtenidos en ensayos, generalmente, se encuentra alrededor de 10 % por lo que se podría afirmar que los resultados obtenidos son viables, sí se tienen en cuenta los posibles errores acumulado en los cálculos con el método programado en la herramienta de cálculo.

Los buques de esta categoría y dimensione suelen trabajar con hélices de  $Z=4$  palas, ya que con  $Z=3$ , debido a la carga de trabajo que causaría un nivel de excitaciones que afectaría a la línea de ejes. Por ello y observando que el margen que nos proporciona es muy similar al de 3 palas, la hélice finalmente seleccionada es la correspondiente  $Z=4$ , debido a que es la que mayor rendimiento y empuje ofrece. Véase *tabla 47* para ver las características del propulsor finalmente seleccionado.

TABLA 48. RESULTADO DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL PROPULSOR.

<b>Z</b>	4
<b>(Ae/Ao) min</b>	0.614
<b>D (m)</b>	3,8200
<b>H/D</b>	0,730
<b><math>\eta_0</math></b>	0,514
<b>T (Kg)</b>	34052.074

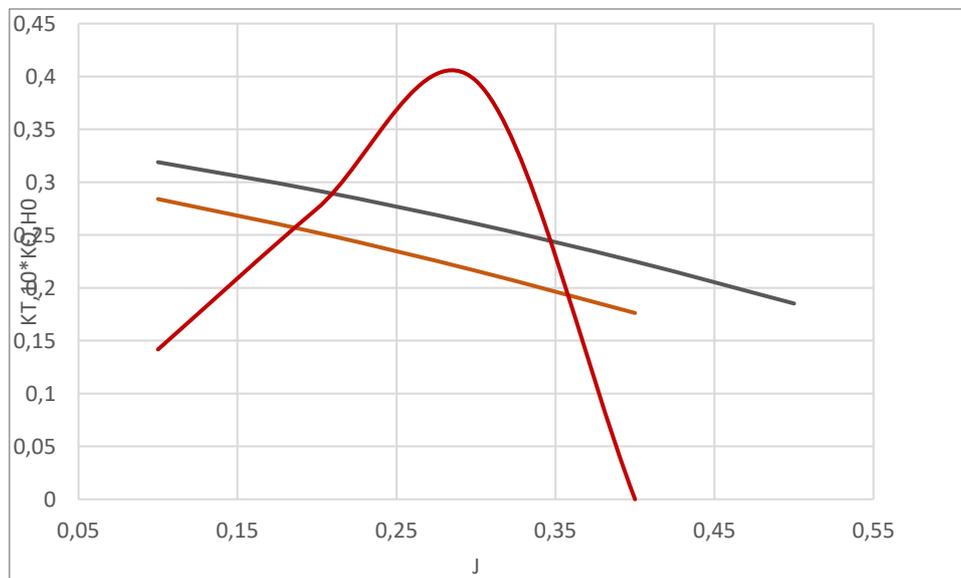


ILUSTRACIÓN 43. GRAFICA DIAGRAMA PARA  $Z=4$

Con los resultados de  $K_T/J^2$  en función del grado de avance, obtenidos a partir de la resistencia al avance.

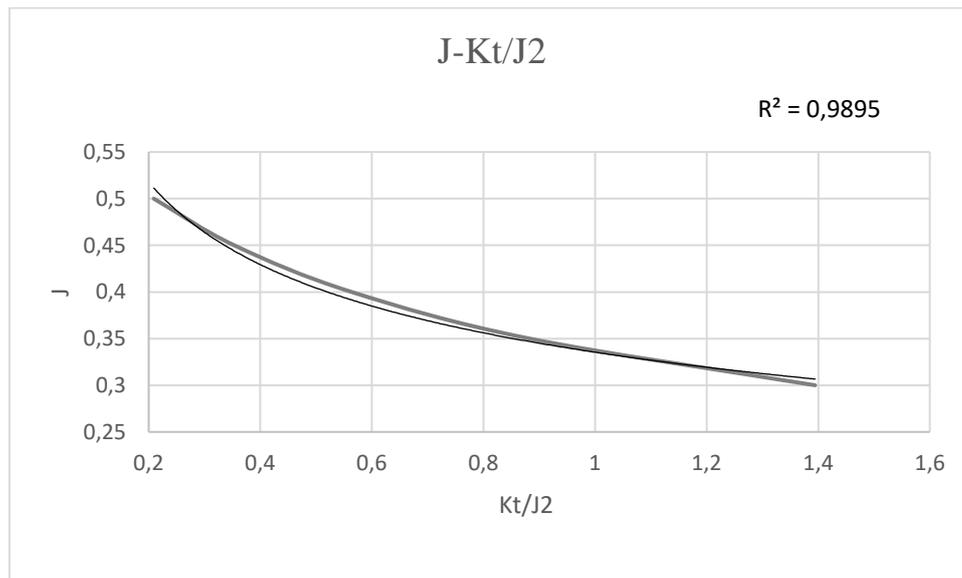


ILUSTRACIÓN 44. GRAFICA J-(KT/J2).

Obteniendo  $Kt/J2$  de la expresión:

$$\frac{K_T}{J^2} = \frac{T}{f x n^2 x D^4 x V_A^4} = \frac{R_T}{f x (1-t) x D^2 x V^2 x (1-w)^2} \quad (110)$$

Pudiendo obtener el grado de avance según la regresión anterior:

$$J = -0.00217x \left(\frac{K_T}{J^2}\right) + 0.15x \left(\frac{K_T}{J^2}\right)^2 - 0.15x \left(\frac{K_T}{J^2}\right) + 0.714 \quad (111)$$

Y los valores necesarios para obtener los siguientes coeficientes:

$$n = \frac{V_A}{J * D} \quad (112)$$

$$Q_0 = f * n^2 * D^5 * K_{Q0} \quad (113)$$



$$Q_B = \frac{Q_0}{\eta_R} \quad (114)$$

$$DHP_B = \frac{2 * \pi * n * Q_B}{75} \quad (115)$$

$$BHP_{neces} = \frac{DHP_B}{K_p * \eta_0 * \eta_R * \eta_M * \eta_H} \quad (116)$$

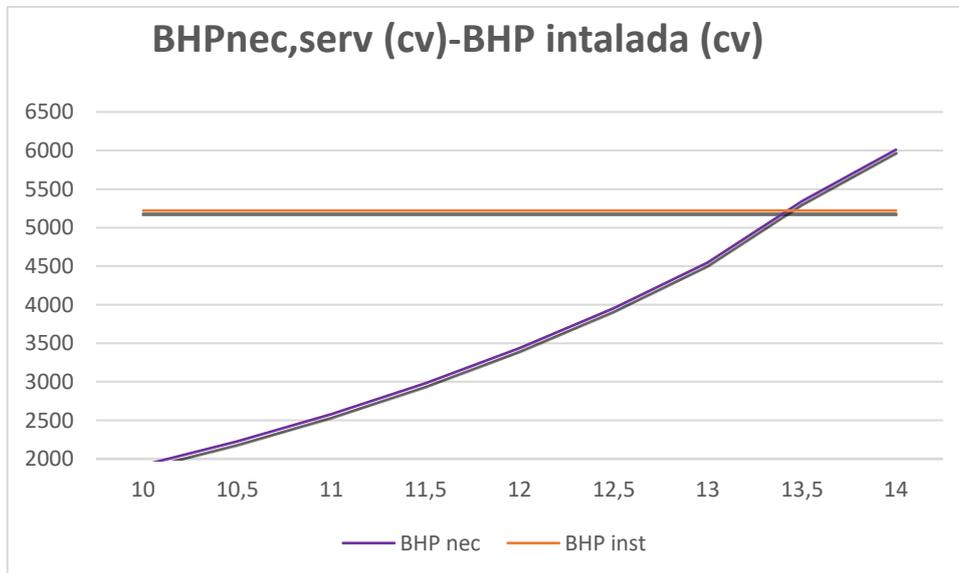


ILUSTRACIÓN 45. GRÁFICO DE BHP NECESARIA EN EL SERVICIO -BHP INSTALADA

Los resultados obtenidos por las expresiones anteriormente descritas, vienen definidas en la **tabla 48**.



V (nudos)	V (m/s)	Rt(Kg)	w	t	Kt/J <sup>2</sup>	J	n (rps)	n (rpm)	10KQ	Q0	Qb	DHPb	BHP nec
10	5,14	11325,61	0,30	0,21	0,73	0,54	1,73	103,76	0,06	15936,50	15904,58	2304,26	1918,23
10,5	5,40	11325,61	0,30	0,21	0,66	0,55	1,79	107,14	0,06	16251,94	16219,40	2426,38	2229,22
11	5,66	11325,61	0,30	0,21	0,60	0,56	1,84	110,43	0,06	16486,27	16453,25	2536,98	2581,14
11,5	5,92	11325,61	0,30	0,21	0,55	0,57	1,89	113,68	0,06	16669,58	16636,20	2640,69	2980,55
12	6,17	11325,61	0,30	0,21	0,50	0,58	1,95	116,92	0,05	16822,24	16788,56	2740,78	3434,92
12,5	6,43	11325,61	0,30	0,21	0,46	0,59	2,00	120,17	0,05	16957,98	16924,02	2839,57	3953,41
13	6,69	11325,61	0,30	0,21	0,43	0,59	2,06	123,43	0,05	17086,00	17051,79	2938,66	4548,74
13,5	6,95	11325,61	0,30	0,21	0,40	0,60	2,11	126,71	0,05	17212,52	17178,05	3039,23	5340,24
14	7,20	11325,61	0,30	0,21	0,37	0,61	2,17	130,03	0,04	17341,67	17306,94	3142,08	6010,63

**TABLA 46. RESULTADOS DE LOS PARÁMETROS ANTES DESCRITOS EN FUNCIÓN DEL GRADO DE AVANCE, J**



## 5. Selección de la ruta a analizar.

En base a los puertos clave analizados en el Bloque I del TFG, la ruta seleccionada va a estar ligada a uno de los puertos seleccionados, en este caso se ha determinado una ruta con origen en el Puerto de Barcelona (España) y origen Zeebrugge (Bélgica). Esta ruta, permite evaluar las zonas afectadas con los diferentes límites de emisiones en consumo de combustibles con contenido en azufre limitado.

La ruta seleccionada, se puede desglosar principalmente en dos zonas de navegación. La primera de ellas comprende el tramo de navegación del Mar Mediterráneo, conectado por el océano Atlántico a su paso por el estrecho de Gibraltar, hasta entrar en la zona del Mar del Norte, es en este límite donde daría comienzo la segunda zona, la cual implica una limitación de emisiones no superior al 0,1% S.

La ruta está configurada por el paso de los siguientes puertos:

- ❖ Barcelona (ES) – Emden (DE)-Sheerness (GB) – Zeebrugge (BE)

La distancia total de la ruta está comprendida por un trayecto optimizado de 2.815.13 Millas y una duración de 7,71 días a una velocidad de 13.5 nudos en condición de carga.

De las 2815.13 millas solo 106 forman parte de la zona SECA, donde se aplican las restricciones de emisiones en la navegación con contenidos de azufre  $S < 0.1\%$ . Véase la segunda imagen extraída del trayecto de la ruta marítima.

TABLA 49. DATOS DE LAS DISTANCIAS ENTRE PUERTOS.

Nº	Nombre del Puerto	Distancia	Millas en zona ECA	velocidad	Días de navegación.
1	Barcelona (ES) [+01:00]				0
2	Emden (DE) [+01:00]	2417,83	665.82	13,5	6,48
3	Sheerness (GB) [+00:00]	291,04	291,04	13,5	0,90
4	Zeebrugge (BE) [+01:00]	106,26	106,26	13,5	0,33
Total		2815.13	1063.12		7.71

FUENTE: HERRAMIENTA DE CÁLCULO DISTANCIAS



ILUSTRACIÓN 46. IMÁGEN DEL TRAYECTO BARCELONA-ZEEBRUGGE.



ILUSTRACIÓN 47. IMÁGEN AMPLIADA DE LA ZONA SECA A NAVEGAR.

## 5.1. Cálculo del consumo y autonomía del buque.

En primer lugar, hay que determinar la capacidad de los tanques de combustible dispuestos en el buque. Como se observa en el plano de disposición general los tanques destinados a almacenamiento de combustible son 5:



TABLA 50 CAPACIDAD DE TANQUES COMBUSTIBLE DEL BUQUE.

TANQUE	m <sup>3</sup>	Tn
Fuel-oil N°5 (Er)	58.976	54,484
Fuel-oil N°5 (Br)	58.976	54,484
Fuel-oil N°7 (Er)	51,045	47,472
Fuel-oil N°7 (Br)	51,045	47,472
Diesel-oil centro	94,614	87,995
		291,907

La autonomía en millas, se puede estimar mediante la expresión;

$$Autonomia \text{ (millas)} = \frac{V \times T \times 10^6}{C_{spf} \times P} \quad (117)$$

Donde V es la velocidad en nudos de navegación del buque en servicio, T es la capacidad de los tanques en toneladas,  $C_{spf}$  es el consumo específico del motor en g/kWh., y donde P es la potencia del motor en kW.

Como se puede observar para el cálculo de la autonomía hace falta un parámetro, el referente al consumo específico del motor, pero ese dato no se encuentra en las especificaciones técnicas del motor seleccionad. Por lo que, éste puede ser estimado; según catálogo, regresión lineal o especificaciones técnicas generales de los motores. En este caso el consumo se obtendrá de una regresión lineal, la cual partirá de una base de datos de motores de potencia comprendida en la necesaria a instalar en el buque.

Por otro lado, el consumo específico de un motor es proporcional al,  $\eta_e$ , que éste tenga. Para motores de combustión interna alternativos marinos suelen oscilar entre el 25-50%. Oscilando el consumo entre 170 g/kWh y 320 g/kWh. Concretamente en motores de 4T como el que lleva instalado el buque entre 170-280 g/kWh [30].

La expresión que permite el cálculo del consumo específico indicado del combustible es;

$$C_{spf} = \frac{m_F}{\eta_e \times m_F \times H} = \frac{1}{\eta_e \times H_c} \quad (118)$$

Siendo  $H_c$  el poder calorífico del combustible. Dado que tenemos esa estimación teórica, se realiza una regresión lineal con el consumo de motores similares sacados de los diferentes catálogos anteriormente consultados se obtiene:

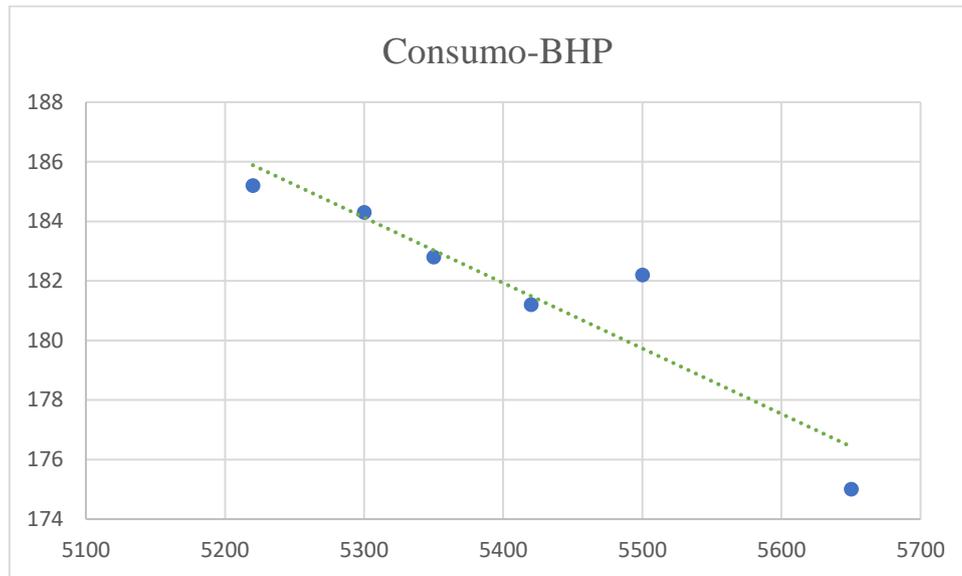


ILUSTRACIÓN 48. GRÁFICO DE LA OBTENCIÓN DEL CONSUMO ESPECÍFICO.

Con una bondad de ajuste  $R^2 > 0.8$  podemos dar la estimación como válida obteniendo un consumo específico para el motor instalado de:

TABLA 51. RESULTADO DEL CÁLCULO DE CONSUMO ESPECÍFICO DEL MOTOR INSTALADO.

g/kwh	181,243
-------	---------

Por los que la autonomía finalmente queda:

$$Autonomia \text{ (millas)} = \frac{13.5 \times 291.907 \times 10^6}{181.243 \times 4117.63} = 5280.43 \text{ millas}$$

En el caso más desfavorable en el que el consumo de combustible fuese de 270 g/kWh el buque tendría una autonomía de:

$$Autonomia \text{ (millas)} = 3544.599 \text{ millas}$$

En cualquier de los casos es autonomía suficiente para cubrir la ruta seleccionada, de su forma más eficiente, es decir optimizando los tramos de manera que el tiempo de navegación sea el menos posible.

A continuación, con el consumo calculado, y los datos de la ruta seleccionada, sabiendo que el precio del IFO 380 que consume el motor seleccionado es de 380,50 dólares por tonelada métrica (\$/MT). Se procede al cálculo del coste que tendría la realización de la ruta, siendo éste:

$$coste \text{ (\$)} = T \text{ (h)} \times \frac{C_{spf} \left( \frac{g}{kwh} \right)}{10^6} \times Precio \left( \frac{\$}{MT} \right) \times BHP \text{ (Kw)} \quad (119)$$

$$coste \text{ (\$)} = 65.127,41 \text{ \$}$$



## 5.2 Remotorización

La remotorización es derivada de las nuevas entradas en vigor de la normativa IMO, convenio Marpol. Normativas que han originado, que el panorama marítimo se vea mapeado por sectores con restricciones de emisiones limitadas por el tipo de combustible que consume el buque que debe navegar por esas zonas. y /o el tipo de tecnología aplicada al motor en cuanto a reducción y tratamiento de gases de escape se refiere. Por lo que la ruta original, se ve castrada por la zona SECA. El buque se ve obligado, en el caso de seguir operando en esta ruta marítima, a cambiar el tipo de combustible que consume, y en consecuencia el tipo de motor que lo propulsa, ya que no cumplen la normativa Euro 6, que es la que vela por las emisiones en la zona SECA.

El buque debe navegar por el Mar del Norte 1063.12 millas de las 2815.13 que tiene el trayecto por el que opera. Por lo que, en definitiva, deberá sufrir una remotorización que no sólo lo certifique para la IMO TIER III y IV, sino que, asegure la viabilidad de la operatividad del buque a largo plazo por cualquier punto del ámbito marítimo.

A continuación, se realiza una revisión literaria de las posibilidades que existen, hoy en día, para subsanar la propulsión del buque.

### 5.2.1 Cambios tecnológicos en motores marinos.

Según la EPA en motores de hasta 5000 kW para ajustarse al nivel II de las regulaciones de emisiones, donde la mayoría de los motores marinos seguirán siendo de 4T y equiparán sobrealimentación y post enfriamiento de los gases de escape, preferentemente de forma externa. Para alcanzar el nivel III es necesario recurrir a la tecnología de inyección common rail y recirculación de los gases de escape (EGR).

Los motores de potencias superiores a los 5000 kW, alcanzaran sin excesivos cambios los límites de NO<sub>x</sub>, bajo el convenio de la IMO. De forma general los nuevos diseños se orientan hacia la reducción de emisiones en lugar de reducción del consumo. Estos impactos negativos del consumo de combustible pueden ser minimizados con estrategias adecuadas en la inyección.[31]

Es necesario acelerar la transición a combustibles y propulsión 0% contenido en carbono, tras una larga trayectoria de buques propulsados por viento, carbón y petróleo, es necesario una cuarta revolución de la propulsión marina para conseguir esa descarbonización total del transporte marítimo en función de los objetivos marcados por la OMI.

La introducción de nuevas tecnologías con cero emisiones de carbono solo será posible mediante un enorme esfuerzo de I+D. Los armadores están dispuestos a catalizar este proceso para lo que se ha creado un fondo dotado con 5.000 millones de dólares.

Las medidas aplicadas hasta ahora son provisionales para ir reduciendo la huella de carbono, la mejora radical en buques es llevar las medidas operacionales de la eficiencia energética con la introducción de combustibles menores en emisiones de CO<sub>2</sub> como el Gas Natural Licuado (GNL). Estas medidas mejoran sustancialmente la eficiencia energética en la flota mundial. Es un hecho según la última investigación de la OMI sobre las emisiones de gases de efecto invernadero de agosto de 2020, las emisiones totales de transporte marítimos se han reducido con respecto a 2007 un 8%, a pesar de que el flujo de transporte marítimo aumento un 40%, lo que se ve como un logro significativo.

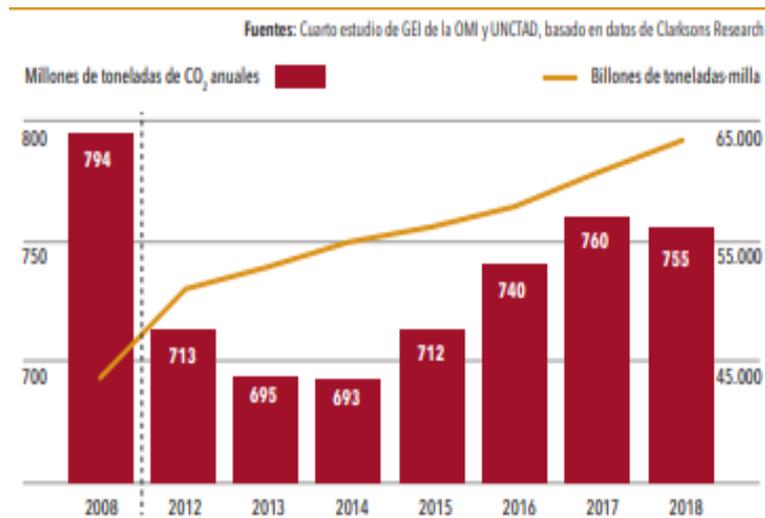


ILUSTRACIÓN 49. EVOLUCIÓN DE LAS EMISIONES.

Existen numerosas investigaciones a combustibles y nuevas tecnologías, de las que hablaremos más adelante. Volviendo a la referencia del apartado los cambios tecnológicos aplicadas a motores de 4T de potencias superiores a 5000 kW tenemos las siguientes recomendaciones:

- 1) Retraso en el inicio de la inyección. (VIT)
- 2) Aumento de la presión de inyección
- 3) Aumento de la relación de compresión
- 4) Variación del perfil de inyección
- 5) Adición de agua (WE)
- 6) Reducción del consumo de lubricante
- 7) Disminución del volumen sobre los segmentos del pistón
- 8) Recirculación de los gases de escape refrigerados (ERG)
- 9) Reducción catalítica selectiva (SCR)
- 10) Combustibles con muy bajo azufre (30 ppm)

Saliendo de las modificaciones de la geometría del motor, tenemos:

- 11) Motores Dual-Fuel
- 12) Propulsión Diesel-eléctrica
- 13) Propulsión eléctrica
- 14) Propulsión a GNL



TABLA 52. TÉCNICAS DE APLICACIÓN A LOS MOTORES PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES

ACCION -TECNICA	VENTAJA	INCONVENIENTE
Reducción del contenido de azufre en el combustible	Reduce la emisión de SOx	Encarece el precio del combustible
Aumento de la presión en la inyección	Mejora la automatización del combustible y en consecuencia la combustión	Necesidad de mejora en el sistema de bombeo.
Retraso del inicio de la inyección	Produce menores temperaturas de combustión. Es una tecnología probada y de fácil aplicación.	Produce un aumento del consumo de combustible, y aumenta la emisión de materia particulada y humos.
Control Electrónico de la inyección (COMMON RAIL)	disminución de los NOx y consumo específico de combustible. Regulación integral de la cantidad de combustible consumida o inyectada.	Sistema sensible a altas temperaturas requeridas por el combustible y Requerimientos específicos del sistema de control en la inyección.
Enfriamiento del aire de carga en la sobrealimentación	Se realiza con agua de mar, disminuyendo a la temperatura, lo que mejora la calidad del aire	No se usa en aplicaciones terrestres.
Rediseño de la geometría del motor y cámara de combustión	Disminuye la emisión de NOx e Hidrocarburos. Mejora la mezcla aire-combustible.	Sistema está en desarrollo, tiene elevado coste en investigación y fabricación.
Variación del diagrama de indicación	Reduce los NOx, mediante el enfriamiento del aire de carga y (ERG)	Se necesita un sistema para controlar el cierre y apertura de las válvulas
Emulsión de agua en combustible	Reducción importante de las emisiones de NOx. Está aún en fase de desarrollo.	Fluido es inestable, puede causar corrosión en los inyectores. Y lleva el coste adicional del agua.
Inyección directa de agua	Es una tecnología ya probada, y tiene una importante reducción de los NOx	Sistema complejo, y coste adicional del agua
Adición de agua en el aire de carga	Reducción de los NOx y tecnología probada	Efecto limitado
Reducción de consumo de lubricante	Menores emisiones de materia particulada	Aumento de la fricción
recirculación de los gases de escape (ERG)	Reduce las emisiones de NOx	Aumenta la emisión de materia particulada Es una tecnología no madurada.
Reducción catalítica selectiva (SCR)	Reducción casi total de emisiones NOx Es una tecnología probada	Elevado coste
Cambio de los filtros en escape	Disminuye la emisión de partículas	Aumentan la contrapresión en el escape Elevado coste.



En la tabla anterior, se reúnen algunas de las acciones tecnológicas que inciden principalmente en la reducción de emisiones NOx, por lo que para atacar las emisiones el SOx se tiene que hacer hincapié en los combustibles, en la composición de los mismos, o en la tecnología del diseño de la cámara de combustión, ya que todas las emisiones son causadas por la combustión incompleta en el proceso de combustión de los motores, las emisiones son todos los inquemados derivados de esa combustión incompleta.

En lo relativo a combustibles alternativos y nuevas tecnologías aún se está muy lejos de conseguir un transporte marítimo cero de emisiones. En la actualidad, los combustibles usados son fósiles derivados del petróleo, y tienen una gran ventaja energéticamente hablando por su densidad y fácil manipulación, sin embargo, producen carbono durante toda su producción y combustión.

Con el objetivo de lograr un transporte marítimo con cero emisiones habrá que desarrollar tanto nuevas tecnologías como nuevos combustibles que, hoy en día, no existen en una forma o a una escala que permitan su uso.

Se están desarrollando nuevos combustibles como el hidrógeno o el amoníaco para el transporte transoceánico o las baterías eléctricas para el transporte marítimo de corta distancia. Sin embargo, todas estas alternativas están aún muy lejos de que sea posible su uso comercial a gran escala, para lo que hará falta una considerable inversión en I+D.

### 5.2.2 Innovaciones en fases de desarrollo.

Como grandes prometedores del futuro de la propulsión marítima, podemos hablar de los combustibles en fase de desarrollo que permitan estar más cerca de la descarbonización total. Entre ellos encontramos:

a) Amoníaco Verde, NH<sub>3</sub>

El amoníaco verde es un combustible entre lo más prometedores del sector. A pesar de que su combustión produce óxidos de nitrógeno, ya existe la tecnología que los eliminaría, instalando un sistema de reducción catalítica selectiva. Su gran ventaja sería su utilización en motores de combustión interna muy similares a los actuales, de hecho, MAN prevé que para 2024 tendrá disponible para comercialización un motor alimentado por amoníaco. Un inconveniente que presenta este combustible es, que no estará disponible para uso hasta 2070, fecha en la que está prevista que existan las cantidades suficientes para abastecer a la flota. Su fabricación es a partir del gas natural licuado y gases derivados del petróleo, Para poder ser utilizado debería almacenarse en estado líquido y habría que desarrollar una nueva red de suministro capaz de manipularlo de forma segura ya que es muy tóxico

b) Hidrógeno, H<sub>2</sub>

Será un combustible que no emite ni gases de efecto invernadero ni contaminantes, pero actualmente la mayor parte del H<sub>2</sub> disponible comercialmente se produce a partir de combustibles fósiles en un proceso energético que produce altas emisiones de carbono. Es por ello que nace el concepto “Hidrógeno Verde” generado a partir del agua mediante ciclos termoquímicos que utilizan energías renovables o por electrolisis a partir del excedente no almacenable de energías solar o eólica.



De forma intermedia se conoce el “Hidrogeno Azul” que se obtendría a partir de combustibles fósiles y la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> generado en el proceso. La densidad energética del H<sub>2</sub> a temperatura ambiente es muy baja, por lo que para usarlo como combustible tendría que licuarse, lo que se produce a -253 °C a presión ambiental. Un importante inconveniente es el volumen de almacenamiento que necesita este tipo de combustible, siendo 5 veces superior al del convencional.

c) Pilas de combustible y baterías

El uso de baterías para propulsión en buques se encuentra aún en una etapa muy incipiente de desarrollo. Un gran portacontenedores requeriría para navegar durante una semana la energía de 70.000 baterías de un coche eléctrico actual. La opinión generalizada es que los buques puramente eléctricos solo serán viables para servicios de corta distancia. Se considera una posibilidad prometedora, tanto para propulsión en rutas cortas como para los sistemas auxiliares de los buques más grandes, además estas pilas pueden estar alimentadas por hidrogeno que producen electricidad por una reacción electroquímica.

d) Viento

El viento es una opción viable gracias a las nuevas aplicaciones de antiguas tecnologías. Se han desarrollado recientemente e instalado en algunos buques mercantes velas rígidas, cometas y rotores Flettner que pueden suministrar actualmente entre el 5 y el 10% de las necesidades energéticas de un buque.

Aunque es poco probable que, a medio plazo, los grandes buques mercantes operen exclusivamente con propulsión eólica, esta sí puede complementar los combustibles con cero emisiones de carbono o sistemas híbridos eólico-eléctricos.



ILUSTRACIÓN 50. BUQUE E-SHIP .



e) Nuclear

La opción de combustibles nucleares son una tecnología probada que podría aplicarse fácilmente a muchos buques mercantes para eliminar por completo sus emisiones de CO<sub>2</sub>. Contradictoriamente, una política difícil de aceptar de forma generalizada. Simplemente, se requeriría un pequeño reactor nuclear, con una vida útil de muchos años, que eliminaría la necesidad de que los buques repostaran o transportaran grandes cantidades de combustible. Rusia opera con éxito varios buques rompehielos nucleares en el Ártico, algunos con una autonomía de hasta 12 años.

### 5.2.3 Opciones viables de remotorización.

Según el estudio de campo realizado la mejor alternativa para eliminar las emisiones de carbono y SO<sub>2</sub>, es no consumir combustibles fósiles derivados del petróleo, pero como los frentes para una cero descarbonización total aun no son viables. Hay que convivir con estos combustibles unos años más. A no ser que se opte por una remotorización total del buque eliminando todo rastro de combustible y se apueste 100% por la propulsión a GNL.

El punto de mira en la transición este puesto, en las tecnologías antes nombradas aplicadas a los motores ya existentes, motores duales (diésel-gas) o (diésel -eléctricos).

Para una adecuada selección de motores duales de Gas Natural Licuado con cambio a diésel, se encuentra un amplio abanico de opciones, por ejemplo, el catálogo GASMAN, recoge las diferentes casas de fabricantes de motores como *Caterpillar-MaK*, *MAN*, *MTU*, *Rolls-Royce*, *Siemens*, *Wärstilä* y *YANMAR*. En cuanto a motores diésel-eléctricos se encuentra el catálogo Man liderando el sector con una amplia gama en este tipo de propulsión.

Una vez se tiene conocimiento de la potencia, y de la ruta en la que el buque va a operar. Hay que encontrar y seleccionar las opciones de remotorización, no sólo es escoger la opción técnico-económica más viable, sino que la opción seleccionada permita cumplir con los requisitos del convenio MARPOL y normativo IMO.

En función de la potencia requerida por el buque, se han seleccionado los diferentes motores que podrían ajustarse a nuestras características:



TABLA 53. TABLA DE MOTORES PREVIAMENTE SELECCIONADOS PARA LA REMOTORIZACIÓN.

MOTOR	TIPO	TECNOLOGÍA	CONSUMO	EMISIONES
MAN L35/44DF	DUAL FUEL	SCR	175,5 g/kWh	IMO TIER II
		COMMON RAIL	7.515KJ/kWh**	IMO TIER III
Rolls-Royce Bergen B36:45	DUAL FUEL	PROPULSION	7.420KJ/kWh**	IMO TIER III
		DUAL SIN SCR con VVT	173.3 g/kWh	ECA PORT
Cartpillar M 34 DF	DUAL FUEL		<180 g/kWh	IMO TIER III
Wärtsilä 34 DF	DUAL FUEL	Swit to: LFO/ULSD LFO/HFO con SCR*	<180 g/kWh	IMO TIER II IMO TIER III + ECA PORT
Wärtsilä 9L32	DUAL FUEL	LFO con SCR	180.9 g/kWh	IMO TIER III
		HFO con SCR	183.0 g/kWh	ECA PORT
Wärtsilä 8L32	DUAL FUEL	LFO con SCR	180.9 g/kWh	IMO TIER III
		HFO con SCR	183.0 g/kWh	ECA PORT

\*La modalidad SCR puede estar encendida o apagada, en ambos modos se cumple la normativa IMO TIER III para los combustibles LFO/ULSD/HFO con LFO <0.1S% y HFO≤0.5 S% emisiones.

\*\*Conversion KJ/KWh a g/KWh

7.575 kj/kWh=133.067 g/kWh // 7.420 kj/kWh=134.771 g/kWh

#### 5.2.4 Bunkers y precios.

El término “Bunkers” hace referencia a combustibles marinos usados por buques para su consumo y propulsión. Los combustibles marinos se clasifican atendiendo a las propiedades y origen de cada uno. Hay una gran variedad de combustible, pero este apartado se centra en los combustibles marinos usados bajo la norma internacional ISO 8217, esta norma divide los combustibles marinos en destilados y combustibles residuales. Estos últimos son los fuelóleos pesados. La norma ISO estipula los combustibles destilados no deben contener combustible o aceites lubricados usados.

Los fuelóleos pesados tienen como principal uso combustible marino, siendo HFO el más usado en la actualidad. En general, los motores Diesel marinos de media y baja velocidad están diseñados para que se funciona con este combustible. Mientras que las centrales eléctricas también generan energía a partir de fuelóleos pesados.

Fuelóleos pesados se definen por una densidad superior a 900 kg/m<sup>3</sup> a 15°C o una viscosidad cinemática de más de 180 mm<sup>2</sup>/s a 50°C. Los fuelóleos pesados están formados por un gran porcentaje de moléculas pesadas, como hidrocarburos de cadena larga y aromáticos con cadenas laterales de rama larga y su color es negro.[32]

La calidad del combustible residual depende de la calidad del crudo utilizado en la refinería. Para conseguir diversas especificaciones y niveles de calidad, estos combustibles residuales se mezclan con combustibles más ligeros como gasóleo o diésel marinos. Las mezclas resultantes se denominan también fuelóleos intermedios (IFO) o diésel marino. Se clasifican y se nombran en función de su viscosidad. Los tipos más frecuentemente



utilizados son IFO 180 e IFO 380, con viscosidades de 180 mm<sup>2</sup> y de 380 mm<sup>2</sup>, respectivamente. Las mezclas en las que predomina el fuelóleo pesado se clasifican dentro de la categoría de fuelóleo pesado. Puesto que se trata de mezclas de fuelóleo pesado con combustibles más ligeros, también pueden denominarse combustibles diésel marinos pesados. Por lo general, el fuelóleo pesado no puede bombearse a una temperatura de 20°C, por lo que tiene que precalentarse en los tanques de los barcos. Para garantizar que el combustible sigue siendo bombeable, debe calentarse al menos a 40°C.

TABLA 54. RESUMEN DEL CONTENIDO DE S MÁXIMO EN EL COMBUSTIBLE

COMBUSTIBLE MARINO	CONTENIDO MÁXIMO EN AZUFRE
HSFO (Fuelóleo alto en azufre)	<3.5 S%
LSFO (Fuelóleo bajo en azufre)	<1.0 S%
ULSFO (Fuelóleo ultra bajo en azufre)	<0.1 S%

#### ❖ **Fuelóleo bajo en azufre (LSFO)**

Su contenido en azufre es inferior al 1%. Normalmente se trata de los combustibles marinos IFO 180 e IFO 380 que han sido desulfurizados. Hasta finales de 2014, los barcos podían navegar por Zonas de Control de Emisiones (ECA) con este tipo de combustible marino.

#### ❖ **Fuelóleo ultra bajo en azufre (ULSFO)**

El gasóleo marino está compuesto exclusivamente por destilados y tiene un contenido en azufre por debajo del 0,1%. Este combustible marino también se denomina gasóleo marino de ultra bajo contenido en azufre. El ULSFO se utiliza en motores diésel de media a alta velocidad. Cuando se pasa de LSFO a ULSFO, es necesario garantizar que el motor es tecnológicamente compatible con ULSFO.

#### ❖ **Fuelóleo alto en azufre (HSFO)**

La alternativa a los combustibles marinos con un contenido tan bajo en azufre en las zonas ECA es el uso de depuradores. Mediante esta tecnología, el agua se inyecta en el circuito de escape de gases para reducir el azufre y otras emisiones. Sin embargo, adaptar un barco a esta tecnología tiene un coste de varios millones de euros. Por otra parte, un depurador permite utilizar combustibles marinos con un mayor contenido en azufre. En este contexto, dichos fuelóleos pesados se denominan fuelóleos altos en azufre (HSFO) y tienen un contenido máximo en azufre del 3,5%, según lo permitido en la norma ISO 8217.

#### ❖ **GAS NATURAL LICUADO (GNL)**

El uso de gas natural licuado en el sector marítimo permite dejar de generar emisiones de partículas (PM) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), al mismo tiempo que permite reducir en un 90% las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y en un 20% las de CO<sub>2</sub>. Todo esto permite cumplir con la IMO 2020, que es la



normativa establecida por la Organización Marítima Internacional, que entró en vigor el 1 de enero de 2020.

La existencia de reservas que permitirán garantizar el abastecimiento de GNL durante las próximas décadas, así como el desarrollo de otras tecnologías (electricidad, biogás, hidrógeno); que todavía se encuentran en fase inicial para ser usados en largos recorridos, convierten al gas natural licuado en una realidad.

Los precios de los combustibles a día 2 de abril;



ILUSTRACIÓN 51.PRECIOS POR ZONAS GEOGRÁFICAS.

Para obtener los precios para nuestra zona de navegación y suministro es la zona EMEA donde obtenemos los siguientes precios por tonelada métrica, \$/mt. En el mar del Norte junto con los precios del mediterráneo y mar negro.

TABLA 55. PRECIOS DEL COMBUSTIBLE.

COMBUSTIBLE	\$/MT
LSMGO	539.00
ULSFO	484.00
GNL	323.94
IFO380	388.50

FUENTE: WWW.BUNKERSHIP.ES



### 5.3 Resultados.

Los resultados se desarrollan según las opciones que tiene el buque de operar en los puertos de su ruta. Las opciones se van a desglosar en función de las millas a navegar en la zona restrictiva del mar del Norte:

1. Opción zona ECA optimizada; la cual se caracteriza por llegar a los puertos de Emden, Sheerness y Zeebrugge haciendo su entrada al mar del Norte por el canal de la mancha.
2. Opción Zona ECA minimizada; ésta se caracteriza por hacer dentro del mar del Norte menos millas en la zona ECA en el tramo Barcelona-Emden que la opción optimizada. La entrada al mar del Norte se produce rodeando las Islas británicas por el Atlántico y accediendo entre el norte de Escocia y la isla de Shetland.

#### 5.3.1 Opción zona ECA (Optimizada)

La ecuación (119) determina el coste del trayecto con los diferentes sistemas de propulsión. Siendo T el tiempo:

$$T = \frac{\text{(distancia de navegación)}}{\text{Velocidad}} \quad (120)$$

A diferencia del cálculo realizado en el apartado 5.1, los cálculos del coste están desglosados según el combustible y la zona de navegación que se encuentra el buque en cada instante del trayecto.

TABLA 56. TABLA DE DISTANCIAS Y TIEMPO ENTRE PUERTOS

Trayecto	millas	días	horas
Barcelona-Endem (No zona ECA)	1752,01	4,695	112,693033
Barcelona-Endem (zona ECA)	665,82	1,78	42,8269673
Endem-Sheerness	291,04	0,9	21,6
Sheerness-Zeebuggre	106	0,33	7,92

En esta ruta como muestra la *tabla 56*, la distancia Barcelona-Emden se divide en un primer tramo hasta llegar al mar del Norte de 1752,01 millas en la cual el combustible usado puede ser cualquiera, que permita que las emisiones a la atmosfera sea  $< 0.5\%S$ , objetivo que se cumple con cualquier combustible que contenga menos de  $3.5\%S$  en su composición. Seguido por el tramo, en zona ECA de 665.82, millas. Por lo tanto, en la tabla del cálculo de costes, ésta distancia se verá afectada por un cambio de combustible en cada uno de ellos.

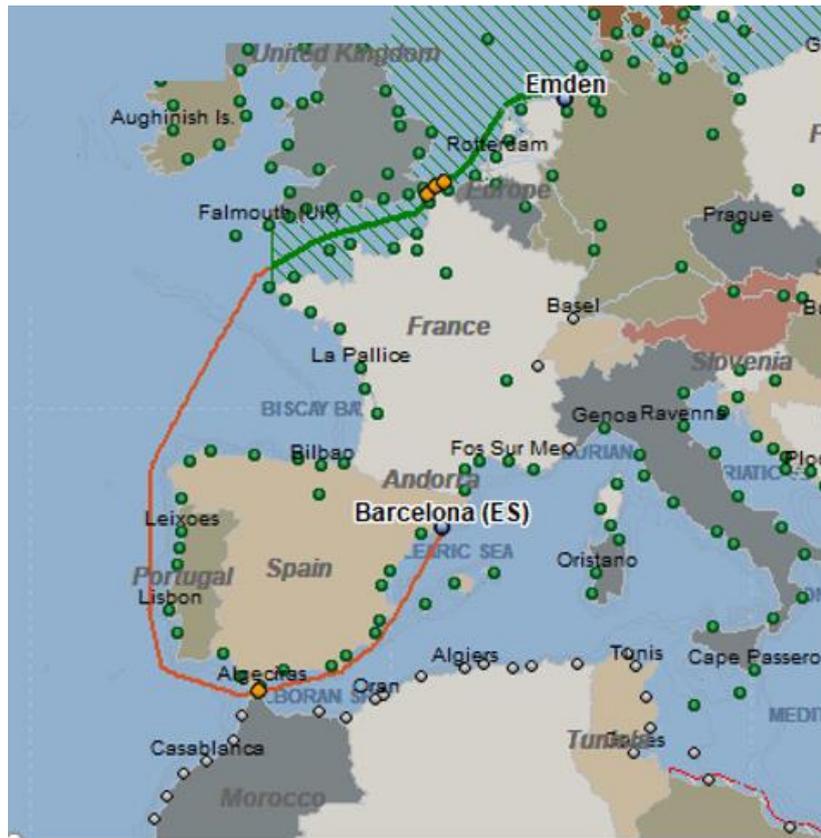


ILUSTRACIÓN 52. TRAYECTO BARCELONA- EMDEN ZONA ECA OPTIMIZADA.

Aplicando los consumos de cada motor se obtienen los siguientes resultados para la ruta donde el trayecto Barcelona (ES) a Emden (DE)

Los cálculos del coste de operación den la ruta por combustible consumido y modelo de motor que se muestran en la *tabla 57*. Siguen la siguiente estructura, el coste total resultante en la columna de la derecha está constituido por el sumatorio del coste de cada tramo en el que se opera:

$$\text{Coste total (\$)} = \sum \text{Costes tramo}_i \quad (121)$$

El coste resultante en cada celda definido por tramo está calculado en base a la ecuación (119) y con los precios establecidos en la *tabla 55*.

En el caso del cálculo cuando se opera con MDO al ser un combustible con contenido máximo de azufre establecido en <3.5%S no cumple con la normativa de emisiones en la zona SECA, por lo que la navegación con ese combustible, obliga al buque a realizar “Switch to”, es decir, “cambio a” operar con el combustible ULSFO. Por lo que el coste total en la fila de MDO, en los motores que dan posibilidad de consumo es: el primer tramo (MDO) más el coste de los tres restantes con ULSFO.

$$\text{Coste total (MDO)} = \text{coste (MDO)} + \sum \text{Coste (ULSFO)} \quad (122)$$



X= combustible no aplicable en zona ECA, contenido máximo S<3,5%

TABLA 57. RESULTADOS DEL CÁLCULO DEL COSTE POR TIPO DE COMBUSTIBLE CONSUMIDO Y MODELO DE MOTOR.

MOTOR	COMBUSTIBLE	ZONA S<0,5%		ZONA ECA S<0,1%		COSTE \$
		BARCELONA -EMDEN		ENDEM-SHEERNESS	SHEERNESS-ZEEBRUGGE	
L35/44DF	MDO	50848,87	X	X	X	83492,97
	ULSFO	19324,20282	9746,26052	9746,26052	3573,62886	83492,965
	GNL	23316,35185	8860,96163	4469,07132	1638,65948	38285,0443
Bergen B36:45	ULSFO	45371,40499	17242,5893	8696,3881	3188,67564	74499,058
	GNL	23615,61894	8974,69272	4526,43218	1659,6918	38776,4356
34 DF	MDO	50848,87295	X	X	X	80161,9353
	ULSFO	45660,21244	17352,3454	8751,74414	3208,97285	74973,2748
	GNL	23170,77701	8805,63852	4441,16882	1628,42857	38046,0129
8L32	MDO	50984,99475	X	X	X	603677,386
	ULSFO	860914,8948	327175,276	165012,524	60504,592	1413607,29
9L32	MDO	55380,25292	X	X	X	87305,5389
	ULSFO	49729,2067	18898,6937	9531,65284	3494,93937	81654,4926



### 5.3.2 Opción zona ECA (Minimizada).

Los cálculos están realizados de misma forma, mediante la expresión (119) y (120).

La *tabla 58*, muestra las distancias entre puertos a realizar en el trayecto donde la zona ECA esta minimizada, es decir, se puede establecer un desvío de ruta que permita navegar menos millas por zona de emisiones restringidas.

TABLA 58. DISTANCIAS ENTRE PUERTOS OPCIÓN ZONA ECA MINIMIZADA.

Trayecto	millas	días	horas
Barcelona-Endem (No zona ECA)	2130.61	6.58	158,0429
Barcelona-Endem (zona ECA)	509.55	1.56	37,55705
Endem-Sheerness	291,04	09	21,6
Sheerness-Zeebuggre	106	0,33	7,92

En esta opción, la distancia Barcelona-Emden se divide en un primer tramo hasta llegar al mar del Norte de 2130.61 millas en la cual el combustible usado puede ser cualquiera, que permita que las emisiones a la atmosfera sean  $< 0.5\%S$ , objetivo que se cumple con cualquier combustible que contenga menos de  $3.5\%S$  en su composición. Seguido por el tramo, en zona ECA de 509.55, millas.



ILUSTRACIÓN 53. DISTANCIA BARCELONA -EMDEN CON DESVÍO DE RUTA.



Como se observa en la ilustración anterior, este trayecto contempla rodear Reino Unido haciendo en 222.33 millas adicionales por zona no SECA y recortando el trayecto por esta última unas 156.27 millas a diferencia de la primera de las opciones estudiadas. Además, el cómputo total de millas en la opción minimizada es de 3037.20 millas.

A continuación, se muestran los resultados de los costes calculados para cada motor, según el combustible usado en base a la zona de navegación.



X= COMBUSTIBLE NO APLICABLE EN ZONA ECA, CONTENIDO EN S<3.5%

TABLA 59. CÁLCULO DE LOS COSTES POR OPERACIÓN EN FUNCIÓN DEL COMBUSTIBLE Y MODELO DE MOTOR.

MOTOR	COMBUSTIBLE	ZONA S<0,5%		ZONA ECA S<0,1%		COSTE \$
		BARCELONA -EMDEN		ENDEM-SHEERNESS	SHEERNESS-ZEEBRUGGE	
L35/44DF	MDO	50848,87295	X	X	X	77979,2798
	ULSFO	63984,97385	15169,6898	8751,74414	3208,97285	91115,3807
	GNL	32673,87696	7746,39028	4469,07132	1638,65948	46527,998
Bergen B36:45	ULSFO	63580,25964	15073,7394	8696,3881	3188,67564	90539,0627
	GNL	49444,74998	11722,4635	6762,95972	2479,7519	70409,9251
34 DF	MDO	71255,99361	X	X	X	98386,4005
	ULSFO	63984,97385	15169,6898	8751,74414	3208,97285	91115,3807
	GNL	32469,87874	7698,02596	4441,16882	1628,42857	46237,5021
8L32	MDO	71446,74502	X	X	X	98649,7796
	ULSFO	64156,26083	15210,2989	8775,17245	3217,56323	91359,2954
9L32	MDO	70495,94281	X	X	X	100387,08
	ULSFO	70495,94281	16713,3238	9642,30221	3535,51081	100387,08



## 5.4 Comparativa y selección.

Reflejado queda en los cálculos que reducir las millas en zona ECA no es viable ya que la opción 2, sólo reduce el paso por ella en 156.27 millas náutica, para conseguir esa reducción supone aumentar la ruta en 222.33 millas. Realizando 3037.2 millas frente a la ruta optimizada de 2815,13. Por lo que aumentar las millas a navegar no es una opción, ya que implicaría realizar menos viajes al año.

El coste original en régimen de IMO TIE II tendría un coste de 65.127,41 \$ por lo que cualquier propulsión que nos dé un mejor rendimiento económico cumpliendo la normativa de emisiones bajo el Convenio MARPOL anexo VI, será una opción viable.

Una vez terminados los cálculos del coste por operación del buque, se obtiene que el coste por operación en una hora navegada por el mismo según motor es de:

TABLA 60. COSTE POR MILLA SEGÚN EL COMBUSTIBLE Y MODELO DE MOTOR.

MOTOR	COMBUSTIBLE	COSTE POR MILLA NAUTICA
L35/44DF	MDO	29.659
	ULSFO	29.659
	GNL	13,600
Bergen B36:45	ULSFO	26,464
	GNL	13,774
34 DF	MDO	28,475
	ULSFO	26,632
	GNL	13,515
8L32	MDO	27,774
	ULSFO	32,453
9L32	MDO	31,013
	ULSFO	29,006

El cambio de combustible entre los derivados del petróleo, (MDO, IFO380 ULSFO) no implica un cambio estructural en el buque, pudiendo aprovechar los tanques, sistemas de tuberías y trasiego que el propio buque dispone, de manera, que, aplicando la limpieza exhaustiva a los mismos para evitar así cualquier tipo de contaminación cruzada, sería válida la implantación de los motores que operan con dual fuel. Por ejemplo, los motores 9/8L32.

En cuanto el cambio de combustible a Gas Natural Licuado, implica insertar los tanques propios con certificados y sistemas de trasiego totalmente seguros para buques que son propulsados a GNL. Los requisitos de seguridad vienen definidos en el Código Internacional de Seguridad para los buques que utilicen gases u otros combustibles de bajo punto de inflamación (código IGF).



La filosofía fundamental del presente código es establecer disposiciones de carácter obligatorio para la disposición, la instalación, control y vigilancia de la maquinaria, equipo y sistemas que utilizan combustibles de bajo punto de inflamación a fin de reducir al mínimo los riesgos para el buque, la tripulación y el medio ambiente, tomando en consideración la naturaleza de los combustibles utilizados. [34] La elaboración de dicho código se basa en los principios firmes de la arquitectura naval y en el conocimiento de más completo y disponible de la experiencia operacional.

La comparación está calculada utilizando el precio nominal del combustible en esa determinada ruta. Por lo que las diferencias calculadas no reflejan efectos producidos por los factores macro, aquellos no controlables por parte de la naviera; Factores político, tecnológicos, medioambientales etc. que afectan de forma indirecta a los costes de operatividad del buque.

A su vez, en el mercado del petróleo encontramos dos vertientes; Spot y Forward. El primero publica el precio spot del petróleo diariamente en los Platt's en base a la situación del mercado y resultados de transacciones, con la necesidad de publicar un precio. Hoy en día la mayoría de las transacciones se realizan con relación al publicado en el Platt's. En cuanto al mercado forward o también conocido de futuros, la idea principal se basa en el cierre de un acuerdo en el cual se especula con la variación que puede tener el precio del combustible en un momento de necesidad determinado. En el cual, el precio spot participa de forma activa y determinante.

Teniendo en cuenta los cálculos realizados y poniendo la mirada en el futuro, la elección del motor para la remotorización es el ROLS ROYCE Bergen B36:45L, en 8 o 9 cilindros conseguiríamos la potencia que se necesita. El coste por milla, ofrece el mejor precio por milla en cuanto ULSFO y GNL en relación potencia /consumo. Ofrece el menor porcentaje de emisiones basándose en el VVT, modificación del timing en la apertura de la válvula de admisión para ofrecer una combustión más completa, y así, una menor reducción de emisiones. Sin necesidad aplicación de la técnica SCR, que todos los otros modelos implican. Por lo que no supone reducción de espacio por necesidad del tanque de amoníaco para la inyección en los gases de escape, ni coste de mantenimiento de los catalizadores, filtros, depósitos de materia particulada etc.

Como el plano de disposición general, indica en el buque tenemos 4 tanques de gasoil, de los cuales, dos de ellos se podrían reestructurar o eliminar, para insertar o acoplar en su espacio dos tanques para el almacenamiento de GNL.

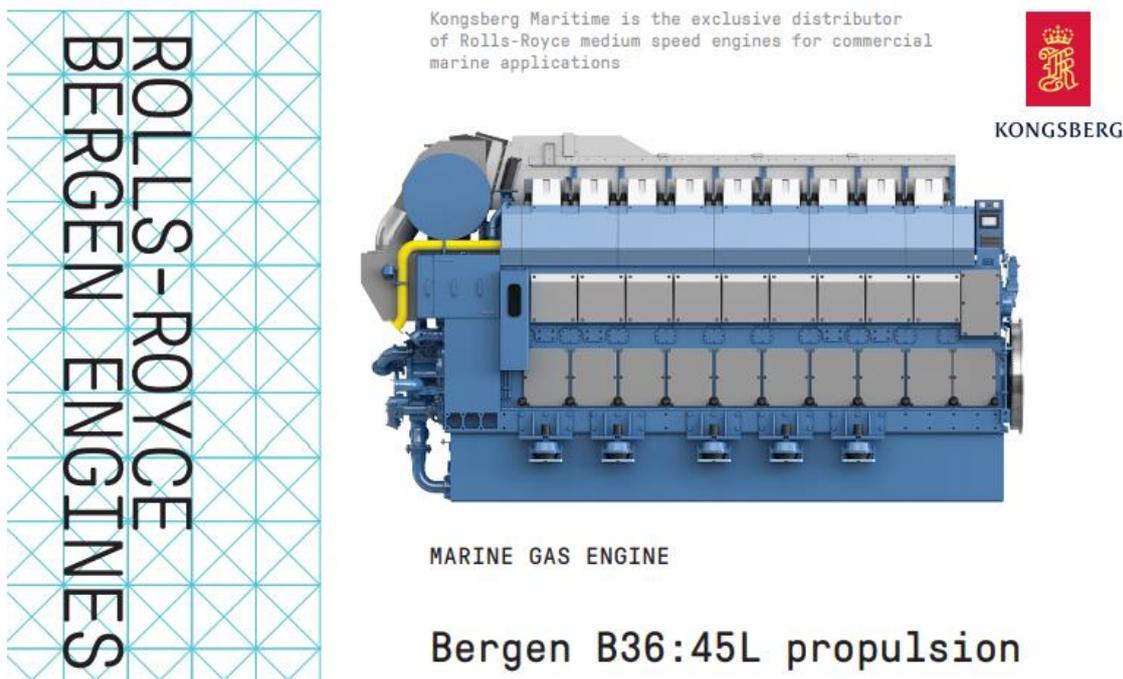


ILUSTRACIÓN 56. MOTOR ROLLS ROYCE SELECCIONADO.

- ❖ Emisiones muy bajas de  $\text{SO}_2$ , y  $\text{NO}_x$  sin necesidad de acoplamiento de SCR.
- ❖ Único tipo de tanque debido a único combustible. Sin problemas de “Swicht to”
- ❖ Cámara de máquinas libre de humos.
- ❖ CPM, control motorizado de presión de los cilindros.
- ❖ VVT, variable válvula timing, lo que hace de la combustión más completa
- ❖ conversión: Gas a diésel y viceversa.
- ❖ Instalación segura de tuberías de gas con doble pared. Seguridad en el

## 6.Conclusiones.

España cuenta con un notable tráfico de buques car-carrier. Lo que es debido a la importancia que España tiene como productor de vehículos tanto a nivel europeo como mundial. El flete de buques Car-Carrier, principalmente se realiza mediante acuerdos entre las compañías automovilísticas y navieras. En realidad, puede observarse como durante toda la evolución, ambos sectores se han alimentado el uno al otro de manera simbiótica, lo que ha desencadenado en la adaptación y especialización del tipo de buque que transporta carga rodada a las necesidades del transporte.

En España el tráfico de buques car-carrier se concentra en seis puertos, tres en la costa del Norte de España (Pasajes, Santander y Vigo) y tres situados en la costa mediterránea (Barcelona, Tarragona y Valencia). Todos y cada uno de ellos, están vinculados con factorías de producción de vehículos, actuando como puertas tanto de entrada (importación) y salida (exportación) de la producción de esas factorías. El tráfico de importación ha registrado una evolución positiva en la serie temporal llevada a estudio.



Barcelona es la gran puerta de salida de vehículos junto con Valencia y Vigo, siendo los tres puertos maduros. Durante el periodo 2011-2019, los puertos de Barcelona, Pasajes, Santander, Valencia y Vigo registraron una mayor proporción de tráfico de embarque de vehículos respecto a desembarque. Sin embargo, el puerto de Tarragona, a partir de 2015, comenzó a registrar mayor proporción de tráfico de vehículos en régimen de desembarque. Durante el periodo analizado, el puerto de Barcelona fue el que registró el mayor movimiento total de vehículos, posición que también tuvo en el embarque de vehículos. Sin embargo, en cuanto a desembarque de vehículos, el puerto líder fue Valencia. En la costa del norte de España, los puertos de Santander y Vigo tuvieron un tráfico muy similar, ambos con más 3 millones de movimientos de vehículos. Vigo fue el líder en embarque de vehículos con 2,87 millones y Santander lideró el desembarque con 1,13 millones de vehículos.

En el análisis de posiciones competitivas los resultados revelaron que los seis puertos analizados se distribuyeron entre las cuatro posiciones tanto en la categoría de embarque como de desembarque de vehículos. Durante el periodo de 2011 a 2019, cinco puertos han evolucionado positivamente en sus posiciones competitivas. dentro de la categoría de embarque de vehículos. Vigo y Barcelona son los dos puertos líderes maduros en el embarque de vehículos. Los puertos de Santander y Valencia se posicionaron en la segunda mitad del periodo como participantes estelares a causa del notable crecimiento que registraron en el embarque de vehículos. Tarragona evolucionó hasta la posición de elevado potencial mejorando, así, la posición de participante minoritario. En el embarque de vehículos, el único puerto que no cambió su posición competitiva fue Pasajes, manteniéndose durante todo el periodo como participante minoritario.

La evolución en la categoría de desembarque de vehículos fue ligeramente diferente. Barcelona también es un líder maduro en este tipo de operación al cual se le une Santander. Valencia evolucionó desde la posición de líder maduro a participante estelar como consecuencia del aumento de desembarque de vehículos durante el periodo 2015-2019. Vigo también muestra una evolución positiva al cambiar desde la posición de participante minoritario a elevado potencial. El puerto de Tarragona, a pesar de mantenerse durante todo el periodo en la posición de elevado potencial, registró un gran aumento de la tasa de variación y la cuota de mercado. Estos cambios lo situaron cerca del límite de la posición participante estelar. El puerto de Pasajes, de forma análoga a lo registrado para el embarque, se mantuvo durante todo el periodo en el cuadrante de participante minoritario.

En la serie temporal estudiada del tráfico marítimo de carga rodada en régimen de mercancía en los puertos españoles se observa que existe estacionalidad, marcada por los patrones de producción de vehículos. Los seis puertos, tienen rasgos comunes relacionados con la estacionalidad, concentrando su mayor actividad en el primer semestre del año (febrero a julio) y su periodo de menor actividad, claramente, se concentra en el mes de agosto.

Que el tráfico marítimo español en general crezca, y el tráfico car-carrier en particular, es en parte responsabilidad de los ingenieros navales españoles. Que deben ofrecer las mejores soluciones a las navieras, para que no pierdan su lugar en las vías marítimas ofreciendo las mejores alternativas, innovaciones y desarrollos que les permita al menos mantener su lugar. Situar competitivamente al sistema portuario, es básico para plantearse las preguntas claves de ¿Dónde?, ¿Cómo? y ¿En qué dirección? Se debe actuar eficientemente



y tomar las decisiones técnico-económicas más viables para sacarle el mejor rendimiento a los puertos, y hacer de cada uno de ellos una potencia en el sector que le beneficie.

España esta geográficamente, está situada de forma estratégica entre dos pasos principales del tráfico marítimo mundial como es el canal de Suez y el estrecho de Gibraltar, siendo la entrada de Asia Occidental hacia el norte de Europa.

Hoy en día, no existe un desarrollo suficiente de combustibles ni tecnologías con cero emisiones de carbono para decir que se ha dado el paso, a la que debería estar ya casi consolidada, la cuarta revolución de buques. Lo que sí se puede afirmar, es que existen numerosos combustibles y tecnologías de gran potencial lo que desencadenará en una red de suministros totalmente nuevos para darle paso al NH<sub>3</sub> y H<sub>2</sub>. Combustibles que se caracterizan por poseer menor poder calorífico que los fósiles, lo que aumentará el consumo de los buques, y su sistema de almacenamiento, lo que desembocará en situación contradictoria, ya que el espacio en el buque se debe destinar a capacidad de carga.

Previo a la remotorización del buque, el precio por milla navegada tenía un coste de 23,13\$ la milla navegada. Precio obtenido de dividir el precio total del coste de la ruta realizada por un tipo de combustible específico en un modelo de motor determinado, partido por las millas totales realizadas. Partiendo de dicho precio por milla, la obtención de las diferencias con respecto al precio previo a la remotorización es de:

TABLA 61. COMPARACIÓN \$ POR MILLA NAVEGADA RESPECTO AL COSTE INICIAL.

MOTOR	COMBUSTIBLE	COSTE POR MILLA NAUTICA	Diferencia \$/milla
L35/44DF	MDO	29,66	6,53
	ULSFO	29,66	6,53
	GNL	13,60	9,53
Bergen B36:45	ULSFO	26,46	3,33
	GNL	13,77	9,36
34 DF	MDO	28,48	5,35
	ULSFO	26,63	3,50
	GNL	13,52	9,62
8L32	MDO	27,77	4,64
	ULSFO	32,45	9,32
9L32	MDO	31,01	7,88
	ULSFO	29,01	5,88

En la última columna de la **tabla 61** se muestra el valor absoluto de la diferencia entre el precio previo y posterior, en verde se muestran las celdas donde se reduce el coste y en rojo aquellas donde el precio por milla aumenta.



El motor Bergen anteriormente seleccionado, ofrece en las dos alternativas de combustible diferencias favorables al cambio.

La opción de navegación con combustible GNL supone un ahorro para la naviera de 28.828,189 \$ por operación. Una cifra muy atractiva, que a largo plazo sería muy rentable, ya que durante los primeros años de operación se derivará para la inversión de la remotización, a consecuencia de la reforma estructural que haya que aplicarle al buque para implantarle satisfactoriamente el sistema de propulsión.

La segunda opción de combustible es ULSFO el cual supone un encarecimiento de 3,33\$ por milla navegada, lo que implica un sobre coste por operación de 9.374,383\$. Este tipo de combustible cuenta con n factor a favor, forma parte de la familia de combustibles fósiles, por lo que se podrán usar los tanques de los que ya dispone el buque sin modificación estructural.

El resto de alternativas de motores, presentan una relación potencia/consumo alto. Sin embargo, en la alternativa de consumo ULSFO, todos pueden realizar la ruta sin problemas, el segundo motor tras el Bergen para el uso de este combustible encontramos a 34DF y siendo el más desfavorable el 8L32.

Para los motores de combustible fósil, el acoplamiento SCR ayuda a disminuir las emisiones de forma considerable, sin embargo, necesita un sistema de inyección para el tratamiento de los gases de escape y un depósito adicional para la urea o amoníaco. Sistema del cual el motor Bergen no necesita, ya que el método usado para la reducción de las emisiones es variable valve timing, VVT. Variando el ángulo de inyección del combustible ofreciendo una combustión más completa, que se traduce generar menos inquemados y por lo tanto menos emisiones.



## Bibliografía

- [1] CCOO. Industria del automóvil. Situación y perspectivas en el sector del automóvil. Septiembre 2018.
- [2] ANFAC. Logística-marítimo-portuaria-11ª edición.
- [4] Autoridad Portuaria de Barcelona.
- [5] Autoridad Portuaria de Pasajes.
- [6] Autoridad Portuaria de Santander.
- [7] Autoridad Portuaria de Tarragona.
- [8] Autoridad Portuaria de Valencia.
- [9] Autoridad Portuaria de Vigo.
- [10] Tema 5. Series temporales. Departamento de métodos cuantitativos e informáticos. Facultad de ciencias de la empresa. UPCT.
- [11] <https://sede.puertos.gob.es/Paginas/default.aspx>. Y [https://es.wikipedia.org/wiki/Puerto\\_de\\_Vigo](https://es.wikipedia.org/wiki/Puerto_de_Vigo)
- [12] <https://catlogcas.blogspot.com/2011/11/el-port-de-tarragona.html>
- [13] <http://www.puertos.es/es-es/Paginas/BibliotecaV2.aspx>
- [14] <https://www.valenciaport.com/autoridad-portuaria/sobre-valencia-port/quienes-somos/>
- [15] <http://www.ugr.es/~rcano/ADDE/tasas.pdf>
- [16] <https://economipedia.com/definiciones/cuota-de-mercado.html>
- [17] <https://economipedia.com/definiciones/simulacion-de-montecarlo.html>
- [18] <https://uplamcdn.files.wordpress.com/2009/04/libro-cap-08.pdf>
- [19] The prospects of development of the car carrier industry in China
- [20] Boletín Oficial del Estado.Nº93.
- [21] ANAVE, Asociación de Navieros Españoles, 2015: <http://anave.es/informes-y-publicaciones/global>
- [22] Flota Suardiaz
- [23] OMI, Organización Marítima Internacional. Antecedentes históricos Convenio MARPOL, 2015: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Historic%20Background%20GHG.aspx>
- [24] [IMO emission limits for nitrogen oxides from ships engines | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
- [25] [North American ECA Will Change Shipping Forever \(amnautical.com\)](#)



[26] Rober García, vía Ingeniero Marino “NORMATIVA, TECNOLOGÍAS Y MODIFICACIONES PARA REDUCIR LAS EMISIONES DE SOX Y NOX A LA ATMÓSFERA, 2015: <https://ingenieromarino.wordpress.com/2014/09/17/26o-normativatecnologias-y-modificaciones-para-reducir-las-emisiones-de-sox-y-nox-a-la-atmosfera/>

[27] [ANÁLISIS DE LA OPERATIVA EN BUQUES DE CARGA RODADA \(upc.edu\)](#)

[28] [ISM - Curso Buques RO-RO & Pasaje - 2 evolucion historica \(slideshare.net\)](#)

[29] [Motores de propulsión comerciales | Cat | Caterpillar](#)

[30] Especificaciones motor diésel de aplicación marina. Departamento de ingeniería térmica y fluidos. Universidad politécnica de Cartagena. José Hernández Grau.

[31] [Fuelóleo pesado \(HFO\) | Glosario | Oiltanking](#)

[32] [Natural gas | 1990-2021 Data | 2022-2023 Forecast | Price | Quote | Chart | Historical \(tradingeconomics.com\)](#)

[33] <https://shipandbunker.com/prices/emea>

[34] Boletín oficial del estado .Núm 10. Martes 2 de mayo de 2017. BOE-A-2017-4763