

Optimización de flotas de portacontenedores para rutas multimodales en la costa Atlántica Europea

Autora: Alicia Munín Doce

Tesis doctoral UDC / 2022

Director: Diego Crespo Pereira

Tutor: Vicente Díaz Casás

Programa Oficial de Doctorado en Ingeniería Naval e Industrial



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Contenido

1.	Introducción.....	13
2.	Objetivos.....	19
3.	Estado del arte	21
3.1.	Soluciones al enrutamiento de vehículos aplicado a rutas marítimas.....	21
3.2.	Planificación de las visitas a los puertos dentro de una ruta	28
3.3.	Problema del tamaño de la flota.....	30
3.4.	Soluciones computacionales al problema del plan de estiba.....	31
4.	Caracterización de las condiciones de contorno de las rutas	37
4.1.	Selección de regiones	38
4.2.	Selección de puertos	41
4.2.1.	Costes portuarios	49
4.3.	Costes asociados al buque.....	54
5.	Metodología.....	63
5.1.	Sistema de información geográfica Transcad	63
5.2.	Modelo Logit.....	70
5.3.	Optimización a través de heurísticos.....	72
5.4.	Optimización a través de programación lineal entera mixta (MILP)	74
5.5.	Modelo matemático para el problema de estiba.....	86
6.	Implementación	97
6.1.	Rutas óptimas obtenidas con el método heurístico	97
6.2.	Rutas óptimas obtenidas con la programación lineal entera mixta (MILP)	106
6.2.1.	Rutas óptimas con el movimiento de contenedores en los puertos en base a los datos publicados por las autoridades portuarias.....	106
6.2.2.	Rutas óptimas con el movimiento de contenedores en puertos en base a los datos publicados por Eurostat.....	115
7.	Análisis de sensibilidad	123
7.1.	Variación de la velocidad	123
7.2.	Variación en el precio del chárter	139
7.3.	Variación en el precio del combustible.....	142
7.4.	Variación en el tamaño del buque	144
8.	Conclusiones y trabajo futuro	149

8.1.	Conclusiones.....	149
8.2.	Trabajo futuro.....	155
9.	Referencias.....	157

Figura 1. Crecimiento en % en el movimiento de mercancías por carretera entre países de la UE.....	13
Figura 2. Distancia media recorrida en las operaciones de transporte por carretera. Fuente: Eurostat.....	14
Figura 3. Corredores TEN-T	15
Figura 4. Mercancía movida en puertos europeos en millones de toneladas. Fuente: Eurostat (https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Gross_weight_of_seaborne_freight_handled_in_all_ports,_2008,_2017_and_2018_(million_tonnes).png)	17
Figura 5. Esquema del modelo de datos definido para la caracterización de las rutas....	38
Figura 6. Jerarquía de NUTS. Fuente: Eurostat.....	39
Figura 7. Tráfico de contenedores en los puertos europeos. Fuente: Eurostat.....	43
Figura 8. Distribución de costes de un buque (Stopford, 2008)	56
Figura 9. Evolución del consumo de combustible en función de la carga del motor. Fuente: (Vedran et al., 2017)	58
Figura 10. Esquema general de la metodología aplicada	63
Figura 11. Dataview (tabla) de TransCAD con la localización de las NUTS	64
Figura 12. Conexiones entre las NUTS y las rutas marítimas en TransCAD	65
Figura 13. Imagen de las tres capas empleadas en TransCAD	65
Figura 14. Tipos de vehículos en la aplicación ACOTRAM	72
Figura 15. Proceso de selección de la ruta óptima en el algoritmo ACO.....	98
Figura 16. Ruta óptima en coste obtenida por ACO para transporte multimodal.....	98
Figura 17. Ruta óptima en tiempo obtenida con ACO para transporte multimodal.....	99
Figura 18. Ruta óptima en tiempo obtenida por ACO para transporte multimodal	100
Figura 19. Ruta óptima en coste obtenida por ACO para transporte por carretera	102
Figura 20. Ruta óptima por tiempo obtenida en tiempo por ACO para transporte por carretera	104
Figura 21. Subrutas generadas por el algoritmo MILP para el caso con las condiciones de contorno definidas en las Tabla 18 y Tabla 7	109
Figura 22. Representación en TransCAD de la ruta 1.1.....	110
Figura 23. Representación en TransCAD de la ruta 1.2.....	113
Figura 24. Subrutas generadas por el algoritmo MILP para el caso con las condiciones de contorno definidas en las y el apartado.....	118
Figura 25. Representación en TransCAD de la ruta 2.1.....	119
Figura 26. Representación en TransCAD de la ruta 2.2.....	120
Figura 27. Representación en TransCAD de la ruta 2.3.....	121
Figura 28. Velocidades de buques portacontenedores en función de la eslora	124
Figura 29. Curva potencia velocidad para el buque de 1800 TEUs calculada en NavCad para el motor https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w46f.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dieselengines&utm_term=w46f&utm_content=productguide&utm_campaign=mp-engines-and-generating-sets-brochures	125
Figura 30. Representación en TransCAD de la ruta 1.v1.1	126
Figura 31 Representación en TransCAD de la ruta 1.v1.2	128

Figura 32. Representación en TransCAD de la ruta 1.v2.1.....	131
Figura 33. Representación en TransCAD de la ruta 1.v2.2.....	133
Figura 34. Reparto de costes en las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque	137
Figura 35. Reparto de costes en las rutas de 6 puertos a diferentes velocidades del buque	138
Figura 36. Evolución del chárter en portacontenedores. Fuente: Hamburg Index	139
Figura 37. Rotterdam Bunker prices. Fuente: https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#VLSFO	142

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado	27
Tabla 2. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado	30
Tabla 3. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado	31
Tabla 4. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado	35
Tabla 5. Selección de NUTS según la clasificación de 2021	40
Tabla 6. Tráfico de contenedores en los puertos europeos seleccionados.....	42
Tabla 7. Tráfico internacional intracomunitario de contenedores en los puertos seleccionados	44
Tabla 8. Causas de la prolongación del tiempo en puerto de un buque	47
Tabla 9. Eficiencia de los puertos.....	48
Tabla 10. Características y tiempos de las grúas portuarias.....	49
Tabla 11. Tiempo de carga y descarga en función del tipo y número de grúas (Bartošek & Marek, 2013)	61
Tabla 12. Variables asociadas a la capa de rutas marítimas en TransCAD	68
Tabla 13. Valores de los coeficientes del modelo Logit.....	71
Tabla 14. NUTS seleccionadas como nodos del algoritmo y sus puertos asociados	79
Tabla 15. Parámetros básicos que definen el buque dentro del algoritmo MILP.....	81
Tabla 16. Dimensiones básicas del buque para el modelo de estiba	88
Tabla 17. Parámetros del algoritmo ACO	97
Tabla 18. Dimensiones principales del buque seleccionado para la ruta.....	97
Tabla 19. Nodos seleccionados por ACO para la ruta óptima por coste en multimodal..	99
Tabla 20. Nodos seleccionados por ACO para la ruta óptima en tiempo para el transporte multimodal.....	101
Tabla 21. Nodos seleccionados por ACO para la ruta óptima por coste en transporte por carretera	103
Tabla 22. Nodos seleccionados por ACO para una ruta óptima por tiempo para transporte por carretera	105
Tabla 23. Nodos seleccionados por MILP bajo las condiciones de las Tabla 7 y Tabla 18	109
Tabla 24. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.1.....	110
Tabla 25. Nodos, puertos y costes asociados a la ruta 1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18.....	111
Tabla 26. Nodos, puertos y tiempos asociados a la ruta 1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18.....	111
Tabla 27. Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.1	111
Tabla 28. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1578 TEUs	112
Tabla 29. Tiempos para una flota de 2 buques en la ruta 1.1.....	112
Tabla 30. Coste para una flota de 2 buques en la ruta 1.1.....	112

Tabla 31. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.2	113
Tabla 32. Nodos, puertos y costes asociados a la ruta 1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18	113
Tabla 33. Nodos, puertos y tiempos asociados a la ruta 1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18	114
Tabla 34. Tiempos para una flota de dos buques en la ruta 1.2.....	114
Tabla 35. Coste para una flota de dos buques en la ruta 1.2.....	114
Tabla 36. Nodos seleccionados por MILP bajo las condiciones del apartado 4 y la Tabla 18	118
Tabla 37. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 2.1	118
Tabla 38. Coste para un buque en la ruta 2.1	119
Tabla 39. Tiempos para un buque en la ruta 2.1.....	119
Tabla 40. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 2.2	120
Tabla 41. Coste para un buque en la ruta 2.2	120
Tabla 42. Tiempos para un buque en la ruta 2.2.....	121
Tabla 43. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 2.3	121
Tabla 44. Coste para un buque en la ruta 2.3	122
Tabla 45. Tiempos para un buque en la ruta 2.3.....	122
Tabla 46. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.v1.1	125
Tabla 47. Costes asociados a la ruta 1.v1.1 y seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn	126
Tabla 48. Tiempos asociados a la ruta 1.v1.1 y seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn.....	126
Tabla 49 Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.v1.1	127
Tabla 50. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1548 TEUs	127
Tabla 51. Coste para una flota de dos buques en la ruta 1.v1.1	127
Tabla 52. Tiempos para una flota de dos buques en la ruta 1.v1.1.....	127
Tabla 53. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.v1.2	128
Tabla 54. Costes de la ruta 1.v1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn.....	129
Tabla 55. Tiempos de la ruta 1.v1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn.....	129
Tabla 56. Coste para una flota de 3 buques en la ruta 1.v1.2.....	129
Tabla 57. Tiempos para una flota de 3 buques en la ruta 1.v1.2	130
Tabla 58. Representación en TransCAD de la ruta 1.v2.1	130
Tabla 59. Costes asociados a la ruta 1.v2.1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21.4 kn	131
Tabla 60. tiempos asociados a la ruta 1.v2.1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21,4 kn	131
Tabla 61. Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.v2.1	131
Tabla 62. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1597 TEUs	132
Tabla 63. Coste para una flota de dos buques en la ruta 1.v2.1	132
Tabla 64 Tiempos para una flota de dos buques en la ruta 1.v2.1.....	132
Tabla 65. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.v2.2	133

Tabla 66. Costes asociados a la ruta 1.v2.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21,4 kn.....	133
Tabla 67. Tiempos asociados a la ruta 1.v2.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21,4 kn.....	134
Tabla 68. Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.v2.2.....	134
Tabla 69. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1578 TEUs	134
Tabla 70. Costes para una flota de 2 buques en la ruta 1.v2.2.....	134
Tabla 71. Tiempos para una flota de 2 buques en la ruta 1.v2.2.....	135
Tabla 72. Comparativa de millas recorridas para rutas con 4 puertos y diferentes velocidades.....	135
Tabla 73. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque	135
Tabla 74. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque.....	136
Tabla 75. Comparativa de millas recorridas para rutas con 6 puertos y diferentes velocidades.....	137
Tabla 76. Tiempos asociados a las rutas formadas por 6 puertos a diferentes velocidades del buque	137
Tabla 77. Variaciones en coste para las rutas de 6 puertos a diferentes velocidades del buque.....	138
Tabla 78. Precios del chárter utilizados en las simulaciones	139
Tabla 79. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos con diferentes precios para el chárter del buque y con navegación low steaming	140
Tabla 80. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos con diferentes precios del chárter del buque y con una navegación low steaming.....	140
Tabla 81. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos con diferentes precios para el chárter del buque y una velocidad de 19,5 kn	140
Tabla 82. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos con diferentes precios del chárter del buque y una velocidad de 19,5 kn	141
Tabla 83. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos con diferentes precios para el chárter del buque y una velocidad de 21,4 kn	141
Tabla 84. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos con diferentes precios del chárter del buque y una velocidad de 21,4 kn	141
Tabla 85. Precio del VLSFO empleados para el análisis de sensibilidad	142
Tabla 86. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque y un precio mínimo del combustible.....	143
Tabla 87. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque para un precio mínimo del combustible	143
Tabla 88. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque y un precio máximo del combustible	143
Tabla 89. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque para un precio máximo del combustible	143
Tabla 90. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque con un precio máximo del combustible y del chárter por día	144
Tabla 91. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque para un precio máximo del combustible y del chárter por día	144
Tabla 92. Características del buque alternativa.....	145

Tabla 93. Variaciones en la velocidad del buque con capacidad para 770 TEUs.....	145
Tabla 94. Variaciones en el precio del chárter para un buque de 770 TEUs.....	145
Tabla 95. Comparación de tiempos en dos rutas para cada tipo de buque (1800 y 770 TEUs) y el flete mínimo del buque en ambos casos	145
Tabla 96. Comparación de costes en dos rutas para los buques seleccionados con el flete mínimo en ambos casos	146
Tabla 97. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el flete máximo en ambos casos.....	146
Tabla 98. Comparación de costes en dos rutas para los buques seleccionados con el flete máximo en ambos casos.....	146
Tabla 99. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el flete máximo en ambos casos.....	146
Tabla 100. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el precio del combustible máximo en ambos buques.....	147
Tabla 101. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el precio del combustible máximo en ambos buques.....	147
Tabla 102. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados a velocidad máxima en ambos buques	147
Tabla 103. Comparación de cotes en dos rutas para los buques seleccionados a velocidad máxima en ambos buques.....	147

LISTA DE ABREVIATURAS

<i>ACO</i>	Ant Colony Optimization
<i>Angesc</i>	Ángulo de escora
<i>Bon</i>	Bonificación
<i>CC</i>	Coste de combustible de un buque
<i>CCD</i>	Coste de carga/descarga en puerto
<i>CCT</i>	Coste del chárter por tiempo del buque
<i>CG_p</i>	Coste de las grúas en el puerto p
<i>CO</i>	Costes operativos del buque
<i>Dtrans</i>	Días de tránsito
<i>EEB</i>	Coste Energía eléctrica buque
<i>GM</i>	Radio metacéntrico transversal
<i>GT</i>	Gross Tonnage
<i>kgf</i>	Posición del centro de gravedad del buque
<i>kb</i>	Posición del centro de carena del buque
<i>MILP</i>	Mixed Integer Liner Programming
<i>MMAA</i>	Motores Auxiliares
<i>MMPP</i>	Motores Principales
<i>NUTS</i>	Nomeclature of Territorial Units for Statistics
<i>OD</i>	Origen - Destino
<i>PAB</i>	Coste Agua Buque
<i>PRemol</i>	Coste Remolcador
<i>PT</i>	Tasas portuarias
<i>TA</i>	Tasa de amarre
<i>TAN</i>	Tasa Ayuda Navegación
<i>TBASC</i>	Tasa Buque. Atraque estancia corta sin concesión
<i>TBACC</i>	Tasa Buque. Atraque estacia corta en concesión
<i>TBFSC</i>	Tasa Buque.Fondeo sin concesión
<i>TBFCC</i>	Tasa Buque. Fondeo con concesión
<i>TCOM</i>	Tasa total de la mercancía
<i>TDB</i>	Tasa Desechos Buque
<i>Tf</i>	Calado medio del buque
<i>Tpr</i>	Calado en la perpendicular de proa
<i>Tpp</i>	Calado en la perpendicular de popa
<i>TP</i>	Tasa de practicaje
<i>TPM</i>	Toneladas Peso Muerto
<i>Trim</i>	Trimado
<i>TSP</i>	Travelling Salesman Problem

<i>20CargSC</i>	Tasa Mercancía. 20' cargado Sin Concesión
<i>20CargCCSA</i>	Tasa Mercancía. 20' cargado Con Concesión Sin Atraque
<i>20CargCCCA</i>	Tasa Mercancía. 20' cargado Con Concesión Con Atraque
<i>20VacSC</i>	Tasa Mercancía. 20' vacío Sin Concesión
<i>20VacCCSA</i>	Tasa Mercancía. 20' vacío Con Concesión Sin Atraque
<i>20VacCCCA</i>	Tasa Mercancía. 20' vacío Con Concesión Con Atraque
<i>TUZT</i>	Tasa Uso Zona Tránsito
<i>Ztrans</i>	Zona de tránsito

1. Introducción

El principal objetivo de la Comisión Europea en 2001, año de publicación del segundo Libro Blanco del Transporte (Libro blanco del transporte, Comisión Europea, 2011), fue reducir el movimiento de mercancías que emplean el transporte por carretera, potenciando el transporte alternativo por mar y tren. Este objetivo buscaba tanto disminuir la congestión que se estaba registrando en las carreteras europeas como reducir los niveles de contaminación generados por camiones y demás vehículos.

Aunque se han logrado avances, el sistema de transporte sigue sin ser sostenible (Figura 1). Los costes de la congestión aumentarán en cerca del 50% para 2050 (Comisión Europea, COM 2020 789). Por este motivo, en la nueva edición del libro blanco, con el horizonte del 2050, se plantea un sistema de transporte competitivo y sostenible, aplicando sistemas inteligentes como el ITS (Inteligente Transport System for safe, green and efficient traffic on the European road network), ERTMS (European Rail Traffic Management System) y Galileo (Libro blanco del transporte, Comisión Europea, 2011).

En 2018, el 75,3% (en toneladas/km) del transporte interior en la UE se realizó por carretera, siendo cuatro veces superior al realizado por tren (18,7%). Sin embargo, los puertos marítimos europeos manejaron casi 4 billones de toneladas de mercancías en 2018. Los más destacados son los puertos holandeses con 600 millones de toneladas. En el caso de los españoles, estos superaron los 470 millones de toneladas. Estos dos países, junto con Italia, manejan casi el 45% de las mercancías transportadas por mar en la UE (Eurostat).

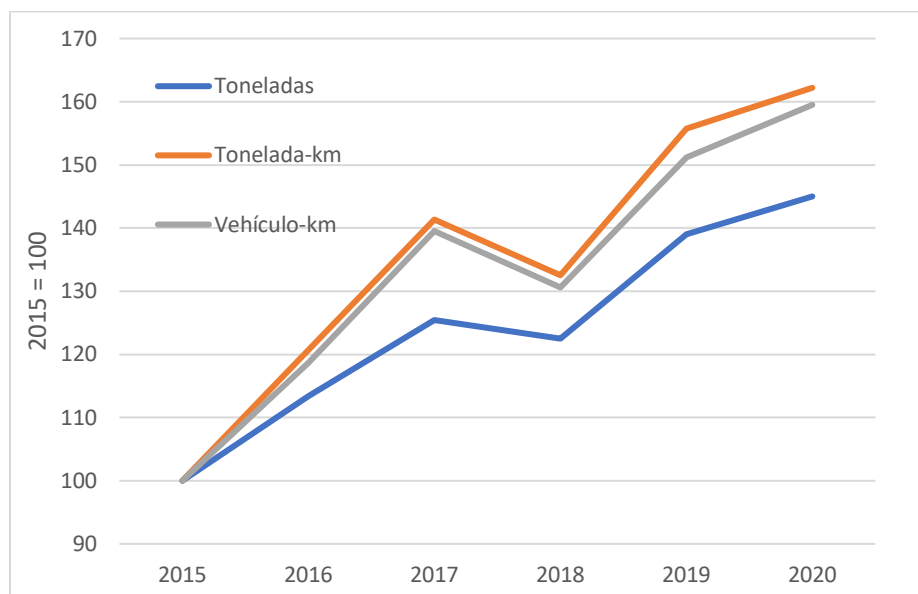
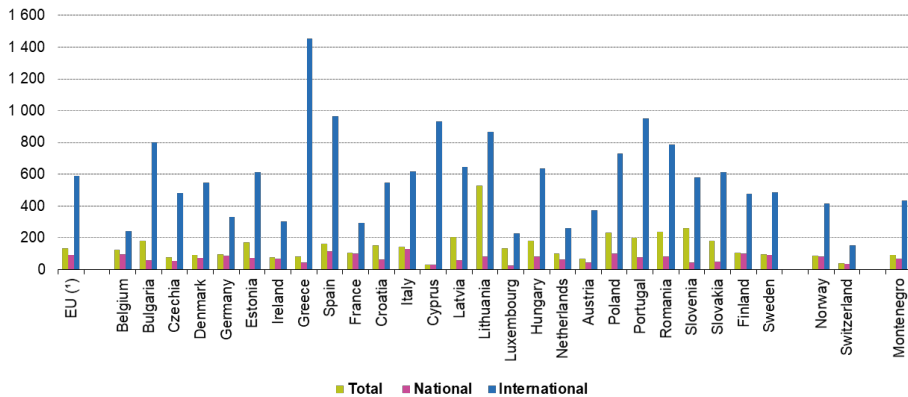


Figura 1. Crecimiento en % en el movimiento de mercancías por carretera entre países de la UE

En 2019 el transporte de mercancías por carretera se realizó en su mayor parte en trayectos con distancias entre los 50 y los 1500 km (Figura 2). De hecho, respecto a años anteriores, se ha producido un incremento del transporte por carretera en grandes distancias, entendidas éstas como las que abarcan entre los 300 y los 999 km. Esto da una idea de que la transferencia de mercancía hacia otros modos de transporte no se está produciendo.

Average distance of road freight transport by type of operation on which goods are carried, 2019
(kilometres)



(*) Malta excluded (see chapter 'data sources')
Source: Eurostat (online data code: road_go_ta_tott)



Figura 2. Distancia media recorrida en las operaciones de transporte por carretera.
Fuente: Eurostat

El sector del transporte hace frente a diversos problemas debido al continuo crecimiento de la demanda de servicios. Y ante este incremento las empresas europeas siguen prefiriendo el transporte por carretera frente al resto por razones operativas, ya que ofrecen un servicio puerta a puerta directo sin transbordo de carga. Frente a esta opción tradicional, la UE apuesta por el concepto de co-modalidad eficiente a través de corredores de transporte de carga especialmente desarrollados, optimizados en cuanto al uso de la energía y a las emisiones, que minimicen los impactos ambientales, pero al mismo tiempo que sean atractivos por su fiabilidad, congestión limitada y reducidos costes administrativos y de funcionamiento. La herramienta para hacer más atractivo este modo de transporte combinado es un sistema europeo de información, gestión y pago de los transportes multimodales.

Estos corredores de transporte aparecen definidos en el Reglamento Europeo 1315/2013. Este reglamento fija la política europea que establece la implementación de la Trans-European Transport Network (TEN-T), que consiste en la generación de una red de líneas de ferrocarril, carreteras, canales de navegación interiores, rutas marítimas, puertos, aeropuertos y terminales de ferrocarril. Los objetivos de esta red son minimizar los gaps entre modos de transporte, eliminar cuellos de botella y barreras técnicas, así

como incrementar la cohesión social, económica y territorial de la Unión Europea. La red consta de dos capas:

- La capa básica que incluye las conexiones más importantes entre los nodos principales y que se espera que esté completa en 2030
- La capa extendida que cubre todas las regiones europeas y que se espera que esté completa en 2050

La capa básica está formada por 9 corredores (Figura 3), que permiten el flujo de mercancía entre países de la Unión Europea combinando diferentes modos de transporte. De ahí que cada corredor incluya rutas marítimas (puertos) y carreteras (principalmente autovías y autopistas) o vías de ferrocarril.

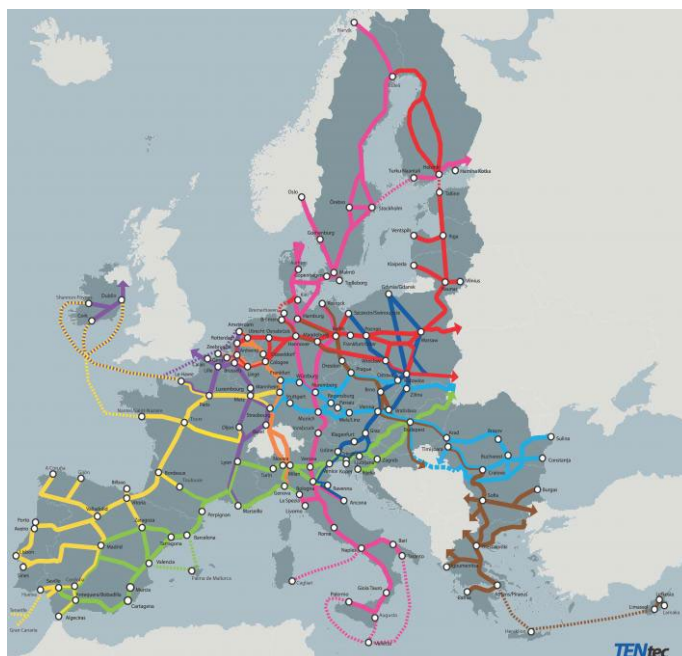


Figura 3. Corredores TEN-T

La manera que ha encontrado la Comisión Europea para incorporar el transporte marítimo a los corredores TEN-T ha sido el «cinturón azul», que simplifica los trámites de los buques que viajan entre puertos de la UE. El objetivo es reducir costes y facilitar el comercio al simplificar los trámites aduaneros para las mercancías transportadas por barco. Teniendo en cuenta la necesidad de proteger a los consumidores y a las empresas de la entrada de productos ilegales en la UE, este sistema se aplica tanto a buques que transportan mercancías entre puertos de la UE como a aquellos que visitan puertos no pertenecientes a la UE en su ruta entre puertos de la UE (por ejemplo, un barco procedente de Chipre que vaya a Calais podría dejar y recoger carga en puertos fuera de la UE, como Túnez). El régimen simplificado de servicios marítimos regulares, que ya se aplica a los buques que transportan mercancías de la UE y que hacen escala de forma

regular solo en puertos de la UE, entró en vigor el 1 de marzo de 2014. Este régimen permite que las mercancías conserven el estatus de la UE incluso cuando abandonan las aguas territoriales de la UE en su viaje entre puertos de los Estados miembros. En el caso particular del tráfico de contenedores la aplicación de este régimen y el eManifest estandarizado, es decir, la declaración de carga mixta permite distinguir entre mercancías de la UE e internacionales (de fuera de la UE), agilizando las gestiones asociadas a la actividad portuaria y aduanera. Como consecuencia lógica de lo anterior, se obtienen controles más eficientes: las mercancías de la UE se despacharían rápidamente, mientras que las mercancías de fuera de la UE estarían sujetas a procedimientos aduaneros.

Las propuestas del cinturón azul complementan la revisión de la política portuaria de la UE adoptada a través del *Europe's Seaports 2030: Challenges ahead* (European Commission, 2013) en mayo de 2013, busca impulsar la competitividad de los puertos marítimos y liberar su potencial de crecimiento.

Los puertos de mar desempeñan una función esencial como centros logísticos y precisan de conexiones eficientes con el interior del país al que pertenecen. Su desarrollo es vital para gestionar mayores volúmenes de carga, tanto mediante el transporte marítimo de corta distancia dentro de la UE como con el resto del mundo. Los flujos de mercancía en los ocho puertos más importantes de la UE fueron de importación principalmente, lo que hace aún más destacada la necesidad de un puerto hub y la redistribución de esa mercancía por Europa a través de rutas marítimas de corta distancia, utilizando buques más pequeños que permitan mayores frecuencias.

En los últimos diez años el conjunto del transporte de contenedores en los puertos europeos ha experimentado un crecimiento del 23%. En los países de la costa atlántica, el incremento en este tipo de transporte ha sido similar (entre el 19 y el 24%), excepto en Portugal donde el incremento ha sido del 59%. Si nos referimos a transporte de corta distancia, esta modalidad (Short Sea Shipping, SSS) creció un 22% en la última década en la UE. En los países de la costa atlántica europea el SSS se ha mantenido más o menos constante en este período, pero destaca el crecimiento experimentado por España y Portugal, de un 29 y un 38% respectivamente. Estos incrementos se deben al crecimiento en el volumen de importaciones fundamentalmente en los países europeos y a la mayor capacidad de los buques que realizan las rutas transoceánicas (fuente Eurostat).

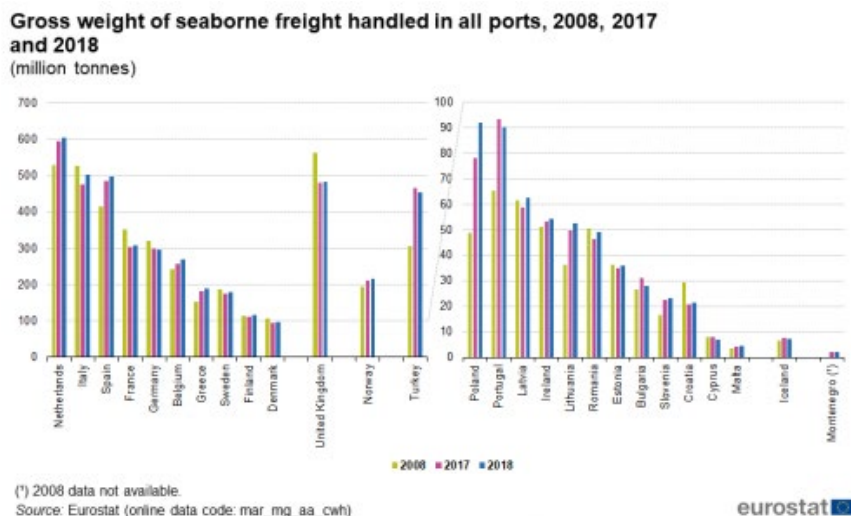


Figura 4. Mercancía movida en puertos europeos en millones de toneladas. Fuente: Eurostat ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Gross_weight_of_seaborne_freight_handled_in_all_ports,_2008,_2017_and_2018_\(million_tonnes\).png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Gross_weight_of_seaborne_freight_handled_in_all_ports,_2008,_2017_and_2018_(million_tonnes).png))

Para que el transporte por mar sea una alternativa atractiva frente al transporte por carretera se deben analizar qué aspectos de toda la cadena logística son susceptibles de una mejora en su eficiencia. Este propósito puede lograrse con la aplicación de herramientas TIC, que permitan simplificar los procedimientos administrativos, gestionar el seguimiento y localización de las mercancías u optimizar la programación y flujos del tráfico. Otra forma de mejorar los sistemas de transporte son los modelos de simulación que permiten evaluar la posible captación de flujos en cada ruta o su evolución con el tiempo. En estos modelos, cuando se simula el transporte multimodal, se linealiza la parte correspondiente al buque, o la aproximación tradicional es estática (Corman et al., 2017). Sin embargo, resulta interesante realizar una aproximación dinámica puesto que el tiempo de estancia del buque en puerto es tiempo que no rentabiliza y, por tanto, interesa reducirlo al mínimo. Este tiempo depende de varios factores como son la cantidad de contenedores que cargue/descargue (tiempo de embarque/desembarque, tiempo de grúas, etc.), el tiempo de entrada en puerto, el tiempo de atraque, etc. Esto requiere de un cálculo de costes y tiempos más detallados que permite a los modelos de simulación y optimización ser más realistas.

2. Objetivos

El objetivo general de esta tesis es desarrollar una metodología para la optimización de una flota de buques portacontenedores de pequeño tamaño para el transporte multimodal, que combina tramo por carretera y tramo por mar, es decir, tráfico marítimo de corta distancia. Para dicha optimización se consideran una serie de factores como son los flujos de mercancía contenerizada entre regiones, las rutas más probables para esos flujos y las frecuencias requeridas para satisfacerlos, así como la interacción buque-puerto.

Objetivos secundarios

Para lograr alcanzar el objetivo principal es necesario desagregar el problema planteado en varios de menor alcance. De esta forma, la solución de cada uno de ellos por separado permitirá finalmente su integración para una solución final al problema inicial planteado.

Por tanto, será necesario abordar los siguientes problemas cuya resolución constituye cada uno de los objetivos secundarios necesarios para alcanzar el objetivo principal:

- Problema de routing (optimización de rutas). Es necesario obtener la ruta o rutas que resulten más atractivas en términos de coste y tiempo para un flujo de mercancía. Dicha ruta va a conectar dos extremos a través de más de dos nodos (puertos) y, por tanto, será clave decidir el orden en que el buque visita dichos nodos.
- Problema de schedulling (optimización de frecuencias). Combinando la ruta y los flujos de mercancía, obtenidos en los puntos anteriores, se podrá conocer la frecuencia de visitas del buque a cada nodo para satisfacer la demanda prevista.
- Problema de sizing (tamaño de flota). Una vez conocida la frecuencia de viajes se puede obtener el número de buques necesarios para cubrirla, lo que permite establecer una flota mínima para dar respuesta a la demanda de mercancía de la ruta seleccionada. Esto permitirá evaluar las ratios de ocupación de los buques, lo que da una idea de la sostenibilidad de la ruta en un periodo de tiempo determinado
- Problema de stowage (estiba). Definir el plan de estiba del buque en cada puerto permite calcular con mayor exactitud los tiempos de carga y de descarga. Este dato es fundamental para conocer el coste en que incurre el buque durante su estancia en puerto, y que influye directamente en el coste del flete ofertado finalmente al cargador. Este tiempo también va a influir en las rutas estudiadas y en la competitividad de la cadena multimodal.

Cada uno de estos puntos se aborda de forma desagregada, en la medida de lo posible, en el estado del arte.

3. Estado del arte

El estado del arte se aborda la situación actual de cada uno de los problemas en los que se ha dividido el objetivo general de esta tesis. En dichas publicaciones, algunos de ellos se estudian de forma combinada y en otros se abordan en solitario. Por tanto, se ha dividido este estado del arte en temáticas (problema del routing, problema de scheduling, problema de sizing y problema de stowage).

3.1. Soluciones al enrutamiento de vehículos aplicado a rutas marítimas

El VRP (Vehicle Routing Problem) es un problema de optimización combinatoria que implica encontrar el diseño óptimo para una ruta realizada por un conjunto de vehículos y que sirve a un conjunto de clientes. En el VRP tradicional, se trata de definir rutas para una flota de vehículos homogénea que satisfaga la demanda de los clientes. Cada nodo, corresponde a un cliente y es visitado una vez por un solo vehículo que comienza y completa su viaje en la estación central, y se deben cumplir algunas restricciones secundarias (Brandão, 2009).

El clásico enrutamiento de vehículos (VRP), que implica entrega o recogida de carga que debe ser transportada por una flota de vehículos desde un almacén o centro de distribución, se ha aplicado al caso de un buque que tiene que tocar diferentes puertos para descargar/cargar. Las restricciones a plantear son en ambos casos similares en cuanto a capacidad máxima del vehículo, satisfacción de la demanda, ventana de tiempo para realizar las entregas/descargas, etc. El problema básico consiste en un conjunto de puertos que deben ser servidos por un número de buques y en el que no hay restricciones de cuándo y en qué orden deben ser servidos esos puertos.

En general, este problema no se aborda de forma aislada, sino que se estudia en conjunto con el problema de las frecuencias de las entregas o el tamaño de la flota para cumplir con éstas o con la demanda (Hsu & Hsieh, 2007). También existen trabajos en los que se combina el problema de la ruta con el problema de la estiba (Conca et al., 2018).

La planificación táctica y operativa de una naviera se enfoca hacia el enrutamiento y la programación (frecuencias). El enrutamiento se puede definir como la asignación de secuencias de puertos a ser visitados por el buque. El término programación (frecuencia) se utiliza cuando el tiempo es una variable que se combina con el enrutamiento (Christiansen, M., et al, 2004).

El objetivo habitual es encontrar la ruta óptima minimizando el coste para la naviera, o maximizando el beneficio (Christiansen et al., 2013), y teniendo en cuenta una serie de consideraciones como la carga a transportar (Lin & Tsai, 2014). Este planteamiento

obliga a decidir cuántos buques será necesario desplegar en esa ruta para cumplir con los requerimientos impuestos. Desde el punto de vista computacional, el VRP es un problema NP-complejo (Non deterministic Polynomial time) que se puede tratar de resolver de diferentes formas relajando las restricciones aplicadas.

La solución al problema consiste en definir una ruta para cada buque con la secuencia de puertos que el buque debe visitar junto con el servicio que se debe dar en cada puerto. Aunque la función objetivo suele enfocarse en términos de coste, existe la posibilidad de minimizar la distancia recorrida en una ruta, lo que sería una aplicación clásica del VRP (Vaferi et al., 2018), o bien buscar el valor del flete óptimo en función de la capacidad disponible en la flota (Wang & Meng, 2021).

En (Lin & Tsai, 2014) los dos componentes principales de la solución propuesta son: el método de subgradiente y la búsqueda local. Proponen una heurística basada en la relajación lagrangiana (LR) que permite cierta flexibilidad en la capacidad de los vehículos para determinar los límites admisibles de la solución. Además, para reducir la brecha de optimización del método LR, diseñan una heurística de búsqueda local específica del problema que intercambia pares de OD entre barcos.

La combinación del problema de enrutamiento y la programación de las visitas a cada puerto se aborda en (Agarwal & Ergun, 2008; Fagerholt & Fagerholt, 1999; Zhen et al., 2019). En el primero a través de la aplicación de tres algoritmos heurísticos, uno para asignar la carga a las rutas, otro que selecciona un conjunto de rutas y, finalmente, otro que selecciona la mejor ruta. Los pares OD se elige de forma aleatoria dentro del conjunto de puertos seleccionados, y la demanda asociada también es aleatoria pero dependiente de la capacidad del buque de mayores dimensiones. En el segundo se emplea un modelo matemático en tres fases. En la fase 1 se calculan todas las rutas simples posibles para el mayor buque disponible. Algunas de estas rutas usarán sólo una parte de la capacidad del buque, por lo que podrían usarse buques más pequeños a menor coste. Esto se usa para calcular el coste de cada ruta. En la fase 2, cada ruta simple se combina para crear rutas complejas. En las dos fases se calculan los costes asociados a las rutas. En la fase 3 se busca la solución con la mejor combinación de ruta y coste, teniendo en cuenta las rutas simples y compuestas calculadas en las fases anteriores. Se obtiene así la flota óptima y la ruta más coherente para ésta. El tercero emplea una combinación de tres heurísticos para minimizar el coste en una ruta, al igual que los anteriores, pero optimizando la velocidad en cada tramo de la ruta.

En (Cho & Perakis, 1996) se presentan dos modelos de optimización para una naviera de línea regular. Uno es un modelo de programación lineal donde se busca maximizar el beneficio, y en el que se obtiene la ruta óptima para cada buque disponible y la frecuencia óptima de servicio en cada ruta. El otro modelo se basa en programación con variables binarias y obtiene no sólo lo mismo que el primer modelo, sino también las mejores alternativas para la inversión de capital a la hora de expandir la capacidad de la flota ante una determinada previsión de la demanda. Este último modelo busca la minimización del coste.

La programación lineal (Mixed Integer Problem, MIP) aplicada al enrutamiento de vehículos con restricciones proporciona un límite inferior y superior de la función objetivo (Lu, 2002) cuando se parte de un conjunto de candidatos conocidos. El buque se toma como un entero y se obtiene una ruta óptima minimizando la función de costes asociados a la ruta (Sambracos et al., 2004). Estos costes son los correspondientes a los costes de combustible y al puerto. La restricción es que se debe satisfacer la demanda en cada puerto. (Meng & Wang, 2011a; Takano et al., 2010) incorporan la restricción de la reposición de contenedores vacíos. Lo que se plantea es un servicio hub&spoke de manera que los puertos se clasifican en dos subconjuntos mutuamente excluyentes: el conjunto de puertos hub y el conjunto de puertos spoke, que serán servidos por buques feeder. Cada uno de estos puertos spoke solo puede reponer los contenedores vacíos a su puerto hub correspondiente, y para eso los contenedores pueden sufrir varios transbordos. Considera como costes fijos constantes los costes de pasos por los canales, los costes de entrada a puerto y de combustible, y como costes operativos los debidos a la ocupación de los muelles (proporcional al tiempo) y los costes de carga y descarga. Lo que se minimiza son estos últimos. La gestión de contenedores vacíos en rutas directas la aborda (Jeong et al., 2018), donde se busca minimizar los costes de transporte de esos contenedores y los debidos a los transbordos a través de seleccionar la ruta más adecuada, teniendo en cuenta cuántos contenedores se deben reponer en cada puerto que configura la ruta.

Un caso específico de puertos hub&spoke es el planteado por (Gelareh & Pisinger, 2011), donde se busca una ruta circular entre puertos hub y el resto de los puertos se consideran spoke. Estos puertos pueden tener dos puertos hub asociados. En base a esto se optimiza el tipo de buque y cuántos son necesarios y la frecuencia de visitas a los puertos spoke (Z. Jin et al., 2005). En (Hellsten et al., 2021) se plantea una ruta feeder con un solo puerto hub, donde toda la carga se origina o tiene como destino dicho puerto hub. El sistema hub&spoke implica que buques de grandes dimensiones (desde postPanamax hasta postSuezmax), que realizan rutas transoceánicas, alimenten esos puertos hub, se proceda al transbordo de los contenedores y se carguen los buques feeder según los puertos que vayan a tocar. La incertidumbre en los tiempos de servicio de los buques feeder puede llevar a esperas excesivas de los buques postPanamax y superiores en las terminales, generando situaciones de congestión en dichas terminales. Por tanto, es interesante analizar la disponibilidad de la terminal para el buque transoceánico combinado con la frecuencia de servicio de los buques feeder asignados a la ruta hub&spoke (Jia et al., 2020; J. G. Jin et al., 2021).

Otra opción es maximizar el beneficio (Chu et al., 2003). En el caso de (Chuang et al., 2010) aplica algoritmos genéticos a este problema. En particular, usa lógica difusa para determinar la ruta de un portacontenedor partiendo de un grupo de puertos a elegir, sin necesidad de pasar por todos ellos y repitiendo algún puerto dentro de una misma ruta. La función objetivo es el beneficio obtenido de transportar un contenedor de un puerto a otro, considerando como costes los costes del viaje y los del puerto. Otra posibilidad de maximización del beneficio aplicando algoritmos genéticos la plantea

(Shintani et al., 2007). En este caso se analizan rutas circulares teniendo en cuenta la demanda de contenedores vacíos. Se busca el conjunto de puertos que configuren la ruta óptima y la frecuencia de visitas a esos puertos a través de la formulación del problema de Knapsack. (Imai et al., 2009) hace algo similar, pero para buques transoceánicos y tiene en cuenta el tiempo de transporte de los contenedores dentro del hinterland de los puertos y el coste de su almacenamiento.

Las condiciones de contorno impuestas varían de unos trabajos a otros, pero las más habituales son las siguientes:

- La demanda puede ser fija y conocida entre pares OD (Origen – destino) (Agarwal & Ergun, 2008; Christiansen et al., 2013; Chu et al., 2003). Se plantea el número de contenedores a transportar como un parámetro fijo. O bien, puede ser estocástica (Ng, 2015) o depender del servicio. Ante la incertidumbre en la demanda se emplean funciones estadísticas de distribución para incorporarlas en los modelos de transporte (Chen & Zeng, 2010; Cho & Perakis, 1996; Christensen et al., 2019). O bien modelos gravitacionales para predecir la demanda (Cheng & Wang, 2021).
- La carga destinada a un puerto no se puede dividir entre varios buques (Polat et al., 2014) o se divide teniendo en cuenta los costes de transbordo (Zhen et al., 2019).
- Hay un camino único para cada par OD (Homsí et al., 2020)
- El tamaño de la flota es fijo y no se considera una posible ampliación (Plum et al., 2014)
- La flota está formada por buques similares. Es una simplificación que facilita el cálculo de los costes por viaje, velocidades y consumo de combustible (Agarwal & Ergun, 2010; Sambracos et al., 2004; Vaferi et al., 2018)
- Los viajes son circulares o pendulares. Lo habitual en las rutas de corta distancia es que los buques realicen rutas con un puerto de origen y varios destinos (Sambracos et al., 2004). Esto ya no se cumple en rutas transoceánicas (end-to-end service).
- Todos los puertos de la ruta deben ser visitados (Plum et al., 2014; Vaferi et al., 2018) o no (Chu et al., 2003; Lu, 2002)
- No hay restricciones en cuanto al momento en que el buque debe llegar a cada puerto, o bien se aplica una ventana de tiempo (Christiansen et al., 2013; Homsí et al., 2020; Z. Jin et al., 2005)

Las rutas circulares o pendulares son las seleccionadas de forma más habitual (Chen & Zeng, 2010), aunque en (Reinhardt & Pisinger, 2012) se plantea un nuevo modelo de la red de transporte en el que se incluyen rutas de mariposa, con el coste del transbordo y el tiempo de la ruta incorporados en los cálculos de la capacidad para presentar un modelo realista. El método propuesto para la resolución del problema (MIP) es el de branch-and-cut y que, según los resultados obtenidos, proponen como adecuado para la planificación de rutas en navieras dedicadas a prestar servicios feeder o a la planificación de una red regional en el caso de una naviera más grande.

En la mayor parte de los trabajos sobre planificación de rutas la demanda se toma como un valor determinista, conocido y fijo a priori para cada puerto, basados en los valores promedios anuales. También se supone que las tarifas de fletes son constantes y que no se ven afectados por la demanda. Sin embargo, esta suposición no refleja la realidad del diseño de la red de transporte de contenedores. De hecho, la demanda de tráfico de carga y las tarifas de flete fluctúan periódicamente. En este caso, las operaciones de la red de envío pueden dar como resultado una gran capacidad superior a la demanda cuando la demanda es baja y generar una gran pérdida de ingresos cuando la demanda es alta. Por lo tanto, cómo mover o arrendar contenedores vacíos de manera oportuna y eficiente, qué tamaño de barcos maximizan los ingresos durante las temporadas altas y minimizan las pérdidas fuera de temporada y cómo determinar las configuraciones de los contenedores para reducir el riesgo de contenedores excesivos fuera de temporada son problemas a resolver. (Chen & Zeng, 2010) presenta un modelo de planificación de rutas con la fluctuación de la demanda de tráfico de carga entre todos los puertos como factor de influencia clave. Propone incorporar esta fluctuación, mediante una serie de matrices de demanda en el tiempo y con tarifas de fletes no homogéneas en lugar de una matriz de la demanda promedio en un determinado horizonte temporal de planificación.

(Gandra et al., 2022; Z. Jin et al., 2005; Moura & Oliveira, 2008) estudian el problema del enrutamiento con ventanas de tiempo (Vehicle Routing Problem with Time Windows, VRPTW). En el primero la función objetivo es minimizar el coste total con restricciones del tipo cada puerto es servido por un buque, que no se supera la capacidad de los buques (Vaferi et al., 2018) ni el número máximo de buques disponible además de que los tiempos de llegada a puerto deben ser anteriores al tiempo límite establecido. El segundo trabajo tiene la particularidad de que se analiza el llenado de los propios contenedores. Se busca maximizar el espacio usado dentro de cada contenedor y minimizar el número de buques. Cada cliente viene definido por sus coordenadas geométricas, su ventana de tiempo, su demanda, peso total de la carga y el período de entrega. Con la lista de clientes así definida se determina la ruta a seguir. Esto hace que la carga del cliente quede repartida por varias bodegas del buque, lo que hace que se incurra en más operaciones de carga/descarga de las necesarias (Qin et al., 2020) o que el buque atraque en el puerto del cliente en más de una ocasión. Este problema es especialmente interesante cuando el número de clientes es pequeño y su demanda consiste en una carga semanal heterogénea.

Normalmente los modelos de enrutamiento que incorporan la carga y descarga del vehículo (Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery, VRPPD) asumen que las cargas y las descargas se realizan en puertos distintos y por eso un solo buque visita cada puerto. Sin embargo, (Pang et al., 2011) plantea la posibilidad de que varios buques visiten el mismo puerto para realizar cargas y descargas distintas, por lo que hay que evitar la posible congestión en el muelle. Define una restricción adicional que limita el tiempo de permanencia del buque en el muelle. En cambio, (Homsí et al., 2020)

establece una restricción sobre el calado máximo admisible en el puerto, lo que puede implicar una incompatibilidad buque-puerto.

Un tema que se está incorporando al planteamiento de cuál es la ruta óptima para un buque o una flota, es el de las emisiones (Kontovas, 2014). Los niveles de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es un condicionante a tener en cuenta en el transporte marítimo. La incorporación de un factor de CO₂ equivalente a los modelos de enrutamiento se puede realizar de diferentes formas:

- Transformar la función objetivo de forma que se minimicen las emisiones totales
- Transformando las emisiones en un coste monetario, como un coste externo asociado a cada ruta
- Añadir una nueva restricción que limite las emisiones permitidas en una ruta

En los niveles de emisiones tiene gran influencia la velocidad del buque. La optimización de la velocidad para cada tramo de la ruta se ha evaluado de forma conjunta con el problema VRP (Norstad et al., 2011). Para una ruta fija con ventanas de tiempo, se evalúa qué velocidad consigue un menor consumo de combustible. Otro factor a tener en cuenta es la disponibilidad de la conexión del buque al puerto en el muelle que puede influir en la frecuencia de acceso al puerto en función de esa disponibilidad (Zhen et al., 2020).

En la Tabla 1 se realiza una clasificación de los métodos propuestos para la resolución del VRP y sus variantes en la bibliografía consultada. Se puede observar que los más empleados son los métodos heurísticos, los algoritmos genéticos y la programación lineal.

Heurístico	Metaheurístico	Algoritmos genéticos	Programación lineal	Otros modelos matemáticos
(Moura & Oliveira, 2008)	(Vaferi et al., 2018)	(Chuang et al., 2010)	(Lin & Tsai, 2014)	(Gelareh & Pisinger, 2011)
(Polat et al., 2014)	(Homsy et al., 2020)	(Shintani et al., 2007)	(Sambracos et al., 2004)	(Agarwal & Ergun, 2010)
(Agarwal & Ergun, 2008)	(Christensen et al., 2019)	(Karlaftis et al., 2009)	(Plum et al., 2014)	
(Norstad et al., 2011)		(Takano & Arai, 2009)	(Fagerholt, 2004)	
(Pang et al., 2011)		(Takano et al., 2010)	(Hsu & Hsieh, 2007)	
(Hellsten et al., 2021)		(Chen & Zeng, 2010)	(Christiansen et al., 2013)	
(Zhen et al., 2020)		(Jia et al., 2020)	(Meng & Wang, 2011a)	
(Zhen et al., 2019)		(Cheng & Wang, 2021)	(Cho & Perakis, 1996)	
(Gandra et al., 2022)		(Jeong et al., 2018)	(Z. Jin et al., 2005)	
(Wang & Meng, 2021)			(Reinhardt & Pisinger, 2012)	
(J. G. Jin et al., 2021)			(Lu, 2002)	
			(Qin et al., 2020)	

Tabla 1. Clasificación de trabajos académicos son el método de resolución del problema utilizado

3.2. Planificación de las visitas a los puertos dentro de una ruta

El problema de la asignación de frecuencias se encuentra en un nivel táctico en la planificación de las navieras y la toma de decisiones por parte de ésta es a medio plazo, ya que afecta a las llegadas y salidas del puerto, la velocidad de navegación en cada tramo de la ruta o el tiempo de estancia del buque en puerto.

Se puede considerar que el nivel de servicio proporcionado por una empresa naviera consta de muchos componentes, como la seguridad de la carga, la disponibilidad de contenedores, la frecuencia del servicio, el día de la semana en que un barco sale del puerto, el tiempo de tránsito entre puertos y fiabilidad del servicio prestado. Los dos primeros elementos están fuera del alcance de la planificación (scheduling). Si se consideran todos los demás elementos, el problema de programación matemática resultante sería demasiado grande y complejo para ser resuelto. Para que sea manejable, el problema de la planificación de buques portacontenedores se puede descomponer en dos partes:

- Encontrar la ruta óptima para cada barco y la carga que transporta para cualquier par de puertos i y j . Y, por tanto, calcular la frecuencia de servicio prestado a cada puerto.
- Luego, para cada barco, preparar un cronograma de modo que las visitas al puerto se extiendan a lo largo del horizonte de planificación y se contabilicen los demás componentes del servicio.

El problema de despliegue de la flota puede asignar diferentes o iguales tipos de embarcaciones a un conjunto de rutas con el objetivo de minimizar una función del coste operativo total de la flota. Por tanto, en un horizonte de planificación a corto plazo son conocidos los costes operativos, las capacidades, el volumen de carga a transportar entre puertos (pares OD) en rutas definidas, con la posibilidad de incorporar otros buques por fletamento. La programación general (en cuanto a la frecuencia del servicio) y la decisión sobre el flete están orientadas a cumplir con los compromisos del contrato de transporte. Sin embargo, algunos de los componentes del coste del servicio en una ruta entran en conflicto. Por ejemplo, para reducir el coste total del consumo de combustible, la empresa naviera tiene que reducir el consumo de combustible de los buques reduciendo su velocidad de navegación, lo que aumentará aún más el tiempo total de viaje del buque y, por lo tanto, aumentará el número de barcos requeridos para garantizar la frecuencia de servicio acordada en los puertos. (Song et al., 2015) propusieron un modelo multiobjetivo para el problema de programación de buques, mientras que otros trabajos sobre planificación de buques combinaron los componentes de costes considerados en un solo objetivo, minimizando el coste total del servicio de la ruta del buque (Lashgari et al., 2021). Este enfoque, que es similar al método de la suma ponderada en optimización multiobjetivo, no permite capturar el conflicto entre los diferentes componentes del coste.

Se pueden plantear diferentes escenarios. Por un lado, fijar el número de viajes anuales, que dependerá de la política de la naviera en cuanto a mantenimiento, reparaciones o paradas en dique, lo que permitirá fijar el número mínimo de buques necesarios para satisfacer el servicio. O bien, el número óptimo de viajes que el buque/flota debe realizar en función de la carga a transportar, lo que permitirá establecer la frecuencia de visitas a los puertos (Wang et al., 2019). La restricción más habitual es la capacidad del buque o la ventana de tiempo admisible en la terminal, pero también existen otras restricciones como la capacidad para la carga/descarga de la terminal (Natalia et al., 2021).

(O et al., 2002) plantea una optimización de la flota para reducir costes en rutas insulares, a través de aplicar un sistema hub&spoke, con una frecuencia coordinada entre buques transoceánicos y feeders. De esta forma se evitarían elevados costes de inventario debido a las esperas de la mercancía en puerto mientras no llega el siguiente buque. Para esto aplica un modelo de programación lineal entera donde se minimizan los costes de los viajes realizados tanto por los buques de grandes dimensiones entre un puerto principal y el hub, como los buques feeder entre los puertos spoke. La misma problemática la presentan (Jia et al., 2020) pero con una función objetivo distinta, ya que buscan minimizar el retraso en la salida de la terminal del buque transoceánico al mismo tiempo que minimizan las modificaciones en las frecuencias de los feeder.

Es muy habitual que las frecuencias sean semanales, es decir, que al menos un buque dentro del servicio parta de cada puerto una vez a la semana. En esto influye la velocidad del buque por lo que se puede llegar a plantear como un sub-problema (Zheng et al., 2021). Se puede establecer como una restricción de forma que la velocidad en cada arco que une el puerto i con el j se encuentre dentro de un límite inferior y uno superior.

La optimización de las frecuencias de entrada a puerto también se puede enfocar hacia la reducción de las emisiones de GEI (Dulebenets, 2018; Qi & Song, 2012; Zhuge et al., 2021), o bien incorporar como variable de decisión la velocidad del buque o la productividad de las grúas del puerto (Ting & Tzeng, 2003).

En la planificación de las visitas a los puertos no hay un método que destaque sobre otro para la resolución del problema, aunque entre los más empleados están el algoritmo genético y la programación lineal (Tabla 2).

Algoritmo genético	Heurístico	Programación lineal	Otros modelos matemáticos
(Song et al., 2015)	(Natalia et al., 2021)	(Gelareh & Meng, 2010)	(Qi & Song, 2012)
(Jia et al., 2020)		(O et al., 2002)	(Ting & Tzeng, 2003)
(Wang et al., 2019)		(Zheng et al., 2021)	(Zhuge et al., 2021)
			(Dulebenets, 2018)
			(Lashgari et al., 2021)

Tabla 2. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado

3.3. Problema del tamaño de la flota

El problema de cuántos buques asignar para dar servicio a una ruta necesita un análisis a nivel táctico y a nivel operativo. A nivel táctico una compañía naviera puede decidir asignar más buques de los necesarios a una ruta, pero mantener el mismo nivel de servicio (frecuencias de entrada a puerto). Esto genera un cierto buffer que resulta útil ante las incertidumbres en la demanda. Este “exceso” de buques permitiría tomar una decisión a nivel operativo como es la navegación low steaming (navegar a velocidades por debajo de la velocidad de servicio), pero repercute en el coste operativo del conjunto de la flota asignada a la ruta. Esto es debido a que el coste operativo total de la flota incurrido en un escenario de este tipo, en un período determinado, consiste en los costes de viaje de los barcos, los costes de inmovilización de los buques, los costes de fletamento de buques portacontenedores de otras compañías navieras o la inversión de capital en la compra de barcos de segunda mano.

En general, se asume que los buques asignados a un servicio (ruta) son todos iguales o similares, al menos, en capacidad. Pero no es la opción más realista, ya que cada ruta puede estar servida por buques de distinta capacidad y, por tanto, de distinto consumo de combustible, distinta eficiencia, y distintos costes asociados. En (Wang & Wang, 2021) se analiza el despliegue de una flota de buques heterogéneos con una demanda fluctuante. El objetivo es minimizar el coste total formado por los costes operativos, los costes de combustibles y la penalización en coste por la demanda no satisfecha. Esto obliga a equilibrar las capacidades de los buques y sus costes asociados.

Las navieras de líneas regulares tienen que ajustar su tamaño de flota para dar respuesta a las acciones de sus competidores o a cambios estacionales en la demanda. Solucionan este problema moviendo buques de unas rutas a otras. Sin embargo, esto

tiene un coste asociado que se puede incluir en la función objetivo de minimizar costes o maximizar los beneficios (Wetzel & Tierney, 2020).

Los métodos utilizados para resolver el tamaño de flota se pueden ver resumidos en la Tabla 3, donde se ve que estos son los metaheurísticos y la programación lineal.

Metaheurísticos	Programación lineal
(Wetzel & Tierney, 2020)	(Meng & Wang, 2011b)
	(Wang & Wang, 2021)

Tabla 3. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado

3.4. Soluciones computacionales al problema del plan de estiba

Los planes de estiba son una tarea importante en el negocio del transporte de contenedores. La calidad de los planes de estiba generados para buques con viajes multi-puerto afectan en gran medida a los costes operativos de la naviera, los cuales también afectan a la competitividad de las empresas que utilizan el servicio.

El problema de la estiba de contenedores (Container Stowage Plan, CSP), también conocido como Master Bay Plan (MBP), es un problema NP-hard (Avriel, M, Penn, M, Shpirer, 2000) con aplicaciones reales tanto en el transporte de corta distancia (Short Sea Shipping) (Martins et al., 2009a) con buque feeder, como en las rutas transoceánicas con buques postpanamax (Ambrosino, Paolucci, & Schiomachen, 2015).

El problema del CSP se puede explicar como el problema de asignar diferentes tipos de contenedores, cada uno con sus características (peso, dimensiones, etc.) a slots en un portacontenedor, con el objetivo de reducir el coste de transporte de la carga.

Determinar la posición óptima de un contenedor a bordo de un buque es un problema complejo. Hasta hace algunos años la mejor de las aproximaciones dependía de la habilidad de los planificadores, primero de la naviera y luego de la terminal de contenedores. Estos planificadores debían tener en cuenta una serie de restricciones (peso del contenedor, puerto de destino, refrigerado o no, 20 o 40 pies) y, además, minimizar los costes asociados a la carga y descarga de los mismos. Esto significa minimizar las re-colocaciones (re-handle)(Cifuentes & Riff, 2020). Estas re-colocaciones son movimientos improductivos de contenedores, pero necesarios para alcanzar un contenedor situado debajo, cuando el que está encima no se va a descargar en ese puerto o bien está vacío.

Por este motivo hay diversos trabajos académicos que abordan esta problemática desde el punto de vista computacional y matemático. En muchos de ellos se plantea como un problema de combinatoria que depende del tamaño del buque y de la demanda establecida para cada puerto de destino (Wilson et al., 2001). En el plan de estiba las decisiones adoptadas para un puerto tienen consecuencias para los siguientes puertos en la ruta. Por lo tanto, una solución completa para el plan de estiba es aquella que determina el orden de los contenedores en el buque de manera que se descarguen de la forma más eficiente en cada puerto, sin comprometer la estabilidad ni superar la resistencia estructural del buque.

El Master Bay Plan Problem (MBPP) implica resolver la asignación de un grupo C de m contenedores de diferentes tipos a un grupo S de n posiciones disponibles dentro de un portacontenedor, respetando algunas restricciones estructurales y operacionales relacionadas con los contenedores y con el buque, mientras se intenta minimizar el tiempo total de estiba (Ambrosino et al., 2004a). Si esto lo extendemos a una ruta con varios puertos se obtiene una variante de este problema que es el Multi-Port Master Bay Plan Problem (MP-MBPP). El problema para un solo puerto es una optimización NP-hard que se puede resolver por métodos heurísticos que se vienen proponiendo en la literatura desde el 2001, pero las posibles soluciones cambian cuando se aborda este problema para varios puertos. (Ambrosino et al., 2017a) proponen un modelo basado en MIP (Mixed Integer Programming) capaz de obtener un plan de estiba con escenarios realistas para buques de hasta 18.000 TEU's.

Algunos modelos MIP para MP-MBPP se presentan en (F. Li et al., 2008) y (Ambrosino, Paolucci, & Sciomachen, 2015a). En este último, siguiendo el enfoque de descomposición propuesto en (Wilson & Roach, 2000), se plantean dos modelos MIP para resolver el MP-MBPP a niveles estratégicos, donde se tienen en cuenta escotillas y quillas irregulares de los portacontenedores. Sin embargo, sólo se considera carga estándar en el análisis y los movimientos de re-handle están permitidos, es decir, es posible descargar contenedores sobre estibados para posteriormente volver a cargarlos en otra posición. La ampliación de este trabajo a otro tipo de contenedores se realiza en (Ambrosino et al., 2017a). Sin embargo, el incremento de restricciones hace irresolubles a estos modelos para los solvers estándar. Debido a esto, existen diversos trabajos en los que se ha aplicado otras soluciones como son los algoritmos heurísticos y metaheurísticos de forma complementaria (Christensen & Pacino, 2017). Otra alternativa son los algoritmos genéticos (Cohen et al., 2015)

Las principales contribuciones se pueden dividir en dos categorías: los que abordan el problema a través de aproximaciones de una sola fase, y los que emplean aproximaciones multi-fase.

Las soluciones multi-fase proponen una descomposición del MP-MBPP. Generalmente descomponen el problema de forma jerárquica y son las que consiguen resultados más ajustados y escalables (Tierney et al., 2014) (Low et al., 2011). Por ejemplo, en (Wilson & Roach, 2000) y (Wilson et al., 2001b), presentan una metodología para generar planes de estiba para un portacontenedores en un viaje con parada en varios puertos, donde

se descompone el proceso en una decisión estratégica y una táctica. El objetivo estratégico incluye, entre otras, la minimización del espacio de carga ocupado por cada destino, de los movimientos de re-colocaciones y de que los slots contiguos estén ocupados por contenedores. Por otro lado, se busca la maximización del número de grúas funcionando simultáneamente en cada puerto. También se propone una descomposición del problema de la estiba en dos sub-problemas en (J. G. Kang & Kim, 2002) y (Zhang, Weiyang et al., 2005). En la primera fase, se asignan grupos de contenedores a los slots de las bodegas del buque, mientras que en la segunda se determina la secuencia de carga de los contenedores en cada bodega. Los métodos heurísticos, en este caso, se usan con el objetivo de minimizar el tiempo total de movimientos en cada puerto, con los que se optimiza el tiempo de atraque, los re-handles y el número de bahías ocupadas por los contenedores con el mismo destino. Con el mismo objetivo en (Pacino et al., 2011) se propone un enfoque de dos fases para generar planes de estiba casi óptimos. Primero, se presenta un modelo de programación entero para asignar grupos de contenedores a las áreas de almacenamiento del buque para múltiples puertos. En una segunda fase, se emplea una programación con restricciones y un procedimiento de búsqueda local para la estiba de los contenedores individuales en cada slot (slot planning).

En (Imai et al., 2006a), se realiza un enfoque unificado teniendo en cuenta el problema de planificación de la ruta tanto del lado de la naviera como del lado del terminal. En esta misma óptica (Azevedo et al., 2018) y (Fan et al., n.d.) plantean la optimización del plan de estiba unido a la asignación equilibrada de grúas en la terminal portuaria para incrementar la eficiencia de ésta. (Monaco et al., 2014) plantea la relación del plan de estiba y la terminal desde el punto de vista de la minimización del coste de las operaciones de transporte para la terminal, al igual que en (Iris et al., 2018; Ji et al., 2015; Tanaka & Voß, 2019) donde se aborda el problema combinado del plan de estiba con la planificación de la estiba en la terminal para minimizar los movimientos de los contenedores en la propia terminal desde la zona de almacenamiento hasta el buque, mejorando así la eficiencia.

En cuanto a la incorporación de los condicionantes del buque como restricciones a la hora de obtener un plan de estiba viable, existen trabajos que no tocan ninguno de los parámetros de los que depende la estabilidad del buque, ni hacen referencia a la estructura de éste (Ding & Chou, 2015a; Moura et al., 2013; Ning, Yifan, et al., 2013; Parreño et al., 2016). En cambio, existen trabajos que sí abordan la estructura del buque de diferentes formas. Por un lado, (Delgado et al., 2012a) se centra en la estiba de contenedores en bodega, y no sobre cubierta (CSPBDL, Container Stowage Problem for Below Deck Locations). Por otro lado, en (Matsaini & Santosa, 2018) el buque se limita a un conjunto de bahías, filas y alturas donde situar los contenedores.

A pesar de que varias de las publicaciones sobre planificación de estiba presentadas abordan la estabilidad (Low et al., 2011; Parreño-Torres et al., 2021) y los momentos a los que se ve sometido el buque, muy pocas presentan modelos que las incorporan como restricciones u objetivos. Lo más habitual es que se considere un límite de peso

para los slots (Korach et al., 2020; Ning, Weijian, et al., 2013; Yifan et al., 2016; Zhang et al., 2018). Sin embargo, se han presentado modelos con restricciones que tenían en cuenta el radio metacéntrico, la estabilidad transversal, el trimado, el centro de gravedad longitudinal y vertical (Parreño-Torres et al., 2021) o los momentos (Pacino et al., n.d.; Zeng et al., 2010), pero que resultaban irresolubles en la práctica debido a su complejidad. En estos casos se sugería la linealización del modelo en función del desplazamiento del buque, que resultaba variable debido a la inclusión de la secuencia de carga y descarga de los contenedores en las restricciones de estabilidad del modelo. Además, ninguno de ellos considera el desplazamiento variable debido a los tanques de lastre (Pacino & Delgado, 2013).

(Martins et al., 2009b) presenta una versión simplificada del problema de la estiba con múltiples puertos de destino (MPCSP), teniendo en cuenta las restricciones estructurales y de estabilidad de un portacontenedor de SSS. Para la resolución del modelo aplica Microsoft Excel Solver (Generalized Reduced Gradient) y un algoritmo genético de Matlab, estableciendo que la función de coste a optimizar esté en función de los contenedores estibados pero descarta los re-handles.

Por lo tanto, teniendo en cuenta todas estas restricciones, existen diferentes aproximaciones al problema: simulaciones basadas en la aplicación de heurísticos y metaheurísticos, modelos matemáticos, programación lineal con enteros o algoritmos genéticos. Los trabajos analizados se muestran categorizados por tipo de método de solución en la Tabla 4.

Heurísticos	Metaheurísticos	Programación lineal	Algoritmos genéticos	Otros modelos matemáticos
(Yoke et al., 2011)	(Matsaini & Santosa, 2018)	(Pacino et al., n.d.)	(Azevedo et al., 2018)	(Ambrosino et al., 2017b)
(Zeng et al., 2010)	(Ambrosino, Paolucci, & Schiomachen, 2015)	(Delgado et al., 2012b)	(Cohen et al., 2015)	(Kroer et al., 2016)
(Martins et al., 2009c)	(Ambrosino, Paolucci, & Sciomachen, 2015b)	(Ambrosino et al., 2004b)	(Le & Yu, 2013)	(J. Li et al., 2018)
(Wilson & Roach, 2000)	(Christensen & Pacino, 2017)	(Avriel, M, Penn, M, Shpirer, 2000)	(J. Li et al., 2017)	(Low et al., 2011)
(Zhang Wei-ying et al., 2005)	(Cifuentes & Riff, 2020)	(Pacino et al., 2012)	(Martins et al., 2009c)	(Moura et al., 2013)

(Ding & Chou, 2015b)	(Parreño-Torres et al., 2021)	(<i>Ambrosino_Shipping Liner</i> , n.d.)	(Parreño et al., 2016)	(Tierney, Kevin, Pacino, Dario, Jensen, 2014)
(Fan et al., n.d.)	(Korach et al., 2020)	(Imai et al., 2006b)	(Yifan et al., 2016)	(Wilson & Roach, 2000)
(Jovanovic et al., 2019)		(F. Li et al., 2008)	(Zhang et al., 2018)	(Wilson et al., 2001a)
(J.-G. Kang & Kim, 2002)		(Monaco et al., 2014)		
(Le & Yu, 2013)		(Ning, Yifan, et al., 2013)		
(Lee et al., 2018)		(Ning, Weijian, et al., 2013)		
(Zeng et al., 2010)				
(Sciomachen & Tanfani, 2007)				
(Tanaka & Voß, 2019)				
(Ji et al., 2015)				
(Ding, Ding, Chou, 2015)				
(Iris et al., 2018)				

Tabla 4. Clasificación de trabajos académicos con el método de resolución del problema utilizado

En el análisis de la literatura existente se ha observado que el problema del enrutamiento de vehículos en rutas marítimas se ha abordado dividiéndolo en subproblemas (planificación de la ruta, planificación de las visitas a puertos, planificación y tamaño de flotas, plan de estiba). Sin embargo, no se tienen en cuenta de forma conjunta, aunque existe una clara influencia entre ellas, especialmente en lo que se refiere a las condiciones de carga y estabilidad del buque. En el presente trabajo se trata de abordar la problemática general de definir rutas optimizadas en función del coste, teniendo en cuenta la frecuencia de visitas a los puertos, el tamaño de la flota necesario para mantener el servicio en la ruta en función de la frecuencia, la capacidad real de carga del buque en función de sus parámetros de estabilidad y la satisfacción de la demanda entre nodos.

4. Caracterización de las condiciones de contorno de las rutas

Después del análisis realizado en el capítulo anterior se han detectado carencias en la definición de las condiciones de los escenarios que se plantean para la selección de las rutas. Además, no se abordan los cuatro problemas planteados (enrutamiento, frecuencia, tamaño de flota y estiba) de forma conjunta por lo que no se pueden evaluar las interacciones entre ellos. Por este motivo en este trabajo se intenta abordar una definición de los escenarios de las rutas lo más completa posible, y su aplicación a dos métodos de optimización. Los métodos seleccionados son un método heurístico (Ant Colony Optimization) y un método basado en programación lineal (Mixed Integer Linear Programming) para la resolución del problema de enrutamiento (VRP) en rutas multimodales, teniendo en cuenta la frecuencia, el tamaño de la flota y el plan de estiba del buque. El primero de ellos, a la vista de la bibliografía consultada, ha sido poco utilizado en este tipo de problemas. El segundo, en cambio, ha sido más ampliamente empleado. Esto permitirá evaluar la aplicabilidad de ambos métodos.

Previo a estos métodos de optimización se va a emplear un software GIS (TransCAD) para una primera asignación de los flujos de mercancía a las rutas, lo que permitirá un cálculo inicial de sus costes. Este cálculo permitirá definir un coste y un tiempo unitario, que se emplearán en un modelo Logit. Los valores de este modelo Logit se emplearán como entradas al método heurístico, y los costes definidos en TransCAD se usarán como entradas en el método basado en Programación Lineal.

Lo primero es definir los nodos que van a conformar los tramos de las rutas. Cada ruta visita varios nodos y está formada por varios tramos, que unen dichos nodos. No se plantean los nodos como puertos, sino como regiones con un volumen de intercambio de mercancía entre ellas. Cada región (nodo) tiene dos puertos asociados que puede utilizar para el transporte de esta mercancía.

La optimización de las rutas se va a realizar teniendo como función objetivo los costes asociados a la ruta multimodal. Esto divide los costes en costes marítimos y costes terrestres. Los primeros dependerán fundamentalmente del buque seleccionado y de los puertos que se visiten en la ruta. Los puertos tienen asociados unos costes que varían en función del tamaño del buque y del número de contenedores cargados y descargados en ellos (Figura 5). Además, se tienen en cuenta los costes de todos los servicios ofrecidos por el puerto y que habitualmente usa un buque (amarre, practicafe, etc.). En los costes por carretera se tienen en cuenta los costes correspondientes a un camión de 6 ejes con capacidad para transportar un contenedor.

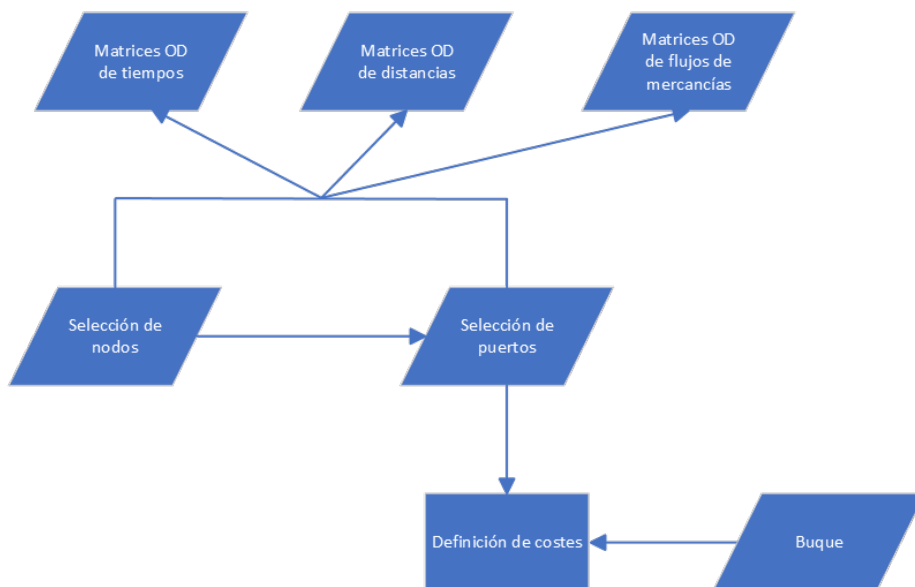


Figura 5. Esquema del modelo de datos definido para la caracterización de las rutas

A continuación, se detalla la elección de regiones europeas realizada, así como los puertos y el criterio para definir los costes asociados al buque.

4.1. Selección de regiones

El volumen del flujo de mercancías es un factor determinante a la hora de analizar el tipo de rutas más viables y las condiciones para que lo sean. Esta información se puede obtener a través de diferentes vías. Una de ellas es la Oficina de Estadística de la Unión Europea, Eurostat, que se encarga de publicar estadísticas e indicadores de alta calidad que permite realizar comparaciones entre regiones europeas (<https://ec.europa.eu/eurostat>). Su labor de recopilación y almacenamiento de datos estadísticos de los diferentes países europeos permite obtener información agregada por años, por países, etc., de numerosos indicadores socioeconómicos.

En este trabajo se han consultado las bases de datos de Eurostat correspondientes a Transporte (<https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>). La base de datos divide esta sección en los principales modos de transporte: carretera, ferrocarril, aéreo y marítimo. Pero también distingue entre transporte multimodal, transporte por aguas interiores o el transporte a través de gaseoductos y oleoductos.

El desglose de la base de datos permite obtener información sobre el volumen de mercancía transportada entre países, entre regiones o entre puertos. Los flujos transportados aparecen en toneladas de mercancía movida agrupada por exportaciones, importaciones, y por años, lo que permite obtener valores promedios de

DE80	Mecklenburg-Vorpommern
DE93	Lüneburg
DE94	Weser-Ems
DEA1	Düsseldorf
DEF0	Schleswig-Holstein
ES11	Galicia
ES12	Principado de Asturias
ES13	Cantabria
ES21	País Vasco
ES51	Cataluña
ES52	Comunitat Valenciana
ES61	Andalucía
ES62	Región de Murcia
FRD1	Basse-Normandie
FRD2	Haute-Normandie
FRE1	Nord-Pas-de-Calais
FRG0	Pays-de-la-Loire
FRH0	Bretagne
FRI1	Aquitaine
FRI3	Poitou-Charentes
FRJ1	Languedoc-Roussillon
FRF2	Champagne-Ardenne
FRI2	Limousin
FRJ2	Midi-Pyrénées
NL11	Groningen
NL12	Friesland (NL)
NL32	Noord-Holland
NL33	Zuid-Holland
NL34	Zeeland
NL41	Noord-Brabant
PT11	Norte
PT15	Algarve
PT16	Centro (PT)
PT17	Área Metropolitana de Lisboa
PT18	Alentejo

Tabla 5. Selección de NUTS según la clasificación de 2021

Para cada una de estas regiones se ha extraído de la base de datos la información correspondiente a los flujos de mercancía en modo multimodal y carretera, también se ha extraído los flujos entre puertos europeos (<https://github.com/amunin/TESIS/tree/main/Data>).

4.2. Selección de puertos

La elección de los puertos se realizó en función de que tuvieran terminales de contenedores equipadas con grúas de carga y descarga lo que permitía emplear buques sin grúas a bordo. Este tipo de buques presenta una mayor capacidad de estiba de contenedores y se gana en eficiencia en las tareas de carga y descarga al emplear las grúas del puerto.

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la información de tráfico portuario se ha obtenido desde dos fuentes. Por un lado, se ha consultado la base de datos de Eurostat y, por otro, se ha acudido a la información publicada por las autoridades portuarias.

Las autoridades portuarias son otra fuente de información gracias a los informes anuales que generan de la situación del puerto y su desempeño a lo largo del año. En estos informes se publica un resumen estadístico del tráfico portuario, pero, además, es muy común que las páginas oficiales de las autoridades portuarias publiquen las estadísticas de todos los tipos tráfico que hay en sus puertos, así como el número y tipo de barco que atraca en sus terminales.

Si nos centramos en el tráfico de contenedores (TEUs), la mayoría de las autoridades portuarias distinguen entre tráfico de importación y exportación, contenedores en tránsito o contenedores vacíos y llenos. Para este caso se ha tenido en cuenta el movimiento de contenedores de importación y exportación, así como los contenedores en tránsito. El motivo es que se puede considerar que este tipo de contenedores serán descargados de los buques de mayor envergadura y cargados posteriormente en buques feeder. El resumen del tráfico se puede ver en la Tabla 6.

Puerto	Contenedores totales movidos en los puertos		Fuente
	Anual	Semanal	
Lyon	66.989	1.288	http://lyon-terminal.fr/#statistiques
Oporto	717.954	13.807	https://www.apdl.pt/estatisticas/carga1
Lisboa	1.200.000	23.077	https://www.portodelisboa.pt/en/estat%C3%ADsticas
Bilbao	538.918	10.364	https://www.bilbaoport.eus/la-autoridad-portuaria/memorias-y-publicaciones/
Nantes - Saint Nazaire	157.391	3.027	https://www.nantes.port.fr/es/nantes-saint-nazaire-port/cifras-clave
Dunkerque	462.691	8.898	http://www.dunkerque-port.fr/en/dunkirk-port/online-documentation/activity-report.html
Amberes	12.020.000	231.154	https://www.portofantwerpbruges.com/en/type/figures-and-statistics

Rotterdam	15.299.970	294.230	https://www.portofrotterdam.com/en/experience-online/facts-and-figures
Bremerhaven	4.900.000	94.231	https://bremenports.de/en/stats/
Amsterdam	1.400.000	26.923	https://www.portofamsterdam.com/en/business/cargo-flows
Gennevilliers	20.000	385	https://www.haropaport.com/fr/publications/rapport-dactivite-haropa-port-2021
Le Havre	3.070.000	59.038	https://www.haropaport.com/fr/lehavre
La Rochelle	552.439	10.624	https://www.larochelle-port.eu/traffic-sectors/containers/
Ferrol	1.190	23	https://www.apfsc.com/wp-content/uploads/2022/08/apendice-4_v02-1.pdf
Vigo	228.822	4.400	https://www.apvigo.es/es/paginas/estadisticas_generales
Málaga	232.314	4.468	https://www.puertomalaga.com/en/statistics/
Barcelona	11.166.640	214.743	https://www.portdebarcelona.cat/es/web/autoritat-portuaria/estadisticas
Valencia	2.716.597	52.242	https://www.valenciaport.com/autoridad-portuaria/estadisticas-de-trafico/boletin-estadistico/
Sines	1.800.000	34.615	https://www.apsinesalgarve.pt/estat%C3%A0Dsticas/mercadorias/
Hamburgo	9.300.000	178.846	https://www.hafen-hamburg.de/en/statistics/containerhandling/
Zeebrugge	6.770.000	130.192	https://www.portofantwerpbruges.com/en/type/figures-and-statistics
Cádiz	214.866	4.132	https://www.puertocadiz.com/comunicacion/publicaciones/
Algeciras	5.125.385	98.565	https://www.apba.es/estadisticas
Burdeos	40.000	769	https://www.bordeaux-port.fr/en/port-bordeaux/key-figures
Rouen	50.000	962	https://www.haropaport.com/fr/publications/rapport-dactivite-haropa-port-2021

Tabla 6. Tráfico de contenedores en los puertos europeos seleccionados

La Tabla 6 refleja el flujo total de contenedores, tanto internacional con terceros países (externos a la Unión Europea) como internacional intracomunitario. Eurostat también registra qué porcentaje del tráfico de contenedores en los puertos europeos se corresponde con intercambios comerciales con terceros países, externos a la UE, y qué porcentaje se corresponde con tráfico entre países europeos (intracomunitario). La estimación de Eurostat es que el tráfico intracomunitario supone entre un 17 y un 25% del tráfico de contenedores totales en los puertos ([https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Maritime freight and vessels statistics#Seaborne freight handled in European ports](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Maritime_freight_and_vessels_statistics#Seaborne_freight_handled_in_European_ports)) como se ve en la Figura 7.

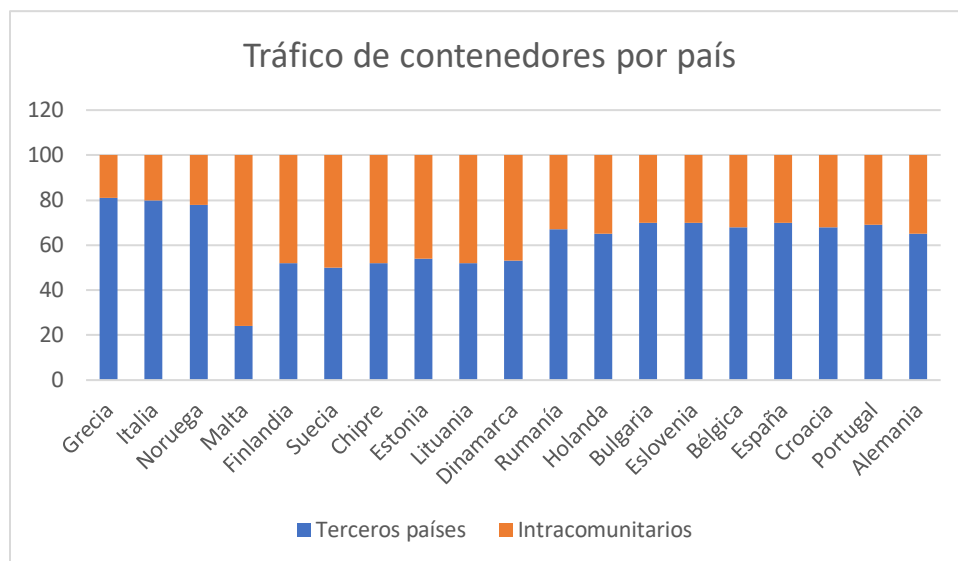


Figura 7. Tráfico de contenedores en los puertos europeos. Fuente: Eurostat

Aplicando estos valores a la Tabla 6, se obtiene el tráfico de contenedores para cada puerto que constituyen el tráfico internacional intracomunitario, es decir, el SSS entre países europeos (Tabla 7).

Puerto	Anual	Semanal
Lyon	17.417	335
Oporto	229.745	4.418
Lisboa	384.000	4.418
Bilbao	172.454	3.316
Nantes - Saint Nazaire	40.922	787
Dunkerque	120.300	2.313
Amberes	3.726.200	71.658
Rotterdam	4.589.991	88.269
Bremerhaven	1.568.000	30.154
Amsterdam	420.000	8.077
Gennevilliers	5.200	100
Le Havre	798.200	15.350
La Rochelle	143.634	2.762
Ferrol	1.190	23
Vigo	73.223	1.408
Málaga	74.340	1.430
Barcelona	3.573.325	68.718
Valencia	869.311	16.718

Sines	576.000	11.077
Hamburgo	2.976.000	57.231
Zeebrugge	2.098.700	40.360
Cádiz	68.757	1.322
Algeciras	1.640.123	31.541
Burdeos	10.400	200

Tabla 7. Tráfico internacional intracomunitario de contenedores en los puertos seleccionados

Estos valores asociados a las NUTS y a los puertos se emplearán como datos de entrada a los modelos desarrollados. Una segunda entrada de datos sobre flujos entre puertos procede de Eurostat.

(<https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/PORT%20FLOWS.xlsx>)

Las regiones (NUTS) serán nodos que representan puntos de generación y consumo de bienes. Cada NUT se corresponderá con un nodo, lo que permitirá definir los orígenes y destinos en las rutas a analizar tanto en TransCAD como en los algoritmos de optimización. La información obtenida sobre flujos entre NUTS se utilizará también en el modelo Logit, que permitirá evaluar la asignación de tráfico en los dos modos de transporte: multimodal y carretera.

Los valores de la Tabla 7 se van a emplear para evaluar la capacidad de los puertos por lo que es necesario tener en cuenta su eficiencia. Esta eficiencia se calcula a partir de la rotación de los buques en cada puerto y del tiempo empleado en el movimiento completo de un contenedor. La rotación da una idea del tiempo que emplea el buque en puerto en lo que se refiere a tiempos de entrada y salida, practicante o amarre. Mientras que el tiempo asociado al movimiento de contenedores permite evaluar la eficiencia de las grúas portuarias.

La estrategia de las navieras se desarrolla en torno a la idea de que los buques deben estar navegando en todo momento. Así, la estancia en una terminal es percibida como una pérdida de tiempo en la que el buque y los contenedores que transporta no aportan ningún rendimiento económico. Es por esto por lo que una buena forma de atraer a una naviera hacia una determinada terminal es mediante unas estadísticas de rendimiento que ofrezcan rentabilidad económica.

Las terminales de contenedores llevan habitualmente un control de sus estadísticas, ya que se trata de un recurso valiosísimo en la evaluación de su rendimiento. Incluso se crean nuevos indicadores para medir partes específicas de la operativa con lo que luego se puedan implementar mejoras en los procesos.

Los indicadores de desempeño portuario más utilizados son (Ibargüen, 2005):

- Tiempo total de rotación del buque
- Tonelaje manejado por día o por hora
- Tiempo medio del buque en puerto

- Toneladas manejadas por grúa por hora
- TEUs por grúa/hora
- Toneladas por hora hombre
- Tiempo de permanencia del cargamento en puerto
- Toneladas manejadas por muelle
- Toneladas manejadas por metro lineal de muelle
- Tasa de utilización de los muelles

Típicamente los indicadores que interesan más a las navieras son los movimientos por atraque a la hora (berth moves per hour o BMPH) y la media de tiempo en servir a un camión (carga o descarga, Truck turnaround time, TTT). Ambos pueden ser indicativos de una terminal bien organizada y con una operativa fluida.

Los movimientos por atraque a la hora o BMPH es el total de movimientos en la operativa de un buque concreto dividido por el total de horas que está atracado. Una terminal con un indicador alto, por ejemplo, de 90, será más atractiva al significar que las operativas de buque se completarán en menor tiempo. Por el contrario, un indicador bajo sugiere que una terminal no rinde a nivel óptimo (Rodrigo de Larrucea, 2018).

$$BMPH = \frac{\text{Total de movimientos (carga + descarga + remociones)}}{\text{Horas de atraque}}$$

(ec. 1)

Los movimientos por atraque a la hora están relacionados con el número de grúas o manos portuarias destinadas a trabajar un buque y con las productividades individuales de cada grúa. A modo de ejemplo, un buque trabajado por cuatro manos portuarias de principio a fin, con una productividad media de 22,5 mph (movimientos por h) produciría un indicador BMPH de 90. En cambio, el mismo buque trabajado por tres manos portuarias con el mismo rendimiento por grúa produciría un BMPH de 67,5.

La realidad es que cada grúa tiene una productividad distinta dependiendo de las bahías donde trabaje y del programa de trabajo. En general, una grúa que trabaje en descarga alcanzará una productividad mayor que una grúa trabajando en carga.

La mayoría de las terminales disponen de grúas con bastidor de anclaje (spreader) con capacidad para cargar en modo twin lift (dos contenedores de 20' en una sola izada). En bahías con contenedores de 20' cabe esperar una mayor productividad ya que la grúa deberá realizar la mitad de las izadas para cargar el mismo número de contenedores que si fuesen de 40'. Hay otros muchos factores que pueden mermar la productividad, como pueden ser las averías de las grúas o de la maquinaria de campa que maneje contenedores con destino a la grúa (Rodrigo de Larrucea, 2018).

Para calcular una eficiencia promedio para cada puerto se ha considerado que en los puertos se trabaja a 4 turnos. Los datos de los movimientos por hora se han obtenido de UNCTAD (United Nations, 2019). A partir de ellos se ha calculado el BMPH como se indica en la ecuación 1. Para obtener una eficiencia relativa a partir de este valor, se ha

considerado un BMPH = 90 como el valor de máxima eficiencia y se han comparado los valores de BMPH de los puertos frente a este valor (90).

Por otro lado, se han analizado los tiempos de rotación de los buques en puerto (Ducruet et al., 2014 y <https://www.statista.com/statistics/1101596/port-turnaround-times-by-country/>). Esto da una medida no solo de la eficiencia de la terminal en las tareas de carga y descarga sino también de lo congestionados que pueden estar los puertos.

Los factores que influyen en los tiempos de rotación se pueden ver en Tabla 8 (Dayananda Shetty K et al., 2021)

Factores	
Retraso previo al atraque	No disponibilidad de amarre
	No disponibilidad de remolcadores/embarcaciones
	No disponibilidad de bandas de amarre
	Estado y capacidad de los remolcadores
	No disponibilidad de pilotos
	Los pilotos no están listos
	Retraso en el embarque del piloto
	Retraso en el aviso a la estación de señales.
	Agrupación de buques
	Restricción de calado
	Canal unidireccional
	Navegación nocturna
	Boyas de canal
	Huelga/paralización
Documentos no listos	
Antes de la llegada y la salida	Restricciones de mareas/clima
	Trámites aduaneros de entrada
	Documentación de entrada
	Inspección de entrada
	Documentación de inmigración
	Trámites Aduaneros de salida
	Documentación de salida
	Sellado e Inspección
	Inspección de salida
	Formalidades de salida
Retrasos debidos al puerto	Restricciones de espacio vacío
	Restricciones de calado
	Tiempo de cambio de turno
	No disponibilidad de amarres
	No disponibilidad de cuadrillas de trabajadores
	No disponibilidad de Embarcaciones/Remolcadores de Puertos
	No disponibilidad de equipos de manejo de carga
	No disponibilidad de Pilotos
Averías en los equipos	

	Atraque prioritario Otro movimiento de buques Huelga/paralización Fallo eléctrico Congestión
	Falta de zonas de almacenamiento
Retrasos no debidos al puerto	Preparación de escotilla Apertura/cierre de escotilla Naturaleza de la carga.
	Retraso del camión para colocación de la carga en el muelle
	Retraso por reposicionamiento de la carga (rehandle)
	Abastecimiento de combustible
Retrasos debidos al buque	Fallo del motor
	Amarrar/Desamarrar
	Atraque anticipado de buques
	Reparación de sus equipos
	Retraso en la navegación

Tabla 8. Causas de la prolongación del tiempo en puerto de un buque

Debido a que los tiempos de practicaaje, amarre, etc. para cada puerto no se pueden determinar para fijar la eficiencia portuaria a través de la rotación de los buques, se parte de tiempos iguales para las tareas comunes (practicaaje, amarre, etc.) y se supone una descarga igual para todos los puertos de 100 contenedores, para realizar la estimación a partir de los tiempos de carga y descarga de cada terminal.

Esta eficiencia se ha calculado a través de la ecuación 2.

$$Eficiencia(\%) = \frac{Tiempo\ descarga\ 100\ contenedores\ (horas)}{Tiempo\ de\ rotación\ buque\ en\ puerto\ (horas)} \cdot 100$$

(ec.2)

El promedio de los valores obtenidos para cada puerto a partir de las ecuaciones 1 y 2 se muestra a continuación (Tabla 9).

Puerto	Eficiencia
Amberes	75%
Dunkerque	68%
Bremerhaven	79%
Hamburgo	79%
Vigo	77%
Ferrol	77%
Bilbao	77%
Barcelona	77%
Valencia	77%

Algeciras	77%
Gennevilliers	85%
Le Havre	85%
Zeebrugge	85%
Saint Nazaire	85%
La Rochelle	85%
Amsterdam	69%
Rotterdam	69%
Oporto	68%
Sines	68%
Lisboa	68%
Cádiz	72%
Málaga	72%
Lyon	72%
Burdeos	72%

Tabla 9. Eficiencia de los puertos

El desglose de los datos para realizar este cálculo se puede consultar en <https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/Eficiencia%20Puertos.xlsx>

La eficiencia de los puertos también afecta a sus tiempos de carga y descarga. En toda operativa se producen imprevistos o situaciones no bien anticipadas que determinan una demora de las operaciones. Hay una infinidad de eventualidades que pueden retrasar la operativa del buque o de la terminal.

En el caso de la operativa del buque, se puede producir retrasos, entre otros motivos por:

- Demora de la tripulación en desconectar los contenedores frigoríficos de descarga
- Demora de las manos de trinca en destrincar las cubiertas de descarga
- Congestión en la campa por deficiencias en la gestión
- Errores humanos de la mano portuaria o de la planificación de la terminal, tales como cargar contenedores en lugares equivocados
- Mal tiempo que imposibilite o dificulte el trabajo, como pueden ser días de mucho viento.

Todas son situaciones que pararán la grúa o disminuirán el ritmo de carga o descarga. Pero toda operativa tiene un cuello de botella. Las grúas pueden tener una productividad elevada, pero si no les llegan contenedores desde la zona de almacenamiento para su carga, no pueden rendir de forma óptima. Por esto es determinante que la terminal tenga esta zona bien gestionada, con una estrategia de planificación bien definida que de fluidez a las operaciones (Rodrigo de Larrucea, 2018).

Para incorporar este factor en los modelos se han definido los tiempos de una grúa tipo Panamax. Se calcula el tiempo para el movimiento de carga/descarga de un contenedor en base a las velocidades que se muestran en la Tabla 10. Este tiempo está ponderado por la eficiencia de cada puerto. Así el tiempo de carga/descarga de un mismo número de contenedores no será igual en todos los puertos afectando al tiempo total empleado en el tramo correspondiente y en la ruta finalmente.

CARACTERÍSTICAS	GRÚA PANAMAX	GRÚA POST-PANAMAX	GRÚA SUPER POST-PANAMAX
Peso (t)	510	790	825
Capacidad de carga (t)	32,5	40/45	40/45
Max. Alcance lado agua (m)	35,17	45	50,30
Recorrido total carro (m)	59,68	85,48	92,78
Ancho de vía (m)	15,24	30,48	30,48
Velocidad de elevación vacío (m/min)	120	130	130
Velocidad elevación cargada (m/min)	60	52	70
Velocidad del carro cargado (m/min)	124	150	175
Capacidad de vientos (km/h)	Hasta 65	Hasta 65	Hasta 65
Tiempo izado pluma (min)	6	6	6
Distancias entre patas (m)	18,4	16,9	18,28
Spreader telescópico	20, 30, 35, 40	20, 30, 35, 40, 45	20, 30, 35, 40, 45
Velocidad de traslación (m/min)	45	45	45

Tabla 10. Características y tiempos de las grúas portuarias

Se establece un mínimo de dos grúas tipo Panamax para la descarga de un buque tipo feeder. La eslora de los buques seleccionados para este estudio permite que dos grúas carguen o descarguen al mismo tiempo sin trabajar en bodegas contiguas.

4.2.1. Costes portuarios

Los costes asociados a los puertos se han calculado tomando como base el desglose de costes de la Ley de Puertos del Estado (<https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-16467>). En esta ley se fija las diferentes tasas mínimas a las que están sujetos las embarcaciones, las mercancías y los pasajeros por los servicios prestados en el puerto. En el resto de la UE no todas las autoridades portuarias son de ámbito estatal y, en muchos, casos la gestión portuaria es privada y no pública. Sin embargo, las tasas generales son asimilables en todos los puertos europeos seleccionados.

Las tasas generales que se van a tener en cuenta son:

- Tasa de ocupación. Se refiere a la ocupación del dominio público portuario (terrenos y agua) e incluye la prestación de los servicios comunes del puerto relacionados con el dominio público ocupado
- Tasa de actividad. Se refiere a la tasa imponible por el ejercicio de actividades comerciales, industriales y de servicios en el dominio público portuario
- Tasa de utilización
 - Tasa del buque. Se refiere a la utilización por los buques de las aguas de la zona de servicio del puerto y de las obras e instalaciones portuarias que permiten el acceso marítimo al puesto de atraque o de fondeo que se les haya asignado y la estancia en los mismos en las condiciones que se establezcan. Aquí se distingue entre atraque y fondeo con concesión o sin ella, con una tasa diferente en cada caso.
 - Tasa de la mercancía. Se refiere a la utilización de las instalaciones de atraque, zonas de manipulación asociadas a la carga y descarga del buque, por parte de las mercancías de entrada o salida marítima, o que realicen transbordo o tránsito marítimo o terrestre, así como sus elementos de transporte.
 - Tasa por utilización de la zona de tránsito. Se refiere a la utilización de las zonas de tránsito, zonas de maniobra, por las mercancías y elementos de transporte por un periodo superior a cuatro horas desde su entrada en la zona de servicio del puerto o de su desembarque.
- Tasa de ayudas a la navegación. Se refiere a la utilización del servicio de señalización marítima.
- Bonificaciones. Se pueden aplicar a las tasas de actividad y utilización.
- Servicio de manipulación de mercancías. Se consideran integradas en este servicio portuario las actividades de carga, estiba, desestiba, descarga y trasbordo de mercancías, objeto de tráfico marítimo, que permitan su transferencia entre buques, o entre estos y tierra.
- Servicio de amarre.
- Servicio de practicaje
- Servicio de remolque
- Servicio de recepción de desechos generados por buques. Se incluyen en este servicio las actividades de recogida de desechos generados por el buque, su traslado a una instalación de tratamiento.
- Servicio de agua y electricidad al buque

Las expresiones empleadas para el cálculo de los costes portuarios se muestran a continuación. Son las fijadas en la ley de Puertos del Estado y las que emplean los puertos españoles para establecer las cuantías mínimas para los buques que atracan en sus terminales.

Tasa de ayudas a la navegación

$$TAN = 0,02 \cdot GT (\$)$$

(ec.3)

Tasa del buque

$$TBASC = S_{ASC} \cdot \frac{GT}{100} \cdot h (\$)$$

(ec.4)

donde

S_{ASC} es la cuantía básica para el atraque sin concesión

$$TBACC = S_{ACC} \cdot \frac{GT}{100} \cdot h (\$)$$

(ec.5)

donde

S_{ACC} es la cuantía básica para el atraque con concesión

$$TBFSC = S_{FSC} \cdot \frac{GT}{100} \cdot h (\$)$$

(ec.6)

donde

S_{FSC} es la cuantía básica para el fondeo sin concesión

$$TBFCC = S_{FCC} \cdot \frac{GT}{100} \cdot h (\$)$$

(ec.7)

donde

S_{FCC} es la cuantía básica para el fondeo con concesión

Tasa de la mercancía

$$20CargSC = U_{equip} \cdot M \cdot CCor \cdot Cequip \cdot Red \cdot Bon$$

(ec.8)

donde

U_{equip} es la unidad de equipamiento, en este caso se corresponde con el número de contenedores de veinte pies (TEU) cargados o descargados en el puerto

M es la cuantía básica imponible.

$CCor$ es el coeficiente corrector.

$Cequip$ es el coeficiente de equipamiento.

Red son las reducciones aplicables. Se va a considerar igual a 1 en todos los casos.

Bon las posibles bonificaciones. Se va a considerar igual a 1 en todos los casos.

$$20VacSC = U_{equip} \cdot M \cdot CCor \cdot Cequip \cdot Red \cdot Bon$$

(ec.9)

donde

$Cequip$ es el coeficiente de equipamiento, que para contenedores vacíos tiene un valor inferior que para contenedores cargados

$$TCOM = 20CargSC + 20VacSC$$

(ec.10)

Tasa por utilización de la zona de tránsito

$$TUZT = Sup \cdot Ndías \cdot TB \cdot Cutil$$

(ec.11)

donde

Sup es la superficie utilizada por las mercancías en tránsito. Se ha estimado

$$Sup = 500 m^2$$

$Ndías$ es el número de días de utilización de la zona de tránsito. Se ha estimado

$$Ndías = 7$$

TB es la tasa básica

$Cutil$ es el coeficiente de utilización fijado por el puerto según el número de días que se utilice la zona de tránsito

$$Cutil = \begin{cases} 1,00 & 1^{\circ} \text{ al } 7^{\circ} \text{ día} \\ 3,00 & 8^{\circ} \text{ al } 15^{\circ} \text{ día} \end{cases}$$

Servicio de recepción de desechos generados por los buques

$$TDB = \begin{cases} 1,50 \cdot R & \text{para } 0 < GT < 2.500 \\ 0,0006 \cdot GT \cdot R & \text{para } 2.501 < GT < 25.000 \end{cases}$$

(ec. 12)

Donde

R es la cuantía básica

Servicio de remolque

$$PRemol^* = \begin{cases} 0,1485 \cdot GT + 639 & 0 < GT < 8000 \\ 0,1984 \cdot GT + 240 & 8000 < GT < 30000 \end{cases}$$

(ec. 13)

Servicio de amarre

$$TA^* = \begin{cases} 0,0108 \cdot GT + 74 & 0 < GT < 10000 \\ 0,0068 \cdot GT + 113 & GT > 10000 \end{cases}$$

(ec. 14)

Servicio de practicaaje

$$TP^* = \begin{cases} 243 & 0 < GT < 7000 \\ 0,0158 \cdot GT & 7000 < GT < 25000 \end{cases}$$

(ec. 15)

* ejemplo puerto de Algeciras

Servicio de agua y electricidad al buque

$$PAB = C_{m3} \cdot Consumo$$

(ec.16)

donde

C_{m3} es el coste del m³ de agua consumido

$$EEB = C_{kWh} \cdot Consumo$$

(ec.17)

Donde

C_{kWh} es el coste del kW/h consumido

Los valores empleados para cada puerto se pueden consultar en https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/COSTE_PUERTOS.xlsx. En este apartado se puede ver además el coste asociado a la utilización de las grúas del puerto. Debido al tamaño de buque analizado tipo feeder, en el rango de 500 a 2000 TEUS, se necesitarían como máximo dos grúas para dar el servicio de estiba y desestiba.

Finalmente, los costes portuarios (PT) son la suma de los conceptos anteriores,

$$PT = TAN + TBASC + TBFSC + TCOM + TUZT + TDB + EEB + PAB + PRemol + TA + TP$$

(ec.18)

4.3. Costes asociados al buque

La progresiva contenerización de mercancías ha dado un impulso importante en las últimas décadas al transporte internacional y a lo que se conoce como globalización. Por este motivo los buques portacontenedores son una pieza fundamental de la cadena logística. Las empresas dedicadas al transporte o a la logística integral, como las 3PL (Third-Party Logistics), intentan minimizar los costes asociados al transporte sea cual sea el modo empleado para el transporte de las mercancías. Por lo que las cadenas logísticas en su conjunto acaban demasiado tensionadas, como ha demostrado la crisis por el COVID-19. En el caso de buques portacontenedores los costes que se ven afectados son el precio del chárter y el del flete por contenedor, que fluctuarán en función de la coyuntura económica mundial.

Dentro de los portacontenedores, los feeder operan normalmente en líneas regulares con rutas y frecuencias conocidas (normalmente de una semana), lo que implica visitas fijas a los puertos a los que se les da servicio dentro de esa ruta. Las fechas y los precios se planifican y se publican con tiempo de antelación para que los cargadores organicen sus envíos o recepciones. Este tipo de servicio, con poca flexibilidad para retrasos o cambios en los puertos servidos, obliga a las navieras a un control exhaustivo de sus costes y a buscar la mayor eficiencia posible de los buques desplegados en la ruta.

Los costes asociados a un buque abarcan desde los costes de construcción a los costes de explotación. La distribución de estos costes entre el armador y el operador del buque difieren según el tipo de contrato que se establezca entre ellos. Hoy en día, la tendencia es que las navieras no sean las propietarias de los buques que operan, sino que los tengan arrendados bajo alguna las formas de contrato previstas en el transporte marítimo (por ejemplo, APM-Maersk opera 331 buques en propiedad y 400 en modo chárter, actualmente).

El contrato chárter consiste en alquilar un buque a una naviera o un armador y ofrecer servicios de transporte a los dueños de la carga o a un transitario. El operador del

servicio (charterer) ofrece transporte en rutas regulares con frecuencias determinadas, realizando un servicio de línea regular. Esto es así sobre todo en el caso del transporte de contenedores.

El riesgo del negocio chárter está en la diferencia entre el contrato existente, los costes de operación, el valor del flete, que puede fluctuar, y la capacidad para llenar el buque, es decir, realizar viajes lo más eficientes posible. Normalmente estos operadores utilizan brokers para vender sus servicios de transporte.

El mercado chárter se divide en el chárter por viaje y en el chárter por tiempo. Se diferencian en la duración del contrato y en sus obligaciones. Un chárter por viaje es un contrato de un buque para realizar un viaje entre dos puertos específicos con cierta carga. Un chárter por tiempo fija un tiempo de uso del barco entre dos meses y diez años. Este tipo de contratos son los más habituales en buques de carga específica como pueden ser los portacontenedores, los ro-ro, los offshore, etc. Existe una variante que es el fletamento a casco desnudo donde se incluyen los costes de mantenimiento y tripulación. Esto es habitual cuando el dueño del buque es un grupo de inversión y no una naviera.

$$Flete\ ch\acute{a}rter \leq (Beneficio_{viaje} - Coste_{viaje}) * N_{viajes}$$

(ec.19)

$$Beneficio_{viaje} = Flete_{U_{com}} * U_{com}$$

(ec.20)

En un contrato de chárter por tiempo el dueño del buque se hace cargo de los costes de capital (CAPEX), los costes fijos y algunos de los costes de operación (OPEX). Estos costes van a definir el precio del chárter para el operador, que también se hace cargo de los costes del fuel y de la terminal (ecuación 19 y 20). Desde el punto de vista del dueño del buque dos terceras partes de su coste son costes de capital (intereses y devolución del capital), mientras que una tercera parte se correspondería con los costes de operación (Stopford, 2008). Estos costes los supervisa el gestor del buque, que contrata la tripulación y el mantenimiento en nombre del dueño. Desde el punto de vista del operador, el chárter es un tercio de los costes totales: fuel y coste de la terminal es un cuarto y el resto serían costes portuarios, pasos por canales, etc. (Figura 8).

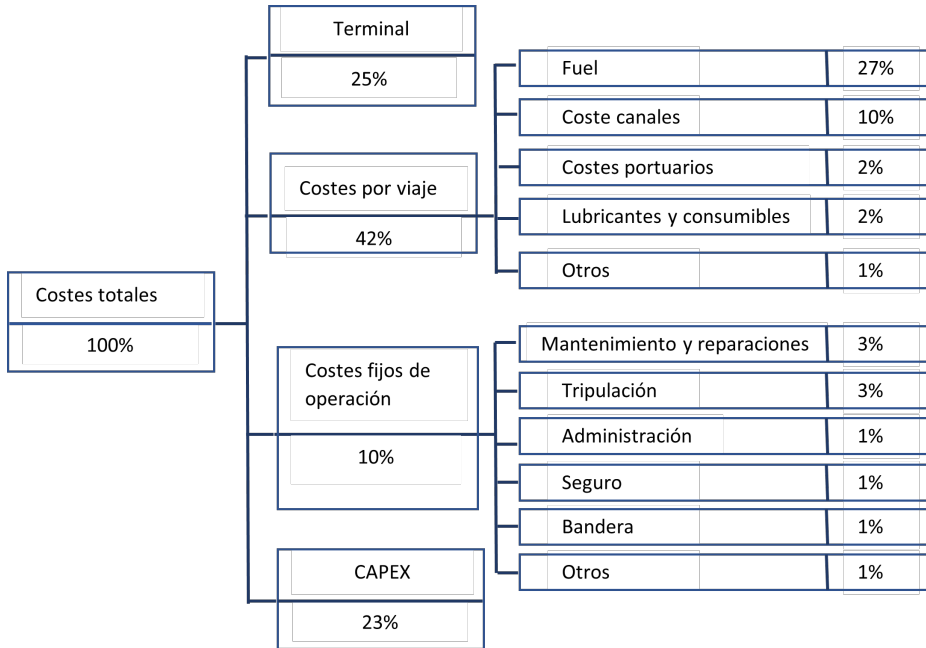


Figura 8. Distribución de costes de un buque (Stopford, 2008)

Por tanto, suponiendo que el transporte por mar se realiza con barcos bajo un régimen de chárter por tiempo, los costes a tener en cuenta a la hora de verificar que el servicio es rentable, por viaje circular y dado un determinado flete del buque, son:

$$CO_{viaje} = CCT + CC + PT + CCD \quad (ec.21)$$

donde

CO_{viaje} es el Coste Operativo por viaje

CCT es el coste del chárter por tiempo de viaje

CC es el coste del combustible por viaje

PT es la tasa portuaria de todos los puertos de la ruta

$$PT = \sum_{i=1}^p PT_i \text{ con } i \in P \quad (ec.22)$$

CCD es el coste de cargar/descargar en todos los puertos de la ruta

$$\sum_{i=1}^p CCD_i = \sum_{i=1}^p \sum_{ki=1}^l Tiempo_{ik}^c * CG_{ik} + \sum_{i=1}^p CTER_i \quad (ec.23)$$

Siendo $i = 1, \dots, p$ cualquier puerto de la ruta, $i \in P$

P es el conjunto de puertos de la ruta

Siendo $k_i = 1, \dots, l$ cualquiera de las grúas de la terminal del puerto i , $k_i \in G_i$

G_i conjunto de grúas con que está equipada la terminal del puerto i

CG_{ik} = tarifa de uso de la grúa k en la terminal del puerto i (€/h)

$CTER_i$ = otros costes aplicados por la terminal del puerto i

Para el cálculo del coste de combustible (CC) se elaboró una matriz OD de distancias entre puertos y se procedió al cálculo del consumo de combustible del buque en función de la potencia de sus motores principales y auxiliares

$$CC = (PMMPP \cdot CMMPP \cdot Tiempo_{navegación} + PMMAA \cdot CMMAA \cdot Tiempo_{puerto}) \cdot 10^{-6} \cdot P_{fuel}$$

(ec.24)

Donde

$PMMPP$ es la potencia de los motores principales en kW

$CMMPP$ es el consumo de los motores principales en g/kWh

$PMMAA$ es la potencia de los motores auxiliares en kW

$CMMAA$ es el consumo de los motores auxiliares en g/kWh

P_{fuel} es el precio del MDO según el Rotterdam Bunker Prices

Los valores de consumo oscilan en función de la carga del motor (Vedran et al., 2017). Para % de MCR bajos se producen los consumos más altos, y para valores de entre el 75 al 85% del MCR se alcanzan consumos más bajos en motores marinos de dos tiempos.

En el algoritmo de optimización MILP, se han empleado diferentes valores de consumo en función de la carga del motor. La carga varía debido a que se utilizan diferentes valores de velocidades del buque. La velocidad de diseño se corresponde con un 85% del MCR, la velocidad máxima se corresponde con el 95% del MCR y la velocidad mínima o 'low steaming' se correspondería con un 45% del MCR (<https://www.wartsila.com/services-catalogue/engine-services-2-stroke/slow-steaming-upgrade-kit>), (Psaraftis & Kontovas, 2010).

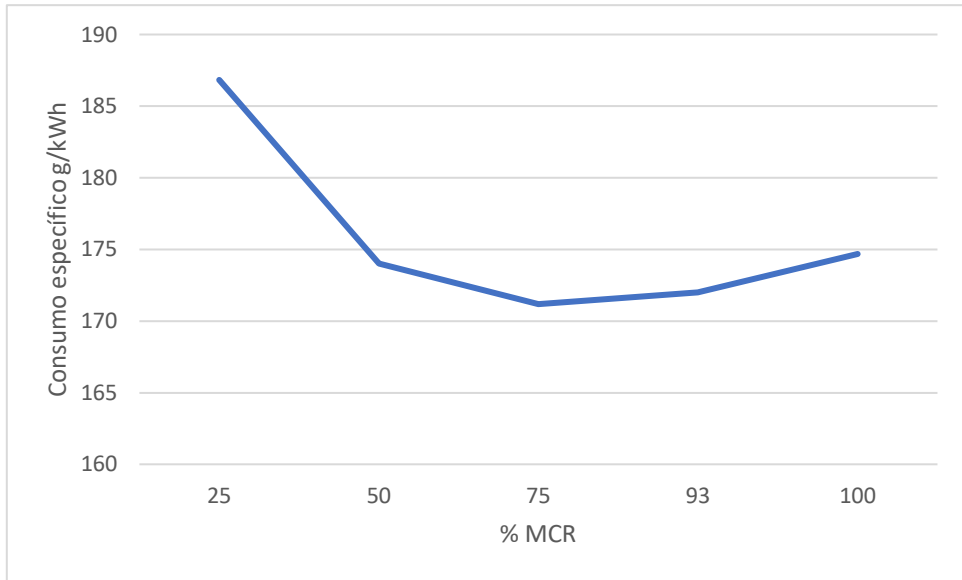


Figura 9. Evolución del consumo de combustible en función de la carga del motor.
Fuente: (Vedran et al., 2017)

Para los casos base de los algoritmos de optimización se utiliza un precio de 500\$/t de MDO, que resulta el precio medio en los años anteriores a la crisis del COVID-19. En el apartado 7.3 se muestra una estadística de la evolución del precio de combustible en los últimos años (Figura 36). A partir de esa estadística se realizará un análisis de sensibilidad para analizar la influencia del precio del combustible en los resultados de la optimización.

Para este mismo caso, el coste del chárter se ha establecido en 25.000\$ diarios según el Hamburg Index. En el apartado 7.2 se puede ver la evolución del precio del chárter por tamaño de buque en los últimos años (Figura 35). Al igual que con el precio del combustible, los datos obtenidos del Hamburg Index se emplearán en un análisis de sensibilidad donde se varíe el precio del chárter y se observe la influencia de éste en los resultados de la optimización.

En cuanto a los tiempos considerados, el tiempo de navegación dependerá de la velocidad del buque (low steaming, velocidad de diseño, velocidad máxima). La matriz de distancias marítimas empleada se puede consultar en <https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/Matriz%20distancias%20maritimas.xlsx>. Estos valores unidos a las diferentes velocidades del buque permiten calcular los tiempos de navegación según la ecuación 24.

$$Tiempo_{navegación} = \frac{OD \text{ Distancia}}{V_{buque}}$$

(ec.25)

El tiempo en puerto del buque se desglosa como se muestra en la ecuación 25.

$$Tiempo_{puerto} = Tiempo_{efectivo} + Tiempo_{espera\ terminal} + Tiempo_{fondeo}$$

(ec.26)

$$Tiempo_{efectivo} = Tiempo_{entrada+salida} + Tiempo_{amarre} + Tiempo_{\frac{C}{D}}$$

(ec.27)

$Tiempo_{espera\ terminal}$ es el tiempo de parada de la grúa debido a la espera por el contenedor, fallos de la grúa o mal tiempo (Khafid & Syairudin, 2019).

$Tiempo_{espera\ terminal} = 8\%$ o un promedio de 1,85 h (Lind et al., 2018) IHS Markit

$Tiempo_{fondeo}$ es el tiempo de espera del buque hasta que puede llegar a la terminal.

Este tiempo varía según el número de buques que accedan a la terminal en un mismo periodo de tiempo. Terminales más o menos colapsadas tienen tiempos de fondeo mayores, en cambio puertos pequeños con terminales no saturadas apenas tienen tiempo de fondeo.

$$Tiempo_{fondeo} = 10\% Tiempo_{efectivo}$$

$Tiempo_{entrada+salida}$ = tiempo empleado en las labores de acceso al puerto que dependerá de si es necesario el uso de remolcadores y de un práctico a bordo.

$$Tiempo_{entrada+salida} = 20\% Tiempo_{efectivo}$$

Cada servicio está definido de forma unívoca por la ruta seguida, por el número y tipo de buques asignados a ese servicio y la velocidad de navegación.

Se supone que cada buque que llega al puerto j, procedente del puerto i, emplea tiempo en esperar que le den acceso, en tareas de pilotaje, amarre y descarga en el terminal. Después ese mismo buque necesitará tiempo para cargar la mercancía nueva y salir del puerto.

El tiempo de estancia del buque en puerto puede considerarse como no productivo. En el caso de un buque de gran capacidad el coste/hora de la estancia en puerto es más costosa que para un buque pequeño. Los buques grandes emplean más tiempo para cargar y descargar debido a la gran cantidad de carga que transportan. Esto a priori podría suponer un freno al crecimiento del tamaño del buque (Cullinane and Khanna, 2000). Los buques más grandes realizan menos paradas en puerto, pero más largas que los buques pequeños para reducir sus tiempos improductivos. Esto hace que los buques grandes tensionen la logística de las terminales al realizar cargas/descargas de miles de TEU's en la misma terminal.

El tiempo empleado en carga o descargar un buque dependerá no sólo de los contenedores a cargar o descargar sino también del número de movimientos que la grúa tenga que hacer para llegar a los contenedores que hay que descargar en ese puerto, es decir, el número de recolocaciones de contenedores (rehandles). Este número será mayor o menor en función de lo optimizado que esté el plan de estiba. Además, hay que tener en cuenta que la grúa se debe desplazar de una bodega a otra para realizar las operaciones de carga/descarga. Este desplazamiento será máximo si se emplea una sola grúa y se reducirá a medida que se empleen más grúas en la carga/descarga de un solo buque (ecuaciones 28 y 29).

$$Tiempo_{C/D\ ki} = TG_{ki} * N_{cont} + TG_{ki} * N_{rehandle} + Mov_{bog} * V_{despgrúa\ ki}$$

(ec.28)

Donde

TG_{ki} es la tasa de carga/descarga de la grúa

$$TG_{ki} = 3600 \frac{N_{cont}}{t_t} * t_p * c_t * f_t \left(TEU/h \right)$$

(ec.29)

$\frac{N_{cont}}{mov}$ es el número de contenedores desplazados en un solo movimiento de la grúa. Esto incluye tanto los contenedores que efectivamente se cargan o descargan en el puerto (N_{cont}), como aquellos que hay que mover para acomodar a los otros según el plan de estiba ($N_{rehandle}$).

Las grúas convencionales (tipo Panamax) tienen un gancho de izar con un solo spreader con capacidad para levantar 65 t. Estas grúas elevan un solo contenedor de 20', 40' o 45', o bien dos de 20' con un solo spreader. Existen grúas con una elevada capacidad de izado (grúas Post-Panamax) que llevan doble gancho, por lo que tienen un doble sistema de izado que les permite elevar hasta 4 contenedores de 20' en un solo movimiento (Bierwirth & Meisel, 2010).

Si se consideran puertos con un movimiento medio de contenedores (puertos spoke) lo habitual es que el terminal disponga de grúas convencionales tipo Panamax con una capacidad de 30 elevaciones (Tabla 11) por hora para las operaciones de carga y descarga, y un solo gancho con spreader, por lo que se puede suponer $\frac{N_{cont}}{mov} = 1$ (TEU).

t_t es el tiempo teórico de un movimiento de la grúa (s), es la suma de todos los tiempos necesarios para el transbordo de un contenedor desde el barco hasta el muelle o viceversa (Tabla 10).

t_p es el coeficiente de utilización de la grúa. La productividad real de la grúa (número de movimientos) alcanza el 70% de la productividad teórica. $t_p = 0,7$ (Bartošek, A, et al., 2013)

c_t es un coeficiente que refleja las paradas por ineficiencia, los tiempos de espera para la carga/descarga y otras paradas improductivas

f_t es un coeficiente que refleja las paradas por fallo o mantenimiento

Mov_{bog} es el número de desplazamientos horizontales de la grúa a lo largo del buque para posicionarse para la carga/descarga. Este valor depende del número de bodegas del buque y del número de grúas que se emplean en la carga/descarga (m).

$$Mov_{bog} = \frac{N_{bahía}}{2} * L_{bahía}$$

(ec.30)

$V_{despgrúa}$ = velocidad lineal de la grúa (m/min)

$N_{bahía}$ = número de bahías en el buque

$L_{bahía}$ = longitud de la bahía (m)

Capacidad del buque (TEU)	Movimientos por hora			Número de grúas
	30	40	50	
	Tiempo de las operaciones de carga y/o descarga (h)			
500	10	8	6	2
1000	20	15	12	2
2500	34	25	20	3
6000	49	37	29	5
8000	69	51	41	5
10000	71	54	43	6
12000	86	64	51	6

Tabla 11. Tiempo de carga y descarga en función del tipo y número de grúas (Bartošek & Marek, 2013)

Debido a que el plan de estiba está optimizado (ver apartado 5.5), el número de recolocaciones de contenedores (rehandle) es un valor muy bajo o nulo, por lo que ese término es despreciable. Además, al considerar buques feeder atendidos por dos grúas tipo Panamax, los movimientos entre bahías no tienen un gran impacto en el tiempo total empleado en la carga/descarga del buque. Por lo tanto, no se tiene en cuenta el segundo término de la ecuación 28.

A la hora de aplicar todo este desglose de costes en los algoritmos distinguiremos entre costes fijos y variables asociados a cada ruta que se obtenga. Se consideran como costes fijos los asociados al flete del buque y los costes portuarios relativos al propio buque (costes de entrada a puerto, amarre, practicaaje, etc.), y se consideran costes variables

los relativos a la operativa del buque en puerto como es el coste de combustible, el coste por la ocupación de los muelles que dependen del tiempo de estancia del buque en la terminal, y el coste de carga/descarga, que depende del número de contenedores a descargar y de la eficiencia del puerto (Meng & Wang, 2011a; Takano et al., 2010).

$$\text{Coste fijo} = TBFSC + TUZT + TAN + TDB + TA + TRemol + TP$$

(ec.31)

$$\text{Coste variable} = CC_{navegación} + CC_{puerto} + TBASC * TiempoCD + TCOM + CG_p$$

(ec.32)

5. Metodología

La metodología seguida para la resolución del conjunto de problemas planteados en este trabajo se resume en la Figura 10.

Los datos seleccionados y calculados en la fase de caracterización (apartado 4) se van a emplear como entradas, en un primer paso, del software SIG TransCAD. Esto permite obtener una matriz de costes OD para cada tramo definido entre NUTS. Esta matriz se empleará, por un lado, como entrada para el modelo Logit, junto con las matrices OD de tiempo, distancia y flujos entre NUTS. Y, por otro, como una de las entradas al algoritmo MILP. Las características del buque se tienen en cuenta en la definición de los costes portuarios y del propio buque, y en el modelo de estiba, que es la otra entrada al algoritmo MILP.

Para el algoritmo heurístico se ha empleado como entrada la matriz unitaria calibrada que se obtiene del modelo Logit.

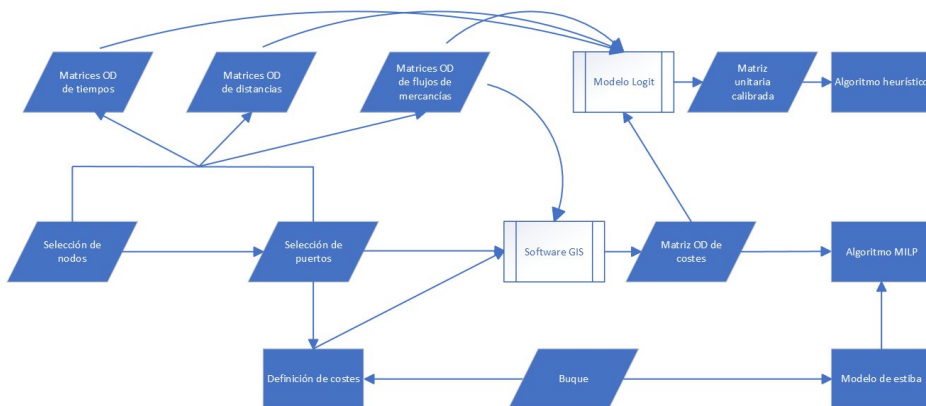


Figura 10. Esquema general de la metodología aplicada

5.1. Sistema de información geográfica Transcad

Se ha empleado el software SIG (Sistema de Información Geográfica) TransCAD para la definición de las rutas y para establecer un primer reparto del flujo de mercancías a través de la red. En este tipo de software existen múltiples capas con información sobre redes de comunicación terrestre (autopistas, autovías, carreteras, calles) pero no así sobre comunicación marítima. Por tanto, a la capa de carreteras se le tuvo que añadir otra de rutas marítimas que representase las conexiones entre los diferentes puertos que se iban a analizar. Para la correcta distribución de los flujos de mercancías se necesitaba además definir los centros de generación y consumo de esas mercancías, es decir, nodos que tienen una o más conexiones a los puertos.

Las rutas marítimas se definieron como conexiones entre los puertos seleccionados. La capa de rutas marítimas consta de 285 rutas. La selección de puertos abarca tanto puertos con un gran volumen de movimiento de contenedores, que se podrían considerar como puertos hub, y puertos de menor entidad, que se podrían considerar del tipo spoke. Aunque no es objeto de este trabajo analizar estrictamente rutas hub&spoke, sino la viabilidad de realizar el transporte de mercancías dentro de Europa a través de rutas marítimas sí es una posible futura vía de análisis debido al tipo de puertos seleccionados. Los puertos más grandes permiten el atraque de buques portacontenedores con calados importantes, mientras que los puertos más pequeños resultan más favorables para buques feeder, con calados más pequeños. Esto implica una diferencia importante en los medios de carga y descarga de los puertos y en su eficiencia.

En TransCAD las NUTS están almacenadas en una capa con sus correspondientes coordenadas. En este software los nodos equivalen a puntos, por lo que las coordenadas de las NUTS se corresponden con el centro geográfico de las regiones.

ID	Longitude	Latitude	ID:1 Name
3	9980268	53489807	-- DE33
5	7627532	52350405	-- DE41
6	7544631	53435080	-- DE34
7	6145767	53131117	-- NL12
8	5958752	52449552	-- NL32
49	6461970	53511817	-- NL11
48	8788959	53142871	-- DE5
12	3123165	51124189	-- BE25
47	9779604	53902936	-- DE6
14	571508	48757721	-- FRD1
15	-1843648	48212407	-- FRH0
16	-295848	47531443	-- FRG0
17	1259447	46122383	-- FRB3
46	1257854	44267792	-- FRH2
45	-621061	46056221	-- FRJ2
44	2240088	50691170	-- FRE1
21	2528531	47410961	-- FRF2
22	2545157	43217336	-- FRJ1
43	1111617	49896942	-- FRD2
24	-725136	44252240	-- FRJ1
25	-8049491	43014444	-- ES11
26	-5874719	43424336	-- ES12
27	-4131409	43277646	-- ES13
28	-2670283	43315678	-- ES21
29	1311517	42873982	-- ES51
30	-726743	40696321	-- ES52
33	-1567875	38202995	-- ES62
32	4560438	37900386	-- ES61
34	-7983712	41645164	-- PT11
35	-8082655	37432045	-- PT15
36	-7621893	40004387	-- PT16
37	-8731957	38823270	-- PT17

Figura 11. Dataview (tabla) de TransCAD con la localización de las NUTS

A continuación, se realizó la conexión entre la capa de NUTS y la capa de las rutas entre puertos.

Metodología

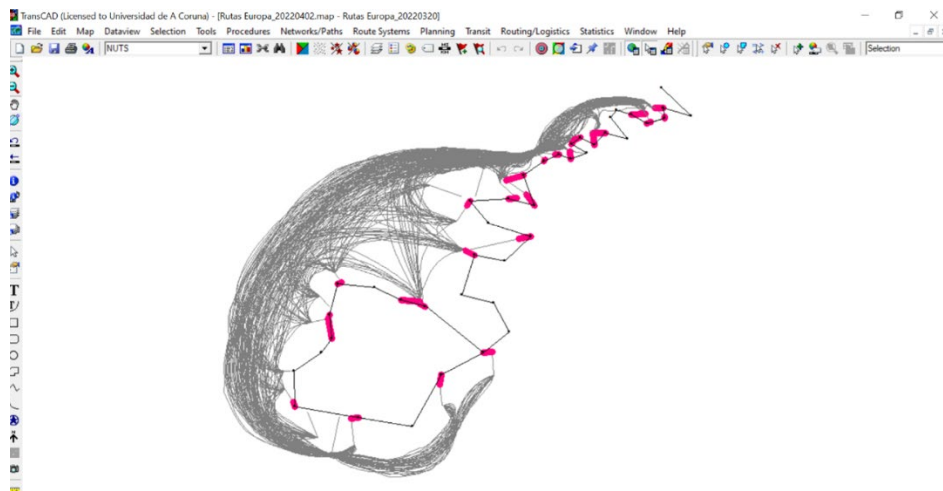


Figura 12. Conexiones entre las NUTS y las rutas marítimas en TransCAD

Aunque TransCAD permite importar una capa con todas las carreteras de Europa, en este trabajo sólo son de interés las autovías y autopistas que conforman los corredores TEN-T. Sin embargo, no se ha aligerado la capa de carreteras porque no afectaba a los tiempos de computación. Finalmente, en la Figura 13 se puede ver la superposición de las tres capas definidas en la herramienta SIG: la capa de carreteras, la capa de rutas marítimas y la capa de nodos (NUTS). Con estas tres capas se creó una red (network) para la distribución de viajes.

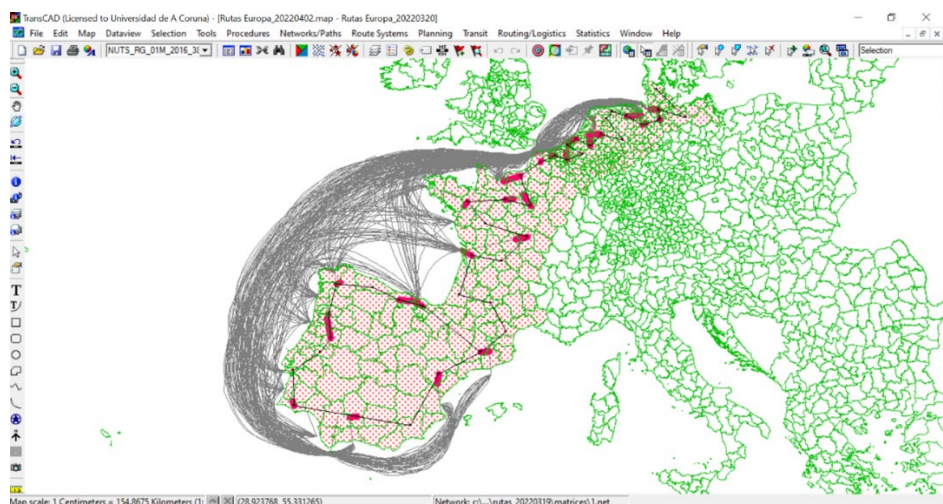


Figura 13. Imagen de las tres capas empleadas en TransCAD

La asignación de costes y flujos en cada capa va a determinar el reparto por cada tramo.

En la capa marítima se definieron una serie de variables para determinar el coste de cada tramo. Debido a que este coste depende no solo del puerto de origen y el de destino, sino también del buque seleccionado para ese tramo, en la Tabla 12 aparecen tanto las variables asociadas al coste portuario como las del buque que influyen en el coste portuario.

<i>Field Name</i>	<i>Type</i>	<i>Width</i>	<i>Decimal</i>	<i>Description</i>
<i>ID</i>	Integer (4 bytes)	10	0	Número identificativo del tramo
<i>Length</i>	Real (8 bytes)	10	2	Distancia
<i>Dir</i>	Integer (2 bytes)	2	0	Dirección
<i>Name</i>	Character	512	0	Nombre
<i>RL</i>	Real (8 bytes)	10	2	Longitud real
<i>Vel</i>	Integer (2 bytes)	6	0	Velocidad (km/h)
<i>DT</i>	Character	200	0	Descripción Tasa
<i>TBASC</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Buque. Atraque estancia corta sin concesión
<i>TBACC</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Buque. Atraque estancia corta en concesión
<i>UA</i>	Character	16	0	Unidades del atraque
<i>Bon</i>	Real (8 bytes)	10	2	Bonificación
<i>DBon</i>	Character	50	0	Descripción Bonificación
<i>TBFSC</i>	Real (8 bytes)	10	5	Tasa Buque. Fondeo sin concesión
<i>TBFCC</i>	Real (8 bytes)	10	5	Tasa Buque. Fondeo con concesión
<i>UF</i>	Character	100	0	Unidades Fondeo
<i>20CargSC</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 20' cargado Sin Concesión
<i>20CargCCSA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 20' cargado Con Concesión Sin Atraque
<i>20CargCCCA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 20' cargado Con Concesión Con Atraque
<i>40CargSC</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 40' cargado Sin Concesión
<i>40CargCCSA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 40' cargado Con Concesión Sin Atraque
<i>40CargCCCA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 40' cargado Con Concesión Con Atraque

Metodología

<i>20VacSC</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 20' vacío Sin Concesión
<i>20VacCCSA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 20' vacío Con Concesión Sin Atraque
<i>20VacCCCA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 20' vacío Con Concesión Con Atraque
<i>40VacSC</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 40' vacío Sin Concesión
<i>40VacCCSA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 40' vacío Con Concesión Sin Atraque
<i>40VacCCCA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Mercancía. 40' vacío Con Concesión Con Atraque
<i>UTM</i>	Character	16	0	Unidad Tasa Mercancía
<i>Pgant OD</i>	Real (4 bytes)	10	2	Precio Grúas
<i>Pgant Trans</i>	Real (4 bytes)	10	2	Número de grúas de la terminal
<i>UPG</i>	Character	50	0	Número de grúas de tránsito
<i>TUZT</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa Uso Zona Tránsito
<i>UTZT</i>	Character	16	0	Zona de tránsito
<i>TDB</i>	Real (8 bytes)	10	4	Días de tránsito
<i>UTDB</i>	Character	20	0	Unidad Tasa Zona Tránsito
<i>TAN</i>	Real (8 bytes)	10	5	Tasa Desechos Buque
<i>DAN</i>	Character	200	0	Unidad Tasa Desechos
<i>PRemol</i>	Real (8 bytes)	10	2	Tasa Ayuda Navegación
<i>UPRemol</i>	Character	200	0	Descripción Ayuda Navegación
<i>PAB</i>	Real (4 bytes)	10	4	Coste Remolcador
<i>UAB</i>	Character	16	0	Unidad
<i>CAB</i>	Real (4 bytes)	10	4	Coste Agua Buque
<i>UCA</i>	Character	16	0	Unidad agua
<i>EEB</i>	Real (4 bytes)	10	4	Coste Conexión agua buque
<i>UEEB</i>	Character	20	0	Unidad coste conexión
<i>CEB</i>	Real (4 bytes)	10	4	Coste Energía eléctrica buque
<i>UCEB</i>	Character	16	0	Unidad energía eléctrica
<i>TA</i>	Real (8 bytes)	10	4	Coste Conexión energía eléctrica
<i>DTA</i>	Character	60	0	Unidad Conexión eléctrica
<i>TP</i>	Real (8 bytes)	10	4	Tasa de amarre

<i>TP</i>	Real (8 bytes)	60	0	Tasa de practicaaje
<i>GT</i>	Real (8 bytes)	60	4	Gross Tonnage
<i>CMP</i>	Real (8 bytes)	60	4	Consumo motor principal
<i>CMMAA</i>	Real (8 bytes)	60	4	Consumo motores auxiliares
<i>PMP</i>	Real (8 bytes)	60	4	Potencia MP
<i>PMMAA</i>	Real (8 bytes)	60	4	Potencia MMAA
<i>PrecioMDO</i>	Real (8 bytes)	60	4	Precio del MDO
<i>CC</i>	Real (8 bytes)	60	4	Coste combustible
<i>PT</i>	Real (8 bytes)	60	4	Costes portuarios
<i>Tiempo NAV</i>	Real (8 bytes)	60	4	Tiempo de navegación
<i>Tiempo ES</i>	Real (8 bytes)	60	4	Tiempo de entrada/salida de puerto
<i>Tiempo ET</i>	Real (8 bytes)	60	4	Tiempo de espera en la terminal
<i>Tiempo amarre</i>	Real (8 bytes)	60	4	Tiempo de amarre
<i>Tiempo fondeo</i>	Real (8 bytes)	60	4	Tiempo de fondeo
<i>Tiempo CD</i>	Real (8 bytes)	60	4	Tiempo de carga/descarga
<i>Coste</i>	Real (8 bytes)	10	2	Coste total por viaje
<i>Port Attraction</i>	Real (4 bytes)	10	2	Flujo atraído por un puerto
<i>Port Non Attraction</i>	Real (4 bytes)	10	2	Flujo no atraído por un puerto
<i>TripDistribution</i>	Real (4 bytes)	10	2	Distribución de los viajes

Tabla 12. Variables asociadas a la capa de rutas marítimas en TransCAD

Cada uno de los tramos de las rutas marítimas tiene asociado los costes de los puertos que unen dicho tramo. La estructura de variables de coste mostrada en la Tabla 12 refleja el desglose de los costes portuarios en España. La Ley de Puertos del Estado realiza una desagregación de los costes del puerto bastante detallada, por lo que se ha elegido esta estructura como referencia. El resto de los puertos europeos, en sus tasas públicas, se ajustan en menor o mayor medida a esta estructura en los grandes conceptos (tasa de practicaaje, tasa de amarre, etc.). En aquellos casos en los que no se dispuso de la información correspondiente a alguna variable, se asimiló al valor proporcionado por otro puerto de similar tamaño del mismo país. Los datos de coste asociados a cada tramo marítimo se pueden consultar en el https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/COSTE_PUERTOS.xlsx.

Una vez creada la red, que conecta las capas entre sí, y asociados los costes y las distancias en cada una de ellas, se puede realizar la distribución de viajes a través de un modelo gravitacional. La forma de este tipo de modelos presenta la siguiente expresión:

$$T_{i,j} = A_i B_j C_{i,j} f(f_{i,j})$$

(ec.33)

Donde:

$T_{i,j}$ son las cantidades transportadas entre i y j .

A_i, B_j son coeficientes de ponderación del modelo.

$C_{i,j}$ son los costes del transporte entre i y j .

$f(f_{i,j})$ es la función de impedancia del modelo que en este caso se ha hecho depender del flujo entre el puerto de origen y el puerto de destino. Esta función tiene por objetivo penalizar el flujo de transporte entre dos puntos conforme aumenta el flujo de mercancía entre ellos buscando así desviar el flujo hacia puertos con menor probabilidad de congestión. Para reflejar esto se ha optado por una función de impedancia de tipo potencial empleando como indicador de coste el flujo de mercancías a través de la red de transporte contenida en la cartografía GIS.

$$T_{i,j} = A_i B_j P_i C_j f_{i,j}^{-b}$$

(ec. 34)

Por tanto, en este modelo se ha empleado como matriz de impedancia los flujos de mercancía entre los puertos según los datos de Eurostat (<https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/PORT%20FLOWS.xlsx>), que se corresponde con el término $f_{i,j}$, es decir, el flujo de mercancía entre el puerto i y el puerto j . b es un parámetro del modelo que se ajusta en el denominado proceso de calibración del modelo gravitacional, éste es un procedimiento integrado en el software TransCAD, dando como resultado $b = 0,123$.

El resultado de aplicar el modelo gravitacional es la distribución de viajes (en este caso toneladas de mercancía) entre los diferentes tramos definidos. Esta distribución va a permitir configurar el modelo Logit.

5.2. Modelo Logit

Se emplea un modelo Logit (Mai et al., 2018; Meyer de Freitas et al., 2019; Prashker & Bekhor, 2004; Reggiani et al., n.d.; Rich et al., 2009) para determinar la capacidad de atracción de cada uno de los modos de transporte analizados, en este caso carretera y multimodal carretera - marítimo.

El modelo Logit se utiliza para modelar las relaciones entre un conjunto de variables a las que se aplican regresiones (Habib, K.). En este caso la probabilidad de elección entre un modo de transporte u otro (multimodal o carretera) dentro del modelo depende de los costes y tiempos de la ruta (lo que se llama impedancia) y de otros factores de preferencias modales de los cargadores.

La estimación de dicho modelo requiere que identifiquemos las rutas alternativas posibles y las caractericemos definiendo para cada una el tiempo, el coste y el flujo de mercancías, de ahí que las entradas al modelo sean las matrices OD de distancias, tiempos, flujos y coste (Figura 10). La estimación de esta última matriz se ha realizado en TransCAD. Para el modelo Logit se han empleado las matrices OD de tiempos, distancias, flujo y coste del modo multimodal, así como del modo por carretera, entre los nodos.

La formulación utilizada para el modelo es la siguiente:

$$P_m = \frac{e^{u_m}}{e^{u_m} + e^{u_c}} = \frac{1}{1 + e^{u_c - u_m}}$$

(ec. 35)

donde

$$u_m = \beta_m + \beta_c \cdot c_m + \beta_t \cdot t_m$$

(ec. 36)

$$u_c = \beta_c \cdot c_c + \beta_t \cdot t_c$$

(ec. 37)

Por tanto,

$$\ln\left(\frac{1}{P_m} - 1\right) = \beta_c(c_c - c_m) + \beta_t(t_c - t_m) - \beta_m$$

(ec. 38)

$$\beta_m = -\beta_o$$

Siendo

P_m la probabilidad de escoger el modo multimodal

t_m el tiempo de cada tramo multimodal

c_m es el coste de cada tramo multimodal

c_c es el coste de cada tramo de carretera

t_c es el tiempo de cada tramo de carretera

u_m es utilidad para el modo multimodal

u_c es la utilidad para la carretera

β_c es el coeficiente de ponderación para la carretera

β_t es el coeficiente de ponderación para el tiempo

β_m es el coeficiente de ponderación para el modo multimodal

A partir de las matrices mencionadas antes, se va a obtener las variables unitarias del modelo que son el coste unitario para cada modo de transporte. Los valores de los coeficientes que se obtienen en el modelo son los que se muestran en la Tabla 13, y que permiten definir la utilidad para ambos modos de transporte. Por ejemplo, β_m es el número de veces que el modelo incrementa la ventaja o preferencia de la opción multimodal frente a la opción por carretera cuando se incrementa en una unidad la carga transportada. Los coeficientes de la Tabla 13 han sido ajustados mediante regresión lineal ya que se partía de una matriz de repartos modales y no se contaba con datos de encuestas de preferencias modales para hacer una calibración con datos discretos. Las matrices empleadas para el modelo Logit se pueden consultar en <https://github.com/amunin/TESIS/tree/main/Data>.

β_c	β_t	β_m
-0.0015561	-0.001879932	1.72789611

Tabla 13. Valores de los coeficientes del modelo Logit

Para el cálculo del coste por carretera se ha empleado la herramienta del Ministerio de Transporte, Movilidad y Agenda Urbana, ACOTRAM 3.1.0. Se trata de una herramienta informática que pone a disposición de los usuarios el Ministerio y que permite realizar el cálculo de los costes de explotación de los vehículos de transporte de mercancías por carretera. La aplicación calcula los costes directos de los diferentes tipos de vehículos estudiados en el “Observatorio de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera”. El Observatorio actualiza los datos base del cálculo cada tres meses. La aplicación permite elegir entre un grupo de 20 vehículos diferentes (Figura 14) según su TARA y el tipo de mercancía a transportar. En este caso se seleccionó un vehículo articulado de seis ejes específico para el transporte de contenedores, y que la aplicación denomina portacontenedor.

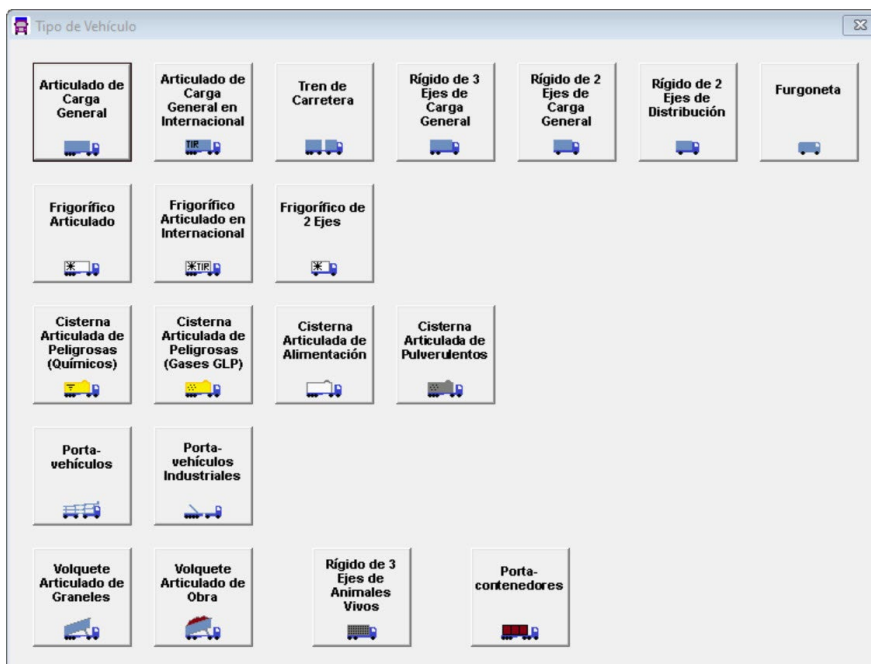


Figura 14. Tipos de vehículos en la aplicación ACOTRAM

El coste por km cargado que se obtiene es de 1,3646 \$/km, el resto de los costes asociados a este vehículo se pueden consultar en <https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/Portacontenedor%20carretera.pdf>

Finalmente, como salida del modelo, se ha obtenido una matriz unitaria de reparto modal (coste y flujos) que podremos emplear como entrada al algoritmo heurístico (<https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/Datos%20optimizacion.xlsx>).

5.3. Optimización a través de heurísticos

La optimización por colonia de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO) es un método metaheurístico que se ha aplicado de unos años a esta parte al problema del viajero (Travelling Salesman Problem, TSP) (Ariyasingha & Fernando, 2015; Ghafurian & Javadian, 2011; Lizárraga et al., 2013).

ACO es un conjunto de metaheurísticas probabilísticas y algoritmos de optimización inteligente, inspirados en el comportamiento social de las hormigas. Los algoritmos ACO también se clasifican como métodos de inteligencia de enjambre (Ismkhan, 2017), debido a la implementación de este paradigma, a través de la simulación del comportamiento de las hormigas en la estructura de estos algoritmos.

El primer algoritmo ACO es propuesto por Marco Dorigo en su tesis doctoral, en 1991, como algoritmo Ant System (Dorigo). Se va a seguir el planteamiento de Dorigo en (Dorigo & Gambardella, 1997) pero aplicado al caso que nos ocupa (<https://github.com/amunin/TESIS/tree/main/Ant%20Colony%20Algorithm>).

Sea $N = \{n_1, n_2, n_3, \dots, n_n\}$ el set de nodos que se corresponden con cada una de las NUTS, $A = \{(n_n, n_m): n_n, n_m \in N\}$ el set de arcos que unen cada nodo, y $\delta(n_n, n_m) = \delta(n_m, n_n)$ es el valor de coste o el tiempo asociado a cada arco $(n_n, n_m) \in A$. El objetivo es encontrar el tour cerrado que con el mínimo coste visite cada nodo al menos una vez.

El algoritmo utiliza una representación por grafos de manera que cada arco no solo tiene asociado el valor de δ sino también una medida de lo atractivo que resulta cada arco frente a los otros. Este valor se denomina ‘feromona’ (pheromone), $\tau(n_n, n_m)$, y se actualiza con cada iteración. Se va a considerar que los arcos son simétricos, es decir,

$$\tau(n_n, n_m) = \tau(n_m, n_n)$$

El algoritmo funciona de la siguiente manera: cada ‘hormiga’ genera un tour completo escogiendo nodos en base a una regla de probabilidad: las ‘hormigas’ prefieren moverse a nodos con un coste más bajo y un valor alto de ‘feromona’. Una vez que todas las ‘hormigas’ completan un tour, se aplica una actualización de la ‘feromona’ global, una fracción de las ‘feromonas’ de cada arco se evapora (arcos que no son actualizados se vuelven menos atractivos), y finalmente cada ‘hormiga’ deposita una cantidad de ‘feromonas’ en los arcos que conforman su tour proporcionalmente al coste de ese tour. Es decir, los arcos que pertenecen a los tours con menor coste son los que reciben mayor cantidad de ‘feromonas’. Este proceso es iterativo. El número de iteraciones se fijan inicialmente.

La regla de probabilidad que se emplea (random-proportional rule) define la probabilidad de que la ‘hormiga’ k en el nodo n_m elija moverse al nodo n_n y se puede expresar de la siguiente manera:

$$p_k(n_n, n_m) = \begin{cases} \frac{[\tau(n_n, n_m)]^\rho \cdot [\mu(n_n, n_m)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(\tau)} [\tau(n_n, n_m)]^\rho \cdot [\mu(n_n, n_m)]^\beta}, & \text{si } n_n \in J_k(\tau) \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases}$$

(ec. 39)

Donde τ es la ‘feromona’, $\mu = 1/\delta$ es la inversa del coste o el tiempo $\delta(n_n, n_m)$, $J_k(\tau)$ es el set de nodos que todavía no han sido visitados por la ‘hormiga’ k posicionada en el nodo n_m . Con esto se busca que la solución sea posible. β es un parámetro que determina la relativa importancia de la ‘feromona’ frente al coste/tiempo ($\beta > 0$).

En la ecuación 39 se multiplica la ‘feromona’ del arco (n_n, n_m) por el valor heurístico correspondiente $\mu(n_n, n_m)$. Se favorece así la elección de arcos con los valores de coste/tiempo más cortos y que tengan la mayor cantidad de ‘feromonas’.

Una vez que todas las hormigas han completado un tour, las 'feromonas' se actualizan en todos los arcos (regla de actualización global) de acuerdo a la ecuación 40.

$$\tau(n_n, n_m) \leftarrow (1 - \alpha) \cdot \tau(n_n, n_m) + \sum_{k=1}^p \Delta\tau_k(n_n, n_m)$$

(ec. 40)

$$\text{Donde } \Delta\tau_k(n_n, n_m) = \begin{cases} \frac{1}{L_k}, & \text{si } (n_n, n_m) \in \text{tour realizado por la 'hormiga' } k \\ 0 & \end{cases}$$

(ec. 41)

$0 < \alpha < 1$ es un parámetro de decrecimiento de las 'feromonas', L_k es el coste total/tiempo total del tour realizado por la 'hormiga' k y p es el número total de hormigas.

La ecuación 41 simula el cambio en la cantidad de 'feromona' debido a la adición de nuevas cantidades depositadas por las 'hormigas' en cada visita a cada arco y la evaporación de 'feromonas' que se produce cuando las 'hormigas' no utilizan un arco.

5.4. Optimización a través de programación lineal entera mixta (MILP)

La programación del algoritmo se ha realizado en Matlab (<https://github.com/amunin/TESIS/tree/main/MILP%20Algorithm>). Dentro de este lenguaje hay disponibles funciones para la minimización, la optimización multiobjetivo, la resolución de ecuaciones y la resolución de problemas de mínimos cuadrados. En este caso, para el problema que se plantea de minimización del coste de la ruta, se escogió el solver intlinprog. Este solver presenta la siguiente formulación:

$$\min_x f^T x$$

De forma que

$$A \cdot x \leq b$$

(ec. 42)

$$A_{eq} \cdot x = b_{eq}$$

(ec. 43)

con

$$lb \leq x \leq ub$$

A y Aeq son matrices que representan las primeras partes de las desigualdades e igualdades de las restricciones respectivamente, mientras que b y beq son vectores con los valores a la derecha de las desigualdades e igualdades de las restricciones.

Este tipo de algoritmos constan de tres fases:

1. Realizan una pre-resolución, es decir, realizan una simplificación y una conversión del problema a una forma estándar
2. Generan un punto inicial. La elección de este punto inicial es especialmente importante para resolver un algoritmo de este tipo (de búsqueda de un punto interior dentro del dominio) de forma eficiente. Puede ser un paso con elevado consumo de tiempo
3. Realiza iteraciones de predicción-corrección para resolver las ecuaciones KKT (Karush-Kuhn-Tucker)

En la fase de pre-resolución el algoritmo trata de simplificar el problema eliminando las redundancias y simplificando las restricciones. Esto se lleva a cabo a través de las siguientes tareas:

- Comprueba si las variables tienen límite superior e inferior. Si es así, comprueba la viabilidad de las mismas y, según esto, las fija o las elimina
- Comprueba las restricciones que son desigualdades lineales y que implican una sola variable. Si existen, comprueba la viabilidad y cambia la restricción lineal por un límite
- Comprueba si las restricciones que son igualdades lineales implican una sola variable, y si es así, chequea su viabilidad y a partir de ahí fija y elimina la variable.
- Comprueba si las matrices de las restricciones lineales tienen alguna fila de ceros. Si es así, chequea la viabilidad de la restricción y entonces elimina la fila de ceros.
- Determina si las restricciones lineales y los límites son coherentes.
- Comprueba si las variables aparecen como términos lineales en la función objetivo y no aparecen en ninguna de las restricciones lineales. De ser así, chequea la viabilidad y las limitaciones, y a partir de ahí, fija las variables y sus límites más adecuados.
- Cambia cualquier restricción de desigualdad lineal a una de igualdad lineal añadiendo variables de exceso.

El algoritmo debería alcanzar un punto único viable que representa la solución. Si no detecta ningún problema sin límites o irresoluble en esta fase, pero no encuentra una solución, continua con la fase siguiente. Después de llegar al criterio de parada, reconstruye el problema original, deshaciendo cualquier transformación realizada en esta fase inicial.

Por simplicidad, si el problema no se resuelve en esta fase de pre-resolución, el algoritmo cambia todos los límites inferiores finitos por cero.

Punto inicial general

Para fijar el punto inicial, x_0 , el algoritmo realiza lo siguiente:

1. Inicializa x_0 a unos $(n, 1)$, donde n es el número de elementos de la función objetivo, que es un vector f
2. Convierte todos los componentes que tienen límites a tener un límite inferior de cero. Si el componente i tiene un límite superior finito $u(i)$, entonces $x_0(i) = u/2$
3. Para aquellos componentes que tienen sólo un límite, modifica el componente, si es necesario, para permanecer estrictamente dentro del límite.
4. Para poner x_0 cerca de la solución, realiza un paso de predicción – corrección, y entonces modifica la posición resultante y las variables de exceso para que se encuentren dentro de los límites establecidos.

Predicción – corrección

El algoritmo trata de encontrar un punto donde las condiciones de las ecuaciones de KKT se cumplan. Para describir las ecuaciones para el problema de programación lineal se va a considerar la forma estándar del problema de programación lineal:

$$\min_x f^T x \text{ sujeto a } \begin{cases} \bar{A} x = \bar{b} \\ x + t = u \\ x, t \geq 0 \end{cases}$$

Se asume que todas las variables tienen, al menos, un límite finito. A base de cambiar componentes, si es necesario, esta hipótesis significa que todos los elementos de x tienen un límite inferior de cero. t es el vector de las variables de exceso que convierte los límites superiores en igualdades.

\bar{A} es la matriz lineal extendida que incluye las desigualdades y las igualdades lineales. \bar{b} es el vector lineal correspondiente. \bar{A} también incluye los términos para extender el vector x con variables de exceso, s , que transforman las restricciones con desigualdades en restricciones de igualdades.

$$\bar{A} x = \begin{pmatrix} Aeq & 0 \\ A & I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ s \end{pmatrix} \quad (\text{ec. 44})$$

Donde x_0 es el vector original.

Por tanto, las condiciones de las ecuaciones KKT para este sistema son:

$$f - \bar{A}^T y - v + w = 0 \quad (\text{ec. 45})$$

donde

$$\bar{A} x = \bar{b}$$

$$\begin{aligned}
 x + t &= u \\
 v_i x_i &= 0 \\
 w_i t_i &= 0 \\
 (x, v, w, t) &\geq 0
 \end{aligned}$$

Siendo y el multiplicador lagrangiano asociado a las igualdades lineales, v es el multiplicador lagrangiano asociado a los límites inferiores (restricciones positivas) y w es el multiplicador lagrangiano asociado a los límites superiores.

Condiciones de parada

En la fase de predicción – corrección el algoritmo itera hasta que alcanza un punto viable, que satisface las restricciones dentro de unos rangos de tolerancia, y donde el paso relativo es pequeño. Específicamente, se define como:

$$\begin{aligned}
 \rho &= \max(1, \|\bar{A}\|, \|f\|, \|\bar{b}\|) \\
 &\text{(ec. 46)}
 \end{aligned}$$

El algoritmo para cuando todas estas condiciones se satisfacen:

$$\begin{aligned}
 \|r_p\| + \|r_{ub}\| &\leq \rho TolCon \\
 &\text{(ec. 47)}
 \end{aligned}$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 \|r_d\| &\leq \rho Tolfun \\
 r_c &\leq Tolfun
 \end{aligned}$$

Siendo r_p es el valor residual principal, r_{ub} es el valor residual del límite superior, r_d es el valor residual doble y r_c se define como:

$$\begin{aligned}
 r_c &= \max_i \left(\min(|x_i v_i|, |x_i|, |v_i|, \min(|t_i w_i|, |t_i|, |w_i|)) \right) \\
 &\text{(ec. 48)}
 \end{aligned}$$

El subíndice i hace referencia a cada uno de los valores que toma el vector independiente x , que en este caso son los tramos definidos entre cada nodo.

$TolCon$ y $Tolfun$ hacen referencia a la tolerancia de la convergencia y de la función respectivamente.

La función objetivo es la combinación de los costes de la parte del tramo correspondiente a la carretera y la parte del tramo correspondiente al barco para

representar un servicio puerta a puerta completo. Es decir, se entiende por tramo la conexión entre dos NUTS y cada tramo estará constituido por la distancia por carretera entre el centro de la NUT de origen y el puerto de origen más la distancia entre el puerto de origen y el puerto de destino y, finalmente, la distancia entre el puerto de destino y la NUT de destino. Estas distancias implican un coste y un tiempo para el transporte de la mercancía por ese tramo. Un conjunto de tramos constituye una ruta que conectará varias NUTS.

$$\sum_{\forall y \in r} Coste_{carretera} + Coste_{maritimo}$$

(ec. 49)

El $Coste_{carretera}$ viene definido por la distancia de la NUT al puerto de embarque/desembarque de la mercancía.

NUTS	NUTS	Puerto 1	Distancia Puerto 1 (km)	Puerto 2	Distancia Puerto 2 (km)
BE21	Prov. Antwerpen	Amberes	32,5	Rotterdam	120
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	Amberes	66,5	Zeebrugge	63,7
BE25	Prov. West-Vlaanderen	Dunkerque	82,4	Zeebrugge	34,9
DE50	Bremen	Bremerhaven	74	Hamburgo	113
DE60	Hamburg	Hamburgo	11	Bremerhaven	180
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	Hamburgo	240	Bremerhaven	415
DE93	Lüneburg	Hamburgo	50,5	Bremerhaven	195
DE94	Weser-Ems	Bremerhaven	87,8	Hamburgo	161
DEA1	Düsseldorf	Amberes	254	Bremerhaven	356
DEF0	Schleswig-Holstein	Hamburgo	99,9	Bremerhaven	141
ES11	Galicia	Vigo	126	A Coruña	131
ES12	Principado de Asturias	A Coruña	287	Bilbao	272
ES13	Cantabria	Bilbao	132	A Coruña	460
ES21	País Vasco	Bilbao	87,2	Barcelona	589
ES51	Cataluña	Barcelona	86,1	Valencia	333
ES52	Comunitat Valenciana	Valencia	48,3	Barcelona	345
ES61	Andalucía	Algeciras	257	Cádiz	245
ES62	Región de Murcia	Valencia	232	Málaga	421
FRD1	Basse-Normandie	Caen	51,6	Le Havre	131
FRD2	Haute-Normandie	Le Havre	76,8	Caen	120
FRE1	Nord-Pas de Calais	Calais	104	Dunkerque	97,6
FRG0	Pays de la Loire	Saint Nazaire	196	La Rochelle	233

Metodología

FRH0	Bretagne	La Rochelle	275	Saint Nazaire	155
FRI1	Aquitaine	La Rochelle	211	Bilbao	353
FRI3	Poitou-Charentes	La Rochelle	90,5	Saint Nazaire	296
FRJ1	Languedoc-Roussillon	Barcelona	329	Valencia	331
FRF2	Champagne-Ardenne	Le Havre	207	Dunkerque	346
FRJ2	Midi-Pyrénées	La Rochelle	411	Bilbao	525
FRI2	Limousin	Le Havre	211	Brest	591
NL11	Groningen	Bremerhaven	187	Amsterdam	184
NL12	Friesland (NL)	Amsterdam	142	Rotterdam	241
NL32	Noord-Holland	Amsterdam	24,3	Amberes	190
NL33	Zuid-Holland	Rotterdam	50,8	Zeebrugge	201
NL34	Zeeland	Rotterdam	134	Amsterdam	186
NL41	Noord-Brabant	Amberes	88,3	Amsterdam	131
PT11	Norte	Oporto	133	Vigo	242
PT15	Algarve	Sines	190	Algeciras	275
PT16	Centro (PT)	Oporto	108	Lisboa	303
PT17	Área Metropolitana de Lisboa	Lisboa	5,6	Cádiz	316
PT18	Alentejo	Sines	136	Algeciras	432

Tabla 14. NUTS seleccionadas como nodos del algoritmo y sus puertos asociados

El cálculo del coste de cada tramo incluye la parte de carretera correspondiente al puerto seleccionado.

$$\sum_{\forall y \in r} Coste_{carretera} = \sum_{y=1}^Y \sum_{p=1}^2 D_p^y * C_{carr}$$

(ec. 50)

Donde

C_{carr} es el coste del transporte en camión que se ha obtenido con ACOTRAM

D_p^y es la distancia entre el puerto p del tramo y al centro geográfico de la NUT a la que sirve. Cada tramo tiene asociado un puerto de origen y un puerto de destino y, por tanto, dos tramos de carretera.

El $Coste_{marítimo}$ representa los costes operativos del buque. El sistema de explotación del barco es el de chárter por tiempo.

$$\begin{aligned}
& \sum_{\forall y \in Y} Coste_{marítimo} \\
&= \sum_{y=1}^Y \sum_{p=1}^2 Coste_p * Carga_{transportada} \\
&+ \sum_{y=1}^Y (Coste_{combustible} + Coste_{charter}) * n_{buque}
\end{aligned}$$

(ec. 51)

El conjunto de puertos se denota como P y representa el set de puertos reales introducidos en el problema. Sea N el set de regiones (Tabla 14) definidos por la UE y que constituyen el origen y destino de la mercancía transportada. Cada NUT tiene asociados dos puertos. Sea Y el set de arcos (tramos) que representan las rutas entre puertos y, por tanto, conectan cada NUT a través de dos puertos distintos. La demanda viene representada por el flujo de mercancía contenerizada entre NUTS, F^y , con $y \in Y$. En consecuencia, una ruta está formada por tramos donde existe un nodo de origen y un nodo de destino, cada uno de ellos tiene asociado dos puertos de origen po , dos puertos de destino pd y una carga a transportar, medida en TEUs, entre ambos puertos, U_{od} .

$$F^y = \sum_{i,j=1}^n U_{oid_j}$$

(ec. 52)

Con $i, j = 1, \dots, n \in N$

Para una ruta completa sería

$$F = \sum_{y=1}^m F^y$$

(ec. 53)

Con $y = 1, \dots, m \in Y$

Además, se debe tener en cuenta la flota de buques que se puede desplegar en cada ruta. Por tanto, sea B el conjunto de buques disponibles para transportar la carga entre las NUTS. Cada uno de estos buques aparece definido en el algoritmo el buque como un conjunto de parámetros básicos que permiten incorporar sus costes (Tabla 15). Con estos parámetros se pueden calcular los costes portuarios que están en función de las dimensiones y capacidad del buque, así como los costes asociados al combustible que dependerán de la distancia recorrida, de la velocidad y de la potencia.

Eslora	L (m)
Manga	B (m)
Calado	T
Toneladas de Peso Muerto	TPM

Velocidad	VB (kn)
Potencia Motor Principal	PMP (kW)
Potencia Motores Auxiliares	PMMAA (kW)
Consumo Motor Principal	CMP (g/kWh)
Consumo Motores Auxiliares	CMMAA (g/kWh)
Gross Tonnage	GT
Coste combustible	CComb (\$/t)
Coste Chárter	CCharter (\$/día)

Tabla 15. Parámetros básicos que definen el buque dentro del algoritmo MILP

Definimos a continuación la función objetivo del algoritmo que busca la minimización de los costes asociados a las rutas.

Sea CO_r el coste operativo de un buque b por viaje (tramo entre dos puertos) en la ruta r . La función objetivo es $CO'_r * x$ sujeto a restricciones no lineales del tipo $Aineq * x \leq bineq$ y restricciones lineales del tipo $Aeq * x = beq$

Siendo x el conjunto de tramos que forman una ruta y que constituye la variable independiente del problema.

$$\text{Con } 0 \leq x_i \leq 1$$

La función objetivo presenta los siguientes términos:

$$\begin{aligned} \text{Min } CO_r &= \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y CO_y^b \\ &= \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y CC_y^b + \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y PT_y^b + \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y CCD_y^b + \sum_{b=1}^B CCT_b \end{aligned}$$

(ec. 54)

donde

Y es el conjunto de tramos de una ruta correspondientes a los tramos entre NUTS

R es el conjunto de rutas posibles constituidas por diferentes tramos

B es el conjunto de buques disponibles

CO_r = Coste Operativo para la ruta n

CCT_b = coste del chárter por tiempo para cada buque b

CC_y^b = coste del combustible por tramo y y buque

PT_y^b = tasa portuaria por tramo y y buque

CCD_y^b = coste de carga/descarga en puerto por tramo y y buque

La función objetivo busca la minimización del coste total de operar una ruta formada por un conjunto de tramos. Por lo que, para su incorporación al algoritmo se ha expresado de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } CO_r &= \sum_{y=1}^Y \sum_{p=1}^P D_p^y * C_{carr} \\
 &+ \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y CO_y^b \\
 &= \sum_{y=1}^Y \sum_{p=1}^P D_p^y * C_{carr} + \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y CC_y^b * s_b \\
 &+ \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y PT_y^b * s_b + \sum_{b=1}^B CCT_b * s_b + \sum_{b=1}^B \sum_{y=1}^Y CCD_{ij}^b * U^y * x_{ij}^y
 \end{aligned}$$

(ec. 55)

La variable independiente es una variable binaria, $x_{ij}^y \in [0,1]$, que indica si un tramo y forma parte de la ruta r. $x_{ij}^y = 1$ si el tramo y que conecta las NUTS i, j pertenece a la ruta r.

s_b es el número de buques que es necesario desplegar en esa ruta.

La función objetivo está sujeta a una serie de restricciones.

Restricción 1 (frecuencia semanal)

$$\sum_{y=1}^Y T_y^r \leq 168 \quad \forall y \in R$$

(ec. 56)

Restricción 2 (satisfacción de la demanda)

$$\sum_{y=1}^Y U_{od}^y \geq \sum_{n=1}^N U_{ij} \quad \forall o, d \in P \quad \forall i, j \in N$$

(ec. 57)

Restricción 3 (ruta circular)

$$\sum_{y=1}^Y \sum_{i=1}^N x_{ij}^y = 2 \quad \forall i, j \in N \quad \forall y \in Y$$

(ec. 58)

Restricción 4 (capacidad de los buques)

$$\sum_{y=1}^Y \sum_{b=1}^B C_{TEU_b}^y \cdot s_b \geq \sum_{y=1}^Y U_{ij}^y$$

(ec. 59)

Donde

$C_{TEU_b}^y$ es la capacidad en TEUs de los buques asignados al tramo

Restricción 5 (flujo entre puertos de dos NUTS)

$$U_{ij}^p > 0 \quad \forall p \in P \quad \forall i, j \in N$$

(ec. 60)

Vamos a desglosar ahora cómo se calculan cada una de las restricciones.

Restricción 1

$$\sum_{y=1}^Y T_y^r \leq 168 \quad \forall y \in R$$

(ec. 61)

Una semana consta de 168 horas. Esta restricción fuerza a que un viaje completo, con origen y fin en el mismo puerto, se complete en una semana. Es una restricción de frecuencia semanal para que el buque toque cada puerto una vez a la semana.

$$\sum_{y=1}^Y T_y^r = \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Tiempo_{pkC/D} * U^p + \sum_{p=1}^P Tiempo_p + \sum_{y=1}^Y Tiempo_{nav}^y$$

(ec. 62)

$Tiempo_{pk\frac{C}{D}}$ = Tiempo empleado en la carga/descarga de un contenedor por puerto y por grúa (h)

$$Tiempo_{pk\frac{C}{D}} = T_T^k + T_{EC}^k + T_{EV}^k + T_{MC}^k$$

(ec. 63)

T_T^k = Tiempo de traslado de la grúa entre bodegas (h)

T_{EC}^k = Tiempo de elevación en carga por TEU (h)

T_{EV}^k = Tiempo de elevación en vacío (h)

T_{MC}^k = Tiempo de movimiento del carro (h)

U^p = número de contenedores a cargar/descargar en el puerto p semanalmente

$$Tiempo_p = Tiempo_{entrada+salida} + Tiempo_{amarre} + Tiempo_{espera\ terminal} + Tiempo_{fondeo}$$

(ec. 64)

Por lo tanto, esta restricción tiene en cuenta todos los tiempos empleados por el buque desde que sale del puerto de origen hasta que llega al puerto de destino (tiempo de navegación), y luego en puerto se han establecidos tiempos de entrada en puerto, espera (fondeo), de amarre, pilotaje, carga y descarga y salida de puerto. Los tiempos de entrada y salida son parámetros constantes para cada puerto, para el resto se ha aplicado un coeficiente de eficiencia portuaria (Tabla 9). Además, los tiempos de carga/descarga dependen del número de contenedores a cargar/descargar en ese puerto.

Restricción 2

Sea U^r el promedio de carga (número de contenedores promedio) requerido en la ruta r y con la frecuencia de servicio elegida. Sea U^y la carga promedio (número de contenedores promedio) que se transporta por viaje entre el puerto i y el puerto j.

$$\sum_{r=1}^R U^r - \sum_{y=1}^Y \sum_{p=1}^P U^y \leq 0$$

$\forall p \in Y$

$\forall y \in R$

(ec. 65)

Todo el flujo entre NUTS de una ruta (U^r), tomado como demanda, debe ser igual al flujo entre los puertos (U^y) que forman parte de la ruta y que están asociados a los extremos de cada tramo y que conforma la ruta. Este flujo constituye la oferta (<https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/NUTS%20FLOWS.xlsx>).

Esta restricción llevaría a que se escogiesen los puertos con más movimientos de contenedores en cada NUT.

Restricción 3

En esta restricción se fuerza a que cada puerto tenga asociados dos tramos, es decir, siempre se entra al menos una vez en el puerto y se sale, al menos una vez, de ese puerto. Además, las rutas no están formadas por los mismos tramos.

$$\sum_{r=1}^R \sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^N x_{ij}^r = 2 \quad \forall i, j \in N$$

(ec. 66)

x_{ij}^r es la variable binaria que indica si un tramo y que une los puertos i, j forma parte de la ruta r . La variable es 1 si el tramo y pertenece a la ruta r , o 0 si no es así.

$$x_{i,j}^r \in [1, 0] \quad i, j \in Y$$

o

$$x_y^r \in [1, 0]$$

El algoritmo encuentra mínimos locales que son subrutas dentro de la red planteada. Estas subrutas estarán formadas por distintos tramos dependiendo de las condiciones de contorno de las que se parta: flujo de mercancía, tipo de buque, condiciones de navegación (velocidad), precio del combustible o del flete del buque. Estas condiciones de contorno tienen un impacto más o menos importante en que se cumplan las restricciones y el algoritmo encuentre rutas de coste mínimo.

Dentro de las salidas del algoritmo encontramos rutas no viables por tratarse sólo de la conexión entre dos NUTS y no de una ruta circular que incluya varios puertos. Este tipo de rutas se han descartado.

Restricción 4

La capacidad del buque es una restricción que se expresa como:

$$\sum_{y=1}^Y \sum_{b=1}^B C_{TEU_b}^y \cdot s_b \geq \sum_{y=1}^Y U_{ij}^y$$

(ec. 67)

Donde C_{TEU} es la capacidad máxima del buque (número de contenedores). La carga a transportar entre los puertos pertenecientes a todos los tramos que conforman una ruta no puede superar la capacidad máxima de carga de la flota de buques desplegada para esa ruta (s_b). Es decir, la capacidad de los buques desplegados en la ruta debe ser

mayor o igual a la suma de los contenedores de cada tramo de la ruta y , por tanto, el flujo total de contenedores asociado a la ruta r , donde $y_1, y_2, y_3 \dots y_n$ configuran los tramos de la ruta.

No se ha supuesto un número límite de buques para cumplir con las restricciones, es decir, se parte de la hipótesis de que si en una ruta se necesitan más buques de los que dispone la naviera en ese momento, existen en el mercado un número suficiente de buques que se podría incorporar a la ruta en modo time charter. El número mínimo de buques viene condicionado por la satisfacción de la restricción de frecuencia, que se ha establecido en 7 días (168 horas).

Restricción 5 (flujo entre puertos de dos NUTS)

$$U_{ij}^p > 0 \quad \forall p \in P \quad \forall i, j \in N$$

(ec. 68)

Debido a que los datos iniciales de Eurostat daban valores 0 en algunas conexiones entre puertos, es decir, no hay constancia de flujo de contenedores entre esos puertos, se estableció un número mínimo de carga/descarga en cada puerto superior a 0 para evitar que el algoritmo escogiese tramos con flujos nulos.

Esta restricción se ha limitado aún más al considerar que el número mínimo de contenedores a descargar por puerto sea de 15 TEUs.

$$U_{ij}^p \geq 15 TEUs \quad \forall p \in P$$

Este valor se obtiene de evaluar el número mínimo de contenedores que permitiría a la naviera cubrir los costes mínimos del charter de un buque, costes portuarios y coste de combustible para un solo tramo. Con un valor promedio obtenido de todos los costes asociados a los tramos, se emplea la función objetivo de Excel para obtener el número de TEU.

En el código desarrollado se generan todos los tramos posibles entre los nodos. Pero se ha introducido una condición para que se eliminen los tramos con nodos que tienen el mismo puerto de llegada y salida. Esto se produce cuando dos nodos distintos tienen el mismo puerto para dar salida a la mercancía por estar dichos nodos próximos a ese puerto. De esta manera de los 3160 tramos iniciales se pasa a 3036.

5.5. Modelo matemático para el problema de estiba

La primera generación de buques portacontenedores adaptados para el transporte de contenedores apilados sobre cubierta eran capaces de llevar sólo dos alturas de contenedores. Hoy en día los grandes buques portacontenedores llevan hasta 8 contenedores (20') apilados en cubierta.

La seguridad de los contenedores en un buque realmente comienza cuando el contenedor es cargado en la zona del cargador (shipper). Todos los planes de seguridad a bordo del buque asumen que la carga dentro del contenedor está adecuadamente estibada y sujeta. Si un contenedor está sobrecargado, estibado de forma inadecuada o la carga está incorrectamente sujeta, esto puede llevar a ocasionar un daño estructural en el contenedor y colapsar la estiba.

El proceso de estiba debe ser adecuadamente preparado y ejecutado para que los elementos de seguridad de los contenedores estándar sean efectivos. Los contenedores más pesados se deben situar en la parte baja de la pila (tier) y los más ligeros en la parte superior de la misma. En caso contrario, las cargas en la parte baja de la pila pueden llegar a ser excesivas y colapsar el contenedor. Además, también se producen grandes aceleraciones y fuerzas en el sistema de sujeción, cuando los contenedores más pesados están colocados en la parte alta de la pila y la mayor parte de la fuerza debe ser contrarrestada por los contenedores situados en la parte inferior de la pila.

Cada operador de contenedores emplea personal en sus terminales dedicados a elaborar el plan de estiba del buque. El trabajo de este planificador es calcular y determinar en qué posición debe ser cargado cada contenedor en el buque. Los dos factores críticos en esta planificación son el puerto de destino y el peso del contenedor. El planificador determina la posición de cada contenedor al mismo tiempo que tiene en cuenta la estabilidad del buque, el apilamiento de los contenedores y las necesidades operacionales (descarga).

Cuanto más lejos se sitúe un contenedor del centro del buque, más elevadas serán las aceleraciones a las que se verá sometido el contenedor. Los contenedores apilados en cubierta, cerca de popa, tienen generalmente mayor número de incidencias que aquellos estibados en otras zonas del buque. Para compensar esto, algunas navieras colocan "Bird Cages", estructuras soporte, en la cubierta de toldilla, con el propósito de apilar y asegurar los contenedores estibados en la zona de popa.

El modelo matemático de la estiba se ha desarrollado en Matlab (<https://github.com/amunin/TESIS/tree/main/Stowage%20Algorithm>) y permite optimizar un plan de estiba de un buque portacontenedor a partir de sus dimensiones y características principales. La función objetivo para la optimización es la minimización de las recolocaciones de contenedores para la estiba y desestiba del buque en puerto. Es decir, se busca minimizar el número de movimientos improductivos de las grúas durante las operaciones de carga y descarga.

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{p=1}^P rehandle_p^t$$

(ec. 69)

Con $t = 1, \dots, T$ y $p = 1, \dots, P$

Siendo T el conjunto de TEU's cargados en el buque y P el conjunto de puertos de destino de esos contenedores.

A partir de las dimensiones básicas del buque (Tabla 16) se crea una matriz que permite almacenar la posición del contenedor en el buque, identificándola por su bahía, fila y pila (bay, row, tier). Además, se almacenan las coordenadas del centro de gravedad del contenedor y su peso, obtenidos de forma aleatoria dentro de unos rangos predefinidos (de 2,5 a 25 t en el caso del peso y de $xg \pm 2$ m en el caso del centro de gravedad). Y, por último, en esta matriz también se almacena el puerto de destino de cada contenedor.

$$matriz_{estiba} = \begin{pmatrix} C_1: bay, row, tier & xg, yg, zg & peso, puerto \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n: bay, row, tier & xg, yg, zg & peso, puerto \end{pmatrix}$$

Eslora	L (m)
Manga	B (m)
Puntal	D (m)
Velocidad	Vb (kn)
PMP	Potencia Motor Principal
Velocidad del motor	N (rpm)

Tabla 16. Dimensiones básicas del buque para el modelo de estiba

Para determinar la capacidad del buque se parte de un peso en rosca obtenido por formulación con los datos de la Tabla 16, es decir, en base a las características del buque. Teniendo en cuenta el tipo de buque y sus dimensiones principales (eslora, manga, puntal) se definen los coeficientes relativos a las formas del buque como son el coeficiente de bloque, el coeficiente del área de la flotación, el coeficiente prismático y el coeficiente de la maestra. Estos coeficientes permiten calcular otros valores necesarios como son las Toneladas por cm de inmersión (TPC) o el Momento para cambiar el trimado 1 cm (MCTC).

Los cálculos hidrostáticos son en la práctica aproximaciones lineales a partir de unos datos conocidos. Cuando el centro de gravedad y el desplazamiento del buque son conocidos, dicha linealización es bastante precisa.

El número total de TEU's en bodega y en cubierta se define a través de las ecuaciones 69, 70, 71 y 72 (Alvariño et al., 1997). Se parte de la consideración de que el buque no lleva grúas propias.

Número de bahías bajo cubierta

$$NCHO = \frac{10^{-5} \cdot L_{pp}^{3,4929}}{DC_{11}}$$

(ec. 70)

Número de contenedores por pila en bodega

$$NCD = \frac{0,0005D^2 + 0,3772D - 0,3442}{DC_{11}}$$

(ec. 71)

Número de filas en bodega

$$NCB = \frac{0,0014B^2 + 0,3936B - 0,8183}{DC_{11}}$$

(ec. 72)

Número de bahías sobre cubierta

$$NCL = E \left(\frac{L_{pp} - ET_1 - ET_2}{DC_{11}} \right)$$

(ec. 73)

Número total de contenedores

$$NC = \sum_{i=1}^{NCHO} NCD_i \cdot NCB_i + \sum_{i=1}^{NCL} NCB_i \cdot NTMAX_i$$

(ec. 74)

Siendo

$NTMAX_i$ el número de máximo de contenedores que se pueden apilar sobre cubierta, que se calcula teniendo en cuenta la línea de visibilidad del buque. Esta línea de visibilidad es distinta en función de la situación de carga del buque. Este valor está en función del ángulo de visibilidad θ .

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{HSE + (D - TFB)}{2 \cdot L + (L - ET_2)} \right)$$

(ec. 75)

Se realizan una serie de cálculos adicionales como son los coeficientes adimensionales del buque y el cálculo del francobordo y el arqueo. Estos valores podrían ser entradas del algoritmo si se conociesen todos los datos del buque, pero si se parte sólo de las dimensiones principales, es necesario calcularlo. Las ecuaciones empleadas para estos cálculos se pueden consultar en <https://github.com/amunin/TESIS/tree/main/Stowage%20Algorithm>.

Para la estiba de los contenedores se parte de la condición de buque adrizado. La posición inicial del centro de gravedad del buque y de su centro de carena se obtienen a partir de formulación.

$$Zg_0 = Kg_0 = 1,06 \cdot (0,64193 \cdot D + 1,02109)$$

(ec. 76)

$$Yg_0 = 0$$

$$Xg_0 = Lcg_0 = 0,41699 \cdot L$$

(ec. 77)

$$Lcf = 0,5 \cdot L$$

$$BM = \frac{c_1 \cdot B^2}{CB \cdot T}$$

(ec. 78)

$$KB = \frac{c_2 \cdot T}{CB}$$

(ec. 79)

$$c_1 = 0,772 \cdot CB^{0,0803} \cdot \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{0,023} - 0,6914$$

(ec. 80)

$$c_2 = 2,415 \cdot CB^{0,1434} \cdot \left(\frac{T_1}{T_0}\right)^{0,025} - 1,92$$

(ec. 81)

$$KM = KB + BM$$

(ec. 82)

La altura metacéntrica finalmente sería,

$$GM = KM - KG$$

(ec. 83)

En el modelo esta altura se restringe a través de la condición de no colocar los contenedores más pesados sobre otros más ligeros. Ésta es una regla básica en la estiba de contenedores.

La posición final del centro de gravedad del buque se calcula a través del centro de gravedad y el peso de cada uno de los contenedores cargados.

$$YG_n = \frac{\sum_{i=1}^{NCHO} \sum_{j=1}^{NCD_i+NTMAX_i} \sum_{k=1}^{NCB_i} (YG_{ijk} - YG_{n-1}) \cdot P_{ijk}}{\Delta_n}$$

$$\forall C_{ijk} \in NC_p$$

(ec. 84)

$$LCG = XG = \frac{\sum_{i=1}^{NCHO} \sum_{j=1}^{NCD_i+NTMAX_i} \sum_{k=1}^{NCB_i} (XG_{ijk} - XG_{i-1}) \cdot P_{ijk}}{\sum_{i=1}^{NCHO} \sum_{j=1}^{NCD_i+NTMAX_i} \sum_{k=1}^{NCB_i} (\Delta_{i-1} + P_{ijk})}$$

$$\forall C_{ijk} \in NC_p$$

(ec. 85)

Donde

C_{ijk} es cada uno de los contenedores cargados, identificado por la posición que ocupa en el barco (bahía, fila, pila, i, j, k)

NC_p el conjunto de contenedores cargados asignados a los puertos de la ruta

$$P_{ijk} \in [2,5,25]t$$

Una vez cargado el buque es necesario realizar las comprobaciones de estabilidad a través de los momentos que se generan debido a la carga (DNVGL, Pt5 Ch2 Sec8).

Momento escorante

$$M_{esc} = (\Delta_0 + P_{ijk}) \cdot G_2 G_3 \cdot \cos \theta$$

(ec. 86)

$$G_2 G_3 = \frac{d \cdot P_{ijk}}{\Delta_0 + P_{ijk}}$$

$$\forall C_{ijk} \in NC_p$$

(ec. 87)

Momento adrizante

$$M_{adr} = (\Delta_0 + P_{ijk}) \cdot G_2 M_2 \cdot \sen \theta \quad \forall C_{ijk} \in NC_p$$

(ec. 88)

Igualando momentos y despejando el ángulo se tiene:

$$\tan \theta = \frac{d \cdot P_{ijk}}{G_2 M_2 \cdot (\Delta_0 + P_{ijk})} \quad \forall C_{ijk} \in NC_p$$

(ec. 89)

En el caso del trimado el cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$Trim = \frac{MTrim}{100 \cdot MCTC}$$

(ec. 90)

$$MTrim = \sum_{i=1}^{NCHO} \sum_{j=1}^{NCD_i + NTMAX_i} \sum_{k=1}^{NCB_i} (LCG - XG_{ijk}) \cdot P_{ijk} \leq \pm 0,01L$$

Con el reparto del trimado, según sea positivo o negativo, se calculan los calados a popa y a proa.

$$Trimaft = \frac{Trim \cdot LCF}{L}$$

(ec. 91)

La estiba de contenedores se aborda como la carga y el movimiento de pesos en un plano transversal, que se correspondería con las bahías del buque. Este movimiento se puede dividir, a su vez, en uno vertical y otro horizontal. Al cargar el peso p en la zona de crujía del buque y sobre cubierta se producirá un movimiento vertical de su centro de gravedad, de G a G_1 , y un incremento del desplazamiento de Δ_0 a Δ_1 que se puede expresar como

Dependiendo de la posición de la pila, dentro de la bahía, que corresponde a ese contenedor de peso P , se producirá un movimiento vertical que desplazará el centro de gravedad de G_1 a G_2 y

$$G_1 G_2 = \frac{h \cdot p}{\Delta_1}$$

(ec. 92)

Siendo h la distancia vertical que se desplaza el peso y Δ_1 el desplazamiento del buque.

$$G_2 Z_2 = G_1 Z_1 - G_1 G_2 \sin \theta$$

(ec. 93)

El movimiento horizontal corresponde al desplazamiento del peso p debido a la fila que va a ocupar dentro de la bahía. Esto hace que el centro de gravedad del buque se desplace de G_2 a G_3

$$G_2G_3 = \frac{d \cdot p}{\Delta_1}$$

(ec. 94)

Siendo d la distancia horizontal desde crujía a la fila correspondiente.

$$G_3Z_3 = G_2Z_2 - G_2G_3 \sin \theta$$

(ec. 95)

El momento adrizante resultante será la diferencia de ambos momentos

La posición del buque o de la carena queda determinada por su posición relativa respecto al plano de la flotación. Es posible definir esta posición relativa mediante los calados, el ángulo de escora y el ángulo de asiento o trimado.

No se puede superar la capacidad máxima del buque, expresada en TPM.

$$\sum_{i=1}^{NCHO} \sum_{j=1}^{NCD_i+NTMAX_i} \sum_{k=1}^{NCB_i} P_{ijk} \leq TPM$$

En buques tipo feeder, con desplazamientos de entre 10.000 y 20.000 t, no es necesaria la comprobación del peso máximo de apilamiento. En el Convenio Internacional sobre la Seguridad de los Contenedores (CSC), se habla de un apilamiento de 9 alturas y una fuerza de 1,8g como valor máximo, que no se va a alcanzar en ningún caso en estos barcos.

Se debe comprobar también que no se superan los valores de resistencia longitudinal del buque en el momento de la carga de contenedores a través del momento flector inducido por la carga. La carga de contenedores puede generar posiciones de arrufo y quebranto puntuales en el buque (DNVGL Pt 3 Ch 1 Sec 5).

Momento flector en aguas tranquilas

$$MS = k_{sm} \cdot MS_0$$

$$k_{sm} = \begin{cases} 1,0 & x_{ijk} \in [0,4L] \\ 0,15 & x_{ijk} \in [0,1L - Ppr] \cup [0,1L - Ppp] \end{cases}$$

(ec. 96)

Momento flector en arrufo

$$MS_0 = -0,065 \cdot C_{WU} \cdot L^2 \cdot B(C_B + 0,7) \text{ kNm}$$

(ec. 97)

Momento flector en quebranto

$$MS_0 = C_{WU} \cdot L^2 \cdot B(0,1225 - 0,015 \cdot C_B) \text{ kNm}$$

(ec. 98)

Momento flector generado por la carga

$$MS_V = 5 \left[(\Delta - TPM) \cdot 0,27 \cdot L + \sum_{i=1}^{NCHO} \sum_{j=1}^{NCD_i + NTMAX_i} P_{ijk} \cdot x_{ijk} - 0,18 \cdot (C_B + 0,35) \cdot L \cdot \Delta \right]$$

(ec. 99)

$$MS_V \leq MS_0$$

El momento flector inducido por la carga no puede superar el valor del momento flector en arrufo o quebranto.

Para buques más pequeños, los cálculos de momentos flectores en aguas tranquilas y las fuerzas cortantes podrían incluir el lastre en condiciones de carga no homogéneas. En este trabajo no se ha considerado que el buque lleve lastre en su condición de máxima carga. Así mismo es recomendable considerar las situaciones transitorias de carga y descarga en este tipo de buques. Esto se puede realizar recalculando el plan de estiba en cada puerto, puesto que, en este caso, implica un cálculo de estabilidad básico del buque.

Las combinaciones de carga portuaria se asignan como combinaciones de carga estática. Por tanto, es necesario calcular las fuerzas cortantes generadas por la carga. Las presiones de flotabilidad en condiciones de aguas tranquilas y las fuerzas de inercia causadas por la aceleración gravitatoria dan como resultado un estado de equilibrio.

Fuerzas cortantes

$$Q_S = k_{sq} \cdot Q_{SO}$$

(ec. 100)

$$Q_{SO} = 5 \cdot \frac{M_{SO}}{L}$$

$$k_{sq} = \begin{cases} 0 & \text{en } Ppp \text{ y } Ppr \\ 1,0 & x_{ijk} \in [0,15L, 0,3L] \\ 0,8 & x_{ijk} \in [0,4L, 0,6L] \\ 1,0 & x_{ijk} \in [0,7L, 0,85L] \end{cases}$$

Finalmente, lo que se obtiene es un plan de estiba que garantiza la navegabilidad del buque bajo criterios de estabilidad. El modelo está planteado para que el plan de estiba acomode un número de contenedores con destino a diferentes puertos minimizando las recolocaciones. Sin embargo, a la hora de combinarlo con los algoritmos de optimización (capítulo 6) y los volúmenes de flujo de contenedores, un solo puerto de destino superaba la capacidad máxima del buque.

6. Implementación

6.1. Rutas óptimas obtenidas con el método heurístico

Como inputs de este modelo de optimización se han utilizado los mismos valores que en el modelo Logit (<https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/LOGIT.xlsx>), es decir, costes y tiempos unitarios del transporte multimodal y el de carretera. Se parte de la hipótesis de que cada nodo está asociado a un puerto exclusivamente, por lo que los tramos en las rutas se establecen entre nodos y no entre puertos. Esto permite evitar distorsiones a la hora de calcular las rutas multimodales y las que emplean únicamente el transporte por carretera. Se ha fijado el número de iteraciones en 250, puesto que se observó que el algoritmo con 40 nodos alcanzaba una solución óptima entre las iteraciones 200 y 250. Los valores de los parámetros empleados en el algoritmo se muestran en la Tabla 17. El número de ‘hormigas’ se fijó en 50, un incremento en el número de ‘hormigas’ no supone mejores resultados en la optimización. De hecho, si se establece el número de hormigas en 100, el coste unitario total de la ruta óptima resulta ser mayor que con 50 hormigas (234,8 \$/t con 100 hormigas, frente a 227,3 \$/t con 50 hormigas, por ejemplo)

Parámetro	Descripción	Valor
α	Ratio de evaporación	0,5
β	Exponente de la atracción de cada arco	1,727
ρ	Exponente de la ‘feromona’	1

Tabla 17. Parámetros del algoritmo ACO

El algoritmo optimiza a partir del coste unitario del transporte o el tiempo entre un nodo y otro. En este caso no se han establecido restricciones de ningún tipo y para el cálculo de los costes se ha tomado como referencia un buque feeder de 1800 TEU’s (Tabla 18, https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:687697/mmsi:477466300/imo:9691113/vessel:SITC_SHANDONG). Se ha escogido este buque como base para los cálculos debido a su adecuación a todos los puertos seleccionados por calado y por ser suficientes dos grúas para su carga y descarga. El algoritmo, al estar resolviendo un TSP, trata de visitar al menos una vez cada nodo minimizando la variable que se le pide en cada caso y busca una ruta circular (Shintani et al., 2007).

Eslora (L)	172 m
Manga (B)	27,6 m
Calado (T)	9,5 m
Velocidad	19,5 kn
TPM	21355
Potencia MMPP (kW)	12000
Potencia MMAA (kW)	5390
Chárter (\$/día)	25.000

Tabla 18. Dimensiones principales del buque seleccionado para la ruta

Para el caso del coste en el transporte multimodal en la Figura 15 y en la Tabla 19 se pueden observar el resultado obtenido con el ACO.

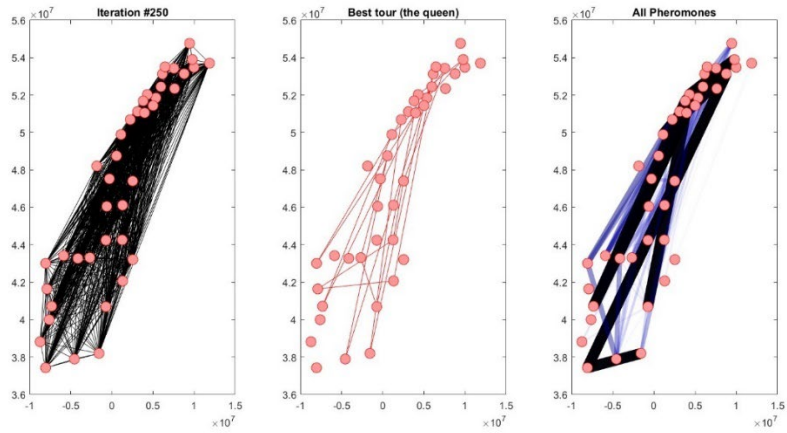


Figura 15. Proceso de selección de la ruta óptima en el algoritmo ACO

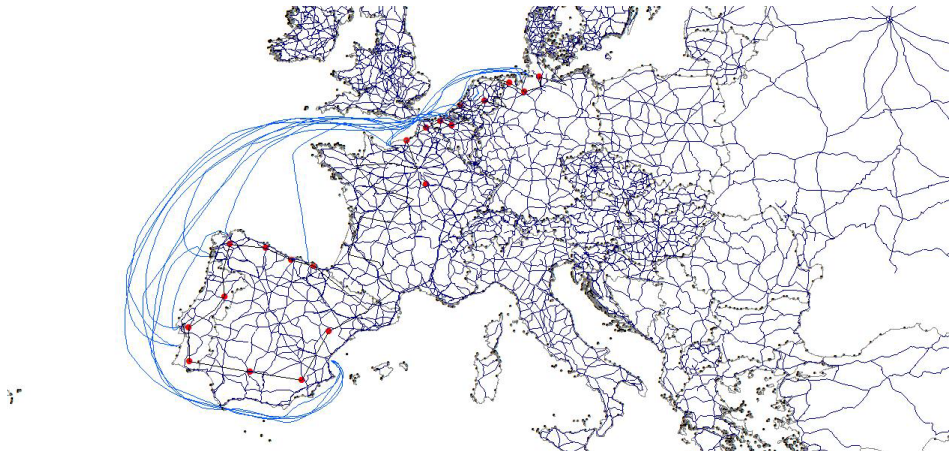


Figura 16. Ruta óptima en coste obtenida por ACO para transporte multimodal

nodo inicial	nodo inicial	nodo final	nodo final	coste unitario multimodal (\$/t)
ES52	Comunitat Valenciana	NL33	Zuid-Holland	8.47
NL33	Zuid-Holland	DE60	Prov. Antwerpen	16.86
DE60	Prov. Antwerpen	ES62	Noord-Holland	10.23
ES62	Noord-Holland	FRE1	Hamburg	9.58
FRE1	Hamburg	PT15	Algarve	11.96
PT15	Algarve	DE50	Bremen	11.59
DE50	Bremen	PT18	Alentejo	10.02
PT18	Alentejo	BE21	Haute-Normandie	7.26

Implementación

BE21	Haute-Normandie	NL32	Prov. Oost-Vlaanderen	3.80
NL32	Prov. Oost-Vlaanderen	FRD2	Düsseldorf	2.38
FRD2	Düsseldorf	BE25	Noord-Brabant	20.22
BE25	Noord-Brabant	ES13	Friesland (NL)	14.46
ES13	Friesland (NL)	ES61	Centro (PT)	12.44
ES61	Centro (PT)	ES21	Nord-Pas de Calais	11.06
ES21	Nord-Pas de Calais	DE94	Prov. West-Vlaanderen	8.05
DE94	Prov. West-Vlaanderen	ES12	Andalucía	26.64
ES12	Andalucía	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	8.11
PT17	Área Metropolitana de Lisboa	FRF2	País Vasco	4.16
FRF2	País Vasco	ES11	Cataluña	20.92
ES11	Cataluña	ES52	Comunitat Valenciana	8.72

Tabla 19. Nodos seleccionados por ACO para la ruta óptima por coste en multimodal

En el caso de la ruta óptima por tiempo en transporte multimodal los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 20 y la Figura 17.

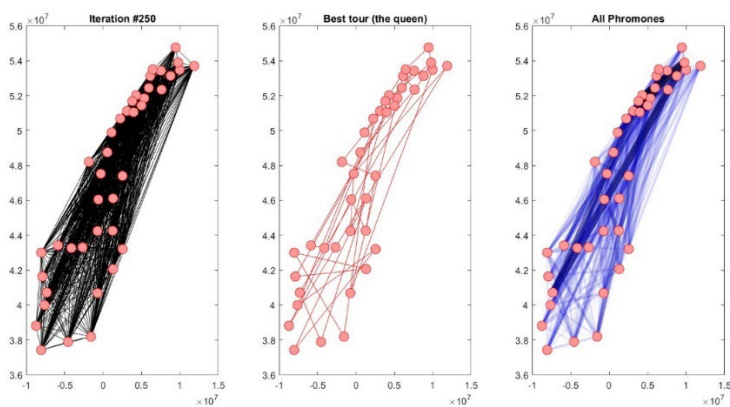


Figura 17. Ruta óptima en tiempo obtenida con ACO para transporte multimodal

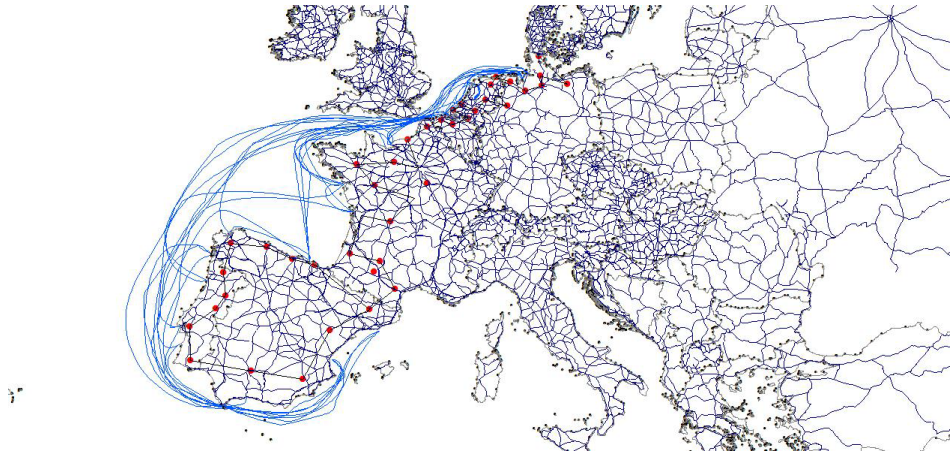


Figura 18. Ruta óptima en tiempo obtenida por ACO para transporte multimodal

nodo inicial	nodo inicial	nodo final	nodo final	Tiempo (h)
FRI3	Poitou-Charentes	ES61	Andalucía	79,80
ES61	Andalucía	PT18	Alentejo	34,16
PT18	Alentejo	DE50	Bremen	27,70
DE50	Bremen	DE60	Hamburg	17,35
DE60	Hamburg	NL34	Zeeland	28,96
NL34	Zeeland	FRD2	Haute-Normandie	26,51
FRD2	Haute-Normandie	NL33	Zuid-Holland	27,73
NL33	Zuid-Holland	FRI1	Aquitaine	60,28
FRI1	Aquitaine	FRG0	Pays de la Loire	30,86
FRG0	Pays de la Loire	DE80	Mecklenburg-Vorpommern	86,48
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	ES21	País Vasco	70,99
ES21	País Vasco	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	53,79
PT17	Área Metropolitana de Lisboa	FRJ2	Midi-Pyrénées	72,26
FRJ2	Midi-Pyrénées	FRI2	Limousin	47,80
FRI2	Limousin	FRF2	Champagne-Ardenne	46,70
FRF2	Champagne-Ardenne	FRH0	Bretagne	48,23
FRH0	Bretagne	DE94	Weser-Ems	69,71
DE94	Weser-Ems	BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	31,83
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	BE25	Prov. West-Vlaanderen	19,92
BE25	Prov. West-Vlaanderen	ES13	Cantabria	53,09

Implementación

ES13	Cantabria	ES12	Principado de Asturias	31,71
ES12	Principado de Asturias	BE21	Prov. Antwerpen	56,83
BE21	Prov. Antwerpen	NL32	Noord-Holland	25,05
NL32	Noord-Holland	PT11	Norte	79,68
PT11	Norte	ES51	Cataluña	71,49
ES51	Cataluña	ES11	Galicia	76,21
ES11	Galicia	ES62	Región de Murcia	69,68
ES62	Región de Murcia	FRE1	Nord-Pas de Calais	110,17
FRE1	Nord-Pas de Calais	NL11	Groningen	32,51
NL11	Groningen	DEF0	Schleswig-Holstein	19,59
DEF0	Schleswig-Holstein	DE93	Lüneburg	18,08
DE93	Lüneburg	ES52	Comunitat Valenciana	30,84
ES52	Comunitat Valenciana	NL41	Noord-Brabant	113,73
NL41	Noord-Brabant	NL12	Friesland (NL)	26,98
NL12	Friesland (NL)	DEA1	Düsseldorf	28,82
DEA1	Düsseldorf	FRD1	Basse-Normandie	29,14
FRD1	Basse-Normandie	PT16	Centro (PT)	57,18
PT16	Centro (PT)	FRJ1	Languedoc-Roussillon	61,55
FRJ1	Languedoc-Roussillon	PT15	Algarve	61,55
PT15	Algarve	FRI3	Poitou-Charentes	60,88

Tabla 20. Nodos seleccionados por ACO para la ruta óptima en tiempo para el transporte multimodal

Debido a que no se ha impuesto ninguna restricción de tiempo ni frecuencia, el algoritmo encuentra una ruta en la que se visitan los 40 nodos (NUTS). La ruta que lleva menos tiempo es la que comienza en la NUT PT15 (Lisboa) y recorre todas las demás NUTS en el orden que se muestra en la Tabla 20. En cambio, en el caso de la búsqueda de la ruta de menor coste, sólo consigue rutas donde se visitan 20 nodos y que, además, sean circulares.

En el caso del transporte por carretera la ruta óptima obtenida para un coste mínimo se puede ver en Figura 19 y Tabla 21.

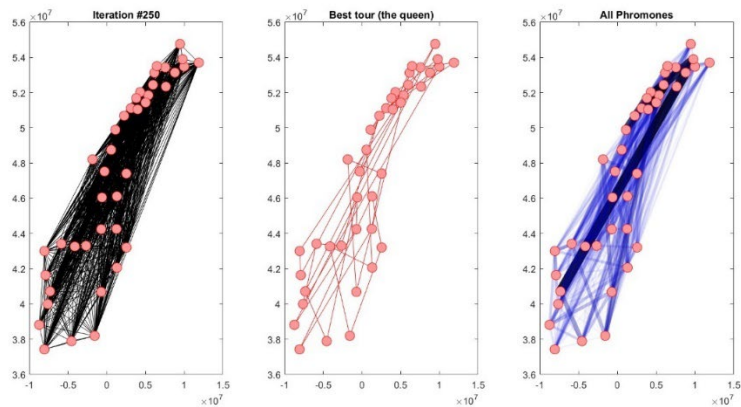


Figura 19. Ruta óptima en coste obtenida por ACO para transporte por carretera

nodo inicial	nodo inicial	nodo final	nodo final	Coste unitario (€/t)
DE50	Bremen	DE60	Hamburg	6,75
DE60	Hamburg	NL33	Zuid-Holland	8,66
NL33	Zuid-Holland	NL34	Zeeland	7,22
NL34	Zeeland	FRD2	Haute-Normandie	64,74
FRD2	Haute-Normandie	NL32	Noord-Holland	6,14
NL32	Noord-Holland	BE21	Prov. Antwerpen	6,47
BE21	Prov. Antwerpen	NL11	Groningen	21,17
NL11	Groningen	DE94	Weser-Ems	2,36
DE94	Weser-Ems	DE80	Mecklenburg-Vorpommern	1,54
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	BE25	Prov. West-Vlaanderen	7,67
BE25	Prov. West-Vlaanderen	DE93	Lüneburg	7,02
DE93	Lüneburg	PT16	Centro (PT)	2,49
PT16	Centro (PT)	ES12	Principado de Asturias	25,55
ES12	Principado de Asturias	ES21	País Vasco	2,57
ES21	País Vasco	FRE1	Nord-Pas de Calais	13,66
FRE1	Nord-Pas de Calais	FRG0	Pays de la Loire	4,63
FRG0	Pays de la Loire	DEF0	Schleswig-Holstein	8,61
DEF0	Schleswig-Holstein	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	14,97

Implementación

PT17	Área Metropolitana de Lisboa	FRI1	Aquitaine	2,26
FRI1	Aquitaine	FRJ2	Midi-Pyrénées	2,28
FRJ2	Midi-Pyrénées	ES61	Andalucía	13,48
ES61	Andalucía	PT18	Alentejo	2,20
PT18	Alentejo	BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	24,03
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	NL41	Noord-Brabant	1,76
NL41	Noord-Brabant	ES11	Galicia	16,74
ES11	Galicia	PT11	Norte	0,93
PT11	Norte	FRD1	Basse-Normandie	1,48
FRD1	Basse-Normandie	ES51	Cataluña	8,46
ES51	Cataluña	ES13	Cantabria	2,92
ES13	Cantabria	ES62	Región de Murcia	14,18
ES62	Región de Murcia	FRJ1	Languedoc-Roussillon	5,07
FRJ1	Languedoc-Roussillon	FRI3	Poitou-Charentes	1,93
FRI3	Poitou-Charentes	PT15	Algarve	15,19
PT15	Algarve	FRI2	Limousin	11,90
FRI2	Limousin	FRF2	Champagne-Ardenne	3,19
FRF2	Champagne-Ardenne	FRH0	Bretagne	1,00
FRH0	Bretagne	ES52	Comunitat Valenciana	3,68
ES52	Comunitat Valenciana	NL12	Friesland (NL)	18,11
NL12	Friesland (NL)	DEA1	Düsseldorf	0,05
DEA1	Düsseldorf	DE50	Bremen	0,65

Tabla 21. Nodos seleccionados por ACO para la ruta óptima por coste en transporte por carretera

Para el caso de la ruta óptima por tiempo en el modo transporte por carretera tendríamos los resultados que se muestran en la Figura 20 y Tabla 20.

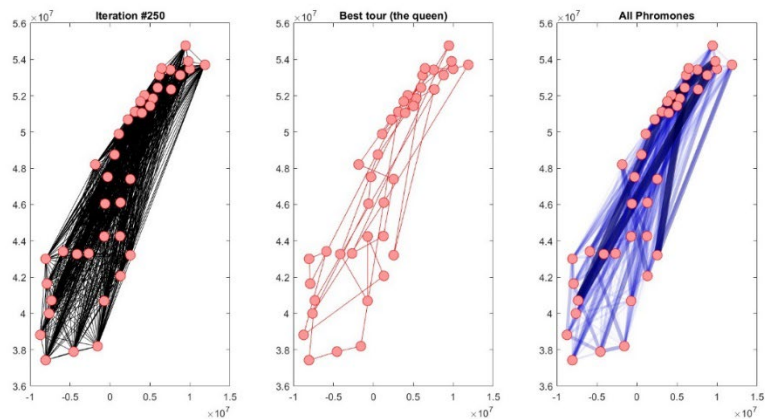


Figura 20. Ruta óptima por tiempo obtenida en tiempo por ACO para transporte por carretera

nodo inicial	nodo inicial	nodo final	nodo final	Tiempo (h)
FRG0	Pays de la Loire	NL12	Friesland (NL)	8,93
NL12	Friesland (NL)	BE21	Prov. Antwerpen	3,25
BE21	Prov. Antwerpen	NL32	Noord-Holland	2,33
NL32	Noord-Holland	NL33	Zuid-Holland	1
NL33	Zuid-Holland	FRH0	Bretagne	7,68
FRH0	Bretagne	FRF2	Champagne-Ardenne	2,93
FRF2	Champagne-Ardenne	FRI2	Limousin	5,38
FRI2	Limousin	ES21	País Vasco	4,45
ES21	País Vasco	DEF0	Schleswig-Holstein	18,83
DEF0	Schleswig-Holstein	DE94	Weser-Ems	2,08
DE94	Weser-Ems	FRE1	Nord-Pas de Calais	6,88
FRE1	Nord-Pas de Calais	BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	1,38
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	FRD2	Haute-Normandie	3,55
FRD2	Haute-Normandie	NL34	Zeeland	5,56
NL34	Zeeland	DE60	Hamburg	4,83
DE60	Hamburg	DE50	Bremen	1,45
DE50	Bremen	PT18	Alentejo	25
PT18	Alentejo	PT15	Algarve	2,68
PT15	Algarve	ES61	Andalucía	3,53
ES61	Andalucía	ES62	Región de Murcia	4,25
ES62	Región de Murcia	BE25	Prov. West-Vlaanderen	18,03
BE25	Prov. West-Vlaanderen	PT11	Norte	17,11
PT11	Norte	ES11	Galicia	2,43

Implementación

ES11	Galicia	ES12	Principado de Asturias	3,75
ES12	Principado de Asturias	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	7,56
PT17	Área Metropolitana de Lisboa	ES51	Cataluña	10,15
ES51	Cataluña	FRI1	Aquitaine	6
FRI1	Aquitaine	ES52	Comunitat Valenciana	8,08
ES52	Comunitat Valenciana	ES13	Cantabria	7,38
ES13	Cantabria	FRD1	Basse-Normandie	11,03
FRD1	Basse-Normandie	NL41	Noord-Brabant	6,66
NL41	Noord-Brabant	DEA1	Düsseldorf	2,43
DEA1	Düsseldorf	FRJ1	Languedoc-Roussillon	12,46
FRJ1	Languedoc-Roussillon	NL11	Groningen	13,65
NL11	Groningen	DE93	Lüneburg	3,26
DE93	Lüneburg	DE80	Mecklenburg-Vorpommern	2,68
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	FRI3	Poitou-Charentes	16,3
FRI3	Poitou-Charentes	PT16	Centro (PT)	11
PT16	Centro (PT)	FRJ2	Midi-Pyrénées	17,28
FRJ2	Midi-Pyrénées	FRG0	Pays de la Loire	0,66

Tabla 22. Nodos seleccionados por ACO para una ruta óptima por tiempo para transporte por carretera

En ambos casos el heurístico encuentra una ruta de coste mínimo que conecta todos los nodos, al igual que una ruta de tiempo mínimo para todos los nodos. Sin embargo, la resolución del TSP por carretera no resulta realista puesto que no existirá una única empresa con una flota de camiones que realice una ruta tan larga, sino diferentes transportistas realizando el transporte de la mercancía en los diferentes tramos.

El método heurístico aquí planteado obtiene rutas únicas, tanto en el caso de transporte multimodal como en el del transporte por carretera. El algoritmo busca la ruta óptima en cuanto a coste o a tiempo que conecte todos los nodos, lo que da lugar a rutas que visitan 20 puertos (y sus correspondientes NUTS) en el caso multimodal, y 40 NUTS en el caso del transporte por carretera. En el método propuesto no se han incorporado ningún tipo de penalización en cuanto al número de nodos visitados por ruta ni tampoco por tiempo o capacidad del vehículo, por lo que los resultados no son demasiado realistas en ninguno de los modos de transporte seleccionados.

Con este método se obtendrían resultados más válidos si se empleasen un número más reducido de nodos, pero, para una implementación como la planteada en este trabajo, sería necesario un desarrollo específico para incorporar las limitaciones o condicionantes de las rutas multimodales.

6.2. Rutas óptimas obtenidas con la programación lineal entera mixta (MILP)

6.2.1. Rutas óptimas con el movimiento de contenedores en los puertos en base a los datos publicados por las autoridades portuarias

Las condiciones de contorno impuestas al algoritmo en este caso fueron la capacidad del buque (Tabla 18), la velocidad, el coste del chárter y el número de contenedores a mover por puerto (ver Tabla 7).

Los nodos seleccionados con estas condiciones se pueden ver en Tabla 23 (caso 1). El MILP está resolviendo el problema del VRP, es decir, busca la ruta de mínimo coste que permita visitar todos los nodos. Debido a que no se obtiene una única ruta, sino subrutas desconectadas, no podemos hablar de un TSP de forma estricta, sino de una variante de éste. Por ser una aproximación a un TSP, la salida del algoritmo (Tabla 23) son los 80 nodos visitados al menos una vez formando rutas circulares, aunque no una única ruta circular.

nodo inicial	nodo inicial	puerto O	puerto O	nodo final	nodo final	puerto D	puerto D
BE21	Prov. Antwerpen	253	Amberes	BE25	Prov. West-Vlaanderen	235	Dunkerque
BE21	Prov. Antwerpen	253	Amberes	ES13	Cantabria	163	Bilbao
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	253	Amberes	BE25	Prov. West-Vlaanderen	235	Dunkerque
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	253	Amberes	ES21	País Vasco	163	Bilbao
DE50	Bremen	245	Bremerhaven	ES12	Principado de Asturias	285	A Coruña
DE50	Bremen	245	Bremerhaven	FRD1	Basse-Normandie	268	Calais
DE60	Hamburg	1069	Hamburgo	NL32	Noord-Holland	218	Amsterdam
DE60	Hamburg	1069	Hamburgo	PT18	Alentejo	61	Algeciras
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	1069	Hamburgo	ES11	Galicia	288	Vigo
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	1069	Hamburgo	FR11	Aquitaine	283	La Rochelle
DE93	Lüneburg	1069	Hamburgo	NL12	Friesland (NL)	218	Amsterdam
DE93	Lüneburg	1069	Hamburgo	NL32	Noord-Holland	218	Amsterdam
DE94	Weser-Ems	245	Bremerhaven	ES12	Principado de Asturias	285	A Coruña
DE94	Weser-Ems	245	Bremerhaven	FRD1	Basse-Normandie	268	Calais
DEA1	Düsseldorf	253	Amberes	ES11	Galicia	288	Vigo
DEA1	Düsseldorf	253	Amberes	FRH0	Bretagne	283	La Rochelle
DEF0	Schleswig-Holstein	1069	Hamburgo	ES13	Cantabria	163	Bilbao

Implementación

DEF0	Schleswig-Holstein	1069	Hamburgo	ES21	País Vasco	163	Bilbao
ES51	Cataluña	1063	Barcelona	ES52	Comunitat Valenciana	1064	Valencia
ES51	Cataluña	1063	Barcelona	PT18	Alentejo	1065	Sines
ES52	Comunitat Valenciana	1064	Valencia	PT15	Algarve	1065	Sines
ES61	Andalucía	61	Algeciras	FRG0	Pays de la Loire	282	Saint Nazaire
ES61	Andalucía	61	Algeciras	PT11	Norte	111	Oporto
ES62	Región de Murcia	1064	Valencia	FRG0	Pays de la Loire	282	Saint Nazaire
ES62	Región de Murcia	1064	Valencia	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	294	Lisboa
FRD2	Haute-Normandie	269	Le Havre	FRH0	Bretagne	283	La Rochelle
FRD2	Haute-Normandie	269	Le Havre	FRI3	Poitou-Charentes	283	La Rochelle
FRE1	Nord-Pas de Calais	220	Zeebrugge	FRI1	Aquitaine	283	La Rochelle
FRE1	Nord-Pas de Calais	220	Zeebrugge	FRI3	Poitou-Charentes	283	La Rochelle
FRJ1	Languedoc-Roussillon	1063	Barcelona	FRJ2	Midi-Pyrénées	283	La Rochelle
FRJ1	Languedoc-Roussillon	1063	Barcelona	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	294	Lisboa
FRF2	Champagne-Ardenne	269	Le Havre	FRJ2	Midi-Pyrénées	283	La Rochelle
FRF2	Champagne-Ardenne	269	Le Havre	NL12	Friesland (NL)	218	Amsterdam
FRI2	Limousin	269	Le Havre	FRG0	Pays de la Loire	283	La Rochelle
FRI2	Limousin	269	Le Havre	FRH0	Bretagne	282	Saint Nazaire
NL11	Groningen	245	Bremerhaven	FRI1	Aquitaine	275	Brest
NL11	Groningen	245	Bremerhaven	FRI2	Limousin	275	Brest
NL33	Zuid-Holland	250	Rotterdam	PT18	Alentejo	1065	Sines
NL33	Zuid-Holland	250	Rotterdam	NL11	Groningen	218	Amsterdam
NL34	Zeeland	250	Rotterdam	PT11	Norte	111	Oporto
NL34	Zeeland	250	Rotterdam	PT16	Centro (PT)	111	Oporto
NL41	Noord-Brabant	253	Amberes	PT15	Algarve	1065	Sines
NL41	Noord-Brabant	253	Amberes	PT16	Centro (PT)	111	Oporto
BE21	Prov. Antwerpen	250	Rotterdam	FRE1	Nord-Pas de Calais	235	Dunkerque
BE21	Prov. Antwerpen	250	Rotterdam	FRF2	Champagne-Ardenne	235	Dunkerque
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	220	Zeebrugge	ES12	Principado de Asturias	163	Bilbao

BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	220	Zeebrugge	FRJ2	Midi-Pyrénées	163	Bilbao
BE25	Prov. West-Vlaanderen	220	Zeebrugge	FRD1	Basse-Normandie	269	Le Havre
BE25	Prov. West-Vlaanderen	220	Zeebrugge	PT18	Alentejo	61	Algeciras
DE50	Bremen	1069	Hamburgo	ES12	Principado de Asturias	163	Bilbao
DE50	Bremen	1069	Hamburgo	NL11	Groningen	218	Amsterdam
DE60	Hamburg	245	Bremerhaven	ES61	Andalucía	297	Cádiz
DE60	Hamburg	245	Bremerhaven	FRD2	Haute-Normandie	271	Caen
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	245	Bremerhaven	ES11	Galicia	285	A Coruña
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	245	Bremerhaven	ES13	Cantabria	285	A Coruña
DE93	Lüneburg	245	Bremerhaven	FRI1	Aquitaine	275	Brest
DE93	Lüneburg	245	Bremerhaven	FRI2	Limousin	275	Brest
DE94	Weser-Ems	1069	Hamburgo	FRE1	Nord-Pas de Calais	235	Dunkerque
DE94	Weser-Ems	1069	Hamburgo	FRF2	Champagne-Ardenne	235	Dunkerque
DEA1	Düsseldorf	245	Bremerhaven	ES11	Galicia	285	A Coruña
DEA1	Düsseldorf	245	Bremerhaven	ES13	Cantabria	285	A Coruña
DEF0	Schleswig-Holstein	245	Bremerhaven	ES61	Andalucía	297	Cádiz
DEF0	Schleswig-Holstein	245	Bremerhaven	PT11	Norte	288	Vigo
ES21	País Vasco	1063	Barcelona	FRD2	Haute-Normandie	271	Caen
ES21	País Vasco	1063	Barcelona	FRH0	Bretagne	282	Saint Nazaire
ES51	Cataluña	1064	Valencia	ES62	Región de Murcia	462	Málaga
ES51	Cataluña	1064	Valencia	FRI3	Poitou-Charentes	282	Saint Nazaire
ES52	Comunitat Valenciana	1063	Barcelona	ES62	Región de Murcia	462	Málaga
ES52	Comunitat Valenciana	1063	Barcelona	FRI3	Poitou-Charentes	282	Saint Nazaire
FRD1	Basse-Normandie	269	Le Havre	FRG0	Pays de la Loire	283	La Rochelle
FRJ1	Languedoc-Roussillon	1064	Valencia	FRJ2	Midi-Pyrénées	163	Bilbao
FRJ1	Languedoc-Roussillon	1064	Valencia	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	297	Cádiz
NL12	Friesland (NL)	250	Rotterdam	PT11	Norte	288	Vigo
NL12	Friesland (NL)	250	Rotterdam	PT16	Centro (PT)	294	Lisboa
NL32	Noord-Holland	253	Amberes	NL34	Zeeland	218	Amsterdam
NL32	Noord-Holland	253	Amberes	NL41	Noord-Brabant	218	Amsterdam

Implementación

NL33	Zuid-Holland	220	Zeebrugge	NL34	Zeeland	218	Amsterdam
NL33	Zuid-Holland	220	Zeebrugge	NL41	Noord-Brabant	218	Amsterdam
PT15	Algarve	61	Algeciras	PT16	Centro (PT)	294	Lisboa
PT15	Algarve	61	Algeciras	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	297	Cádiz

Tabla 23. Nodos seleccionados por MILP bajo las condiciones de las Tabla 7 y Tabla 18

El algoritmo no está forzado a formar una única ruta, sino a que todos los nodos formen parte, como mínimo, de un tramo como nodo de entrada y nodo de salida, por lo que se generan varias subrutas (ver Figura 21).

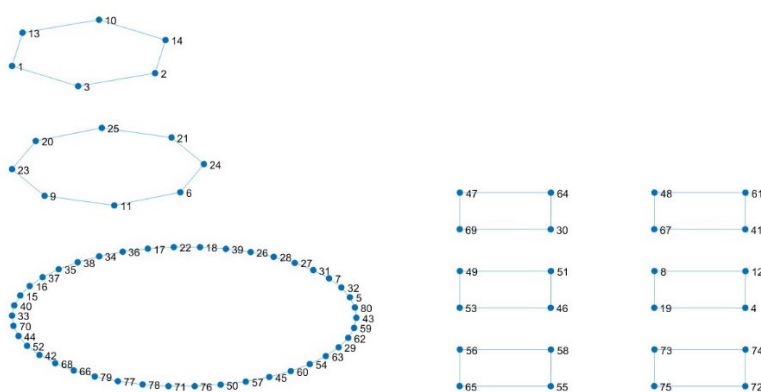


Figura 21. Subrutas generadas por el algoritmo MILP para el caso con las condiciones de contorno definidas en las Tabla 18 y Tabla 7

De entre estas subrutas, no todas son viables puesto que algunas de ellas solo consisten en la navegación entre dos mismos puertos, como es el caso de aquellas NUTS que comparten puerto de embarque/desembarque. Para el algoritmo son nodos distintos, pero en realidad sólo está describiendo una ruta que va de un puerto origen a otro de destino para la ida y en la vuelta los dos puertos vuelven a coincidir. Para prevenir que se formasen tramos absurdos, con el mismo puerto de origen y destino, sí que se ha forzado al algoritmo a que no genere tramos con nodos de inicio y fin que tengan el mismo puerto.

Por otro lado, no se ha incluido una limitación en el dimensionamiento de la flota, es decir, el algoritmo parte de la hipótesis de que hay un número ilimitado de buques disponibles. En este caso el dimensionamiento ha sido de entre 13 y 14 buques para dar respuesta al flujo de mercancía y la frecuencia, establecidas ambas como restricciones. Este número de buques serían los necesarios para cubrir todas las subrutas seleccionadas por el algoritmo, no sería el número de buques en cada subruta. Este

valor se determina en función del tiempo total empleado en el servicio completo de una subruta.

Se muestran a continuación un conjunto de subrutas totalmente viables y que cumplen con las restricciones impuestas en el algoritmo.

Ruta 1.1

Esta ruta abarca 4 puertos y conecta 5 NUTS en 3 países distintos (Tabla 24, Figura 22).

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Mecklenburg-Vorpommern	Hamburgo	Aquitaine	La Rochelle
Bretagne	La Rochelle	Düsseldorf	Amberes
Düsseldorf	Amberes	Galicia	Vigo
Galicia	Vigo	Mecklenburg-Vorpommern	Hamburgo

Tabla 24. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.1

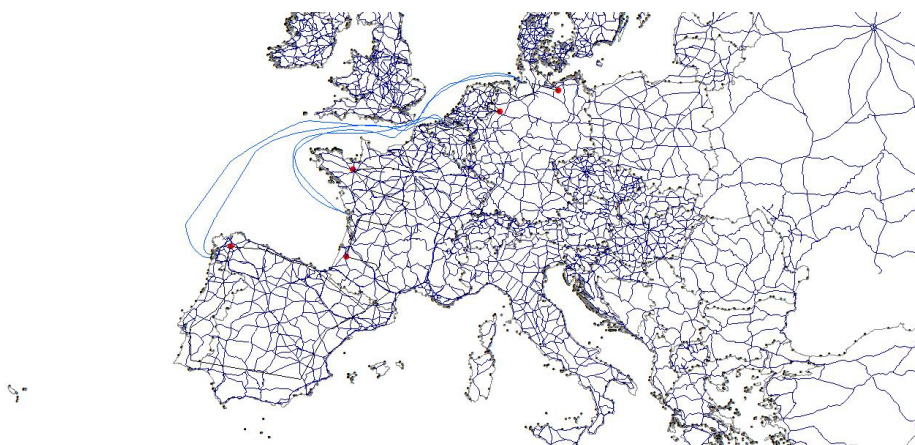


Figura 22. Representación en TransCAD de la ruta 1.1

Para esta ruta los valores de costes y tiempos se muestran en las Tabla 25 y Tabla 26. En la Tabla 25, además, se puede ver el flujo de mercancía entre las NUTS y el movimiento de contenedores en los puertos (Oferta), lo que da una idea de la capacidad que habría en cada puerto para dar salida al flujo de mercancía entre las NUTS.

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo/buque (\$)	Flujo (TEU)	Oferta (TEU)
DE80	1069	FRI1	283	1.376.636,79	95.209,72	145278	2267
FRH0	283	DEA1	253	1.611.632,73	80.523,70	144185	2267
DEA1	253	ES11	288	589.052,65	95.630,26	142393	1051
ES11	288	DE80	1069	565.702,00	110.612,87	142842	1051

Tabla 25. Nodos, puertos y costes asociados a la ruta 1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)
DE80	1069	FRI1	283	49,12	13,53	25,08
FRH0	283	DEA1	253	35,42	13,59	27,02
DEA1	253	ES11	288	45,49	10,84	11,84
ES11	288	DE80	1069	59,42	10,79	10,94

Tabla 26. Nodos, puertos y tiempos asociados a la ruta 1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18

En la bibliografía consultada no se realiza el plan de estiba para valorar la capacidad real del buque, ni se tiene en cuenta el nivel de ocupación que se puede alcanzar en dicho buque respetando sus condiciones de estabilidad. Por tanto, en este trabajo se va a aplicar el modelo de estiba para incorporar la restricciones debidas a la situación de carga del buque y, que en las soluciones expuestas al problema del VRP aplicado a rutas marítimas, se venía tratando de igual manera que el transporte terrestre, cuando tiene unos condicionantes muy específicos (<https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Stowage%20Algorithm/Formulacion%20adicional%20estiba.pdf>).

El modelo matemático de la estiba indica que el buque sólo puede cargar 1578 TEUs manteniendo intacta la estabilidad del mismo (Tabla 27 y Tabla 28).

Nº total de contenedores bajo cubierta	660
Nº total de contenedores sobre cubierta	918
Nº total de contenedores en el buque	1578

Tabla 27. Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.1

Desplazamiento (t)	28236
Tf (m)	9,28
Kgf (m)	8,26
Kb (m)	5,71
Trim (m)	-1,69

Tpp (m)	8,43
Tpr (m)	10,12
Angesc	-0,05
GM (m)	5,80

Tabla 28. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1578 TEUs

Una vez aplicada la restricción de la estabilidad del buque, los costes y tiempos de la ruta quedan como se muestra en las Tabla 29 y Tabla 30.

nodo inicial	nodo final	Flujo (TEUs)	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	TEUs/buque
DE80	FRI1	145278	49,12	13,53	17,46	80,11	1578
FRH0	DEA1	144185	35,42	13,59	18,81	67,81	1578
DEA1	ES11	142393	45,49	10,84	11,84	68,18	1051
ES11	DE80	142842	59,42	10,79	10,94	81,15	1051

Tabla 29. Tiempos para una flota de 2 buques en la ruta 1.1

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Coste Variable (\$)	Coste Fijo (\$)	Coste total (\$)
DE80	1069	FRI1	283	958.381	190.419	1.148.800
FRH0	283	DEA1	253	1.121.980	161.047	1.283.027
DEA1	253	ES11	288	589.052	191.260	780.313

Tabla 30. Coste para una flota de 2 buques en la ruta 1.1

El tiempo total de esta ruta son 297 horas, se necesitan dos buques para mantener una frecuencia semanal en cada puerto con cierta holgura (en promedio 22 horas). La capacidad del buque es inferior al movimiento de contenedores previsto en los dos primeros puertos, pero es superior para los dos últimos puertos con una ratio de ocupación del buque del 66%. Esto permitiría mover contenedores vacíos entre estos puertos.

Se podría emplear un buque de mayor porte para el transporte de todos los contenedores que se mueven en los dos primeros puertos, pero no se alcanzaría unas ratios de ocupación del buque razonables para los siguientes dos puertos.

Ruta 1.2

Esta ruta circular abarca 6 puertos y 8 NUTS de 4 países distintos (Tabla 31, Figura 23).

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Región de Murcia	Valencia	Pays de la Loire	Saint Nazaire
Pays de la Loire	Saint Nazaire	Andalucía	Algeciras
Andalucía	Algeciras	Norte	Oporto

Centro (PT)	Oporto	Noord-Brabant	Amberes
Noord-Brabant	Amberes	Algarve	Sines
Algarve	Sines	Comunitat Valenciana	Valencia

Tabla 31. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.2

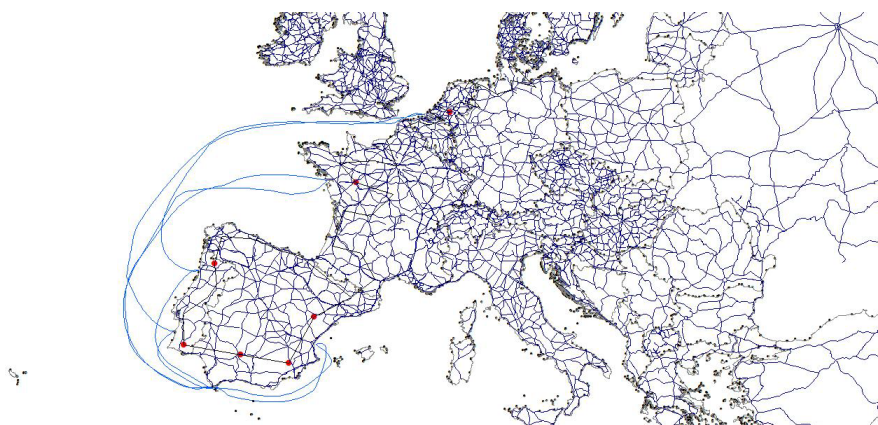


Figura 23. Representación en TransCAD de la ruta 1.2

Los resultados de coste y tiempo para esta ruta se pueden ver en las Tabla 32 y Tabla 33.

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo (\$)	Flujo (TEU)	Oferta (TEU)
ES62	1064	FRG0	282	513.627,74	334.857,29	135416	817
FRG0	282	ES61	61	535.749,71	297.431,90	115263	817
ES61	61	PT11	111	1.655.177,23	160.689,39	507158	2825
PT16	111	NL41	253	868.404,80	287.782,69	122073	2825
NL41	253	PT15	1065	2.831.594,20	333.818,25	142393	7083
PT15	1065	ES52	1064	2.653.023,48	216.024,69	141512	7083

Tabla 32. Nodos, puertos y costes asociados a la ruta 1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)
ES62	1064	FRG0	282	64,46	12,76	9,54
FRG0	282	ES61	61	53,94	13,76	9,27
ES61	61	PT11	111	16,42	8,21	32,37
PT16	111	NL41	253	49,48	10,27	35,71
NL41	253	PT15	1065	59,78	12,31	79,39
PT15	1065	ES52	1064	29,55	9,25	73,33

Tabla 33. Nodos, puertos y tiempos asociados a la ruta 1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y las condiciones del buque de la Tabla 18

El número máximo de contenedores que se pueden estibar en el buque sin comprometer su estabilidad es igual que en el caso anterior, por lo que, los valores finales asociados a esta ruta, en cuanto a costes y tiempos, quedan como se puede ver en las Tabla 34 y Tabla 35.

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Flujo (TEUs)	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	TEUs/buque
ES62	1064	FRG0	282	135416	64,46	12,76	9,54	86,76	817
FRG0	282	ES61	61	115263	53,94	13,76	9,27	76,97	817
ES61	61	PT11	111	507158	16,42	8,21	18,08	42,71	1578
PT16	111	NL41	253	122073	49,48	10,27	19,95	79,70	1578
NL41	253	PT15	1065	142393	59,78	12,31	17,69	89,78	1578
PT15	1065	ES52	1064	141512	29,55	9,25	16,34	55,13	1578

Tabla 34. Tiempos para una flota de dos buques en la ruta 1.2

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Coste Variable (\$)	Coste Fijo (\$)	Coste total (\$)
ES62	1064	FRG0	282	513.627	223.238	736.865
FRG0	282	ES61	61	535.749	198.287	734.037
ES61	61	PT11	111	924.468	107.126	1.031.594
PT16	111	NL41	253	485.031	191.855	676.886
NL41	253	PT15	1065	630.816	222.545	853.361
PT15	1065	ES52	1064	591.034	144.016	735.050

Tabla 35. Coste para una flota de dos buques en la ruta 1.2

El tiempo total de esta ruta son 431 horas, se necesitan 2 buque para tener una frecuencia semanal en cada puerto, con una holgura de 13 horas de media. La capacidad del buque es inferior al movimiento de contenedores previsto en 4 de los 6 puertos de la ruta, pero es superior para los dos primeros puertos con una ratio de ocupación del buque del 52%.

El método de programación lineal entera (MILP) obtiene un conjunto de rutas, y no una única ruta como en el caso del método heurístico (ACO). El conjunto de rutas son el resultado de buscar el coste mínimo cumpliendo con una serie de restricciones como son la restricción de tiempo (una semana) y la restricción de capacidad (número de contenedores que el buque puede transportar). En cambio, no se ha restringido el número de buques disponibles para transportar el flujo de mercancías entre nodos para que esta restricción no impidiese la convergencia del algoritmo, y éste pudiese encontrar alguna solución óptima.

6.2.2. Rutas óptimas con el movimiento de contenedores en puertos en base a los datos publicados por Eurostat

En este caso las condiciones de contorno son las mismas que en el caso anterior en cuanto a características del buque y nodos de la red (Tabla 18 y Tabla 5), pero el flujo de contenedores entre puertos va a tener como fuente Eurostat (caso 2). La matriz OD de flujo de mercancías entre puertos se puede ver <https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/PORT%20FLOWS.xlsx>. En esta matriz se puede observar que existen puertos en los que no consta que exista intercambio comercial entre ellos. Para que el algoritmo los tenga en cuenta se ha estimado un flujo mínimo de 15 TEUs entre ellos. Este valor se obtiene de la aplicación de la herramienta Buscar objetivo (herramientas Análisis de si) en Excel. Se estableció un precio para el transporte de un contenedor (container freight rate) de 850\$ y se buscó el número de contenedores que cubriesen los costes con ese precio (https://github.com/amunin/TESIS/blob/main/Data/COSTE_PUERTOS.xlsx).

nodo inicial	nodo inicial	puerto O	puerto O	nodo final	nodo final	puerto D	puerto D
BE21	Prov. Antwerpen	253	Amberes	NL33	Zuid-Holland	250	Rotterdam
BE21	Prov. Antwerpen	253	Amberes	BE21	Prov. Antwerpen	250	Rotterdam
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	253	Amberes	FRD1	Basse-Normandie	268	Calais
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	253	Amberes	FRE1	Nord-Pas de Calais	220	Zeebrugge
BE25	Prov. West-Vlaanderen	235	Dunkerque	BE21	Prov. Antwerpen	250	Rotterdam
BE25	Prov. West-Vlaanderen	235	Dunkerque	NL12	Friesland (NL)	250	Rotterdam
DE50	Bremen	245	Bremerhaven	PT11	Norte	111	Oporto
DE50	Bremen	245	Bremerhaven	BE25	Prov. West-Vlaanderen	220	Zeebrugge
DE60	Hamburg	1069	Hamburgo	FRF2	Champagne-Ardenne	269	Le Havre
DE60	Hamburg	1069	Hamburgo	NL33	Zuid-Holland	250	Rotterdam
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	1069	Hamburgo	FRE1	Nord-Pas de Calais	235	Dunkerque

DE80	Mecklenburg-Vorpommern	1069	Hamburgo	FRF2	Champagne-Ardenne	235	Dunkerque
DE93	Lüneburg	1069	Hamburgo	FRF2	Champagne-Ardenne	269	Le Havre
DE93	Lüneburg	1069	Hamburgo	FRI2	Limousin	269	Le Havre
DE94	Weser-Ems	245	Bremerhaven	PT16	Centro (PT)	111	Oporto
DE94	Weser-Ems	245	Bremerhaven	BE25	Prov. West-Vlaanderen	220	Zeebrugge
DEA1	Düsseldorf	253	Amberes	FRE1	Nord-Pas de Calais	220	Zeebrugge
DEA1	Düsseldorf	253	Amberes	NL33	Zuid-Holland	220	Zeebrugge
DEF0	Schleswig-Holstein	1069	Hamburgo	FRI2	Limousin	269	Le Havre
DEF0	Schleswig-Holstein	1069	Hamburgo	FRD1	Basse-Normandie	269	Le Havre
ES11	Galicia	288	Vigo	PT15	Algarve	1065	Sines
ES11	Galicia	288	Vigo	ES13	Cantabria	285	A Coruña
ES12	Principado de Asturias	285	A Coruña	ES12	Principado de Asturias	163	Bilbao
ES12	Principado de Asturias	285	A Coruña	FRJ2	Midi-Pyrénées	163	Bilbao
ES13	Cantabria	163	Bilbao	FRH0	Bretagne	283	La Rochelle
ES13	Cantabria	163	Bilbao	FRJ2	Midi-Pyrénées	283	La Rochelle
ES21	País Vasco	163	Bilbao	FRG0	Pays de la Loire	282	Saint Nazaire
ES21	País Vasco	163	Bilbao	FRJ2	Midi-Pyrénées	283	La Rochelle
ES51	Cataluña	1063	Barcelona	ES52	Comunitat Valenciana	1064	Valencia
ES51	Cataluña	1063	Barcelona	ES62	Región de Murcia	1064	Valencia
ES52	Comunitat Valenciana	1064	Valencia	FRJ1	Languedoc-Roussillon	1063	Barcelona
ES61	Andalucía	61	Algeciras	FRJ1	Languedoc-Roussillon	1063	Barcelona
ES61	Andalucía	61	Algeciras	ES52	Comunitat Valenciana	1063	Barcelona
ES62	Región de Murcia	1064	Valencia	PT16	Centro (PT)	294	Lisboa
FRD1	Basse-Normandie	268	Calais	NL41	Noord-Brabant	253	Amberes
FRD2	Haute-Normandie	269	Le Havre	DE50	Bremen	1069	Hamburgo
FRD2	Haute-Normandie	269	Le Havre	DE94	Weser-Ems	1069	Hamburgo
FRG0	Pays de la Loire	282	Saint Nazaire	FRI3	Poitou-Charentes	283	La Rochelle
FRH0	Bretagne	283	La Rochelle	FRI1	Aquitaine	275	Brest
FRI1	Aquitaine	283	La Rochelle	FRI3	Poitou-Charentes	282	Saint Nazaire
FRI1	Aquitaine	283	La Rochelle	FRI2	Limousin	275	Brest
FRI3	Poitou-Charentes	283	La Rochelle	FRI3	Poitou-Charentes	282	Saint Nazaire
NL11	Groningen	245	Bremerhaven	NL12	Friesland (NL)	218	Amsterdam
NL11	Groningen	245	Bremerhaven	NL32	Noord-Holland	218	Amsterdam
NL12	Friesland (NL)	218	Amsterdam	DE60	Hamburg	245	Bremerhaven

Implementación

NL32	Noord-Holland	218	Amsterdam	DE80	Mecklenburg-Vorpommern	245	Bremerhaven
NL34	Zeeland	250	Rotterdam	FRE1	Nord-Pas de Calais	235	Dunkerque
NL34	Zeeland	250	Rotterdam	FRH0	Bretagne	282	Saint Nazaire
NL41	Noord-Brabant	253	Amberes	BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	220	Zeebrugge
PT11	Norte	111	Oporto	DEF0	Schleswig-Holstein	245	Bremerhaven
PT15	Algarve	1065	Sines	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	294	Lisboa
PT16	Centro (PT)	111	Oporto	DEF0	Schleswig-Holstein	245	Bremerhaven
PT17	Área Metropolitana de Lisboa	294	Lisboa	PT18	Alentejo	1065	Sines
PT18	Alentejo	1065	Sines	ES21	País Vasco	1063	Barcelona
BE23	Prov. Oost-Vlaanderen	220	Zeebrugge	NL32	Noord-Holland	253	Amberes
DE50	Bremen	1069	Hamburgo	FRD1	Basse-Normandie	269	Le Havre
DE60	Hamburg	245	Bremerhaven	NL34	Zeeland	218	Amsterdam
DE80	Mecklenburg-Vorpommern	245	Bremerhaven	NL34	Zeeland	218	Amsterdam
DE93	Lüneburg	245	Bremerhaven	NL11	Groningen	218	Amsterdam
DE93	Lüneburg	245	Bremerhaven	NL41	Noord-Brabant	218	Amsterdam
DE94	Weser-Ems	1069	Hamburgo	FRF2	Champagne-Ardenne	235	Dunkerque
DEA1	Düsseldorf	245	Bremerhaven	NL11	Groningen	218	Amsterdam
DEA1	Düsseldorf	245	Bremerhaven	NL41	Noord-Brabant	218	Amsterdam
ES11	Galicia	285	A Coruña	ES12	Principado de Asturias	163	Bilbao
ES11	Galicia	285	A Coruña	FRJ2	Midi-Pyrénées	163	Bilbao
ES13	Cantabria	285	A Coruña	PT11	Norte	288	Vigo
ES21	País Vasco	1063	Barcelona	ES62	Región de Murcia	462	Málaga
ES51	Cataluña	1064	Valencia	ES61	Andalucía	297	Cádiz
ES51	Cataluña	1064	Valencia	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	297	Cádiz
ES52	Comunitat Valenciana	1063	Barcelona	PT15	Algarve	61	Algeciras
ES61	Andalucía	297	Cádiz	FRJ1	Languedoc-Roussillon	1064	Valencia
ES62	Región de Murcia	462	Málaga	PT18	Alentejo	61	Algeciras
FRD2	Haute-Normandie	271	Caen	PT15	Algarve	61	Algeciras
FRD2	Haute-Normandie	271	Caen	PT18	Alentejo	61	Algeciras
FRG0	Pays de la Loire	283	La Rochelle	FRI1	Aquitaine	275	Brest

FRG0	Pays de la Loire	283	La Rochelle	FRI2	Limousin	275	Brest
FRH0	Bretagne	282	Saint Nazaire	NL12	Friesland (NL)	250	Rotterdam
FRJ1	Languedoc-Roussillon	1064	Valencia	PT17	Área Metropolitana de Lisboa	297	Cádiz
NL32	Noord-Holland	253	Amberes	NL33	Zuid-Holland	220	Zeebrugge
PT11	Norte	288	Vigo	PT16	Centro (PT)	294	Lisboa

Tabla 36. Nodos seleccionados por MILP bajo las condiciones del apartado 4 y la Tabla 18

En base a esto el algoritmo vuelve a obtener varias subrutas al tratar de resolver el problema de optimización de rutas (VRP). En este caso tampoco se le fuerza a que genera una única ruta.

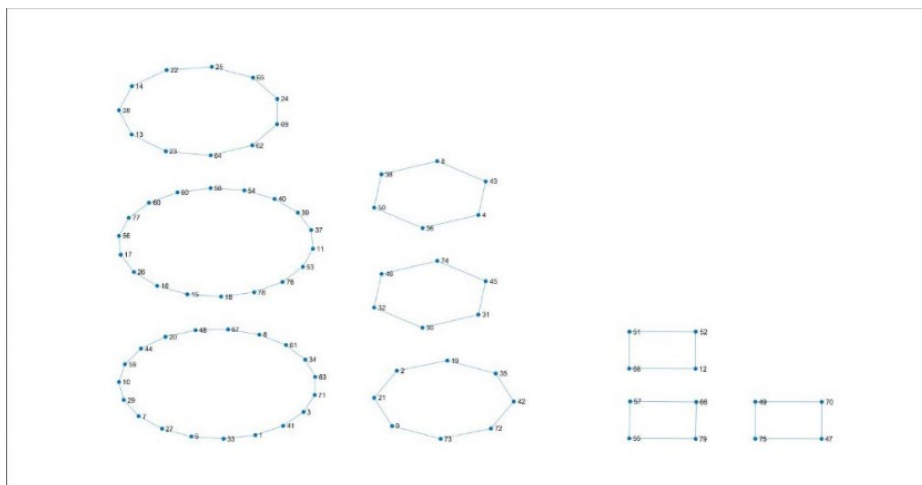


Figura 24. Subrutas generadas por el algoritmo MILP para el caso con las condiciones de contorno definidas en las y el apartado

Se muestran a continuación algunas de la subrutas generadas. La gran diferencia con el caso anterior es que las rutas obtenidas no conectan puertos entre el norte y el sur de Europa, sino que son rutas más cortas que conectan países vecinos.

Ruta 2.1

Esta ruta toca 4 puertos y conecta Francia con España (Tabla 37 y Figura 25).

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Cantabria	Bilbao	Bretagne	La Rochelle
Aquitaine	La Rochelle	Poitou-Charentes	Saint Nazaire
Pays de la Loire	Saint Nazaire	País Vasco	Bilbao

Tabla 37. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 2.1

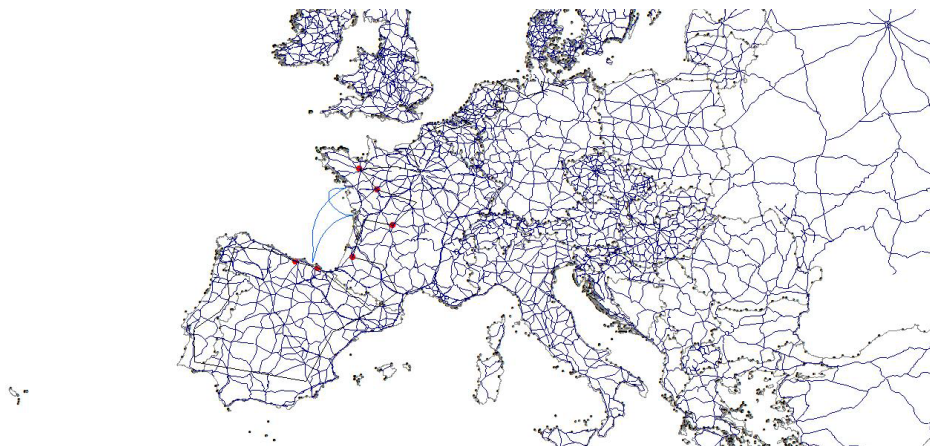


Figura 25. Representación en TransCAD de la ruta 2.1

Los resultados en coste y tiempos para esta ruta se pueden ver en las Tabla 38 y Tabla 39.

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo (\$)	Flujo (TEUs)	Oferta (TEUs)	Coste Total (\$)
ES13	163	FRH0	283	7.213,05	49.228,71	118488	12	56.441,76
FRI1	283	FRI3	282	8.780,95	45.099,15	120126	13	53.880,10
FRGO	282	ES21	163	6.233,84	55.819,40	142393	14	62.053,24

Tabla 38. Coste para un buque en la ruta 2.1

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Navegación(h)	Tiempo Puerto(h)	Tiempo CD(h)	Tiempo total (h)
ES13	163	FRH0	283	9,64	11,71	1,01	22,35
FRI1	283	FRI3	282	5,64	14,18	1,01	20,84
FRGO	282	ES21	163	13,68	13,17	1,28	28,13

Tabla 39. Tiempos para un buque en la ruta 2.1

El tiempo total de esta ruta es de 71,3 horas (Tabla 39 y Figura 26), teniendo en cuenta esto y el número de contenedores a mover por puerto solo se necesitaría un buque. El buque propuesto en la Tabla 18 está claramente sobredimensionado. Por otro lado, el flujo entre los puertos no responde a la demanda de mercancía que hay entre las NUTS. El algoritmo escoge los puertos con menor movimiento de contenedores, lo que implica un menor coste variable y, por tanto, un menor coste total. Flexibiliza la restricción correspondiente a la satisfacción de la demanda (flujo de mercancías entre NUTS) que se corresponde con la restricción 2.

Ruta 2.2

Esta ruta visita 5 puertos y conecta 9 NUTS.

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Languedoc-Roussillon	Barcelona	Comunitat Valenciana	Valencia
Región de Murcia	Valencia	Centro (PT)	Lisboa
Centro (PT)	Lisboa	Norte	Vigo
Galicia	Vigo	Algarve	Sines
Alentejo	Sines	País Vasco	Barcelona

Tabla 40. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 2.2

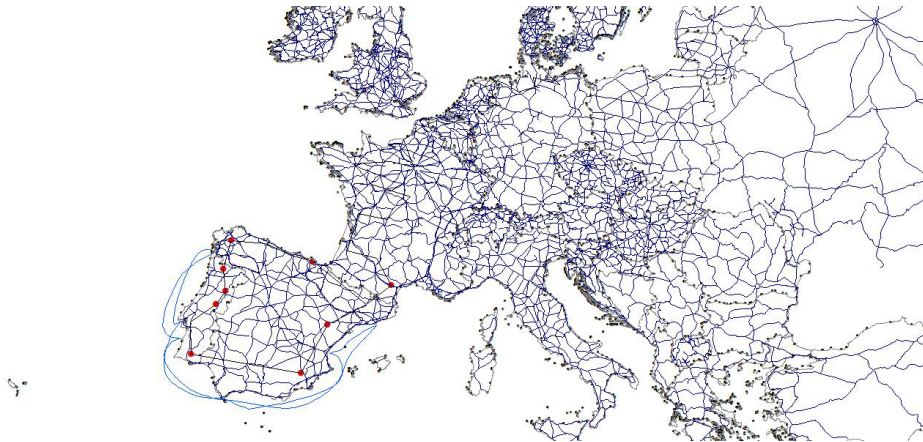


Figura 26. Representación en TransCAD de la ruta 2.2

Los costes asociados a la ruta y sus tiempos se pueden ver en las Tabla 41 y Tabla 42.

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo (\$)	Flujo (TEUs)	Oferta (TEUs)	Coste Total (\$)
FRJ1	1063	ES52	1064	54.714	326.396	117769	95	381.111
ES62	1064	PT16	294	16.895	72.035	191087	21	88.930
PT16	294	PT11	288	8.358	54.343	507158	10	62.702
ES11	288	PT15	1065	8.472	57.716	114204	17	66.189
PT18	1065	ES21	1063	19.541	367.690	176842	19	387.231

Tabla 41. Coste para un buque en la ruta 2.2

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)
FRJ1	1063	ES52	1064	8,31	9,58	6,24	24,13
ES62	1064	PT16	294	31,76	8,46	1,41	41,63
PT16	294	PT11	288	11,44	9,96	0,68	22,07
ES11	288	PT15	1065	12,90	9,44	1,15	23,49
PT18	1065	ES21	1063	40,97	11,61	1,27	53,85

Tabla 42. Tiempos para un buque en la ruta 2.2

El tiempo total de esta ruta serían 165 horas, con un solo buque se mantienen las frecuencias de visitar cada puerto una vez a la semana. En esta ruta la capacidad del buque también supera ampliamente el movimiento de contenedores entre los puertos.

Ruta 2.3

Esta ruta visita solo 3 puertos y 5 NUTS en 3 países cercanos.

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Zuid-Holland	Rotterdam	Hamburgo	Hamburgo
Weser-Ems	Hamburgo	Champagne-Ardenne	Dunkerque
Prov. West-Vlaanderen	Dunkerque	Prov. Antwerpen	Rotterdam

Tabla 43. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 2.3

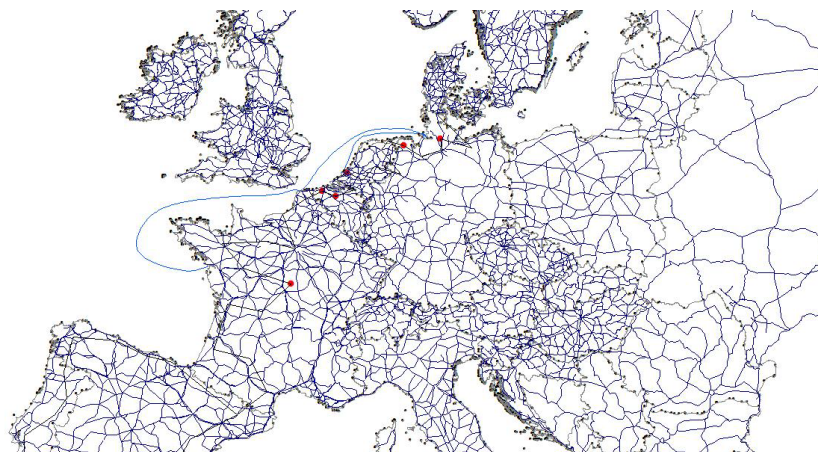


Figura 27. Representación en TransCAD de la ruta 2.3

Los costes asociados a esta ruta y los tiempos se muestran en las Tabla 44 y Tabla 45.

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo (\$)	Flujo (TEUs)	Oferta (TEUs)	Coste Total (\$)
NL33	250	DE60	1069	21.398	63.412	192446	156	84.811
DE94	1069	FRF2	235	10.863	60.512	126451	15	71.375
BE25	235	BE21	250	12.443	51.855	142842	37	64.298

Tabla 44. Coste para un buque en la ruta 2.3

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)
NL33	250	DE60	1069	15,64	8,38	12,15	36,17
DE94	1069	FRF2	235	20,91	9,18	1,02	31,11
BE25	235	BE21	250	7,23	8,90	2,85	18,98

Tabla 45. Tiempos para un buque en la ruta 2.3

En este caso el tiempo total es de 86 horas, por lo que la frecuencia sería inferior a una semana empleando un solo buque.

El MILP con los datos de Eurostat ha seleccionado de forma preferente aquellas NUTS con puertos con el menor flujo de mercancía entre ellos, y especialmente, a aquellos a los que se le ha asignado un flujo mínimo de 15 TEUs. Este valor incluso es inferior en algunos casos porque el algoritmo aplica la eficiencia del puerto en el movimiento de contenedores.

Se observa claramente que el resultado del algoritmo está muy influenciado por las matrices OD de flujo de mercancías entre puertos y entre NUTS. En el caso anterior donde se empleaban los datos de las autoridades portuarias (apartado 6.2.1) para la matriz de OD entre puertos, las rutas que se obtenían conectaban mayoritariamente NUTS del norte de Europa con NUTS del sur. Mientras que, en este caso, las rutas que el algoritmo considera óptimas conectan NUTS de países cercanos. Debido a este resultado, se podría plantear para este caso una nueva restricción que hiciera referencia a la distancia mínima entre NUTS que queden conectadas por un mismo tramo. Esto forzaría al algoritmo a descartar tramos cuya distancia no supere ese límite inferior, de igual manera que se descartan tramos que unen diferentes NUTS pero que comparten un mismo puerto.

7. Análisis de sensibilidad

7.1. Variación de la velocidad

Los buques se diseñan para una determinada velocidad, pero esa velocidad de diseño no es a la que navegan habitualmente. Sobre todo, desde hace unos años donde se ha llegado a imponer el “low steaming”, es decir, la navegación a baja velocidad. El primero en aplicar este método fue Maersk en sus portacontenedores en el año 2009. En sus informes anuales posteriores (<https://investor.maersk.com/news-releases>) deja claro los beneficios de la navegación a baja velocidad, y comienza a incorporar a su flota buques capaces de navegar en este modo con motores principales diseñados para estas velocidades.

Los mayores beneficios del “slow steaming” son:

- Ahorro en el consumo de combustible
- Reducción de las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero: CO₂, NO_x, Sox)
- Mejora de la eficiencia
- Mejora de la fiabilidad

La navegación lenta ha ayudado a las navieras a mejorar su rendimiento, y a reducir su huella de carbono. Aunque cuestiones como el mayor tiempo para el transporte de la carga y los efectos negativos en los motores han preocupado a los armadores, los beneficios generales de esta estrategia han conseguido imponerla como práctica habitual no solo en portacontenedores sino en el resto de los buques. Lo ideal sería buscar la velocidad óptima en función del tipo de buque, el servicio requerido (frecuencia, flujos), el precio del flete por contenedor y el chárter del buque en cada momento (Psaraftis & Kontovas, 2014) pero esto puede resultar demasiado complejo para navieras u operadores de buques en su operativa diaria.

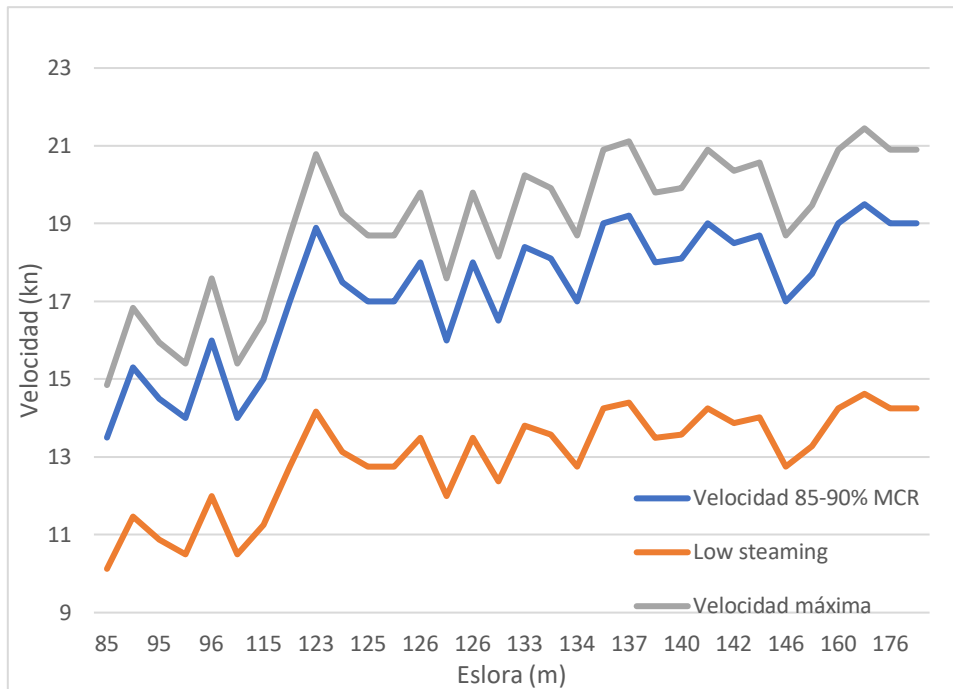


Figura 28. Velocidades de buques portacontenedores en función de la eslora

Se ha estimado una variación del $\pm 10\%$ en la velocidad del buque (Cariou, 2011) para obtener una velocidad asimilable al low steaming, por un lado, y una velocidad superior a la de diseño del buque, por otro (Figura 28).

En base a estas velocidades se ha realizado un análisis de cómo afecta un cambio de velocidad en la elección de nodos dentro de una ruta con el objetivo del coste mínimo. Para esto se ha empleado el algoritmo MILP del caso 1 con las condiciones expuestas en la Tabla 7 y la Tabla 18, es decir, el flujo en los puertos es el indicado por las Autoridades Portuarias y el buque es un feeder de 1800 TEUs. Si en este caso, la velocidad de diseño del buque era de 19,5 kn, se van a realizar simulaciones con velocidades de 14 kn y 21,4 kn teniendo en cuenta que el buque seleccionado tiene una eslora de 172 m (Figura 28). Además, es necesario tener en cuenta la variación en el consumo del motor y en la potencia requerida (Figura 29). En el primer caso, con la adaptación de los motores diésel marinos a las velocidades empleadas en el low steaming y a la carga del motor que esto implica, la reducción en el consumo se puede estimar en el entorno de 10 g/kWh (<https://www.wartsila.com/services-catalogue/engine-services-2-stroke/slow-steaming-upgrade-kit>). Por lo tanto, se ha considerado que para un motor de este tipo el SFOC (Specific Fuel Oil Consumption) es de 185 g/kWh al 85% del MCR (Maximum Continuous Rating), mientras que en el caso del low steaming, que estaría entre el 60 y el 70% del MCR, el SFOC se ha tomado como 175 g/kWh.

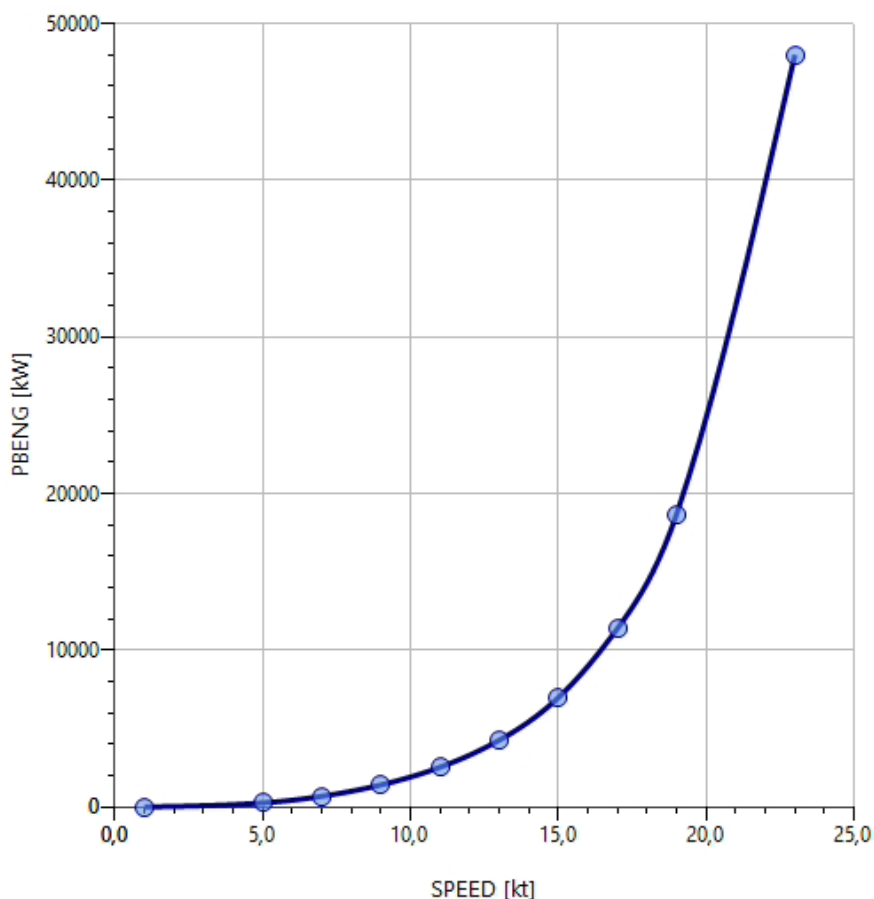


Figura 29. Curva potencia velocidad para el buque de 1800 TEUs calculada en NavCad para el motor https://www.wartsila.com/docs/default-source/product-files/engines/ms-engine/product-guide-o-e-w46f.pdf?utm_source=engines&utm_medium=dieselengines&utm_term=w46f&utm_content=productguide&utm_campaign=mp-engines-and-generating-sets-brochures

Con el buque navegando en low steaming, es decir, a 14 kn, una de las subrutas (ruta 1.v1.1) que se obtienen se muestra en la Tabla 46, la Tabla 47 y la Tabla 48. La ruta la conforman 4 puertos y 6 NUTS.

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Prov. Oost-Vlaanderen	Amberes	Cantabria	Bilbao
Cantabria	Bilbao	Schleswig-Holstein	Hamburgo
Mecklenburg-Vorpommern	Hamburgo	Galicia	Vigo
Galicia	Vigo	Düsseldorf	Amberes

Tabla 46. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.v1.1

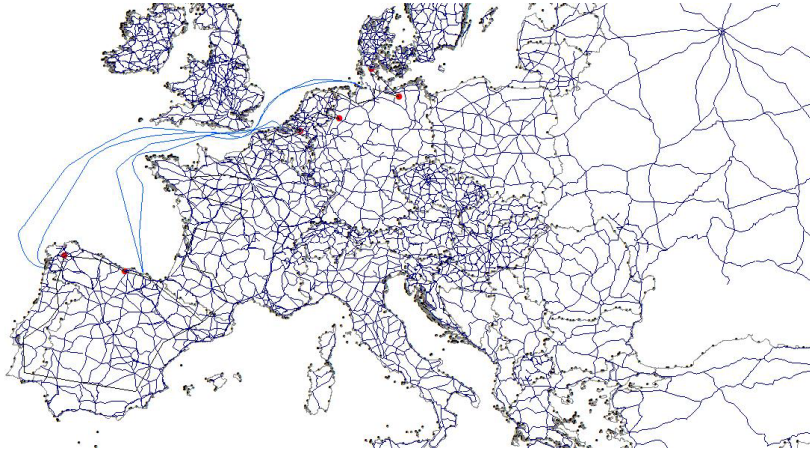


Figura 30. Representación en TransCAD de la ruta 1.v1.1

Los costes y los tiempos asociados a esta ruta se muestran en las Tabla 47 y Tabla 48.

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo /buque (\$)	Flujo (TEU)	Oferta (TEU)
BE23	253	ES13	163	949.031	76.061	117924	3085
ES13	163	DEF0	1069	1.079.963	85.405	163171	3085
DE80	1069	ES11	288	517.213	93.621	142842	960
ES11	288	DEA1	253	538.562	84.882	142393	960

Tabla 47. Costes asociados a la ruta 1.v1.1 y seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)
BE23	253	ES13	163	55,42	11,69	34,79
ES13	163	DEF0	1069	74,86	9,18	32,15
DE80	1069	ES11	288	82,77	10,08	10,52
ES11	288	DEA1	253	63,37	12,59	11,34

Tabla 48. Tiempos asociados a la ruta 1.v1.1 y seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn

Si realizamos una estiba optimizada para este caso, se obtiene que el número máximo de contenedores que se pueden cargar, sin comprometer la estabilidad del buque, es de 1548 TEUs (Tabla 49 y Tabla 50).

Nº total de contenedores bajo cubierta	557
Nº total de contenedores sobre cubierta	991
Nº total de contenedores en el buque	1548

Tabla 49 Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.v1.1

Desplazamiento (t)	28789
Tf (m)	7,24
Kgf (m)	8,90
Kb (m)	3,99
Trim (m)	-1,72
Tpp (m)	6,38
Tpr (m)	8,09
Angesc	0,03
GM (m)	4,44

Tabla 50. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1548 TEUs

Debido a que el buque de referencia es capaz de cargar 1548 TEUs, el desglose de tiempos y costes quedaría como se ve en las Tabla 51 y Tabla 50.

nodo inicial	nodo final	Flujo (TEUs)	TEUs/buque	Coste Variable (\$)	Coste Fijo (\$)	Coste total (\$)
BE23	ES13	117924	1548	476.201	152.122	628.324
ES13	DEF0	163171	1548	541.900	170.811	712.711
DE80	ES11	142842	960	517.213	187.243	704.456
ES11	DEA1	142393	960	538.562	169.765	708.328

Tabla 51. Coste para una flota de dos buques en la ruta 1.v1.1

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)
BE23	253	ES13	163	55,42	11,69	17,46	84,57
ES13	163	DEF0	1069	74,86	9,18	16,13	100,18
DE80	1069	ES11	288	82,77	10,08	10,52	103,37
ES11	288	DEA1	253	63,37	12,59	11,34	87,30

Tabla 52. Tiempos para una flota de dos buques en la ruta 1.v1.1

El tiempo total de esta ruta es de 375 horas, se necesitan dos buques (Tabla 52) para mantener una frecuencia semanal en cada puerto, pero sin ninguna holgura. En este caso no habría margen para posibles retrasos. Si comparamos esta ruta con la ruta 1.1 (apartado 6.2.1), que es una ruta similar que conecta puertos del norte de Europa con

puertos del sur, se observa que se produce un incremento en el tiempo total de la ruta (78 horas). Si se compara la Tabla 52 con la Tabla 29, se observa que el incremento en el tiempo total se debe fundamentalmente al tiempo de navegación y no al resto de tiempos desglosados. Para la ruta 1.1, con el mismo número de buques, se conseguía una holgura de 22 horas, que en esta nueva ruta (1.v1.1) desaparece al disminuir la velocidad. Lo que se constata es que una reducción de la velocidad del barco lleva al límite el cumplimiento con el nivel de servicio establecido (frecuencia semanal). En este trabajo no se han tenido en cuenta la congestión en los puertos dentro del tiempo del buque en puerto, pero ésta podría ser una causa plausible para no alcanzar la frecuencia semanal en esta ruta a la velocidad estimada.

Ruta 1.v1.2

Esta ruta está formada por 6 puertos y 10 NUTS, conectando de sur a norte España, Francia y Alemania.

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Andalucía	Algeciras	Pays de la Loire	Saint Nazaire
Pays de la Loire	Saint Nazaire	Región de Murcia	Valencia
Región de Murcia	Valencia	Aquitaine	La Rochelle
Poitou-Charentes	La Rochelle	Haute-Normandie	Le Havre
Haute-Normandie	Le Havre	Hamburg	Hamburgo
Hamburg	Hamburgo	Alentejo	Algeciras

Tabla 53. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.v1.2

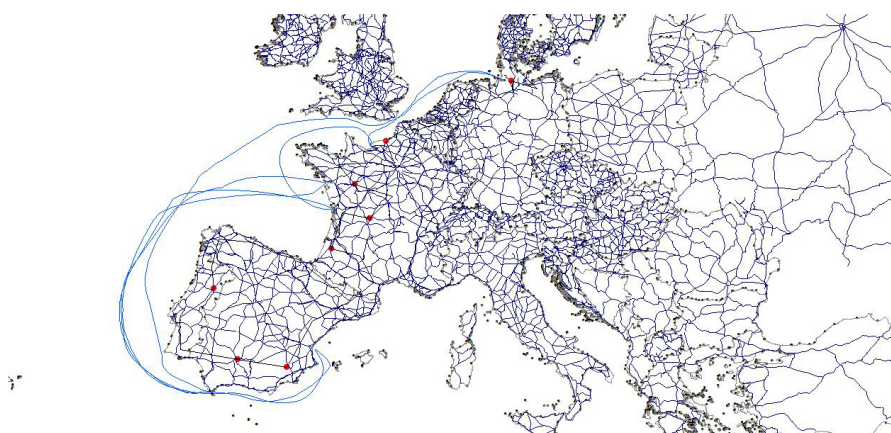


Figura 31 Representación en TransCAD de la ruta 1.v1.2

Los resultados de costes y tiempos asociados a esta ruta se pueden ver en las Tabla 54 y Tabla 55.

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo/buque (\$)	Flujo (TEU)	Oferta (TEU)
ES61	61	FRG0	282	461.853	80.967	115263	704
FRG0	282	ES62	1064	442.782	92.500	135416	704
ES62	1064	FRI1	283	1.226.697	98.949	199598	1954
FRI3	283	FRD2	269	466.847	63.957	141512	1954
FRD2	269	DE60	1069	1.883.866	69.296	145278	13730
DE60	1069	PT18	61	11.581.775	110.263	118488	18537

Tabla 54. Costes de la ruta 1.v1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)
ES61	61	FRG0	282	75,13	8,46	7,68
FRG0	282	ES62	1064	89,79	9,85	7,91
ES62	1064	FRI1	283	101,47	10,77	22,55
FRI3	283	FRD2	269	33,07	12,52	24,23
FRD2	269	DE60	1069	37,22	12,61	156,35
DE60	1069	PT18	61	119,48	9,47	211,18

Tabla 55. Tiempos de la ruta 1.v1.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 14 kn

Si tenemos en cuenta la capacidad del buque en base a sus condiciones de estabilidad, el número de contenedores máximos que se transportan en cada navegación es de 1548 TEUs, por lo que los costes y tiempos de esta ruta quedarían como se ve en las Tabla 56 y Tabla 57.

nodo inicial	nodo final	Flujo (TEUs)	TEUs/buque	Coste Variable (\$)	Coste Fijo (\$)	Coste total (\$)
ES61	FRG0	115263	704	461.853	323.870	785.724
FRG0	ES62	135416	704	442.782	370.002	812.785
ES62	FRI1	199598	1548	971.803	395.799	1.367.603
FRI3	FRD2	141512	1548	369.841	255.831	625.673
FRD2	DE60	145278	1548	212.399	277.184	489.584
DE60	PT18	118488	1548	967.164	441.052	1.408.217

Tabla 56. Coste para una flota de 3 buques en la ruta 1.v1.2

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)
ES61	61	FRG0	282	75,13	8,46	3,68	87,27
FRG0	282	ES62	1064	89,79	9,85	3,91	103,55
ES62	1064	FRI1	283	101,47	10,77	7,57	119,81
FRI3	283	FRD2	269	33,07	12,52	8,89	54,48
FRD2	269	DE60	1069	37,22	12,61	8,61	58,43
DE60	1069	PT18	61	119,48	9,47	6,78	135,73

Tabla 57. Tiempos para una flota de 3 buques en la ruta 1.v1.2

Esta ruta se realiza en 607 horas por lo que se hace necesario desplegar 4 buques para cumplir con la frecuencia semanal, y con cierta holgura para retrasos (24 horas). Si se compara esta ruta con la ruta 1.2 (Figura 23), en la que también se conectan 8 NUTS a través de 6 puertos, se observa que son rutas muy similares y que la mayor divergencia entre ellas se produce en el tiempo de navegación. En el caso de la ruta 1.2 el tiempo total es de 430 horas aproximadamente, muy inferior al de esta segunda ruta, y la diferencia en los tiempos de navegación de la segunda frente a la primera es del 60% superior (en un rango de 45-70% como se puede observar en las Tabla 73 y Tabla 76). Aunque los tiempos de carga y descarga y de estancia en puerto no coinciden, el incremento del tiempo total de la ruta puede ser atribuible al tiempo de navegación.

Si realizamos ahora la simulación bajo las mismas condiciones, pero incrementando la velocidad hasta los 21,4 kn, las subrutas que se obtienen visitando 4 puertos (ruta 1.v2.1) se pueden ver en la Tabla 58, la Tabla 59 y la Tabla 60.

Ruta 1.v2.1

Esta ruta visita 4 puertos y 5 NUTS entre España y Francia.

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Bretagne	La Rochelle	Andalucía	Algeciras
Andalucía	Algeciras	Pays de la Loire	Saint Nazaire
Pays de la Loire	Saint Nazaire	Región de Murcia	Valencia
Región de Murcia	Valencia	Aquitaine	La Rochelle

Tabla 58. Representación en TransCAD de la ruta 1.v2.1

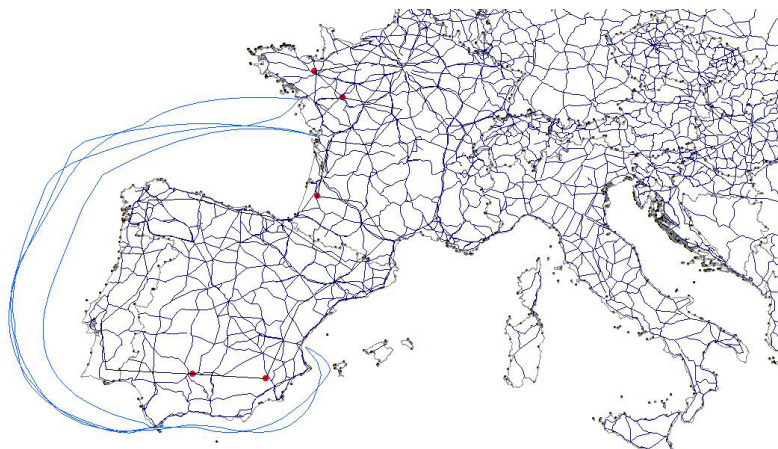


Figura 32. Representación en TransCAD de la ruta 1.v2.1

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo/buque (\$)	Flujo (TEU)	Oferta (TEU)
FRH0	283	ES61	61	1.559.704	88.448	191087	2110
ES61	61	FRG0	282	498.801	91.244	115263	760
FRG0	282	ES62	1064	478.205	104.478	135416	760
ES62	1064	FRI1	283	1.324.833	111.632	199598	2110

Tabla 59. Costes asociados a la ruta 1.v2.1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21.4 kn

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)
FRH0	283	ES61	61	47,94	9,98	24,37
ES61	61	FRG0	282	49,15	9,74	8,29
FRG0	282	ES62	1064	58,74	11,52	8,55
ES62	1064	FRI1	283	66,38	11,76	25,11

Tabla 60. tiempos asociados a la ruta 1.v2.1 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21,4 kn

Utilizando el algoritmo para la estiba, se determina que la capacidad de carga del buque para esta ruta es de 1597 TEUs (Tabla 61, Tabla 62).

Nº total de contenedores bajo cubierta	557
Nº total de contenedores sobre cubierta	1040
Nº total de contenedores en el buque	1597

Tabla 61. Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.v2.1

Desplazamiento (t)	28508
Tf (m)	10,07
Kgf (m)	9,12
Kb (m)	6,37
Trim (m)	-1,70
Tpp (m)	9,22
Tpr (m)	10,92
Angesc	-0,02
GM (m)	5,24

Tabla 62. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1597 TEUs

En base a los resultados anteriores, se tiene que los costes y tiempos asociados a esta ruta son los que se muestran en las Tabla 63 y Tabla 64.

nodo inicial	nodo final	Flujo (TEUs)	TEUs/buque	Coste Variable (\$)	Coste Fijo (\$)	Coste total (\$)
FRHO	ES61	191087	1597	1.180.303	176.895	1.357.198
ES61	FRGO	115263	760	498.801	182.488	681.290
FRGO	ES62	135416	760	478.205	208.956	687.161
ES62	FRI1	199598	1597	1.002.564	223.264	1.225.829

Tabla 63. Coste para una flota de dos buques en la ruta 1.v2.1

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)
FRHO	283	ES61	61	9,98	18,44	76,36
ES61	61	FRGO	282	9,74	8,29	67,18
FRGO	282	ES62	1064	11,52	8,55	78,81
ES62	1064	FRI1	283	11,76	19,00	97,14

Tabla 64 Tiempos para una flota de dos buques en la ruta 1.v2.1

Esta ruta se completa en 320 horas, por lo que solo se necesitan dos buques para mantener una frecuencia semanal en los puertos con una holgura de 4 horas de media.

Si realizamos ahora la simulación bajo las mismas condiciones, es decir, la misma velocidad de 21,4 kn, pero incrementando el número de puertos hasta 6 los resultados (ruta 1.v2.2) se pueden ver en la Tabla 65, la Tabla 66 y la Tabla 67.

Ruta 1.v2.2

Esta subruta la conforman 6 puertos y 7 NUTS (Tabla 65, Tabla 66y Tabla 69).

Nodo inicial	Puerto O	Nodo final	Puerto D
Alentejo	Algeciras	Prov. West-Vlaanderen	Zeebrugge
Prov. West-Vlaanderen	Zeebrugge	Basse-Normandie	Le Havre
Basse-Normandie	Le Havre	Midi-Pyrénées	Bilbao
Midi-Pyrénées	Bilbao	Languedoc-Roussillon	Valencia
Languedoc-Roussillon	Valencia	Área Metropolitana de Lisboa	Cádiz
Área Metropolitana de Lisboa	Cádiz	Algarve	Algeciras

Tabla 65. NUTS y puertos seleccionados para la ruta 1.v2.2

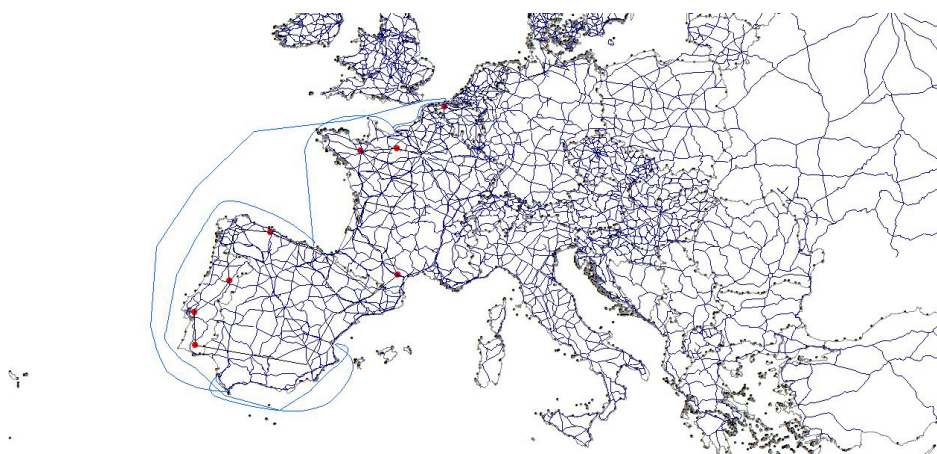


Figura 33. Representación en TransCAD de la ruta 1.v2.2

Los costes y tiempos asociados a esta ruta se pueden ver en las Tabla 66 y Tabla 67.

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Coste variable (\$)	Coste fijo (\$)	Flujo (TEU)	Oferta (TEU)
PT18	61	BE25	220	12.471.856,75	1.393.547,20	117769	18537
BE25	220	FRD1	269	3.809.553,73	719.200,61	199059	14828
FRD1	269	ES12	163	2.809.942,49	1.036.804,96	145278	3085
ES12	163	FRJ1	1064	3.703.382,22	1.378.490,25	163171	3085
FRJ1	1064	PT17	297	840.207,86	765.536,14	192446	902
PT17	297	PT15	61	768.916,22	469.157,06	113696	902

Tabla 66. Costes asociados a la ruta 1.v2.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21,4 kn

Nodo inicial	puerto O	Nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)
PT18	61	BE25	220	63,26	11,79	213,20
BE25	220	FRD1	269	8,46	15,32	168,42
FRD1	269	ES12	163	28,41	15,48	35,32
ES12	163	FRJ1	1064	58,22	13,73	32,47
FRJ1	1064	PT17	297	21,64	9,11	10,57
PT17	297	PT15	61	3,50	7,33	10,25

Tabla 67. Tiempos asociados a la ruta 1.v2.2 seleccionados por el MILP con el movimiento de contenedores intracomunitario y buque navegando a 21,4 kn

La capacidad de carga del buque para esta ruta es de 1578 TEUs (Tabla 68 y Tabla 69).

Nº total de contenedores bajo cubierta	678
Nº total de contenedores sobre cubierta	900
Nº total de contenedores en el buque	1578

Tabla 68. Disposición de contenedores en el buque para la ruta 1.v2.2

Desplazamiento (t)	27936
Tf (m)	9,87
Kgf (m)	9,09
Kb (m)	6,22
Trim (m)	-1,71
Tpp (m)	9,01
Tpr (m)	10,72
Angesc	-0,04
GM (m)	5,24

Tabla 69. Resultados cálculo de estabilidad del buque para la condición de 1578 TEUs

Finalmente aplicando la restricción de estabilidad y, por tanto, limitando el número de contenedores a cargar en el buque, los valores de costes y tiempos para esta ruta quedarían como se muestra en las Tabla 70 y Tabla 71.

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Flujo (TEUs)	Coste Variable (\$)	Coste Fijo (\$)	Coste total (\$)
PT18	61	BE25	220	117769	1.074.460	214.391	1.288.852
BE25	220	FRD1	269	199059	410.287	110.646	520.934
FRD1	269	FRJ2	163	145278	1.454.592	59.508	1.614.101
FRJ2	163	FRJ1	1064	163171	1.917.090	212.075	2.129.165
FRJ1	1064	PT17	297	192446	840.207	117.774	957.982
PT17	297	PT15	61	113696	768.916	72.178,01	841.094

Tabla 70. Costes para una flota de 2 buques en la ruta 1.v2.2

nodo inicial	puerto O	nodo final	puerto D	Tiempo Navegación (h)	Tiempo Puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)
PT18	61	BE25	220	63,26	11,79	18,37	93,41
BE25	220	FRD1	269	8,46	15,32	18,14	41,92
FRD1	269	FRJ2	163	28,41	15,48	18,28	62,18
FRJ2	163	FRJ1	1064	58,22	13,73	16,81	88,77
FRJ1	1064	PT17	297	21,64	9,11	10,57	41,31
PT17	297	PT15	61	3,50	7,33	10,25	21,09

Tabla 71. Tiempos para una flota de 2 buques en la ruta 1.v2.2

Esta ruta se completa en 348 horas, por lo que solo se necesitan dos buques para mantener una frecuencia semanal en los puertos con una holgura de 26 horas de media. Si comparamos esta ruta con la 1.2, el tiempo total en la ruta 1.v2.2 es inferior y fundamentalmente debido a una reducción del tiempo de navegación en un 28%.

Si se realiza una comparativa entre las rutas que conectan 4 puertos (Tabla 29, Tabla 56 y Tabla 63) a las diferentes velocidades del buque estudiadas (14 kn, 19,5 kn y 21,4 kn), se puede apreciar que los tiempos totales se incrementan en un 26% para la navegación lenta y un 7% para la ruta a 21,4 kn (Tabla 73). Pero si se observa la Tabla 72, se puede ver que la diferencia de millas recorridas en esta última ruta es significativamente superior a las otras dos. Esto es debido a que el algoritmo intenta ajustarse a una de sus restricciones que es el tiempo total entre nodos (168 horas). Sin embargo, no tiene ninguna restricción de distancia, por lo tanto, la gran diferencia entre las rutas está en las millas recorridas en cada caso (Tabla 72).

Velocidad (kn)	Distancia (millas náuticas)
14	3226
19,5	3695
21,4	4753

Tabla 72. Comparativa de millas recorridas para rutas con 4 puertos y diferentes velocidades

Velocidad (kn)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Diferencia Tiempo Navegación	Diferencia Tiempo Total
14	276,42	43,54	55,45	375,42	46%	26%
19,5	189,46	48,75	59,70	297,90		
21,4	222,22	42,99	53,52	318,73	17%	7%

Tabla 73. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque

En cuanto a los costes incurridos en cada caso, lo previsible es el ahorro en consumo de combustible de la ruta a 14 kn. Un menor consumo implica un coste inferior en esa partida (Tabla 74).

Velocidad (kn)	Nº buques	Contenedores movidos	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
14	2	5017	679.943	2.073.877	2.753.821	-31%
19.5	2	5257	763.953	3.235.116	\$ 3.999.069	
21.4	2	4714	79.605	3.159.874	\$ 3.951.479	-1%

Tabla 74. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque

La navegación lenta repercute tanto en el consumo de combustible de cada buque individual como en las características del servicio. Centrándonos en el primer componente, para portacontenedores que transporten más de 1.000 TEU y que utilizan motores Diesel de dos tiempos, el low steaming reduce el consumo de combustible del motor principal en el mar, pero tiene un efecto limitado en los motores auxiliares y su consumo durante la estancia en puerto.

El segundo impacto de la navegación lenta es sobre el tiempo de tránsito y sobre el número de buques para ser desplegados dentro de un servicio (Psaraftis y Kontovas, 2010) (Tabla 73). El número y características de los buques a incorporar a una ruta sigue siendo difícil de estimar ya que esto depende de lo que los cargadores puedan soportar, por un lado, en cuanto al aumento en los costes de inventario (coste por la estiba en puerto de los contenedores). Y, por otro lado, porque afecta a las características iniciales del servicio en términos de la distancia de ida y vuelta, el número y el orden de las escalas en los puertos, la frecuencia, el tiempo de margen en el servicio de línea (holgura) y la combinación de flotas (charter in – charter out, si el mercado lo permite). Como alternativa, algunos puertos de escala se pueden eliminar. Por lo tanto, la decisión de optar por la navegación lenta requiere un análisis cuidadoso de la compensación entre un impacto positivo resultante de la reducción del consumo de combustible en el mar y dos efectos negativos: la necesidad de buques adicionales en caso de reducciones significativas en la velocidad; el aumento del tiempo empleado en la navegación entre puertos y, por lo tanto, en tiempo de tránsito (Notteboom & Cariou, 2013). En este caso se aprecia una reducción importante en coste empleando el low steaming (Tabla 74) pero unos incrementos del 46% en los tiempos de navegación. Para la ruta a 21,4 kn se produce un incremento de tiempo de navegación, pero es debido a que recorre más millas (Tabla 73). En la Figura 34 se puede ver la distribución de costes en función de la velocidad del buque.

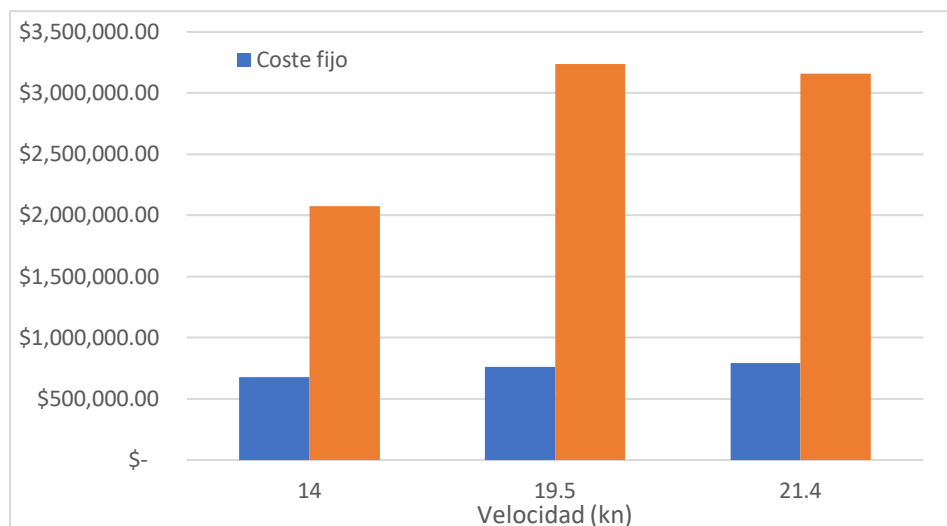


Figura 34. Reparto de costes en las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque

Si analizamos ahora lo que ocurre con rutas que visitan 6 puertos (Tabla 34, Tabla 56 y Tabla 70), observamos que los resultados difieren a igualdad de frecuencia.

Velocidad (kn)	Distancia (millas náuticas)
14	6222
19,5	5336
21,4	3927

Tabla 75. Comparativa de millas recorridas para rutas con 6 puertos y diferentes velocidades

La ruta a velocidad baja abarca más millas que las otras dos, lo que obliga a emplear tres buques en esa ruta. Aunque aun así no resulta mucho más costosa (Tabla 77) que la ruta a la velocidad de diseño, los tiempos se disparan excesivamente. En la Tabla 76 se puede ver el incremento o reducción del tiempo de navegación entre una ruta y otra a diferentes velocidades y cómo afecta al tiempo total de las rutas.

Velocidad (kn)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Diferencia Tiempo Navegación	Diferencia Tiempo Total
14	456,17	63,66	92,61	612,44	67%	42%
19,5	273,63	66,55	90,86	431,05		
21,4	183,49	72,76	92,42	348,67	-33%	-20%

Tabla 76. Tiempos asociados a las rutas formadas por 6 puertos a diferentes velocidades del buque

En cuanto a la navegación a velocidad máxima (21,4 kn) se puede observar en la Tabla 77 que se moviliza un mayor número de contenedores en menos tiempo (se navegan menos millas a más velocidad lo que compensa el incremento de tiempo en puerto), en esto no solo influye la velocidad sino el orden en que se realizan las entradas a puerto. Ambas rutas conectan el norte de Europa (Holanda y Alemania) con el sur (España y Portugal). Sin embargo, en la ruta 1.v2.2 se realiza de forma más ordenada, tocando los puertos franceses en mitad de la ruta, y completando la ruta circular desde Algeciras a Zeebrugge.

Velocidad	Nº buques	Contenedores movidos	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
14	4	7600	2.063.741	3.425.845	5.489.587	3%
19,5	3	7945	1.630.604	3.680.727	5.311.332	
21,4	2	8192	886.574	6.465.555	7.352.130	28%

Tabla 77. Variaciones en coste para las rutas de 6 puertos a diferentes velocidades del buque

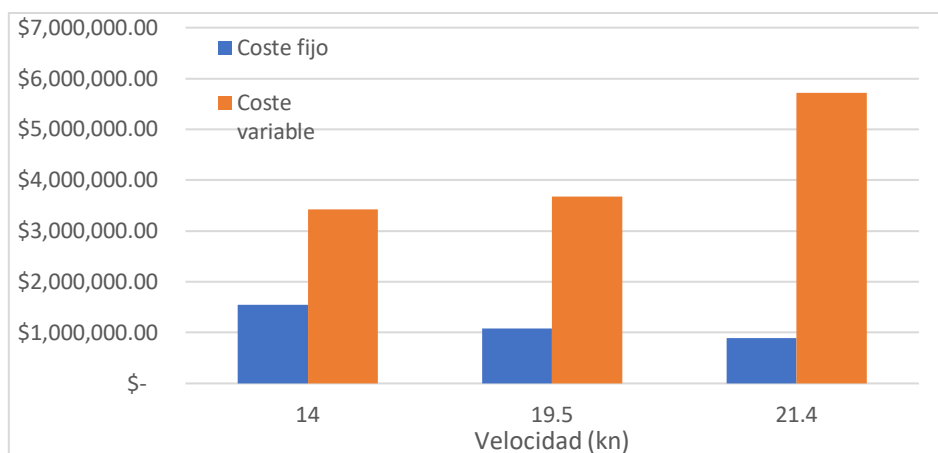


Figura 35. Reparto de costes en las rutas de 6 puertos a diferentes velocidades del buque

La diferencia entre los costes asociados a las rutas se puede ver en la Figura 35. Las rutas resultantes para cada caso evaluado (diferentes velocidades) son bastante similares en cuanto a nodos visitados, distancias cubiertas y número de contenedores movidos entre nodos. Se observa que la velocidad del buque afecta fundamentalmente al número de buques empleados y al coste variable asociado a la ruta, debido al consumo de combustible.

7.2. Variación en el precio del chárter

Los ciclos en el transporte marítimo siguen los ciclos económicos mundiales. Es por esto que el precio del chárter en los buques portacontenedores ha experimentado un incremento muy importante en los dos últimos años debido a la situación mundial derivada del COVID-19. En el caso de buques tipo feeder ha implicado multiplicar hasta por 5 el precio del chárter por día (Figura 36). Realizar un análisis de sensibilidad con valores puntuales en el tiempo puede resultar poco significativo. Sin embargo, se han escogido tres valores del precio del chárter para observar cómo influye en los resultados del algoritmo (Tabla 78). Además, con el valor máximo en el precio del chárter junto con el valor desproporcionadamente alto del combustible (Tabla 85), que constituyó la “tormenta perfecta” entre 2021 y 2022, podremos analizar una situación coyuntural concreta a través del algoritmo MILP (apartado 7.3).

Precio inferior	12.500\$/día
Precio medio	25.000\$/día
Precio superior	50.000\$/día

Tabla 78. Precios del chárter utilizados en las simulaciones

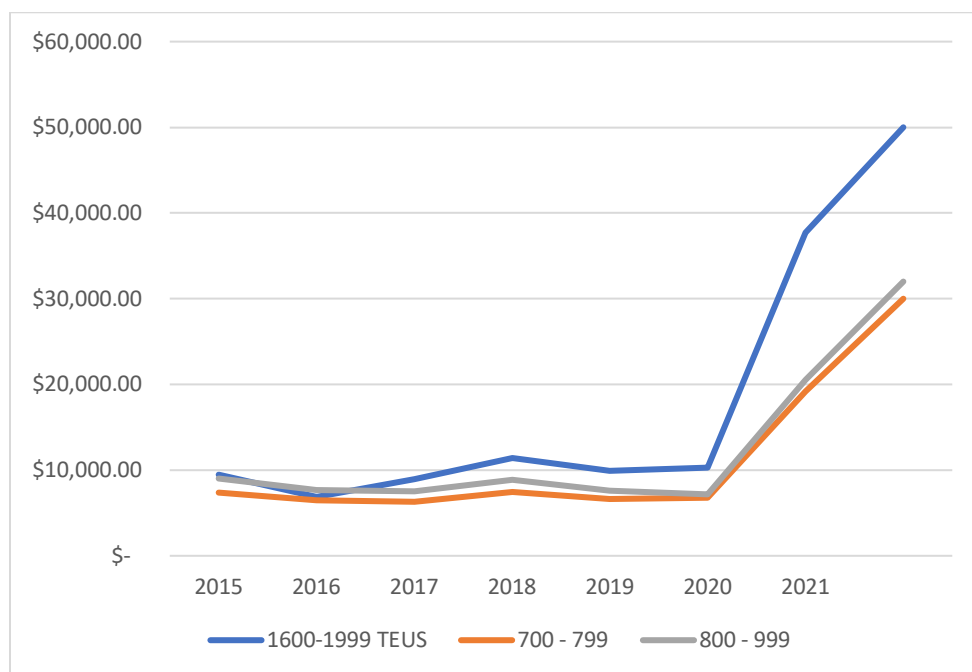


Figura 36. Evolución del chárter en portacontenedores. Fuente: Hamburg Index

Se va a analizar la influencia del precio del chárter a diferentes velocidades del buque (14, 19,5 y 21,4 kn).

Las condiciones de contorno para el primer caso serían una velocidad de 14 kn, una ruta que toca 4 puertos y los tres valores para el precio del chárter por día (Tabla 78).

Chárter (\$/día)	Contenedores movidos	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
12.500	6236	2	425.160	2.829.800	3.254.961	18%
25.000	5017	2	679.943	2.073.877	2.753.821	
50.000	6192	2	735.265	2.751.297	3.486.563	27%

Tabla 79. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos con diferentes precios para el chárter del buque y con navegación low steaming

Chárter (\$/día)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo C/D (h)	Tiempo total (h)	Distancia (millas)	Diferencia tiempo navegación	Diferencia tiempo total
12.500	155,22	36,25	71,97	263,44	2173	-44%	-30%
25.000	276,42	43,54	56,40	376,36	3226		
50.000	155,22	48,95	63,74	267,91	2173	-44%	-29%

Tabla 80. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos con diferentes precios del chárter del buque y con una navegación low steaming

El algoritmo de MILP busca una ruta, que minimice en lo posible el coste, sujeta a las restricciones impuestas (ecuaciones 55, 56, 57, 58 y 59) para cada caso planteado (diferentes precios del flete del buque). La solución es distinta en cada uno de ellos puesto que variaciones en los valores de las variables seleccionadas para el análisis no siempre implican aumentos o reducciones directas en los parámetros de coste y tiempo.

Con el buque navegando a baja velocidad (low steaming de 14 kn) las rutas seleccionadas para los fletes mínimo y máximo son iguales, pero modificando el orden en que se tocan los puertos. El coste del buque asociado al flete se duplica prácticamente entre la variante de flete mínimo y máximo (Tabla 79) pero se eligen rutas con un movimiento similar de contenedores por lo que los costes asociados a la carga y descarga se equiparan. Esto hace que resulte más costosa la variante del flete máximo, como cabría esperar. En cambio, en tiempos son similares las dos soluciones de flete mínimo y máximo.

Si mantenemos las condiciones de contorno, pero variamos la velocidad del buque, pasando a ser ésta, de 19,5 kn, los resultados comparados de las rutas se pueden ver en la Tabla 81 y en la Tabla 82.

Chárter (\$/día)	Contenedores movidos	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
12.500	6312	1	254.945	1.333.881	1.588.826	-60%
25.000	5257	2	763.953	3.235.116	3.999.069	
50.000	6312	1	411.175	1.519.524	1.930.700	-52%

Tabla 81. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos con diferentes precios para el chárter del buque y una velocidad de 19,5 kn

Chárter (\$/día)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo C/D (h)	Tiempo total (h)	Distancia (millas)	Diferencia tiempo navegación	Diferencia tiempo total
12.500	116,56	40,01	76,77	193,34	2273	-38%	-35%
25.000	189,46	48,75	59,57	297,77	3780		
50.000	116,56	51,05	76,77	244,39	2273	-38%	18%

Tabla 82. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos con diferentes precios del chárter del buque y una velocidad de 19,5 kn

En este segundo caso vuelve a dar dos rutas similares para las variantes de flete mínimo y máximo, aunque al incrementar la velocidad solo es necesario emplear un buque para cubrir la ruta entre los 4 puertos. Por tanto, la diferencia en coste es muy superior en ambas con respecto al caso base (chárter de 25.000\$/día). Para este valor del flete las rutas son más largas y con un menor movimiento de contenedores.

Para unas condiciones de contorno de 21,4 kn como velocidad del buque, rutas de 4 puertos y una fluctuación en el precio del chárter como se muestra en la Tabla 78, se obtienen unos resultados para dichas rutas que se pueden ver en la Tabla 83 y la Tabla 83.

Chárter (\$/día)	Contenedores movidos	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
12.500	5017	2	661.461	2.258.068	2.919.529	-26%
25.000	4714	2	791.605	3.159.874	3.951.479	
50.000	5257	2	912.601	2.852.848	3.765.449	-5%

Tabla 83. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos con diferentes precios para el chárter del buque y una velocidad de 21,4 kn

Chárter (\$/día)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo C/D (h)	Tiempo total (h)	Distancia (millas)	Diferencia tiempo navegación	Diferencia tiempo total
12.500	180,83	55,74	56,64	293,21	3870	-19%	-8%
25.000	222,22	42,99	53,10	318,31	4756		
50.000	172,63	39,33	59,57	271,53	3694	-22%	-15%

Tabla 84. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos con diferentes precios del chárter del buque y una velocidad de 21,4 kn

Con el buque a máxima velocidad las rutas obtenidas son más largas que en los casos anteriores y con menor movimiento de contenedores para las tres variantes. Las diferencias en coste y tiempo se reducen significativamente. Y como era previsible, a valores semejantes de millas recorridas, contenedores movidos y número de buques por ruta (2 en ambos casos) la opción más favorable es la del flete más bajo (Tabla 83 y Tabla 84).

7.3. Variación en el precio del combustible

Las rutas analizadas se encuadran en una zona marítima muy concreta como es el Atlántico y el Mediterráneo a lo largo de la costa europea. Esto implica que un buque navegando por estas aguas de forma exclusiva no debería emplear como combustible HFO (Heavy Fuel Oil) sino, al menos, VLSFO (Very Low Sulphur Fuel Oil). Es decir, utilizar combustibles con bajo contenido en azufre para minimizar la contaminación en las costas europeas. Desde el 1 de enero de 2020 (resolución MEPC.280 70) ya está en vigor el límite del 0,5% de emisiones de SOx en buques, procedentes de la combustión de sus motores. La Unión Europea publicó una directiva a este respecto en 2012 (Directiva 2021/33), adelantándose en la aplicación de estos límites en sus aguas marítimas a la resolución de la OMI. Ésta última ya es de aplicación a nivel mundial.

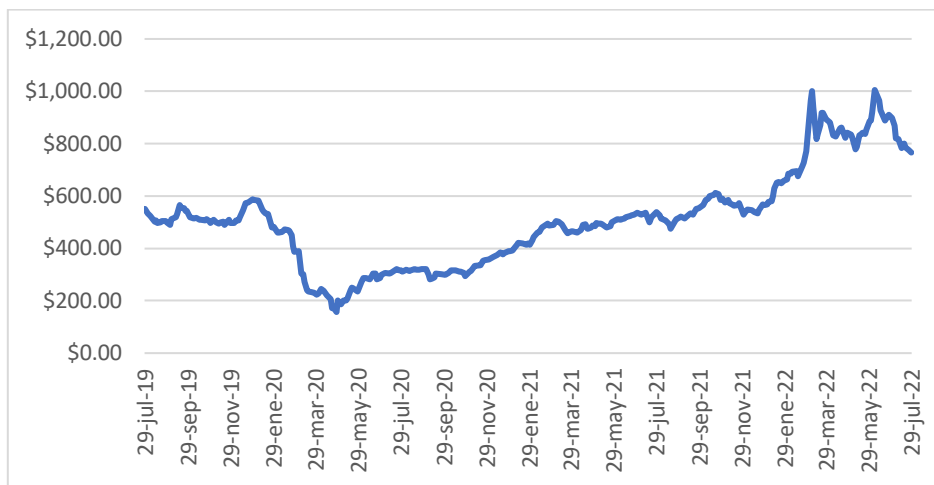


Figura 37. Rotterdam Bunker prices. Fuente: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#VLSFO>

Si se observa la evolución del precio del VLSFO en los últimos tres años (Figura 37) podemos obtener un valor promedio, un valor mínimo y un máximo del conjunto de precios alcanzado por este combustible en el período comprendido entre julio de 2019 y julio de 2022. Estos tres valores (mínimo, medio y máximo) del combustible van a permitir evaluar cómo influye el precio del combustible en la elección de rutas del algoritmo.

Precio mínimo	157\$/ton
Precio medio	500\$/ton
Precio máximo	1005\$/ton

Tabla 85. Precio del VLSFO empleados para el análisis de sensibilidad

Para el caso de un precio mínimo de 157\$/ton, un precio del chárter de 25.000\$/día, en una ruta que visita 4 puertos y el buque navegando a las diferentes velocidades descritas en el apartado 7.1, se tendría la comparación mostrada en Tabla 86.

Velocidad (kn)	Contenedores movidos	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
14	6236	3	666.146	1.282.497	1.948.643	-63%
19,5	6312	2	1.493.703	3.784.741	5.278.445	
21,4	4845	2	410.363	3.242.460	3.652.824	-31%

Tabla 86. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque y un precio mínimo del combustible

Velocidad (kn)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Distancia (millas)	Diferencia tiempo navegación	Diferencia tiempo total
14	398,42	41,52	74,68	514,62	5577	106%	70%
19,5	193,06	46,43	62,98	302,47	3765		
21,4	222,22	30,88	54,04	307,13	4755	15%	2%

Tabla 87. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque para un precio mínimo del combustible

Para las condiciones de contorno de precio máximo del combustible (1.005\$/ton), un chárter diario de 25.000\$/día y rutas donde se tocan 4 puertos, la comparación de resultados se puede ver en la Tabla 88 y Tabla 89.

Velocidad (kn)	Contenedores movidos	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
14	6192	2	379.338	2.263.051	2.642.390	-75%
19,5	3381	2	2.900.842	7.493.575	10.394.417	
21,4	4957	1	423.001	2.952.735	3.375.737	-68%

Tabla 88. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque y un precio máximo del combustible

Velocidad (kn)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo C/D (h)	Tiempo total (h)	Distancia (millas)	Diferencia tiempo navegación	Diferencia tiempo total
14	140,42	45,81	63,42	249,65	1966	-16%	-1%
19,5	167,67	46,90	37,65	252,23	3269		
21,4	90,82	43,39	55,15	189,35	1944	-7%	-25%

Tabla 89. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque para un precio máximo del combustible

Si establecemos unas condiciones de contorno con valores máximos en el precio del chárter (50.000\$/día) y del combustible (1.005\$/ton) los resultados para rutas que tocan 4 puertos se pueden ver en la Tabla 90 y la Tabla 91.

Velocidad (kn)	Contenedores movidos	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
14	3501	2	1.748.244	2.029.375	3.777.619	8%
19,5	4957	1	538.112	2.952.735	3.490.847	
21,4	2428	2	2.516.977	2.412.077	4.929.054	41%

Tabla 90. Variaciones en coste para las rutas de 4 puertos a diferentes velocidades del buque con un precio máximo del combustible y del chárter por día

Velocidad (kn)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo C/D (h)	Tiempo total (h)	Distancia (millas)	Dif tiempo nav	Dif tiempo tot
14	260,57	38,14	37,27	335,98	3647	161%	87%
19,5	99,67	42,86	57,15	199,67	1962		
21,4	187,06	42,43	13,92	243,41	4003	88%	43%

Tabla 91. Tiempos asociados a las rutas formadas por 4 puertos a diferentes velocidades del buque para un precio máximo del combustible y del chárter por día

La combinación de valores máximos para el precio del flete y del combustible obtiene un valor en coste muy superior al resto. Al incremento en el coste diario del buque, se le suma el incremento en el coste de combustible al navegar a 21,4 kn y hacerlo un mayor número de millas. En este caso la ruta más ajustada, con un solo buque desplegado y con un mayor movimiento de contenedores asociado, resulta ser la del caso base (19,5 kn y 25.000\$/día de flete).

7.4. Variación en el tamaño del buque

Se va a realizar la comparación de los casos anteriores con un buque de menor porte. En este análisis se compara un buque de 1800 TEUs con uno de 770 TEUs. El primer buque ha sido el utilizado para el cálculo de todas las rutas anteriores, y en algunas rutas se ha observado que estaba sobredimensionado para el flujo de contenedores entre algunos puertos. A continuación, se realizan las simulaciones con el segundo buque. Esto implica con las condiciones iniciales no van a ser las mismas, puesto que un buque de ese tamaño no navega a las mismas velocidades, ni tiene la misma potencia, ni valor del flete, etc.

Por tanto, para las características del buque, mostradas en, y los valores de las variables de las se realizan las simulaciones correspondientes a la combinación de las mismas.

Eslora (L)	114 m
Manga (B)	16,5 m
Calado (T)	6,7 m
TPM	5547

Velocidad (VB)	17 kn
Potencia MMPP	4000 kW
Potencia MMAA	448 kW

Tabla 92. Características del buque alternativa

En base a la Figura 28 y Figura 36 se seleccionan 3 valores para las variables del análisis de sensibilidad como se muestran en la Tabla 93 y la Tabla 94.

Velocidad mínima (kn)	12,8
Velocidad de diseño (kn)	17
Velocidad máxima (kn)	18,7

Tabla 93. Variaciones en la velocidad del buque con capacidad para 770 TEUs

Chárter mínimo (\$/día)	7.500
Chárter medio (\$/día)	15.000
Chárter máximo (\$/día)	30.000

Tabla 94. Variaciones en el precio del chárter para un buque de 770 TEUs

Las rutas obtenidas para este buque de menor porte con el algoritmo MILP son diferentes que en el caso del buque de 1800 TEUs. Sin embargo, para realizar la comparativa se han escogido rutas formadas por 4 puertos que conectasen NUTs similares.

Si establecemos como condición de contorno un precio mínimo en el coste del combustible (157 \$/t) y una navegación a baja velocidad para ambos buques, se pueden observar las diferencias que se producen al variar el coste del chárter. Para el caso de considerar un valor del flete mínimo de 12.500 \$/día para el buque de 1800 TEUs, y de 7.500 \$/día para el buque de 770 TEUs, se aprecia en las Tabla 95 y Tabla 96 que la diferencia importante en tiempos está en los tiempos empleados en la carga/descarga de los contenedores, puesto que los contenedores movidos por el buque de mayor porte son superiores. Aunque en velocidad de movimientos y tiempo resulta más eficiente la carga/descarga de buques con un gran número de contenedores, en este caso, al tratarse de dos buques feeder, el tiempo de carga y descarga es directamente dependiente del número de contenedores movidos en puerto

Buque (TEUs)	Velocidad (kn)	Distancia (millas)	Nº TEUs	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Dif tiempo tot
1800	14	3077	6312	219,78	46,65	75,68	302,11	
770	12,8	2173	2896	169,77	40,58	33,46	215,82	-40%

Tabla 95. Comparación de tiempos en dos rutas para cada tipo de buque (1800 y 770 TEUs) y el flete mínimo del buque en ambos casos

Buque	Velocidad	Nº buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
1800	14	2	357.256	3.832.284	1.948.643	
770	12,8	2	237.363	1.540.567	1.331.148	-136%

Tabla 96. Comparación de costes en dos rutas para los buques seleccionados con el flete mínimo en ambos casos

El chárter afecta al coste fijo y en este caso la diferencia no es significativa (en ambas rutas se emplean dos buques). La diferencia está en el coste variable donde entran los costes asociados a la carga y descarga de los contenedores y el consumo de combustible. En el caso el buque más pequeño es muy inferior.

Si modificamos el precio del flete hasta su precio máximo (50.000 \$/día y 30.000 \$/día), las diferencias entre dos rutas de 4 puertos con un precio mínimo del combustible y navegando a baja velocidad, se pueden ver en las Tabla 97 y Tabla 98.

Buque	Velocidad (kn)	Distancia (millas)	Nº TEUs	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Diferencia tiempo total
1800	14	3765	6236	268,90	46,43	78,01	700,02	%
770	12,8	4756	2762	371,52	43,73	29,31	444,56	-57

Tabla 97. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el flete máximo en ambos casos

Buque	Velocidad	Nº buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
1800	14	2	1.806.000	3.739.171	3.076.465	
770	12,8	3	699.013	1.822.811	2.583.377	-120%

Tabla 98. Comparación de costes en dos rutas para los buques seleccionados con el flete máximo en ambos casos

En este caso se aprecian diferencias en tiempos y costes. Por un lado, al igual que en el caso anterior, el tiempo de carga y descarga es superior para el buque de 1800 TEUs puesto es que capaz de transportar más carga. Por tanto, sus costes variables son superiores que en el caso del buque de 770 TEUs. Pero, además, se aprecia el incremento en coste fijo debido al precio del chárter y cómo duplica el coste fijo del primer buque respecto al segundo.

Buque	Velocidad	Distancia	Nº TEUs	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Dif tiempo tot
1800	14	5577	6236	398,42	41,52	74,68	514,62	
770	12,8	3870	2872	302,33	40,79	33,88	377,00	-27%

Tabla 99. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el flete máximo en ambos casos

Si cambiamos las condiciones de contorno a un precio máximo del combustible de 1.005 \$/t, y mantenemos el valor del flete en 12.500 \$/día y 7.500 \$/día, y los valores de velocidad en 14 y 12,8 kn, para el buque de 1800 TEUs y el de 770 TEUs, respectivamente, se obtienen los resultados mostrados en las Tabla 100 y Tabla 102.

Buque	Velocidad	Nº TEUs	Distancia (millas)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Diferencia tiempo total
1800	14	6192	1966	140,42	44,55	65,84	250,80	
770	12,8	2780	3648	285,00	49,55	31,67	366,22	32%

Tabla 100. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el precio del combustible máximo en ambos buques

Buque	Velocidad	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
1800	14	2	945.324	2.131.140	3.076.465	
770	12,8	2	988.126	1.595.251	2.583.377	-19%

Tabla 101 Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados con el precio del combustible máximo en ambos buques

En estas rutas la diferencia en coste total no es tan significativa como en el caso anterior de flete mínimo (57% frente a un 19%), por lo que se puede ver claramente que el precio del combustible influye más que el precio del carácter en estos casos con las condiciones establecidas.

Si ahora establecemos que la condición de navegación será a velocidad máxima para ambos buques, esto es 21,4 kn y 18,7 kn para el buque de 1800 TEUs y el 770 TEUs respectivamente, y mantenemos en el mínimo las otras dos variables, es decir, el valor del carácter en 12.500 \$/día y 7.500 \$/día y el precio del combustible en el mínimo, 157 \$/t, los resultados obtenidos se pueden ver en las Tabla 102 y Tabla 103.

Buque	Velocidad	Nº TEUs	Distancia (millas)	Tiempo navegación (h)	Tiempo en puerto (h)	Tiempo CD (h)	Tiempo total (h)	Diferencia tiempo total
1800	21,4	5257	3870	180,83	46,05	61,68	288,57	
770	18,7	2894	4756	254,30	40,87	33,58	328,75	12%

Tabla 102. Comparación de tiempos en dos rutas para los buques seleccionados a velocidad máxima en ambos buques

Buque	Velocidad	Nº de buques	Coste fijo (\$)	Coste Variable (\$)	Coste total (\$)	Diferencia Coste Total
1800	21,4	2	334.235	2.006.943	2.341.178	10%
770	18,7	2	229.297	1.906.871	2.136.168	

Tabla 103. Comparación de cotes en dos rutas para los buques seleccionados a velocidad máxima en ambos buques

En este apartado se ha realizado un análisis básico del impacto que supone una variación en las dimensiones del buque, reduciendo a la mitad aproximadamente la capacidad del buque. Lo que se observa es que el buque más pequeño tiene un menor coste operativo, pero a cambio ofrece un servicio más lento (tiempo total de ruta superior al de 1800 TEUs) y la oferta para el transporte de contenedores es inferior a igualdad en el número de buques empleados en la ruta. Esto conlleva un menor nivel de servicio en el feeder más pequeño. En este punto sería necesario realizar una optimización de la capacidad del buque y, por tanto, de sus dimensiones, teniendo en cuenta los flujos de mercancía que existen entre los nodos, manteniendo una frecuencia semanal. La resolución de este problema es una optimización multiobjetivo, donde las dimensiones del buque influyen en sus costes operativos y en el coste total asociado a la ruta.

8. Conclusiones y trabajo futuro

8.1. Conclusiones

La Comisión Europea lleva años, a través de los Libros Blancos del Transporte, incidiendo en la necesidad de trasladar buena parte de la mercancía transportada por carretera hacia las vías marítimas o fluviales. El objetivo perseguido, a través de esta transferencia de mercancía entre modos de transporte, es la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y una mayor sostenibilidad del transporte de mercancías. Sin embargo, no se está consiguiendo ni con la rapidez ni en la cuantía que la Comisión esperaba. El hecho de que el transporte marítimo no ofrezca un servicio puerta a puerta, sino que se deba combinar con otro medio de transporte (carretera o ferrocarril), ralentiza el servicio, lo que hace a este transporte multimodal menos atractivo para los cargadores. Una reducción de estos tiempos es a través de la optimización en la transferencia entre modos de transporte. Sobre esto están trabajando los puertos, convertidos hoy en día, en plataformas logísticas integrales, al dar servicios que van más allá de las tareas de carga y descarga de mercancía, a través de la mejora de las infraestructuras en el puerto. Aunque estas iniciativas dependen en la mayoría de los casos del acuerdo entre entes públicos y privados, lo que dificulta a veces la implementación de las mejoras o las prolonga en el tiempo.

Otra forma de conseguir mejoras en el servicio de las rutas multimodales, y que ha sido el objeto de este trabajo, es el análisis de esta combinación de modos de transporte a través de metodologías que permiten optimizar la relación tiempo/coste. Los problemas de enrutamiento de vehículos (TSP, etc.) se llevan analizando desde hace más de 50 años, aplicados a transporte terrestre inicialmente, para luego extenderse al resto de modos de transporte. En la revisión bibliográfica realizada para este trabajo se han analizado las metodologías empleadas hasta ahora para la optimización del transporte por mar. En algunos de estos trabajos se analizaba exclusivamente el tramo marítimo enfocándolo como un problema VRP o TSP. Además, se combinaba dicha optimización con alguna otra restricción (frecuencia, tamaño de la flota, limitaciones del buque), incrementando la complejidad del problema. Sin embargo, en muchos de ellos no se detalla la interacción buque-puerto en cuanto al coste que implica la entrada, estancia y salida del buque o los tiempos de estancia del buque en puerto en función de la carga que transporta. En general no es habitual el análisis y optimización de rutas multimodales con tramo marítimo y tramo de carretera, donde se evalúen de forma conjunta la ruta, la frecuencia, el número de buques necesarios y su plan de estiba, y se analicen las implicaciones que estos factores tienen en los costes y el tiempo de los buques y sus rutas. En esta tesis se ha desarrollado una metodología que permite incluir todos estos factores en la optimización de una ruta, lo que conduce a una solución más completa al problema planteado y permite mejorar los aspectos operativos en rutas multimodales.

Para el desarrollo de esta metodología se ha tenido en cuenta que en las rutas marítimas existe un número de condicionantes específicos que diferencia a éstas del resto de modos

de transporte, y las hace, si cabe, más complejas a la hora de aplicar algoritmos de optimización. Siempre existirá un cierto grado de incertidumbre en los tiempos unitarios empleados en los algoritmos puesto que es difícil de determinar con exactitud, por ejemplo, el tiempo que le lleva a un buque entrar en puerto y amarrar en el muelle asignado. Estos tiempos van a depender de innumerables factores que no se pueden cuantificar a priori (destreza de los amarradores, disponibilidad de prácticos, congestión puntual en el puerto, etc.). Algo similar ocurre con los costes asociados a un buque y a una ruta. La ruta óptima obtenida con unas condiciones de contorno puede ser válida para un periodo corto de tiempo debido a que dichas condiciones iniciales pueden verse alteradas en tan solo unos meses. En épocas con volatilidad de precios de combustible, chárter de los buques o el flete de los contenedores, resulta más complicado analizar a medio/largo plazo la idoneidad de una ruta.

El objetivo general de esta tesis, que era la optimización de rutas multimodales en función de sus costes y tiempos asociados (routing problem), se aborda desde dos metodologías distintas. Una se basa en un algoritmo metaheurístico de colonia de hormigas, que permiten el enrutamiento de vehículos en función de costes y tiempos. Y la otra se basa en programación lineal entera, que también permite el enrutamiento de vehículos en función de los costes, pero que, en este caso, proporcionará más flexibilidad a la hora de establecer las restricciones del problema. En ambos casos la función objetivo es la minimización del coste de operación la ruta. En el primer caso (método ACO) con el algoritmo que se ha empleado solo se puede abordar la optimización de la ruta en función del coste y del tiempo. En el segundo caso (método MILP) se pueden combinar los cuatro problemas presentados como objetivos secundarios. Se parte del enrutamiento de vehículos para la búsqueda de una ruta óptima (routing problema) y se incorporan el resto de los problemas planteados como restricciones. Es decir, se limita la frecuencia (scheduling problem) y la capacidad de carga del buque, obteniendo rutas que visitan un determinado número de puertos, y que necesitan un determinado número de barcos (sizing problem) para dar respuesta a la demanda entre origen y destino. La restricción de la capacidad del buque viene determinada por el plan de estiba (stowage problem) que establece el número máximo de contenedores, minimizando las recolocaciones de estos en las operaciones de carga/descarga y, por tanto, minimizando el tiempo de estas operaciones.

La primera aproximación al problema, el enrutamiento de vehículos con un algoritmo heurístico (ACO), permite analizar las posibles rutas óptimas entre los nodos seleccionados, pero eligiendo una sola variable a optimizar cada vez. Esto conlleva que no se pueda optimizar la ruta en función del coste teniendo en cuenta cualquiera de los otros factores como, por ejemplo, la frecuencia. El método heurístico propuesto obtiene rutas circulares únicas para los dos modos de transporte planteados. Sin embargo, la solución a la que llega en cada caso es diferente. Para el transporte multimodal obtiene rutas que visitan 20 puertos (y sus correspondientes NUTS), y para el transporte por carretera obtiene rutas que conectan los 40 NUTS definidas en la caracterización del problema.

En el método propuesto no se ha incorporado ningún tipo de penalización en cuanto al número de nodos visitados por ruta ni tampoco por tiempo o capacidad del vehículo. Estas posibles penalizaciones en los tramos de las rutas se podrían incorporar en los datos empleados como entradas del algoritmo. Si bien es cierto que se podría alterar la obtención de la ‘feromona’ que penaliza un tramo frente a otro y que, al final, determina la ruta solución, esta modificación del algoritmo no se ha incluido en este trabajo, como tampoco se ha considerado un orden prioritario en las visitas a los nodos, por lo que se observa en las rutas obtenidas tramos consecutivos que no siempre conectan NUTS cercanas, sino que algunos tramos reflejan conexiones entre NUTS de Alemania y Portugal, sin pasar por los países intermedios. No ocurre esto mismo cuando se aplica el algoritmo al transporte por carretera, la ruta resultante está, en la práctica totalidad de los casos, formada por tramos que conectan nodos más próximos. Esto puede resultar poco realista si observamos cómo son las rutas marítimas de cabotaje que están funcionando ahora mismo en Europa. Sin embargo, no es el objeto de este trabajo la aproximación exacta a una ruta real, sino la evaluación de este algoritmo para su uso en la optimización de rutas marítimas y qué sería necesario incorporar para obtener mejores soluciones. Una de ellas sería la incorporación de restricciones que hiciesen referencia a la frecuencia de visitas a los puertos, la capacidad máxima de transporte en el buque, el flujo mínimo de contenedores a transportar en cada tramo o la distancia mínima entre NUTS de un mismo tramo. Esta combinación de factores permitiría obtener la planificación de la flota necesaria para cubrir el servicio. Algunas de las restricciones descritas antes se han podido probar en el algoritmo MILP por ser de más sencilla implementación. En el caso del ACO implicaría la modificación sustancial del algoritmo, lo que no se ha abordado en esta tesis.

En el segundo caso se ha empleado un algoritmo de Programación Lineal Entera (MILP) que resulta más flexible que el ACO para incorporar restricciones. Éstas acotan el conjunto solución, de forma, que se pueden obtener rutas más ajustadas a los condicionantes propuestos inicialmente. Sin embargo, un problema que presentan este tipo de algoritmos es que, como la programación lineal entera es un problema NP-hard, puede encontrarse una solución en un tiempo de computación adecuado o que el algoritmo no converja. La solución del algoritmo es un conjunto de rutas, y no una única ruta como en el caso del método heurístico (ACO). Este conjunto de rutas se caracteriza por un coste mínimo cumpliendo con la restricción de tiempo (una semana) y la restricción de capacidad (número de contenedores que el buque puede transportar). No se ha restringido el número de buques que formarían la flota, por lo que se supone una capacidad ilimitada para el transporte de los contenedores (flujo de mercancías entre nodos). Limitar el número de buques implicaría imponer una restricción a la capacidad total de flota. Esta relajación en la restricción permite la convergencia del algoritmo, de manera que éste puede encontrar alguna solución óptima.

El resultado del algoritmo va a depender de las matrices OD utilizadas. El hecho de emplear diferentes matrices OD para el flujo entre puertos, manteniendo la matriz OD de flujos entre NUTS, ha dado como resultado que el algoritmo escoja tramos que conectan

diferentes NUTS, es decir, rutas formadas por NUTS cercanas frente a rutas formadas por NUTS más alejadas entre sí.

En el primer caso, con la matriz OD de flujos portuarios de Eurostat, el algoritmo buscó soluciones a la función objetivo de coste mínimo seleccionando aquellos puertos que tenían un flujo mínimo entre ellos para reducir así, los costes variables. Al flexibilizar la restricción referente a la capacidad máxima de transporte de mercancía en el tramo, esto es, $\sum_{y=1}^Y \sum_{b=1}^B TPM_b^y \geq \sum_{y=1}^Y U_{ij}^y$, el algoritmo encuentra una solución que cumple con esta restricción al mismo tiempo que cumple con el resto de las restricciones. En el segundo caso, con la matriz OD de flujos portuarios de las Autoridades Portuarias, el grado de flexibilización de las restricciones se aprecia en la que hace referencia a la frecuencia, es decir, $\sum_{y=1}^Y T_y^r \leq 168$. Debido a que no se ha incluido un límite en el tamaño de la flota, sino que se ha considerado que se podían incorporar nuevos buques al servicio sin penalización alguna, ha sido posible cumplir con esta restricción utilizando un número ilimitado de buques para el dimensionamiento de la flota. Añadir una restricción en el número de buques disponibles en cada tramo no hubiese permitido la convergencia del algoritmo.

Los factores evaluados en el análisis de sensibilidad permiten observar que una variación en la velocidad del buque, el precio del chárter o el tamaño del buque no influyen de forma determinante en las rutas circulares seleccionadas por el algoritmo, es decir, no influyen en el enrutamiento, debido a que escoge tramos similares en todas las variantes realizadas. En todos los casos se cumple con la restricción semanal y el número de contenedores movidos en cada tramo es semejante. Esto es posible porque no se ha establecido una restricción en el número de buques disponibles por tramo, que flexibiliza significativamente la complejidad del problema.

En el análisis de sensibilidad, dentro de cada variación analizada, se ha podido determinar la influencia que cada una de ellas tiene en los resultados de costes y tiempos. Las rutas obtenidas para cada valor de las variables analizadas son bastante similares en cuanto a nodos visitados, distancias recorridas y número de contenedores movidos entre nodos. A igualdad de coste de combustible y chárter, una reducción en la velocidad del buque implica disminuir los costes variables, como era previsible, puesto que el factor que más influye es el consumo de combustible. Y en este mismo escenario un incremento en el número de puertos (de 4 a 6 puertos) significa aumentar el número de buques que deben dar servicio a la ruta, manteniendo la frecuencia semanal. En el caso de la navegación low steaming el número de buques se duplica, pasando de 2 a 4, y en el caso de la navegación a la velocidad de servicio, el incremento es de un buque. Observando los resultados de costes cabe destacar la mayor influencia del precio del combustible que del precio del chárter a la hora de variar la velocidad del buque. Aunque se reduzca el número de buques, el incremento en la velocidad que es necesario realizar para mantener el nivel de servicio, resulta en un aumento importante de los costes variables, que lleva a que el coste total sea superior en el caso de la ruta con 2 buques, que la ruta con 4 pero navegando a baja velocidad. En el análisis de sensibilidad realizado con el precio del chárter se observa que este valor no tiene una influencia relevante en el coste total

asociado a la ruta, puesto que resulta más impactante cualquier variación en la velocidad, que implica un mayor o menor consumo de combustible.

Ante las condiciones de contorno de precio máximo del combustible y precio máximo del chárter por día, la solución ofrecida por el algoritmo es una ruta que conecta NUTS más alejadas, pero con un menor movimiento de contenedores. Debido a que el algoritmo intenta ajustarse a la función del mínimo coste total, el ajuste a la baja se produce en el número de contenedores cargados/descargados en los puertos, que disminuye el coste variable, frente a la subida del coste fijo por el precio del chárter y del propio coste variable por el precio del combustible. El coste variable es el término que más peso tiene en los costes totales y lo determinan los costes asociados a la carga/descarga de contenedores en los puertos y el precio del combustible. Por lo tanto, para reflejar en el algoritmo que el precio del chárter tiene un impacto en la planificación de la flota (número de buques desplegados en una ruta) se debería incorporar una nueva restricción que supusiese un límite superior en el coste asociado al chárter y al número de buques disponibles.

Finalmente, el factor del tamaño del buque tiene una incidencia clara sobre los costes variables por el número de contenedores que cargan o descargan cada uno de ellos y por el consumo diferente que tiene cada buque. Pero en este análisis se deberían tener en cuenta otros factores como son la satisfacción de la demanda o la disponibilidad en el mercado de buques de un tamaño u otro, que resultaría más determinante que los factores analizados como precio del combustible, del chárter o la velocidad de navegación. Resulta más importante la adecuación del tamaño de buque al flujo de mercancía estimado para la ruta, por lo que lo ideal sería optimizar las dimensiones y capacidades del buque para cada ruta en particular. Esto podría implicar no utilizar buques de igual capacidad para una misma ruta.

En una fase previa a la aplicación de los métodos de programación lineal y heurístico se ha empleado el software GIS TransCAD para obtener la matriz OD de costes asociada a todos los tramos definidos en la red. Los softwares GIS resultan insuficientes para dar una respuesta completa a este tipo de problemas (variaciones del clásico VRP). La combinación de este tipo de software con algoritmos heurísticos o MILP abre otro campo de posibles soluciones. Esto es debido a que el uso de los softwares GIS resulta de gran ayuda a la hora de transformar los datos asociados a todas las variables que definen una ruta (costes portuarios, costes y capacidad del buque, distancias, etc.) en un conjunto de datos válidos para ser utilizados en un algoritmo de tipo heurístico. Con la herramienta GIS se realiza una primera asignación de los flujos de mercancía a la red creada de rutas marítimas, carreteras y nodos de generación y recepción de esos flujos (NUTS). Esto reduce las dimensiones del problema para su posterior tratamiento en los algoritmos de optimización (Janela et al., 2022).

Se ha constatado en la bibliografía consultada que el tratamiento que se le da a la demanda y oferta en las rutas no es el mismo. Algunos trabajos definen datos ficticios (Chu et al., 2003) de movimiento de mercancías entre puertos, otros definen ese flujo de

mercancías como una variable continua y no discreta (Agarwal & Ergun, 2008) o bien simplemente asumen que el flujo de mercancía es igual a la capacidad de los buques desplegados en la ruta (Vaferi et al., 2018). Existe también la posibilidad de acceder a los datos de flujos entre puertos a través de una naviera (Natalia et al., 2021), esto da quizá una mayor precisión a los resultados de los modelos de optimización. Sin embargo, en todos estos trabajos académicos se considera solamente el flujo de contenedores entre los puertos y se considera que la satisfacción de la demanda es transportar el número de contenedores asignado entre dos puertos (origen – destino). En general la demanda se considera determinística, existe algún ejemplo que considera la demanda como estocástica (Christensen et al., 2019). En este trabajo se ha considerado que la demanda es determinística, pero se ha incluido, por un lado, como demanda el flujo de mercancías entre regiones europeas (NUTS), de forma que las rutas definidas entre esas regiones debían satisfacer dicha demanda. Y, por otro lado, se ha considerado como oferta la capacidad de los puertos para dar salida a un número determinado de contenedores, que podrían o no dar satisfacción a la demanda entre NUTS. Esta oferta se ha representado como el flujo de mercancía entre puertos, que según la fuente consultada puede variar significativamente (Eurostat o Autoridad Portuaria).

Una consecuencia del empleo de este tipo de datos es que los resultados del modelo Logit no son concluyentes en cuanto a la capacidad de atracción de mercancía del transporte multimodal frente al transporte por carretera. El modelo se ajustó con los datos de flujo de mercancías observados en la actualidad, pero no incorpora factores como el interés de un cargador por un modo u otro de transporte según las condiciones del servicio, ya que no hay datos de encuestas al respecto. Sin embargo, sí se ha podido valorar, a través del algoritmo MILP, la influencia de factores asociados a este tipo de transporte y sus rutas, como son la velocidad y el tamaño del buque, el precio del combustible o del chárter del buque.

Las principales aportaciones de este trabajo a las metodologías de optimización de ruta multimodales son el nivel de detalle de los modelos utilizados debido al desglose exhaustivo que se ha realizado de los costes asociados al tramo marítimo y de los tiempos asignados a la interacción buque-puerto. Además, se ha desarrollado un modelo para la estiba del buque minimizando las recolocaciones de contenedores, que resultan ser movimientos improductivos en las operaciones de carga/descarga en los puertos, y se ha combinado con el diseño de rutas teniendo en cuenta los flujos entre regiones y las capacidades de los puertos. A esto se ha añadido una restricción de frecuencia en la visita a los puertos y se ha obtenido el número de buques que sería necesario desplegar en cada ruta. Sin embargo, quedan factores aún por analizar y evaluar, como la capacidad de captación de mercancía o la optimización del buque.

La optimización de rutas, a través de algoritmos como los presentados en esta tesis, es un campo amplio de trabajo en el que se pueden proponer múltiples escenarios, con restricciones y condiciones de contorno que permiten evaluar casi infinitas soluciones. El análisis de estas alternativas puede ser de gran ayuda en la toma de decisiones de una naviera tanto a medio como a largo plazo.

8.2. Trabajo futuro

A partir del trabajo realizado surgen nuevas perspectivas que resultarían interesantes analizar en trabajos futuros. Fundamentalmente estaría enfocado a la evolución de los algoritmos de optimización planteados para incrementar las condiciones que se tienen en cuenta en los mismos y obtener así resultados más precisos. Esto implica incrementar o refinar las restricciones y penalizaciones ya impuestas en este trabajo.

Entre las condiciones a incorporar estarían, por ejemplo, la determinación de la capacidad para captar tráficos de mercancía contenerizada de las rutas multimodales frente al transporte por carretera de una forma más precisa, desarrollando en detalle el modelo Logit. En este modelo se podrían establecer penalizaciones de distancias mínimas recorridas en cada tramo que incrementase las probabilidades de seleccionar el modo multimodal por tiempo o coste frente al transporte por carretera. Por otro lado, sería necesario ajustar la capacidad de la flota y, por tanto, el tamaño del buque para las rutas multimodales analizadas, con la hipótesis de que se pueden emplear buques de diferentes tamaños y no iguales, como se ha hecho en el presente trabajo. Esto parece determinante a la hora de conseguir una verdadera optimización de dichas rutas. El diseño de rutas donde el conjunto de buques desplegados en las mismas resulte óptimo, teniendo en cuenta los flujos de mercancía y la disponibilidad de los buques en el mercado, añade nuevas restricciones, que convierten el problema de optimización en más complejo, pero que podrían obtener soluciones más realistas al problema planteado. Otro punto a evaluar podría ser el determinar qué combinación de tipos de contenedores (TEU, FEU, refrigerados o no) resulta la óptima dada una ruta y un tamaño de buque.

En este trabajo se ha evaluado la interacción entre buque y puerto a través de los costes en que incurre un buque y de los tiempos asociados a la carga y descarga. Pero sería interesante incorporar las ventanas de tiempos que existen para la utilización de las terminales, que son bastantes restrictivas y que afectarían al enrutamiento. Esto sería aplicable a un planteamiento de puertos hub&spoke donde se analizase la frecuencia de entrada de los buques feeder en los puertos hub, teniendo en cuenta la frecuencia de los buques de rutas transoceánicas.

El método del MILP presentado ya permite un análisis de escenarios más o menos amplio. Sin embargo, el método metaheurístico ACO necesita un mayor desarrollo para implementar variaciones al único escenario planteado. Es preciso para esto incorporar restricciones que alteren la selección de los tramos que realizan las “hormigas”, en función de los condicionantes de las rutas.

9. Referencias

- Agarwal, R., & Ergun, O. (2008). Ship Scheduling and Network Design for Cargo Routing in Liner Shipping. *Transportation Science*, 42(2), 175–196. <https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0205>
- Agarwal, R., & Ergun, O. (2010). Network Design and Allocation Mechanisms for Carrier Alliances in Liner Shipping. *OPERATIONS RESEARCH*, 00(0). <https://doi.org/10.1287/xxxx.0000.0000>
- Alvariño, R., Azpíroz, J. J., & Meizoso, M. (1997). *El proyecto básico del buque mercante* (1st ed., Vol. 1). Gráficas Don Bosco.
- Ambrosino, D., Paolucci, M., & Schiomachen, A. (2015). *A MIP Heuristic for Multi Port Stowage Planning | Elsevier Enhanced Reader*. <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352146515002136?token=3E013E1B7E275A665AD48ABFCB0BAC777A20A0400BA...1/10>
- Ambrosino, D., Paolucci, M., & Sciomachen, A. (2015a). Experimental evaluation of mixed integer programming models for the multi-port master bay plan problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2–3), 263–284. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9185-4>
- Ambrosino, D., Paolucci, M., & Sciomachen, A. (2015b). Experimental evaluation of mixed integer programming models for the multi-port master bay plan problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 27(2–3), 263–284. <https://doi.org/10.1007/s10696-013-9185-4>
- Ambrosino, D., Paolucci, M., & Sciomachen, A. (2017a). Computational evaluation of a MIP model for multi-port stowage planning problems. *Soft Computing*, 21(7), 1753–1763. <https://doi.org/10.1007/s00500-015-1879-y>
- Ambrosino, D., Paolucci, M., & Sciomachen, A. (2017b). Computational evaluation of a MIP model for multi-port stowage planning problems. *Soft Computing*, 21(7), 1753–1763. <https://doi.org/10.1007/s00500-015-1879-y>
- Ambrosino, D., Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2004a). Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(2), 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.09.002>
- Ambrosino, D., Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2004b). Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(2), 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2003.09.002>
- Ambrosino_Shipping liner*. (n.d.).

- Ariyasingha, I. D. I. D., & Fernando, T. G. I. (2015). Performance analysis of the multi-objective ant colony optimization algorithms for the traveling salesman problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, *23*, 11–26. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.02.003>
- Avriel, M, Penn, M, Shpirer, N. (2000). Container ship stowage problem: complexity and connection to the coloring of circle graphs. *Discrete Applied Mathematics*, *103*, 271–279. http://ac.els-cdn.com/S0166218X99002450/1-s2.0-S0166218X99002450-main.pdf?_tid=d1d0dc70-3b67-11e4-93fd-00000aacb35d&acdnat=1410627961_d2ae6e133f59c732a4fe6f4b27eaf131
- Azevedo, A. T., de Salles Neto, L. L., Chaves, A. A., & Moretti, A. C. (2018). Solving the 3D stowage planning problem integrated with the quay crane scheduling problem by representation by rules and genetic algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, *65*, 495–516. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.01.006>
- Bartošek, A., & Marek, O. (2013). Quay Cranes in Container Terminals. *Transactions on Transport Sciences*, *6*(1), 9–18. <https://doi.org/10.2478/v10158-012-0027-y>
- Bierwirth, C., & Meisel, F. (2010). A survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, *202*(3), 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.05.031>
- Brandão, J. (2009). A deterministic tabu search algorithm for the fleet size and mix vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, *195*(3), 716–728. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.059>
- Cariou, P. (2011). Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *16*(3), 260–264. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.12.005>
- Chen, C., & Zeng, Q. (2010). Designing container shipping network under changing demand and freight rates. *Transport*, *25*(1), 46–57. <https://doi.org/10.3846/transport.2010.07>
- Cheng, Q., & Wang, C. (2021). Container liner shipping network design with shipper's dual preference. *Computers and Operations Research*, *128*. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.105187>

- Cho, S.-C., & Perakis, a. N. (1996). Optimal liner fleet routeing strategies. *Maritime Policy & Management*, 23(3), 249–259. <https://doi.org/10.1080/03088839600000087>
- Christensen, J., Erera, A., & Pacino, D. (2019). A rolling horizon heuristic for the stochastic cargo mix problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 123, 200–220. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.10.010>
- Christensen, J., & Pacino, D. (2017). A matheuristic for the Cargo Mix Problem with Block Stowage. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 151–171. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.10.005>
- Christiansen, M., Fagerholt, K., Nygreen, B., & Ronen, D. (2013). Ship routing and scheduling in the new millennium. *European Journal of Operational Research*, 228(3), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.12.002>
- Chu, C. W., Kuo, T. C., & Shieh, J. C. (2003). A mixed integer programming model for routing containerships. *Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 96–103. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2285>
- Chuang, T. N., Lin, C. T., Kung, J. Y., & Lin, M. da. (2010). Planning the route of container ships: A fuzzy genetic approach. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 2948–2956. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.040>
- Cifuentes, C. D., & Riff, M. C. (2020). G-CREM: A GRASP approach to solve the container relocation problem for multibays. *Applied Soft Computing*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106721>
- Cohen, M. W., Dahan, A., & Kaspi, I. (2015). Software system for container vessel stowage planning using genetic algorithm. *GECCO 2015 - Companion Publication of the 2015 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 1519–1520. <https://doi.org/10.1145/2739482.2764633>
- Comisión Europea. (n.d.). *Estrategia de movilidad sostenible e inteligente: encauzar el transporte europeo de cara al futuro*. 2019. Retrieved October 19, 2022, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:52020DC0789>
- Conca, A., Febbraro, A. di, Giglio, D., & Rebora, F. (2018). Automation in freight port call process: Real time data sharing to improve the stowage planning.

Transportation Research Procedia, 30, 70–79.
<https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.009>

- Corman, F., Viti, F., & Negenborn, R. R. (2017). Equilibrium models in multimodal container transport systems. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 29(1), 125–153. <https://doi.org/10.1007/s10696-015-9224-4>
- Dayananda Shetty K, Vijayanand Gurudev, & Dwarakish.G.S. (2021). *Factors affecting the Vessel Turnaround time in a Seaport*. March, 2–2. <https://www.researchgate.net/publication/350654572>
- Delgado, A., Jensen, R. M., Janstrup, K., Rose, T. H., & Andersen, K. H. (2012a). A Constraint Programming model for fast optimal stowage of container vessel bays. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.01.028>
- Delgado, A., Jensen, R. M., Janstrup, K., Rose, T. H., & Andersen, K. H. (2012b). A Constraint Programming model for fast optimal stowage of container vessel bays. *European Journal of Operational Research*, 220(1), 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.01.028>
- Ding, D., & Chou, M. C. (2015a). Stowage planning for container ships: A heuristic algorithm to reduce the number of shifts. *European Journal of Operational Research*, 246(1), 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.03.044>
- Ding, D., & Chou, M. C. (2015b). Stowage planning for container ships: A heuristic algorithm to reduce the number of shifts. *European Journal of Operational Research*, 246(1), 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.03.044>
- Ding, Ding, Chou, M. C. (2015). Stowage planning for container ships: a heuristic algorithm to reduce the number of shifts. *European Journal of Operational Research*, 246, 1–8.
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997). Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53–66. <https://doi.org/10.1109/4235.585892>
- Ducruet, C., Itoh, H., & Merk, O. (2014). Time Efficiency at World Container Ports. *International Transport Forum*, 2014–08, 30. www.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPapers/jtrcpapers.ht

ml%5Cnwww.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPapers/jtrcp
apers.html%5Cnwww.internationaltransportforum.org/jtrc/DiscussionPap
ers/jtrcpapers.html

Dulebenets, M. A. (2018). A comprehensive multi-objective optimization model for the vessel scheduling problem in liner shipping. *International Journal of Production Economics*, 196, 293–318.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.10.027>

European Commission. (2013, March 23). *Europe's Seaports 2030: Challenges ahead*.
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/MEMO_13_448

Europea, C. (2019). *Libro Blanco del transporte*. <https://doi.org/10.2832/42444>

Fagerholt, K. (2004). Designing optimal routes in a liner shipping problem. *Maritime Policy and Management*, 31(4), 259–268.
<https://doi.org/10.1080/0308883042000259819>

Fagerholt, K., & Fagerholt, K. (1999). Optimal fleet design in a ship routing problem. *Science And Technology*, 6, 453–464.

Fan, L., Yoke Hean Low, M., Shell Ying, H., Wen Jing, H., Min, Z., & Cho Aye, W. (n.d.). *Stowage Planning of Large Containership with Tradeoff between Crane Workload Balance and Ship Stability*.

Gandra, V. S. M., Çalík, H., Toffolo, T. A. M., Carvalho, M. A. M., & Berghe, G. vanden. (2022). The vessel swap-body routing problem. *European Journal of Operational Research*. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.015>

Gelareh, S., & Meng, Q. (2010). A novel modeling approach for the fleet deployment problem within a short-term planning horizon. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(1), 76–89.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.004>

Gelareh, S., & Pisinger, D. (2011). Fleet deployment, network design and hub location of liner shipping companies. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(6), 947–964.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.03.002>

Ghafurian, S., & Javadian, N. (2011). An ant colony algorithm for solving fixed destination multi-depot multiple traveling salesmen problems. *Applied Soft Computing Journal*, 11(1), 1256–1262.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.03.002>

- Hellsten, E. O., Sacramento, D., & Pisinger, D. (2021). A branch-and-price algorithm for solving the single-hub feeder network design problem. *European Journal of Operational Research*.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.08.046>
- Homsí, G., Martinelli, R., Vidal, T., & Fagerholt, K. (2020). Industrial and tramp ship routing problems: Closing the gap for real-scale instances. *European Journal of Operational Research*, 283(3), 972–990.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.11.068>
- Hsu, C. I., & Hsieh, Y. P. (2007). Routing, ship size, and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7–8), 899–916.
<https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.08.012>
- Ibargüen, V. M. Q. (2005). *Análisis de eficiencia en logística portuaria mediante DEA*. 292.
- Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2006a). Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 373–389. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2004.07.066>
- Imai, A., Sasaki, K., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2006b). Multi-objective simultaneous stowage and load planning for a container ship with container rehandle in yard stacks. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 373–389. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.07.066>
- Imai, A., Shintani, K., & Papadimitriou, S. (2009). Multi-port vs. Hub-and-Spoke port calls by container ships. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(5), 740–757.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.01.002>
- Iris, Ç., Christensen, J., Pacino, D., & Ropke, S. (2018). Flexible ship loading problem with transfer vehicle assignment and scheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111, 113–134.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2018.03.009>
- Ismkhan, H. (2017). Effective heuristics for ant colony optimization to handle large-scale problems. *Swarm and Evolutionary Computation*, 32, 140–149.
<https://doi.org/10.1016/J.SWEVO.2016.06.006>
- Janela, J., Mourão, M. C., & Santiago Pinto, L. (2022). Arc routing with trip-balancing and attractiveness measures — A waste collection case study.

- Computers and Operations Research*, 147.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105934>
- Jeong, Y., Saha, S., Chatterjee, D., & Moon, I. (2018). Direct shipping service routes with an empty container management strategy. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 118, 123–142.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2018.07.009>
- Ji, M., Guo, W., Zhu, H., & Yang, Y. (2015). Optimization of loading sequence and rehandling strategy for multi-quay crane operations in container terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 80, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.05.004>
- Jia, S., Li, C. L., & Xu, Z. (2020). A simulation optimization method for deep-sea vessel berth planning and feeder arrival scheduling at a container port. *Transportation Research Part B: Methodological*, 142, 174–196.
<https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.10.007>
- Jin, J. G., Meng, Q., & Wang, H. (2021). Feeder vessel routing and transshipment coordination at a congested hub port. *Transportation Research Part B: Methodological*, 151, 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.07.002>
- Jin, Z., You, Q., & Wang, J. (2005). The container ship routing problem and its practical solutions. *International Conference on ...*, 767–773.
<http://www.seiofbluemountain.com/upload/product/201001/1263371324bl0u7poi.pdf>
- Jovanovic, R., Tanaka, S., Nishi, T., & Voß, S. (2019). A GRASP approach for solving the Blocks Relocation Problem with Stowage Plan. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 31(3), 702–729.
<https://doi.org/10.1007/s10696-018-9320-3>
- Kang, J. G., & Kim, Y. D. (2002). Stowage planning in maritime container transportation. *Journal of the Operational Research Society*, 53(4), 415–426. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601322>
- Kang, J.-G., & Kim, Y.-D. (2002). Stowage planning in maritime container transportation. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 415–426.
<https://doi.org/10.1057=palgrave=jors=2601322>
- Karlaftis, M. G., Kepaptsoglou, K., & Sambracos, E. (2009). Containership routing with time deadlines and simultaneous deliveries and pick-ups. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 210–221. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.05.001>

- Khafid, N., & Syairudin, B. (2019). A concept to Reduce Idle Time on Stevedoring Activities in a Container Terminal. *IPTEK Journal of Proceedings Series, 0(1)*, 43. <https://doi.org/10.12962/j23546026.y2019i1.5105>
- Kontovas, C. a. (2014). The Green Ship Routing and Scheduling Problem (GSRSP): A conceptual approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment, 31*, 61–69. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.05.014>
- Korach, A., Brouer, B. D., & Jensen, R. M. (2020). Matheuristics for slot planning of container vessel bays. *European Journal of Operational Research, 282(3)*, 873–885. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.09.042>
- Kroer, C., Kjaer Svendsen, M., Jensen, R. M., Kiniry, J., & Leknes, E. (2016). SYMBOLIC CONFIGURATION FOR INTERACTIVE CONTAINER SHIP STOWAGE PLANNING. In *Computational Intelligence* (Vol. 32, Issue 2).
- Lashgari, M., Akbari, A. A., & Nasersarraf, S. (2021). A new model for simultaneously optimizing ship route, sailing speed, and fuel consumption in a shipping problem under different price scenarios. *Applied Ocean Research, 113*. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2021.102725>
- Le, M., & Yu, H. (2013). The RHSA strategy for the allocation of outbound containers based on the hybrid genetic algorithm. *Journal of Marine Science and Application, 12(3)*, 344–350. <https://doi.org/10.1007/s11804-013-1200-3>
- Lee, Z. Q., Fan, R., & Hsu, W. J. (2018). A Near-Optimal Algorithm for Constraint Test Ordering in Automated Stowage Planning. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 15(3)*, 1298–1308. <https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2779470>
- Li, F., Tian, C., Cao, R., & Ding, W. (2008). An integer linear programming for container stowage problem. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 5101 LNCS(PART 1)*, 853–862. https://doi.org/10.1007/978-3-540-69384-0_90
- Li, J., Zhang, Y., & Ji, S. (2017). A two-phase approach for inland container ship stowage on full route on Yangtze River. *4th International Conference on Transportation Information and Safety*, 799–805.
- Li, J., Zhang, Y., Ma, J., & Ji, S. (2018). Multi-Port Stowage Planning for Inland Container Liner Shipping Considering Weight Uncertainties. *IEEE Access, 6*, 66468–66480. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2878308>

- Lin, D.-Y., & Tsai, Y.-Y. (2014). The ship routing and freight assignment problem for daily frequency operation of maritime liner shipping. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 67, 52–70. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2014.04.003>
- Lind, M., Lane, A., Bjørn-Andersen, N., Ward, R., Michaelides, M., Sancricca, M., Watson, R. T., Bergmann, M., Haraldson, S., Andersen, T., Park, J., & Theodossiou, S. (2018). *Ships and Port Idle Time: Who are the Culprits?*
- Lizárraga, E., Castillo, O., & Soria, J. (2013). A method to solve the traveling salesman problem using ant colony optimization variants with ant set partitioning. *Studies in Computational Intelligence*, 451, 237–246. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33021-6_19
- Low, M. Y. H., Zeng, M., Hsu, W. J., Huang, S. Y., Liu, F., & Win, C. A. (2011). Improving safety and stability of large containerships in automated stowage planning. *IEEE Systems Journal*, 5(1), 50–60. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2010.2100198>
- Lu, H. A. (2002). Modelling ship's routing bounded by the cycle time for marine liner. *Journal of Marine Science and Technology*, 10(1), 61–67. <https://doi.org/10.51400/2709-6998.2302>
- Mai, T., Bastin, F., & Frejinger, E. (2018). A decomposition method for estimating recursive logit based route choice models. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 7(3), 253–275. <https://doi.org/10.1007/s13676-016-0102-3>
- Martins, P. T., Lobo, V. J. A. S., & Vairinhos, V. (2009a). *Container Stowage Problem Solution for Short Sea Shipping*.
- Martins, P. T., Lobo, V. J. A. S., & Vairinhos, V. (2009b). *Container Stowage Problem Solution for Short Sea Shipping*. 2001, 1–8.
- Martins, P. T., Lobo, V. J. A. S., & Vairinhos, V. (2009c). *Container Stowage Problem Solution for Short Sea Shipping*. 2001, 1–8.
- Matsaini, & Santosa, B. (2018). Solving the Container Stowage Problem (CSP) using Particle Swarm Optimization (PSO). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 337(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012002>
- Meng, Q., & Wang, S. (2011a). Liner shipping service network design with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and*

- Transportation Review*, 47(5), 695–708.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.02.004>
- Meng, Q., & Wang, T. (2011b). A scenario-based dynamic programming model for multi-period liner ship fleet planning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(4), 401–413.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.12.005>
- Meyer de Freitas, L., Becker, H., Zimmermann, M., & Axhausen, K. W. (2019). Modelling intermodal travel in Switzerland: A recursive logit approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 119, 200–213.
<https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.11.009>
- Monaco, M. F., Sammarra, M., & Sorrentino, G. (2014). The terminal-oriented ship stowage planning problem. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 256–265. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.05.030>
- Moura, A., & Oliveira, J. F. (2008). An integrated approach to the vehicle routing and container loading problems. *OR Spectrum*, 31(4), 775–800.
<https://doi.org/10.1007/s00291-008-0129-4>
- Moura, A., Oliveira, J., & Pimentel, C. (2013). A Mathematical Model for the Container Stowage and Ship Routing Problem. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 12(3), 217–231.
<https://doi.org/10.1007/s10852-012-9207-3>
- Natalia, C., Holine, M., & Silalahi, A. (2021). A simultaneous container assignment and ship scheduling optimisation model in container shipping. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 37(3), 213–219.
<https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2021.05.002>
- Ng, M. (2015). Container vessel fleet deployment for liner shipping with stochastic dependencies in shipping demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 74, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2015.01.004>
- Ning, Z., Weijian, M., Chao, M., & Jiaqi, C. (2013). Study on vessel slot planning problem in stowage process of outbound containers. *Journal of Applied Sciences*, 13(20), 4278–4285. <https://doi.org/10.3923/jas.2013.4278.4285>
- Ning, Z., Yifan, S., Jiaqi, C., Chao, M., & Weijian, M. (2013). Study on bay-filling problem in stowage planning of export containers. *Information Technology Journal*, 12(21), 5967–5974.
- Norstad, I., Fagerholt, K., & Laporte, G. (2011). Tramp ship routing and scheduling with speed optimization. *Transportation Research Part C:*

- Emerging Technologies*, 19(5), 853–865.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.05.001>
- Notteboom, T., & Cariou, P. (2013). Slow steaming in container liner shipping: Is there any impact on fuel surcharge practices? *International Journal of Logistics Management*, 24(1), 73–86. <https://doi.org/10.1108/IJLM-05-2013-0055>
- O, M. C. M., Pato, M. v., & O, a. C. P. (2002). Ship assignment with hub and spoke constraints. *Maritime Policy & Management*, 29(2), 135–150.
<https://doi.org/10.1080/03088830110078364>
- Pacino, D., & Delgado, A. (2013). *Computational Logistics*. 8197(September).
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-41019-2>
- Pacino, D., Delgado, A., Jensen, R., & Bebbington, T. (2011). Fast generation of near-optimal plans for eco-efficient stowage of large container vessels. *Computational Logistics*.
- Pacino, D., Delgado, A., Jensen, R. M., & Bebbington, T. (n.d.). *Fast Generation of Near-Optimal Plans for Eco-Efficient Stowage of Large Container Vessels*.
- Pacino, D., Delgado, A., Jensen, R. M., & Bebbington, T. (2012). An accurate model for seaworthy container vessel stowage planning with ballast tanks. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 7555 LNCS, 17–32. https://doi.org/10.1007/978-3-642-33587-7_2
- Pang, K. W., Xu, Z., & Li, C. L. (2011). Ship routing problem with berthing time clash avoidance constraints. *International Journal of Production Economics*, 131(2), 752–762. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.03.013>
- Parreño, F., Pacino, D., & Alvarez-Valdes, R. (2016). A GRASP algorithm for the container stowage slot planning problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 94, 141–157.
<https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.07.011>
- Parreño-Torres, C., Çalik, H., Alvarez-Valdes, R., & Ruiz, R. (2021). Solving the generalized multi-port container stowage planning problem by a matheuristic algorithm. *Computers and Operations Research*, 133.
<https://doi.org/10.1016/j.cor.2021.105383>

- Plum, C. E. M., Pisinger, D., Salazar-González, J. J., & Sigurd, M. M. (2014). Single liner shipping service design. *Computers and Operations Research*, *45*, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2013.11.018>
- Polat, O., Günther, H.-O., & Kulak, O. (2014). The feeder network design problem: Application to container services in the Black Sea region. *Maritime Economics & Logistics*, *16*(3), 343–369. <https://doi.org/10.1057/mel.2014.2>
- Prashker, J. N., & Bekhor, S. (2004). Route choice models used in the stochastic user equilibrium problem: A review. *Transport Reviews*, *24*(4), 437–463. <https://doi.org/10.1080/0144164042000181707>
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. a. (2010). Balancing the economic and environmental performance of maritime transportation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *15*(8), 458–462. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2010.05.001>
- Psaraftis, H. N., & Kontovas, C. a. (2014). Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *44*, 52–69. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.001>
- Qi, X., & Song, D. P. (2012). Minimizing fuel emissions by optimizing vessel schedules in liner shipping with uncertain port times. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *48*(4), 863–880. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.02.001>
- Qin, T., Du, Y., Chen, J. H., & Sha, M. (2020). Combining mixed integer programming and constraint programming to solve the integrated scheduling problem of container handling operations of a single vessel. *European Journal of Operational Research*, *285*(3), 884–901. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.02.021>
- Reggiani, A., Nijkamp, P., & Tsang, W. F. (n.d.). *EUROPEAN FREIGHT TRANSPORT ANALYSIS USING NEURAL NETWORKS AND LOGIT MODELS*.
- Reinhardt, L. B., & Pisinger, D. (2012). A branch and cut algorithm for the container shipping network design problem. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, *24*(3), 349–374. <https://doi.org/10.1007/s10696-011-9105-4>

- Rich, J., Holmblad, P. M., & Hansen, C. O. (2009). A weighted logit freight mode-choice model. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(6), 1006–1019. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.02.001>
- Rodrigo de Larrucea, J. (2018). *Manual del transporte en contenedor* (D. Soler, Ed.; First edition, Vol. 1). Marge Books.
- Sambracos, E., Paravantis, J. a, Tarantilis, C. D., & Kiranoudis, C. T. (2004). Dispatching of small containers via coastal freight liners: The case of the Aegean Sea. *European Journal of Operational Research*, 152(2), 365–381. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00030-4)
- Sciomachen, A., & Tanfani, E. (2007). A 3D-BPP approach for optimising stowage plans and terminal productivity. *European Journal of Operational Research*, 183(3), 1433–1446. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.11.067>
- Shintani, K., Imai, A., Nishimura, E., & Papadimitriou, S. (2007). The container shipping network design problem with empty container repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(1), 39–59. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2005.05.003>
- Song, D. P., Li, D., & Drake, P. (2015). Multi-objective optimization for planning liner shipping service with uncertain port times. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 84, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.10.001>
- Stopford, M. (2008). *Maritime Economics* (3rd ed., Vol. 1). Routledge, Taylor & Francis Group.
- Takano, K., & Arai, M. (2009). A genetic algorithm for the hub-and-spoke problem applied to containerized cargo transport. In *Journal of Marine Science and Technology* (Vol. 14, Issue 2, pp. 256–274). <https://doi.org/10.1007/s00773-008-0035-0>
- Takano, K., Member, S., & Arai, M. (2010). *Study on a Liner Shipping Network Design Considering Empty Container Reposition Study on a Liner Shipping Network Design Considering Empty Container Reposition* □ □.
- Tanaka, S., & Voß, S. (2019). An exact algorithm for the block relocation problem with a stowage plan. *European Journal of Operational Research*, 279(3), 767–781. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.06.014>

- Tierney, K., Pacino, D., & Jensen, R. M. (2014). On the complexity of container stowage planning problems. *Discrete Applied Mathematics*, 169, 225–230. <https://doi.org/10.1016/j.dam.2014.01.005>
- Tierney, Kevin, Pacino, Dario, Jensen, R. M. (2014). On the complexity of container stowage planning problems. *Discrete Applied Mathematics*, 169, 1–6.
- Ting, S. C., & Tzeng, G. H. (2003). Ship scheduling and cost analysis for route planning in liner shipping. *Maritime Economics and Logistics*, 5(4), 378–392. <https://doi.org/10.1057/palgrave.mel.9100087>
- United Nations. (2019). *Review of Maritime Transport 2019 (UNCTAD/RMT/2019)*. 132.
- Vaferi, M., Fallah, M. S., & Tayebi, A. H. (2018). A Metaheuristic for the Containership Feeder Routing Problem with Port Choice Process. *Asian Journal of Shipping and Logistics*, 34(2), 119–128. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2018.06.008>
- Vedran, M., Žarković Božica, S., & Jasna, P.-O. (2017). Marine Slow Speed Two-Stroke Diesel Engine- Numerical Analysis of Efficiencies and Important Operating Parameters. *International Scientific Journal "Machines, Technologies, Materials,"* 484(10), 481–484.
- Wang, Y., & Meng, Q. (2021). Optimizing freight rate of spot market containers with uncertainties in shipping demand and available ship capacity. *Transportation Research Part B: Methodological*, 146, 314–332. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2021.02.008>
- Wang, Y., Meng, Q., & Jia, P. (2019). Optimal port call adjustment for liner container shipping routes. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 107–128. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.07.015>
- Wang, Y., & Wang, S. (2021). Deploying, scheduling, and sequencing heterogeneous vessels in a liner container shipping route. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102365>
- Wetzel, D., & Tierney, K. (2020). Integrating fleet deployment into liner shipping vessel repositioning. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102101>
- Wilson, I. D., & Roach, P. A. (2000). Container stowage planning: A methodology for generating computerised solutions. *Journal of the Operational Research*

- Society*, 51(11), 1248–1255.
<https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601022>
- Wilson, I. D., Roach, P. a., & Ware, J. a. (2001a). Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study. *Knowledge-Based Systems*, 14(3–4), 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(01\)00090-9](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(01)00090-9)
- Wilson, I. D., Roach, P. a., & Ware, J. a. (2001b). Container stowage pre-planning: using search to generate solutions, a case study. *Knowledge-Based Systems*, 14(3–4), 137–145. [https://doi.org/10.1016/S0950-7051\(01\)00090-9](https://doi.org/10.1016/S0950-7051(01)00090-9)
- Yifan, S., Ning, Z., & Weijian, M. (2016). Group-Bay Stowage Planning Problem for Container Ship. *Polish Maritime Research*, 23(s1), 152–159. <https://doi.org/10.1515/pomr-2016-0060>
- Yoke, M., Low, H., Member, S., Zeng, M., Hsu, W. J., Huang, S. Y., Liu, F., & Win, C. A. (2011). *Improving Safety and Stability of Large Containerships in Automated Stowage Planning*. 5(1), 50–60.
- Zeng, M., Low, M. Y. H., Hsu, W. J., Huang, S. Y., Liu, F., & Win, C. A. (2010). Automated stowage planning for large containerships with improved safety and stability. *Proceedings - Winter Simulation Conference*, 1976–1989. <https://doi.org/10.1109/WSC.2010.5678873>
- Zhang, E., Mei, Q., Liu, M., & Zheng, F. (2018). Stowage Planning in Multiple Ports with Shifting Fee Minimization. *Scientific Programming*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/3450726>
- Zhang Wei-ying, Lin Yan, & Ji Zhuo-shang. (2005). Model and algorithm for container ship stowage planning based on bin-packing problem. *Journal of Marine Science and Application*, 4(3), 30–36. <https://doi.org/10.1007/s11804-005-0018-z>
- Zhen, L., Wang, S., Laporte, G., & Hu, Y. (2019). Integrated planning of ship deployment, service schedule and container routing. *Computers and Operations Research*, 104, 304–318. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.12.022>
- Zhen, L., Wu, Y., Wang, S., & Laporte, G. (2020). Green technology adoption for fleet deployment in a shipping network. *Transportation Research Part B: Methodological*, 139, 388–410. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.06.004>

Zheng, J., Ma, Y., Ji, X., & Chen, J. (2021). Is the weekly service frequency constraint tight when optimizing ship speeds and fleet size for a liner shipping service? *Ocean and Coastal Management*, 212. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105815>

Zhuge, D., Wang, S., & Wang, D. Z. W. (2021). A joint liner ship path, speed and deployment problem under emission reduction measures. *Transportation Research Part B: Methodological*, 144, 155–173. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2020.12.006>