

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Autor: Manuel J. Chica González

Tesis doctoral UDC / 2021

Director/a: Dra. Alba Martínez López.

Dr. Marcos Míguez González.

Tutor: Pablo Fariñas Alvariño.

Programa de doctorado en Ingeniería Naval e Industrial



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Dra. Alba Martínez López, Profesora Contratada Doctor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Dr. Marcos Míguez González, Profesor Contratado Doctor del Departamento de Ingeniería Naval e Industrial de la Universidade da Coruña.

CERTIFICAN:

Que la memoria titulada:

“Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal”

Ha sido realizada por D. Manuel J. Chica González bajo nuestra dirección en el Departamento de Ingeniería Naval e Industrial de la Universidade da Coruña, y constituye la Tesis que presenta para optar al grado de Doctor.

Fdo. Dra. Alba Martínez López

Codirectora de la Tesis Doctoral

Fdo. Dr. Marcos Míguez González

Codirector de la Tesis Doctoral.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

A Laura y Carlos.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

INDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	15
RESUMEN	17
RESUMO	19
ABSTRACT.....	21
PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DERIVADA DE LA TESIS	23
LISTA DE SÍMBOLOS	25
CAPÍTULO 1	
REVISIÓN DEL PROBLEMA	27
1 REVISIÓN DEL PROBLEMA	27
CAPÍTULO 2	
ESTADO DE LA CUESTIÓN	33
1 LA OPTIMIZACIÓN DE LA FLOTA EN LA INTERMODALIDAD	33
2 LA NORMATIVA MEDIOAMBIENTAL EN LA UNIÓN EUROPEA: INTERMODALIDAD FRENTE A UNIMODALIDAD.	34
3 DESAFÍOS MEDIOAMBIENTALES INMINENTES PARA EL SHORT SEA SHIPPING EN EL UNIÓN EUROPEA	37
CAPÍTULO 3	
EL MODELO MATEMÁTICO INICIAL Y LA INCLUSIÓN DE LA VALORACIÓN MEDIOAMBIENTAL	41
1 LA DEFINICIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO	41
2 FORMULACIÓN	42
2.1 <i>Flotas, unidades de carga, rutas y puertos</i>	<i>42</i>
2.2 <i>Función objetivo 1: Maximización de la diferencia en términos de coste</i>	<i>44</i>
2.3 <i>Función objetivo 2: Maximización de la diferencia en términos de tiempo</i>	<i>46</i>
2.4 <i>Función objetivo 3: Maximización de la diferencia en costes medioambientales.....</i>	<i>47</i>
CAPÍTULO 4	
TESTEO DEL MODELO OBTENIDO A TRAVÉS DE SU APLICACIÓN A UN CASO REAL: EL ESTABLECIMIENTO DE MOS EN CHILE	53
1 VIABILIDAD OPERATIVA.....	54
2 CONFIGURACIÓN DE LAS RUTAS	56
3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA.....	58
4 ADAPTACIÓN DEL MODELO.....	59
4.1 <i>El marco de optimización.....</i>	<i>60</i>
4.2 <i>Probabilidades de distribución de mercancía en los nodos.....</i>	<i>60</i>
4.3 <i>Costes unitarios del transporte por carretera y coste del MDO.....</i>	<i>63</i>
4.4 <i>Costes unitarios para las emisiones contaminantes en Chile.....</i>	<i>64</i>
5 SIMULACIONES Y RESULTADOS	65
5.1 <i>Análisis de escenarios preliminares.....</i>	<i>66</i>
5.2 <i>Análisis de escenarios actuales.</i>	<i>71</i>
6 CONCLUSIONES	78

CAPÍTULO 5

OPTIMIZACIÓN DE LA PROPULSIÓN DE LOS BUQUES EN EL MODELO MATEMÁTICO	81
1 INTRODUCCIÓN	81
2 LA MODIFICACIÓN DEL MODELO	82
2.1 <i>Adaptación de las funciones objetivo</i>	83
2.1.1 Adaptación de las funciones de costes para el cálculo de F1.....	84
2.1.2 Adaptación de las funciones de costes externos para el cálculo de F3.....	86
2.2 <i>Adaptación de la disposición general y de la capacidad de Carga</i>	89
2.2.1 Motores Duales (TMM ₃)	89
2.2.2 Motores con scrubber alimentados con HFO (TMM ₂)	93
3 CASO DE APLICACIÓN	93
4 ANÁLISIS DE RESULTADOS	95
4.1 <i>Comprobación del rendimiento del modelo modificado</i>	95
4.2 <i>Capacidad del modelo modificado frente al modelo inicial</i>	99
5 CONCLUSIONES	101

CAPÍTULO 6

VIABILIDAD TÉCNICA DE LA FLOTA OPTIMIZADA EN TÉRMINOS DE ESTABILIDAD	105
1 INTRODUCCIÓN	105
2 DEFINICIÓN DEL COMPARTIMENTADO	106
2.1 <i>Compartimentado del Buque Óptimo</i>	106
2.2 <i>1ª alternativa de compartimentado</i> :	121
2.3 <i>2ª alternativa de compartimentado</i> :	126
2.4 <i>Decisión</i> :.....	132
3 ESTUDIO DE ESTABILIDAD INTACTA DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA DEL MODELO MATEMÁTICO	133
3.1 <i>Criterio de estabilidad</i>	134
3.2 <i>Condiciones de Carga</i>	136
3.3 <i>Condiciones Previas</i>	136
3.4 <i>Estudio de las Condiciones de Carga</i>	137
3.4.1 Condición de Navegación en Lastre	137
3.4.2 Condición de Máxima Carga	141
3.4.3 Condición de Carga Homogénea.....	146
3.4.4 Condición de Carga con el Número Máximo de Contenedores a 12.5 Toneladas	151
4 CONCLUSIONES.....	156

CAPÍTULO 7

COMPORTAMIENTO DE LAS FLOTAS OPTIMIZADAS ANTE LA EVOLUCIÓN NORMATIVA MEDIOAMBIENTAL EN PUERTO	159
1 INTRODUCCIÓN	159
1.1 <i>Actuales iniciativas en los puertos europeos</i>	160
2 EL MÉTODO	162
2.1 <i>Impacto medioambiental del Cold Ironing</i>	162
2.2 <i>Tarifa medioambiental y tasas portuarias</i>	164
2.3 <i>Tiempos Portuarios</i>	165
2.4 <i>Costes de capital para la instalación del sistema necesario para uso de CI en buques SSS y sus costes operativos en puerto</i>	166
2.5 <i>Tasa interna de retorno (TIR) para las navieras</i>	166
3 CASOS DE APLICACIÓN	167

4	RESULTADOS.....	170
4.1	<i>Estimación de los factores de emisión para las redes eléctricas en los casos de aplicación.</i>	170
4.2	<i>Tarifas medioambientales.</i>	171
4.3	<i>Tasa Interna de Retorno (TIR)</i>	173
4.4	<i>Análisis de sensibilidad.</i>	174
5	CONCLUSIONES	176
CAPÍTULO 8		
CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....		179
BIBLIOGRAFÍA.....		183
ANEXO 1. CAPÍTULO 3		193
ANEXO 2. CAPÍTULO 4		203
ANEXO 3. CAPÍTULO 5		205
ANEXO 4. CAPÍTULO 6		215
ANEXO 5. CAPITULO 7		267

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Necesidades de transporte actual para líneas MoS in Chile	55
Tabla 2. Estimación de necesidades de servicio de transporte anual para líneas MoS en cada sentido.	55
Tabla 3. Restricciones del modelo.	59
Tabla 4. Comparación Chile-Portugal en el 2014. (elaboración propia).	64
Tabla 5. Factores de coste unitarios para contaminantes en el 2015. (€/Kg contaminante).65	
Tabla 6. Parámetros de configuración para NSGA-II.....	66
Tabla 7. Rangos de resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MoS operando con flotas optimizadas.	68
Tabla 8. Características de algunas soluciones de flota obtenidas para las MoS en las redes de transporte de Etapa II con san Antonio como Hub.....	69
Tabla 9. Comparación de los resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MoS seleccionadas.	74
Tabla 10. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MoS en las redes de transporte para escenarios actuales.....	77
Tabla 11. Precios de combustibles para escenario base.....	85
Tabla 12. Métodos seguidos estimación de los coeficientes de emisión para el transporte por carretera	87
Tabla 13. Configuración de parámetros para el algoritmo NSGA-II.....	94
Tabla 14. Comparación de las soluciones de flota obtenidas en la optimización libre con mejores resultados en costes totales	96
Tabla 15. Comparación de las soluciones de flota obtenidas en optimizaciones independientes para flotas similares	97
Tabla 16. Comparación de soluciones de flota obtenidas por el modelo inicial (2010) y el modificado (2015).....	100
Tabla 17. Dimensiones y características principales de nuestro buque óptimo.....	106
Tabla 18. Resumen comparativo de las dimensiones del modelo matemático y el buque óptimo.....	107
Tabla 19. Tabla resumen de capacidades de Tanques calculados	111
Tabla 20. Tabla resumen comparativa de las capacidades de los tanques calculados y dibujados.....	112
Tabla 21. Valor del Peso en Rosca.....	114
Tabla 22. Posición vertical del centro de gravedad del Peso en Rosca desglosado, Método de SCHNEEKLUTH	114
Tabla 23. Valor del peso y coordenadas del centro de gravedad del rosca de buque óptimo	115
Tabla 24. Peso y centro de gravedad tripulación.....	115
Tabla 25. Peso y centro de gravedad respetos	115
Tabla 26. Peso y centro de gravedad víveres.....	116
Tabla 27. Parámetros del modelo matemático de optimización en referencia a la disposición de los TEUs	116
Tabla 28. Distribución y capacidad de contenedores del buque óptimo	118

Tabla 29. Comparación de datos obtenidos por el modelo matemático de optimización y la carena del buque óptimo.....	118
Tabla 30. Peso total de contenedores y coordenadas del centro de gravedad de la carga ..	119
Tabla 31. Puntos de inundación progresiva.....	119
Tabla 32. Tabla resultados cálculo equilibrio hidrostático	120
Tabla 33. Distribución y capacidad de contenedores de la 1ª alternativa de compartimentado.	123
Tabla 34. Comparación de datos obtenidos por el modelo matemático de optimización, el buque óptimo y 1ª alternativa de compartimentado.....	124
Tabla 35. Peso total de contenedores y coordenadas del centro de gravedad de la carga de la 1ª alternativa de compartimentado.	125
Tabla 36. Tabla resultados cálculo equilibrio hidrostático 1ª Alternativa de compartimentado.	126
Tabla 37. Distribución y Capacidad de contenedores de la 2ª alternativa de compartimentado	129
Tabla 38. Comparación de datos obtenidos por el modelo matemático de optimización, la carena buque óptimo, 1ª alternativa de compartimentado y 2ª alternativa de compartimentado.	130
Tabla 39. Peso total de contenedores y coordenadas del centro de gravedad de la carga de la 2ª alternativa de compartimentado.	130
Tabla 40. Tabla resultados cálculo equilibrio hidrostático 2ª Alternativa de compartimentado	131
Tabla 41. Resumen de los datos obtenidos por el modelo matemático de optimización, la carena buque óptimo, 1ª alternativa de compartimentado y 2ª alternativa de compartimentado.	132
Tabla 42. Datos buque en estudio "2 Alternativa de compartimentado"	134
Tabla 43. Puntos de Inundación progresiva.....	136
Tabla 44. Área latera y KG de la superestructura	137
Tabla 45. Datos Equilibrio en la Condición de Lastre salida de Puerto.....	138
Tabla 46. Tabla comprobación cumplimiento criterios de estabilidad intacta, para condición de lastre salida puerto.	139
Tabla 47. Datos de Equilibrio en la Condición de Lastre Llegada a puerto.....	140
Tabla 48. Tabla comprobación de cumplimientos criterios de estabilidad para la condición de lastre llegada a puerto	141
Tabla 49. Distribución en número y peso de los contenedores en la condición de máxima carga.....	142
Tabla 50. Área Lateral y KG (Máxima carga)	142
Tabla 51. Datos de Equilibrio en la Condición de Máxima Carga Salida de puerto	143
Tabla 52. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios de estabilidad para la condición de Máxima Carga salida de puerto	144
Tabla 53. datos Equilibrio en la Condición de Máxima Carga Llegada a puerto.....	145
Tabla 54. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios estabilidad para la condición de Máxima Carga Llegada a puerto	146

Tabla 55. Distribución en número y peso de los contenedores en la condición de carga homogénea	147
Tabla 56. Área Lateral y KG (Carga homogénea)	147
Tabla 57. Datos Equilibrio de carga homogénea Salida de Puerto	148
Tabla 58. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios estabilidad para la condición de carga Homogénea salida de Puerto	149
Tabla 59. Datos equilibrio de carga homogénea Llegada a Puerto	150
Tabla 60. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios de estabilidad para la condición de carga homogénea llegada a puerto	151
Tabla 61. Distribución en número y peso de los contenedores en la condición de carga de 12.5t por contenedor	152
Tabla 62.. Área Lateral y KG (Carga 12.5 t).....	152
Tabla 63. Datos equilibrio de número máximo de contenedores a 12.5 t Salida de Puerto	153
Tabla 64. Tabla comprobación de criterios de estabilidad para la condición de carga con número máximo de contenedores a 12.5 t Salida de Puerto	154
Tabla 65. Datos equilibrio de número máximo de contenedores a 12.5 t Llegada a Puerto	155
Tabla 66. Tabla comprobación de criterios de estabilidad para la condición de carga con número máximo de contenedores a 12.5 t Llegada a Puerto.....	156
Tabla 67. Resumen de los datos obtenidos por el modelo matemático de optimización y 2ª alternativa al buque óptimo.	157
Tabla 68. Emission factors PM _{2.5} /PM ₁₀ for source category in energy industries (g/GJ)	164
Tabla 69. Características técnicas de las flotas consideradas para los casos de aplicación.	168
Tabla 70. Precio base del LSMGO.....	169
Tabla 71. Generación eléctrica por tipo de fuel en 2017 (%).....	170
Tabla 72. Factor medio de emisión para las redes europeas en 2017.....	171
Tabla 73. Reducción de emisiones por uso de CI en buques feeder	172
Tabla 74. reducción de emisiones por uso de CI en buques Ro-Pax.....	173
Tabla 75. Tasa Interna de Retorno (TIR) para operadores de buques	174
Tabla 76 Escenarios para el análisis determinístico de sensibilidad.....	175
Tabla 77. Análisis de sensibilidad	175

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del desarrollo de la Tesis	30
Figura 2. Integración de elementos en el modelo de optimización variables	41
Figura 3. Variables principales del modelo	43
Figura 4. Modelo many to many para la generación de rutas.	44
Figura 5. Autopistas del mar a evaluar, MoS Norte y Sur.	57
Figura 6. Resultados de rutas intermodales con MoS Norte.	67
Figura 7. Resultados de rutas intermodales con MoS Sur.	68
Figura 8. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MoS Norte (Escenario actual).....	75
Figura 9. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MoS sur con San Vicente (Escenario actual).....	76
Figura 10. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MoS sur con Coronel (Escenario actual)	76
Figura 11. Variables no dependientes en el modelo matemático	82
Figura 12. Disposición general base para el modelo inicial	91
Figura 13. Disposición de tanques de gas para propulsión con LNG. (Fuente: https://www.wartsila.com/marine/build/gas-solutions/fuel-gas-handling/wartsila-Ingpac).....	92
Figura 14. Disposición de tanques LNG aceptada en un buque portacontenedores	92
Figura 15. Relación del peso del scrubber frente a la potencia del motor propulsor	93
Figura 16. Red de transporte “one to many” asumida para el caso de aplicación	94
Figura 17. Frentes de Pareto para las flotas de feeder encontradas con el modelo modificado	95
Figura 18. Frente de Pareto obtenido para optimización libre cuando el precio del LNG alcanza el 120% del valor base.....	99
Figura 19. Carena en 3D del buque optimo	106
Figura 20. Cálculos Hidrostáticas para el calado de diseño y puntos de referencia de la carena del buque óptimo.....	107
Figura 21. . Cotas de Cámara de Máquinas, Cámara de Tanque LNG y Bodega de contenedores del Buque óptimo	108
Figura 22. Modelado interior del doble fondo, doble casco y tanques de consumo	111
Figura 23, Vista en planta del doble casco, doble fondo y tanques de consumo.....	111
Figura 24. Posición de los tanques de consumo	112
Figura 25. Denominación del doble casco y el doble fondo	112
Figura 26. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores	116
Figura 27. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de bodega de contenedores.....	117
Figura 28. Vista en planta de la Disposición de contenedores sobre cubierta.	117
Figura 29. Vista en lateral de la Disposición de contenedores sobre cubierta.	117
Figura 30 Cotas de Cámara de Máquinas, Cámara de Tanque LNG y Bodega de contenedores de la 1ª alternativa de compartimentado.	121

Figura 31. Modelado interior del doble fondo, doble casco y tanques de consumo de la 1ª alternativa de compartimentado.	122
Figura 32. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores 1ª alternativa de compartimentado.	122
Figura 33. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de bodega de contenedores 1ª alternativa de compartimentado. ...	123
Figura 34. Vista en planta de la Disposición de contenedores sobre cubierta 1ª alternativa de compartimentado.	123
Figura 35. Vista en lateral de la Disposición de contenedores sobre cubierta 1ª alternativa de compartimentado.	123
Figura 36. Cotas de Cámara de Máquinas, Cámara de Tanque LNG y Bodega de contenedores de la 2ª alternativa de compartimentado.	127
Figura 37. Modelado interior del doble fondo, doble casco y tanques de consumo de la 2ª alternativa de compartimentado.	127
Figura 38. Disposición de contenedores primer nivel de bodegas de contenedores 2ª alternativa de compartimentado.	128
Figura 39. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de las bodegas de contenedores 2ª alternativa de compartimentado.	128
Figura 40. Vista en planta de la Disposición de contenedores sobre cubierta 2ª alternativa de compartimentado.	128
Figura 41. Vista en lateral de la Disposición de contenedores sobre cubierta 2ª alternativa de compartimentado.	129
Figura 42. Viento y balance intensos	135
Figura 43. Distribución de contenedores en número y peso, en eslora, manga y puntal (Máxima Carga)	141
Figura 44. Distribución de contenedores en número y peso, en eslora, manga y puntal (Carga homogénea).....	147
Figura 45. Distribución de contenedores en número y peso, en eslora, manga y puntal (Carga 12.5t).....	152
Figura 46. Cuadro de sensibilidad en el análisis probabilístico.....	176

AGRADECIMIENTOS

A mis Directores de Tesis, Profesora Dra. Alba Martínez López y Profesor Dr. Marcos Míguez González, que con su inteligencia, comprensión, apoyo y enorme paciencia han conseguido que esta Tesis se finalizara. Sin ellos nunca habría llegado hasta aquí.

A mis padres Manuel y Tere que me dieron la vida y a mi mujer Laura y mi hijo Carlos por vivirla junto a mi, y darme ilusión, apoyo y fuerza día a día para vivirla.

A la UDC y en especial a la EPS, por abrirme las puertas y permitirme realizar mis estudios de doctorado.

A la Catedrática de Economía de la ULPGC, Dra. Lourdes Trujillo Castellano, por sus consejos ayuda y confianza.

Al Grupo de Investigación EITT de la ULPGC, por acogerme y poder colaborar con ellos.

A la Profesora Dra. Pilar Caamaño Sobrino, por permitirme trabajar con ella.

A mi familia y amigos por su cariño y apoyo.

Y finalmente a mis seres queridos que ya no están con nosotros, pero que siempre llevo en mi corazón.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

RESUMEN

El impacto perjudicial en la salud de los ciudadanos de las emisiones de agentes contaminantes tales como el óxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, metano, así como de partículas derivadas por el transporte de mercancías han motivado una creciente preocupación en la ciudadanía. La necesidad de integrar el desarrollo económico con la sostenibilidad medioambiental de modo que permitan garantizar los estándares europeos de sociedad de bienestar a las próximas generaciones ha llevado a la Unión europea a proponer estrategias en la política europea de transporte intracomunitario (corta distancia) basadas en la intermodalidad, ya que tradicionalmente se aceptó que el transporte rodado de mercancías era el más contaminante y el transporte marítimo el más sostenible. Sin embargo, varios hechos han puesto en cuestión estas hipótesis: las características técnicas de los buques que operan en régimen de Autopista del Mar (tráfico marítimo de corta distancia integrado en cadenas intermodales); buques pequeños y rápidos que deben ser capaces de dar respuesta a las cadenas intermodales y la desigual evolución normativa de las limitaciones en emisiones de agentes contaminantes para los distintos métodos de transporte en la Unión Europea, no favorecen la sostenibilidad medioambiental. Mientras que la normativa europea sobre emisiones del transporte terrestre se ha endurecido rápidamente forzando a desarrollar tecnológicamente soluciones de vehículos más sostenibles, la reglamentación marítima europea sigue apoyándose en la normativa OMI (Organización marítima Internacional), de carácter mundial, resulta ser mucho más lenta en forzar restricciones medioambientales.

Por todo lo anterior no está resultando obvia la conveniencia del transporte de mercancía por mar para corta distancia. Los estudios publicados al respecto resultan ser muy escasos y la mayoría se enfocan en soluciones técnicas que reduzcan la contaminación de los buques en zonas ECA (Emission Control Areas) y SECA (Sulphur Emission Control Areas), es decir, que cumplan con normativa OMI aportando las mejores condiciones económicas tanto de inversión como de operación, pero sin evaluar su impacto medioambiental respecto a la alternativa unimodal. La gran esperanza en este sentido la aporta la adopción de motores basados en combustibles a gas. Sin embargo, no son pocas las publicaciones que alertan de que existen más agentes contaminantes que los regulados por la OMI, en concreto las emisiones de metano provocadas por el bunkering y la combustión incompleta de los motores marinos a gas han alertado a muchos países sobre el riesgo que supone el efecto invernadero del metano (25 veces mayor que el del dióxido de carbono)

Dado que la Unión europea ha dado numerosas muestras de intentar desarrollar normativas medioambientales marítimas propias, es predecible que en un futuro próximo esto sea una realidad y que su nivel de exigencia sea comparable al requerido por la tecnología en vehículos terrestres europeos Euro VI.

Por todo lo anterior la presente tesis doctoral pretende abordar esta cuestión escasamente atendida ya que la adaptación de las flotas al tráfico de corta distancia en Europa es un reto inmediato considerando las restricciones medioambientales esperadas (equiparables a las exigidas en tierra) y manteniendo la competitividad de las cadenas intermodales en coste y tiempo respecto a las alternativas de transporte convencionales. Por tanto, la presente tesis doctoral amplía el actual marco metodológico de estudio de la optimización de flotas de portacontenedores para tráfico regular de corta distancia en Europa integrado en cadenas multimodales con el análisis comparativo del impacto medioambiental de las flotas en

relación a alternativas de transporte unimodal; tráfico conocido en el contexto europeo como Autopistas del Mar.

Así se pretende obtener una herramienta capaz de definir técnica y operativamente la flota óptima de buques capaces de establecer soluciones intermodales de transporte alternativas a la unimodalidad en términos de tiempo, coste y sostenibilidad. Para ello será necesario definir las distintas soluciones propulsivas tanto tecnológicas como los combustibles asociados a ellas y su impacto en costes medioambientales operativos, costes de instalación, mantenimiento, operación, reducción de capacidad de carga, y siempre garantizando la estabilidad de los buques.

Para ello será necesario establecer un sistema de cálculo de emisiones de los distintos agentes contaminantes y su coste unitario e integrarlo en un modelo matemático que resuelva la definición de las flotas de buques óptimos y viables asegurando que la solución intermodal sea más competitiva para el usuario que la alternativa unimodal para el transporte puerta a puerta.

Para ello se aplicarán procedimientos de optimización con algoritmos genéticos multiobjetivo a modelos matemáticos complejos. El grupo de investigación en el que se circunscribe el proyecto ha desarrollado una metodología para la optimización de flotas operando en Autopistas del Mar integradas en cadenas intermodales. Sin embargo, la presente tesis pretende avanzar en esta línea integrando el impacto medioambiental en el modelo de definición y evaluación de la competitividad del transporte marítimo y asegurando la viabilidad técnica de la flota desde el punto de vista de su estabilidad.

La presente tesis pretende ser una herramienta de decisión sobre el dimensionamiento y operación de buques y flotas que operando en tráfico regular de corta distancia ofrezcan soluciones a las necesidades de transporte. Las soluciones propuestas estarán vinculadas a alternativas de plantas propulsoras y combustibles óptimos. Los resultados no serán sólo de utilidad para armadores sino también para los legisladores que podrán valorar en términos cuantitativos qué solución puede apoyarse desde las administraciones de cara a establecer estrategias en la política de transporte y cuáles son las consecuencias del trato desigual a los distintos modos de transporte.

RESUMO

O impacto perxudicial na saúde dos cidadáns polas emisións de axentes contaminantes tales como o óxido de azufre, óxidos de nitróxeno, dióxido de carbono, metano, así como de partículas producidas polo transporte de mercadorías motivaron unha crecente preocupación na cidadanía. A necesidade de integrar o desenvolvemento económico coa sustentabilidade ambiental que permitan garantir os estándares europeos da sociedade do benestar ás próximas xeracións levou á Unión europea a propoñer estratexias na política europea de transporte intracomunitario (curta distancia) baseadas na intermodalidade, xa que tradicionalmente aceptouse que o transporte rodado de mercadorías era o máis contaminante e o transporte marítimo o máis sustentable. Con todo, varios feitos puxeron en cuestión estas hipóteses: as características técnicas dos buques que operan en réxime de Autoestrada do Mar (tráfico marítimo de curta distancia integrado en cadeas intermodais); buques pequenos e rápidos que deben ser capaces de dar resposta ás cadeas intermodais e a desigual evolución normativa das limitacións en emisións de axentes contaminantes para os distintos métodos de transporte na Unión Europea, non favorecen a sustentabilidade ambiental. Mentres que a normativa europea sobre emisións do transporte terrestre endureceuse rapidamente forzando a desenvolver tecnoloxicamente solucións de vehículos máis sustentables, a regulamentación marítima europea segue apoiándose na normativa OMI (Organización marítima Internacional), que de carácter mundial, resulta ser moito máis lenta en forzar restricións ambientais.

Por todo o anterior non está a resultar obvia a conveniencia do transporte de mercadoría por mar para curta distancia. Os estudos publicados respecto diso resultan ser moi escasos e a maioría enfócanse en solucións técnicas que reduzan a contaminación dos buques en zonas ECA (Emission Control Areas) e SECA (Sulphur Emission Control Areas), é dicir, que cumpran con normativa OMI achegando as mellores condicións económicas tanto de investimento como de operación pero sen avaliar o seu impacto ambiental respecto da alternativa unimodal. A gran esperanza neste eido achégaa a adopción de motores baseados en combustibles a gas. Con todo non son poucas as publicacións que alertan de que existen máis axentes contaminantes que os regulados pola OMI, en concreto as emisións de metano provocadas polo bunkering e a combustión incompleta dos motores mariños a gas alertaron a moitos países sobre o risco que supón o efecto invernadoiro do metano (25 veces maior que o do dióxido de carbono).

Dado que a Unión europea deu numerosas mostras de tentar desenvolver normativas ambientais marítimas propias, é predicible que nun futuro próximo isto sexa unha realidade e que o seu nivel de esixencia sexa comparable ao requirido pola tecnoloxía en vehículos terrestres europeos Euro VI.

Por todo o anterior a presente tese doutoral pretende abordar esta cuestión escasamente atendida xa que a adaptación das flotas ao tráfico de curta distancia en Europa é un reto inmediato considerando as restricións ambientais esperadas (equiparables ás esixidas en terra) e mantendo a competitividade das cadeas intermodais en custo e tempo respecto das alternativas de transporte convencionais. Por tanto o presente proxecto de tese ampla o

actual marco metodolóxico de estudo da optimización de frotas de portacontedores para tráfico regular de curta distancia en Europa integrado en cadeas multimodales coa análise comparativa do impacto ambiental das frotas en relación a alternativas de transporte unimodal; tráfico coñecido no contexto europeo como Autoestradas do Mar.

Así se pretende obter unha ferramenta capaz de definir técnica e operativamente a flota óptima de buques capaces de establecer solucións intermodais de transporte á unimodalidad en termos de tempo, custo e sustentabilidade. Para iso será necesario definir as distintas solucións propulsivas tanto tecnolóxicas como os combustibles asociados a elas e o seu impacto en custos ambientais operativos, custos de instalación, mantemento, operación, redución de capacidade de carga garantindo a estabilidade dos buques.

Para iso será necesario establecer un sistema de cálculo de emisións dos distintos axentes contaminantes e o seu custo unitario e integralo nun modelo matemático que resolva a definición das flotas de buques óptimos e viables asegurando que a solución intermodal sexa máis competitiva para o usuario que a alternativa unimodal para o transporte porta a porta.

Para iso aplicaranse procedementos de optimización con algoritmos xenéticos multiobjetivo a modelos matemáticos complexos. O grupo de investigación no que se circunscribe o proxecto desenvolveu unha metodoloxía para a optimización de flotas operando en Autoestradas do mar integradas en cadeas intermodais. Con todo a presente tese pretende avanzar nesta liña integrando o impacto ambiental no modelo de definición e avaliación da competitividade do transporte marítimo e asegurando a viabilidade técnica da flota desde o punto de vista da súa estabilidade.

A presente tese pretende ser una ferramenta de decisión sobre o dimensionamiento e operación de buques e flotas que operando en tráfico regular de curta distancia ofrezan solucións realmente sustentables ás necesidades de transporte. As solucións propostas estarán vinculadas a solucións de plantas propulsoras e combustibles óptimos. Os resultados non serán só de utilidade para armadores senón tamén para os lexisladores que poderán valorar en termos cuantitativos que solución pode apoiarse desde as administracións para establecer estratexias na política de transporte e cales son as consecuencias do trato desigual aos distintos modos de transporte.

ABSTRACT

The harmful effects on citizens' health caused by the emission of air pollutants from the load transport such as, sulphur oxides (SO_x); nitrogen oxides (NO_x); methane (CH₄), carbon dioxides (CO₂) and particles emission (PM_{2,5}/PM₁₀), have motivated an increasing concern in the public opinion. The need to integrate the economic development with the environmental sustainability that permits to ensure the standards of the European quality life for the next generations have led to new strategies in the European Policy of the intracommunity transport (short distance) taken by the European Union which are focused on the intermodality. This is so, due to the fact that the land transport was traditionally accepted as the most polluting transportation alternative for the load transport and otherwise the maritime transport proved to be the most sustainable one. Nevertheless, several aspects have currently carried to discuss these assumptions: the technical features of the vessels which operate under Motorway of the Sea conditions (Short Sea Shipping integrated in intermodal chains) do not favour the environmental sustainability; small and fast vessels which must be able to respond to the intermodality requirements, the unbalanced development of the limitations in the emission of pollutant agents in the European Union for the different transport systems. Whereas the European normative about gas emissions for the road transport were quickly tightened by forcing the technological development of solutions to increase the sustainability of the vehicles, the European maritime normative remains are supported by the IMO (International Maritime Organization) normative. This one, with international character beyond the European Union, results to be much slower in the establishment of the compulsory restrictions for the pollutant emissions.

Due to the previous arguments the convenience of the maritime transport for the loads in short distance are currently under discussion. The published studies about this issue in the European Union are very scarce and most of them are focused on technical solutions to reduce the pollution of vessel which operate in ECA (Emission Control Areas) and SECA zones (Sulphur Emission Control Areas). In other words, they try to offer technical solutions to accomplish with OMI normative by evaluating their economical impact from the standpoint of operation and investment but without evaluating their environmental impact with regard to the unimodal alternative.

The highest expectations are provided by the use of gas based engines. However numerous recent publications alert about the existence of other pollutants which are not being regulated by the IMO but very harmful. Concretely, the methane slip due to the incomplete burning and bunkering operations for the gas maritime engines have alerted to many countries about the risk of greenhouse effect of the methane (25 times the CO₂ effect).

Due to the fact that the European Union have shown numerous times its intention to develop an own environmental normative for the maritime transport, it is expectable that in a next future this is a reality and its requirement level is comparable to demanding levels for the European road vehicles, Euro VI technology.

Consequently, the present dissertation tries to tackle this issue which has been scarcely attended taking into account that the adaptation of the vessel fleets to the Short Sea Shipping

in Europe has been become in an immediate challenge due to the expected new environmental restrictions (they will be comparable to the road ones) and to the need to keep the competitiveness of the intermodal chains against the conventional transport modes. Therefore, this dissertation tries to widen the current methodological framework of the optimization of fleets for the Short Sea Shipping traffic in Europe which must be integrated in intermodal chains with the comparative analysis of the environmental impact of the fleets and their intermodal chains regarding to the unimodal transport; this traffic is called Motorways of the Sea in the European context.

The thesis will try to obtain a tool capable to define the optimal fleet from a technical and operative standpoint which offers competitive intermodal solutions to the unimodality in terms of time, cost and sustainability. For that, it will be necessary to define the different propulsive solutions not only from a technological standpoint but also by considering the combustibles associated to them, their impact in terms of the environmental costs, operative costs, investment costs, maintenance costs and the reduction of the cargo capacity by ensuring the required stability for the vessels. Thus, it will be necessary to propose a calculation system for the emission coefficients of several pollutants and their unitary costs. These results must be integrated in a mathematical model which will resolve the definition of fleets of optimal and feasible vessels by ensuring the highest competitiveness of the intermodality with regard to the unimodal alternative for the door to door transport.

Thus, optimization process of this complex mathematical model will be carried out with multi-objective genetic algorithms. The Research Group associated to this thesis has developed a methodology for the optimization of fleets operating under Motorways of the Sea Conditions. However, this thesis tries to advance in that research line by providing the environmental impact in the definition and evaluation model of the relative competitiveness between transport modes and ensuring the technical feasibility of the obtained fleets with the stability analysis of the vessels.

Finally, the actual dissertation will try to be a making decision tool about the sizing and operation of fleets and their vessels, which by operating in short sea shipping conditions, provide sustainable solutions to the real transport needs. The proposed solutions will be to possible propulsion plants and their optimal combustibles. Therefore, the results will be useful not only for the ship-owners but also for the policy makers who will be able to evaluate in quantitative terms which solution must be supported from the administrations and how this can be included in the strategies of the transport policy. The consequence of the unbalance treatment from the Institutions to the different transport modes will be analysed as well.

PRODUCCIÓN CIENTÍFICA DERIVADA DE LA TESIS

Durante la realización de esta tesis se han publicado los siguientes Documentos Científico-Técnicos y contribuciones a congresos:

Revistas:

- Alba Martínez-López, Pilar Caamaño Sobrino, Manuel Chica González, Lourdes Trujillo. 2018. Optimization of a container vessel fleet and its propulsion plant to articulate sustainable intermodal chains versus road transport. *Transportation Research Part D*, 59, 134-137.
- Alba Martínez-López, Pilar Caamaño Sobrino, Manuel Chica González, Lourdes Trujillo. 2019. Choice of propulsion plants for container vessels operating under Short Sea Shipping conditions in the European Union: An assessment focused on the environmental impact on the intermodal chains. *Proc IMechE Part M: J Engineering for the Maritime Environment*. 233(2), 653–669.
- Alba Martínez-López, Manuel Chica. 2020. Joint Optimization of Routes and Container Fleets to Design Sustainable Intermodal Chains in Chile. *Special Issue: Sustainability. "Sustainable Maritime Transportation Management and Policies"*. 2020,12,2221.
- Alba Martínez-López, Alejandro Romero-Filgueira, Manuel Chica. 2021. Specific environmental charges to boost Cold Ironing use in the European Short Sea Shipping. *Transportation Research Part D*, 94(2021), 102775.

Congresos:

- Alba Martínez-López, Manuel Chica González, Lourdes Trujillo. "Influence on the competitiveness of the intermodal chains of the possible technical solutions for short sea shipping fleets by operating in ECA zones". The International Association of Maritime Economists (IAME) 2017 Conference, June 27-30, Kyoto, Japan. (Paper ID 005).
- Alba Martínez-López, Pilar Caamaño Sobrino, Lourdes Trujillo Manuel Chica González. "Feasibility of the intermodal chains articulated through MoS in Chile". The International Association of Maritime Economists (IAME) 2017 Conference, June 27-30, Kyoto, Japan. (Paper ID 006).
- Alba Martínez-López, Lourdes Trujillo, Manuel Chica González. "Assessment of the feasibility of the Eastern African ports to articulate intermodal chains through Short Sea Shipping" The International Association of Maritime Economists (IAME) 2019 Conference, June 25-28, Athens, Greece. (Paper ID 032).

Capítulo de Libro:

- Alba Martínez-López, Trujillo Lourdes and Chica González Manuel (2020) "Chapter 11, Establishment of MoS in Chile: Pertinence Assessment Through an Analysis of Previous Scenarios" Book "Computation and Big Data for Transport, Digital

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Innovations in Surface and Air Transport Systems". Volumen 54. Serie (Computational Methods in Applied Sciences). Pp. 181-193. ISBN 978-3-030-37751-9. Springer Switzerland.

LISTA DE SÍMBOLOS

CAFE:	Clean Air For Europe programme
CI:	Cold Ironing.
ECA:	Emission control area.
EU ETS:	EU's Emissions Trading System.
FEU:	Forty-foot equivalent unit.
HEATCO:	Developing Harmonised European Approaches for Transport Costing and project assessment.
IPC:	Indice de Precios al Consumo
LNG:	Liquefied Natural Gas.
LSMGO:	low-sulphur marine Gas Oil
MoS:	Motorways of The Sea.
MDO:	Marine Diesel Oil.
MGO:	Marine Gas Oil
OMI:	Organización Marítima Internacional.
OPS:	On-shore Power Supply
PM:	Partículas por Millón.
PTO:	Power Take-off
Ro-Ro:	Buque de transbordo rodada
Ro-Pax:	Buque de transbordo rodado y pasaje.
Roll-On Roll-Off:	Buque Transbordo Rodado.
SECA:	Sulfur emission control area.
SSS:	Short Sea Shipping Transport
TEN-T:	Trans-European Transport Network
TEU:	Twenty-foot Equivalent Unit

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 1

Revisión del problema

1 REVISIÓN DEL PROBLEMA

Con la intención de encontrar alternativas para los problemas de congestión de tráfico en las carreteras europeas, la Unión Europea impulsó el transporte marítimo a través del concepto de Autopistas del Mar (Motorways of the Sea; MoS). Esta idea aparece por primera vez en el Libro Blanco del Transporte Europeo en el 2001 como un grupo de puertos y servicios intermodales que eran usados por el transporte marítimo de corta distancia (Short Sea Shipping Transport, SSS) en una zona de la Unión Europea. En el 2003, aceptada la conveniencia de las autopistas del mar para el interés general, la Comisión Europea revisó la extensión de la TEN-T (the Trans-European Transport Network) incluyendo en esta red de transporte a las Autopistas del mar. Desde entonces, las autopistas del mar junto con el transporte por carretera han sido aceptadas firmemente por la comunidad internacional como una alternativa realista para el transporte “puerta a puerta” siendo capaz de responder de manera efectiva a los requisitos sobre transporte y sostenibilidad medioambiental demandados por las sociedades actuales. La aplicación del concepto de Autopista del Mar, como tráfico marítimo de corta distancia integrado en las cadenas intermodales, ha sido analizada en entornos mucho más amplios que el de la Unión Europea, alcanzándose, así, una dimensión eminentemente deslocalizada del concepto (Bendall H. and Brooks M., 2011, entre otros).

A pesar de que las ventajas de las autopistas del mar están ampliamente reconocidas, y del esfuerzo hecho por muchos países para impulsar su actividad, el éxito alcanzado no ha sido el esperado. Los motivos son varios:

- Se observa que en las zonas donde se apostó por ellas, sorprendentemente importantes fondos públicos fueron reservados para el desarrollo de carreteras e infraestructuras ferroviarias y para financiar sus costes externos, generando de esta manera, un marco de competitividad desequilibrado para las cadenas multimodales con tramos marítimos (Baird, 2007; Gese and Baird, 2013).
- A pesar de la amplia diversidad de los estudios enfocados al impulso de la intermodalidad a través de SSS una hipótesis fue comúnmente aceptada: la viabilidad del transporte multimodal estaba basada únicamente en un tipo de buque (ro-ro y ro-pax): tráfico rodado (roll-on roll-off) ya que era asumido que era el transporte más adecuado para la intermodalidad, sin embargo la mayoría de los estudios que soportaban esta afirmación se basaban en conclusiones de análisis cualitativos que no comparaban distintos tipos de buques y los pocos que sí abordaron esta cuestión, aunque centrándose en aspectos puntuales, alcanzaron resultados más favorables para buques portacontenedores (Mbiyzenyuy et al., 2010).
- Las características técnicas y operativas de los buques eran consideradas como parámetros fijos dados por la compañía naviera, es decir, su número y condiciones de servicio eran parámetros discretos.

Como consecuencia de lo anterior, durante estos años, fue una práctica habitual la definición de umbrales de distancias que sugerían una mayor competitividad para la multimodalidad frente a la unimodalidad analizando la actividad de las cadenas intermodales operadas por buques estándar en sus tramos marítimos. Por tanto, se intentaron adaptar las rutas a las flotas en vez de adaptar las flotas a las posibles rutas. Obviamente, esta práctica incumplía la idea ampliamente aceptada de que la competitividad relativa del transporte intermodal frente a la unimodalidad es el resultado de una combinación de las características técnicas y operativas de los medios de transporte, los requisitos de los cargadores y de la propia carga y finalmente de las características geográficas de las rutas (Baird, 2007; Gesé y Baird, 2013). Esta combinación de variables que definen la competitividad relativa de los medios de transporte debe ser evaluada como un todo (Suárez-Alemán A. et al., 2015) teniendo como consecuencia el desarrollo de patrones de elección modal (Feo M. et al., 2010; Garcia-Menendez y Feo-Valero, 2009).

Por tanto, la responsabilidad de la elección técnica y operativa de las flotas para operar en cadenas multimodales bajo condiciones de autopistas del mar se ha traspasado tradicionalmente a las navieras, es decir a la iniciativa privada, quedando sólo en manos de los analistas las recomendaciones de distancias marítimas y/o terrestres para su implantación.

Como consecuencia de esta realidad, una práctica común de las compañías navieras, con el apoyo de las políticas de algunos países, ha sido la de adaptar las rutas a las flotas existentes (buques convencionales; Bendall and Brooks, 2011; WEST-MOS Project 2005–2008) en lugar de adaptar las flotas a las rutas. El poco éxito de las autopistas del mar puede deberse, en gran parte, a la infravaloración de su viabilidad y del impacto medioambiental que esta forma de actuar implica.

Incluso la “etiqueta verde” de las autopistas del mar está siendo debatida en la actualidad. A pesar de estar ampliamente aceptado que el transporte marítimo es más respetuoso con el medio ambiente que otros modos de transporte en términos de emisión de CO₂ (Hjelle and Fridell, 2012), la comparación no resulta tan favorable cuando el análisis se centra en las emisiones de NO_x, SO₂ y PM (Hjelle and Fridell, 2012; Hjelle, 2010). Esto es especialmente evidente cuando se analizan buques pequeños y rápidos, que son los más adecuados para muchas autopistas del mar (Martínez-López et al, 2015a; Ng.,2009). Este tipo de buques generan más emisiones por tonelada y kilómetro que otros tipos de buques. Como consecuencia, la sostenibilidad medioambiental no es tan evidente en las cadenas multimodales con tramos marítimos.

El papel destacado que están asumiendo las compañías navieras en el éxito de las autopistas del mar junto al hecho de que la responsabilidad de asegurar la sostenibilidad medioambiental de los servicios de transporte, que generalmente implica la implantación de costosas medidas de disminución de las emisiones o la utilización de combustibles costosos, recaigan de nuevo en la decisión de las compañías privadas (Tier II/III standards collected on amendments of Annex VI in the MARPOL, October, 2008) han motivado el principal objetivo de este trabajo: **proporcionar una herramienta de evaluación que aporte evidencias cuantitativas sobre la conveniencia de operar autopistas del mar integradas en cadenas intermodales.**

Dada las implicaciones anteriormente expuestas los “*decision makers*” no están únicamente restringidos a las compañías navieras, sino que, autoridades portuarias, estados ribereños y

demás *'stakeholders'* de las cadenas intermodales son actores fundamentales que pueden beneficiarse de la utilidad de la herramienta propuesta.

Por lo tanto, esta tesis presenta un modelo matemático de optimización para definir los buques más apropiados, sus flotas y su operación para establecer autopistas del mar integradas en una cadena intermodal 'muchos a muchos' (con varios posibles orígenes/destinos finales en tierra). De esta manera se pretende ofrecer soluciones realistas sobre combinación de flota y ruta que superen los puntos débiles identificados en el establecimiento de autopistas del mar de experiencias anteriores (Suárez-Alemán A., et al.2015). De esta forma se pretende maximizar las oportunidades de éxito de las cadenas multimodales asegurando, además, su sostenibilidad medioambiental.

Tal y como aseguran Medda y Trujillo (2010), las oportunidades de éxito de la intermodalidad pasan por ofrecer ventajas significativas respecto a la unimodalidad en tiempo y /o coste. Por tanto, el modelo matemático generado deberá ser capaz de evaluar la competitividad relativa en términos de tiempo y coste (por tonelada y viaje) para el transporte intermodal articulado a través de una autopista del mar y su alternativa unimodal (la carretera) pero también evaluar sus ventajas medioambientales. Así, el modelo permitirá comparar los resultados obtenidos sobre competitividad relativa para diferentes posibles autopistas del mar operando con flotas optimizadas, y por tanto poder sugerir la mejor combinación de flota y ruta dados unos orígenes y destinos finales que dicten la cadena intermodal. La optimización será llevada a cabo mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo lo que permitirá definir no sólo las variables técnicas y operativas de la flota (características de arquitectura naval, capacidad de carga, número de buques, velocidad, frecuencia, etc.) sino también el tipo de unidades de carga que más favorecerán la intermodalidad.

El objetivo principal de este trabajo se alcanza a través de la consecución de los siguientes objetivos parciales (ver Figura 1):

- 1. Desarrollo de un modelo de optimización capaz de superar las carencias de modelos anteriores: evaluación de criterios medioambientales y ampliación del "scope" a contextos de trabajo más amplios que la Unión Europea (U.E.)**
- 2. Evaluación del modelo obtenido a través de un caso real significativo.**
- 3. Una vez evaluado, ampliación del modelo incluyendo en la optimización, la búsqueda del sistema propulsivo junto con su combustible óptimo para los buques.**
- 4. Estudio de la viabilidad técnica de los buques identificados, como más convenientes, en términos de estabilidad.**
- 5. Comprobación del comportamiento de los buques óptimos ante desafíos normativos portuarios. Cambios legislativos en términos de sostenibilidad.**

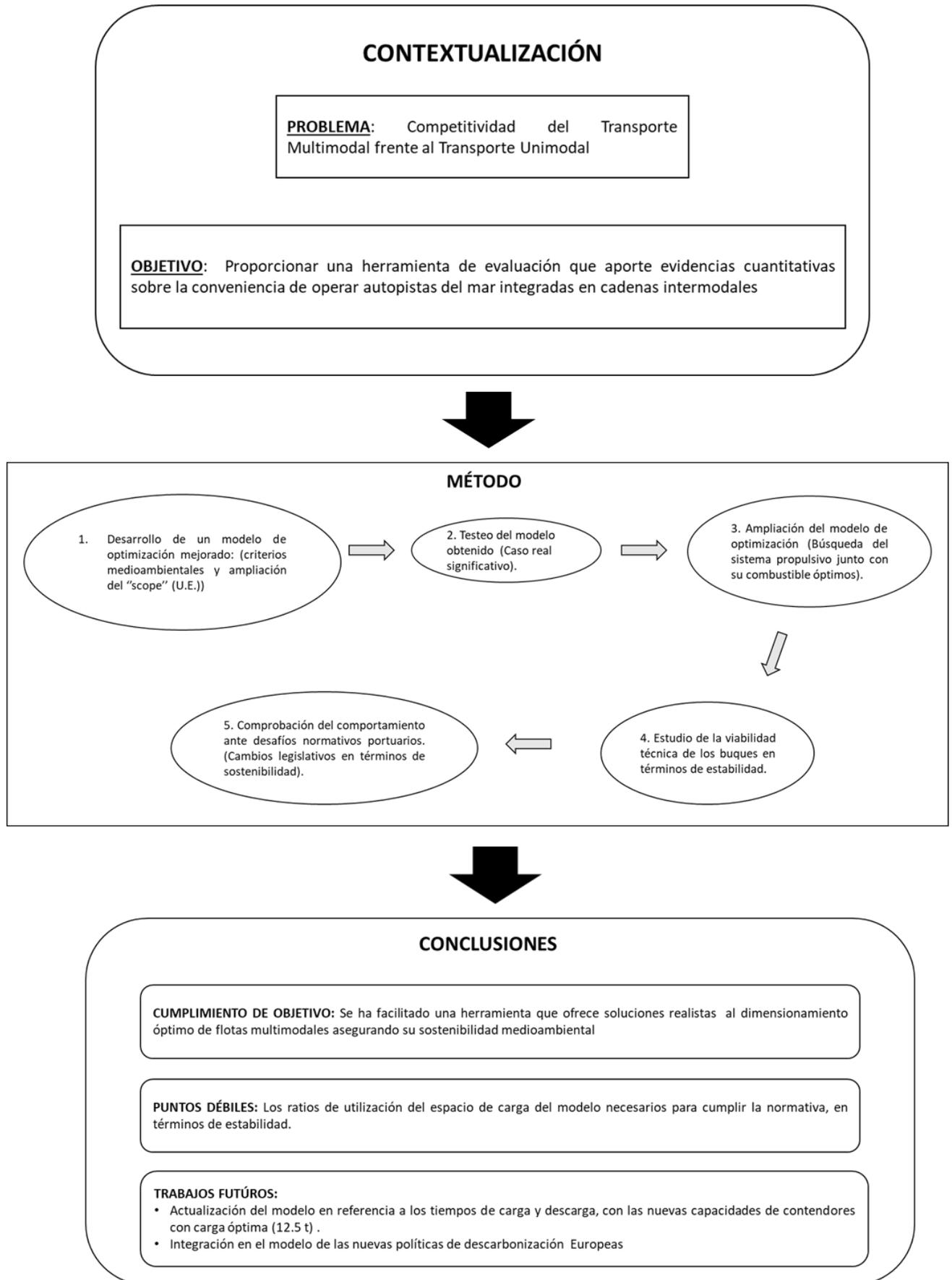


Figura 1. Esquema del desarrollo de la Tesis

Con el fin de atender los objetivos anteriormente planteados, la tesis se estructura en los siguientes capítulos: El capítulo 2 revisa el estado actual de conocimiento sobre optimización de buques y flotas para cadenas el transporte marítimo de corta distancia. El capítulo tres presenta el modelo matemático base sobre el que se asienta la optimización con especial mención a la evaluación medioambiental. El capítulo cuatro evalúa la utilidad del modelo desarrollado a través de su aplicación a un caso real fuera de la Unión europea: establecimiento de autopistas del mar en Chile. Una vez testado el modelo, el capítulo cinco amplía el modelo matemático con la optimización del sistema propulsivo de los buques. El capítulo seis aborda el estudio de la estabilidad de los buques óptimos obtenidos en el capítulo cinco. Finalmente, el capítulo siete estudia el comportamiento de los buques optimizados ante desafíos normativos medioambientales inminentes en puerto. La tesis finaliza con el capítulo ocho que resume las principales conclusiones de la tesis y las líneas futuras de trabajo.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 2

Estado de la cuestión

1 LA OPTIMIZACIÓN DE LA FLOTA EN LA INTERMODALIDAD

A pesar de la amplia diversidad de estudios sobre la competitividad de las cadenas multimodales a través de SSS frente al transporte por carretera en el contexto de la UE, se han aceptado comúnmente tres supuestos; en primer lugar, la viabilidad del transporte multimodal se basa principalmente en un tipo de buque: condiciones de tráfico rodado-rodado para el tramo marítimo (buques ro-ro y ro-pax); en segundo lugar, las características técnicas y operativas de los buques, su número (la flota) y las condiciones de servicio se consideran como parámetros iniciales fijos que corresponden a los buques comerciales; finalmente, la indiscutible preferencia por el transporte marítimo desde el punto de vista medioambiental.

Sin embargo, estos argumentos no son convincentes: la mayoría de los estudios que sustentan estas afirmaciones se basan en enfoques cualitativos y las investigaciones que analizan cuantitativamente estos aspectos del tráfico SSS, aunque escasas, han llegado a conclusiones contrarias a estos supuestos tradicionales. La efectividad de los dos tipos de embarcaciones compatibles con el tráfico SSS fue presentada por diferentes autores en los últimos años (Martínez-López et al, 2015a; Hjelle y Fridell, 2012; Mbiydzényuy et al, 2010; Usabiaga et al, 2013), y sus resultados fueron claramente favorables para los buques portacontenedores en términos de coste, como se esperaba, pero también en términos de tiempo. Prueba de esta percepción positiva sobre los buques portacontenedores para SSS es el creciente número de estudios sobre la competitividad de los SSS, a lo largo del tiempo, que asumen a los portacontenedores como buques de referencia: Ns. (2009); Chang y Chow (2010); Feng y Chang (2008), entre otros. En todos estos estudios, las dimensiones de las embarcaciones obtenidas mediante un proceso de optimización (210 TEUs y 19 kn por Martínez-López et al, 2015a) o asumidas como las embarcaciones más adecuadas para el análisis (250 TEUs y 18 kn por Ng, 2009; entre 200 y 500 TEU por Chang y Chow, 2010) están muy lejos incluso, de los buques convencionales feeder (500-2000 TEU, Ng y Kee, 2008).

Las emisiones por cantidad transportada de mercancías y distancia no solo varían significativamente con el tipo de embarcación, el tamaño del barco, su potencia de motor y tipo de combustible (Hjelle y Fridell, 2012), sino también con la configuración de las rutas de las cadenas multimodales. En este sentido, las aportaciones de Hjelle (2010) y Lee et al (2010) basadas en estudios de casos particulares son especialmente significativos: mientras que para los primeros las cadenas multimodales (París-Trondheim) con flotas ro-ro perdieron su condición de 'transporte verde' respecto a los camiones, para estos últimos (Keelung-Taichung, Taiwán) la alternativa de transporte a través de portacontenedores ofrecía una solución más respetuosa con el medio ambiente que el transporte por camión. Asimismo, Usabiaga et al (2013) concluyeron que la cadena multimodal resultaba más sostenible que el camión sólo cuando una pequeña flota de portacontenedores (de menos de 155 m de eslora) cubría el tramo marítimo de la cadena (Madrid-Dortmund).

Paralelamente, los estudios sobre el tamaño de los buques y sobre la adaptación del servicio de transporte a los requisitos de una ruta marítima en particular, rara vez se dirigieron a SSS (Christiansen, et al, 2004). Con respecto al primer grupo, estos estudios exploraron el tamaño óptimo de los buques aprovechando los efectos de las economías de escala en el tráfico de contenedores para largas distancias (Culliane y Khanna, 2000), pero también en el tráfico de alimentación (Ng y Kee, 2008). A pesar de las consecuencias relevantes del dimensionamiento sobre los costes externos, estos estudios rara vez consideran los beneficios para los cargadores o el rendimiento medioambiental de los buques.

En el otro grupo, la adecuación del servicio marítimo a una ruta determinada, si bien no se encontraron estudios que aborden el SSS de forma particular, la investigación sobre gestión de flotas y planificación de navegación adaptada a las condiciones del servicio de la ruta han obtenido resultados significativos en tráfico de portacontenedores con la utilización de algoritmos heurísticos.

La amplia utilización de estos algoritmos ha abierto relevantes posibilidades de análisis para abordar el problema combinado de la optimización simultánea de buques, flotas y su operación. El tráfico de portacontenedores fue quizás el tráfico que más aprovechó su uso en las redes "hub and spoke" (Bendall y Stent, 2001; Hsu y Hsieh, 2007) y en rutas de línea regular (Lagoudis et al, 2010). Estos trabajos concluyeron la frecuencia óptima, capacidad del buque, tamaño de flota y ruta considerando los costos relacionados con el transporte marítimo, aunque muy pocos contemplaron condiciones SSS (Martínez-López et al, 2015a) y casi ninguno consideró su sostenibilidad ambiental. Sin embargo, los trabajos centrados en el tamaño de la flota y la velocidad óptima han tenido un gran impulso en los últimos años. Cabe destacar el esfuerzo de Kim et al, (2012, y 2013); para incluir en el análisis el rendimiento medioambiental de los buques. Por otro lado, el trabajo de Psaraftis, H. N. & Zis, T. (2014 al 2021) sobre el impacto de las nuevas medidas medioambientales en el transporte marítimo y posibles estrategias para la implantación de los cambios normativos les llevó a la optimización operativa de los buques en términos de velocidad de navegación. Concluyendo limitaciones en la velocidad de los buques, profundizando en la opción planteada por la IMO, como medida a corto plazo para reducir las emisiones de GHG (Greenhouse Gases). Asimismo, sugieren que tales medidas serían efectivas si fuesen cumplimentadas con un impuesto al consumo de combustible, aplicando el principio poco defendido en el sector marítimo "Quien contamina paga".

Esta tesis, pretende, por tanto, cubrir este "knowledge lack", abordando en primer lugar, el problema de la competitividad relativa a las cadenas intermodales operadas a través de SSS frente a la carretera, como un problema también medioambiental. De forma que la evaluación en la optimización técnica y operativa de flota de portacontenedores y su ruta, consideren no sólo la ventaja en tiempo y coste del transporte Puerta a Puerta frente a la alternativa unimodal, sino también su impacto medioambiental.

2 LA NORMATIVA MEDIOAMBIENTAL EN LA UNIÓN EUROPEA: INTERMODALIDAD FRENTE A UNIMODALIDAD.

A pesar de los evidentes esfuerzos políticos realizados por la UE para impulsar el Short Sea Shipping (SSS) (Medda y Trujillo, 2010) y concretamente el MoS, a lo largo de los años esta solución alternativa se ha enfrentado a una situación competitiva desequilibrada frente al transporte por camión debido, entre otras razones, a la financiación pública del transporte por carretera por parte de los estados miembros (Baird, 2007; Gese y Baird, 2013) y el trato

desigual de los requisitos medioambientales exigidos por la UE para cada modo de transporte.

La normativa medioambiental no ha sido tan rápida ni restrictiva para el transporte marítimo como para el terrestre en la UE, por lo que el desarrollo tecnológico centrado en la reducción de emisiones contaminantes ha sido claramente más lento en el sector marítimo (Culliane y Culliane, 2013). Además, las características técnicas y operativas de los buques SSS (barcos pequeños y rápidos) junto con el cambio modal necesario para el transporte puerta a puerta no favorecen la sostenibilidad de las cadenas intermodales (Hjelle, 2010; Lee et al., 2010); Usabiaga et al., 2013). Como consecuencia, la etiqueta ecológica otorgada al SSS en comparación con otros sistemas de transporte ha estado en discusión durante los últimos años (Hjelle y Fridell, 2012; Hjelle, 2010, 2014).

Desde la década de 1990 (Directiva 91/542 / CEE, que modifica la Directiva 88/77 / CEE), la UE ha limitado las emisiones de gases contaminantes de los vehículos con normas obligatorias (Euro I a Euro VI), lo que obligó al desarrollo tecnológico necesario para cumplir con estas limitaciones. Así, desde enero del 2014, la tecnología Euro VI es obligatoria en la UE para vehículos pesados (Reglamento CE N 595/2009 modificado por el Reglamento 582/2011), categoría N3 (Anexo II, Directiva 2007/46 / CE). Estos vehículos son camiones industriales capaces de transportar cargas superiores a 12 toneladas. Los estándares de emisiones Euro VI implican una reducción del 50% de partículas contaminantes y una reducción del 77% de las emisiones de NOx en comparación con Euro V (Reglamento 582/2011).

En el contexto marítimo, las limitaciones más restrictivas de las emisiones contaminantes corresponden a las zonas del Área de Control de Emisiones (ECA) definidas por el Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por Buques (MARPOL 73/78) Anexo VI (Reglamento para la Prevención de la Contaminación Atmosférica), donde las emisiones de SO₂ y NOx están restringidas. Actualmente en Europa, sólo el Mar Báltico, el Mar del Norte y el Canal de la Mancha están clasificados como zonas de Área de Control de Emisiones de Azufre (SECA), lo que implica que, desde enero del 2015, el contenido de azufre de los combustibles utilizados en estas zonas no puede superar el 0,1 % en base a la masa. Más allá de las zonas SECA europeas, la tendencia es claramente restrictiva hacia la ampliación de las áreas protegidas a todas las aguas europeas limitando las emisiones de diferentes contaminantes.

A partir de la publicación del Informe Técnico n.º 4/2013 de la Agencia Europea de Medio Ambiente (European Environmental Agency-EEA-), donde era evidente la preocupación por la concentración de gases de efecto invernadero a nivel mundial aportados por el transporte marítimo europeo, la Comisión Europea adoptó una estrategia de pasos, COM (2013) 479, centrada en la armonización de las emisiones de efecto invernadero del transporte marítimo con los objetivos de emisiones de CO₂ recogidos en el Libro Blanco del Transporte (2011). Desde entonces, el primer paso trató de monitorizar las emisiones de CO₂ de los buques que operan en los puertos de los Estados miembros. Este primer paso se recogió finalmente en el Reglamento (UE) 2015/717 del Parlamento Europeo, que hizo cumplir el establecimiento de sistemas de seguimiento, notificación y verificación (MRV) de las emisiones de CO₂ en los buques, siendo el primer período de notificación el 2018. El segundo el paso de la estrategia se ocupa de los objetivos de reducción de gases de efecto invernadero; esto aún no se ha reflejado en la normativa europea. Además, el Parlamento Europeo [Directiva (UE) 2016/802] limitó drásticamente las emisiones de azufre en todos los mares territoriales europeos y zonas económicas exclusivas a partir de 2020 de acuerdo con

los requisitos de la Organización Marítima Internacional (OMI) con la expectativa de que, el Mediterráneo se clasifique como una zona SECA por la OMI a corto plazo (Panagakos et al., 2014).

El Informe técnico nº 4/2013 concluyó que las emisiones de NO_x en la UE procedentes del transporte marítimo serían equivalentes a las emisiones terrestres de NO_x en 2020; esto, junto con la relevancia de las emisiones de gases contaminantes por el tráfico SSS (Nielsen y Stenersen, 2010) y las conclusiones alcanzadas por los investigadores en los últimos años sobre este tipo particular de tráfico en términos de contaminación (Bengtsson et al., 2014; Hjelle, 2010, 2014) hacen que sea razonable esperar una mayor rigurosidad de las regulaciones marítimas medioambientales europeas no solo desarrollando el segundo paso de la estrategia [COM (2013) 479] sino también acercando los niveles de emisiones contaminantes permitidas en el mar a las recogidas en las normas de la tierra para otros contaminantes.

Bengtsson et al. (2014) concluyeron que el NO_x es un contaminante clave en el tráfico SSS (impactos locales y regionales) y las soluciones técnicas actuales para reducir estas emisiones tienen importantes desventajas (Brynnolf et al., 2014): Motores Tier-III con el uso de costosos sistemas de mitigación (catalizadores), asumiendo posibles derrames de amoníaco ("ammonia slip") o un cambio de combustible hacia el metano (Liquified Natural Gas, LNG, por ejemplo), asumiendo emisiones de metano ("methane slip") que son especialmente significativas en SSS (motores de combustible dual de cuatro tiempos basados en el principio de combustión de Otto).

Aunque el uso de LNG ha sido ampliamente presentado como la solución técnica más prometedora para la mitigación de la contaminación marítima (Elgohary et al., 2015; Bengtsson et al., 2014; Banawan et al., 2009) debido a su capacidad para cumplir con las regulaciones ECA, con una reducción esperada en los costos operativos para los armadores, esta solución por sí sola queda lejos de proporcionar niveles de emisión cercanos a los estándares Euro VI (Brynnolf et al., 2014). Además, los ahorros en mantenimiento (Banawan et al., 2009) junto con el precio reducido del LNG en comparación con los combustibles alternativos no parecen ser suficientes para aconsejar la inversión en reconvertir a propulsión LNG debido a los altos costes de capital asociados (Acciaro, 2014).

Dada esta realidad, existe un verdadero desafío en mantener la competitividad medioambiental del transporte intermodal a través del SSS. Varios estudios previos han abordado el impacto ambiental del transporte unimodal para una ruta particular puerta a puerta frente al transporte intermodal a través de SSS. Los resultados obtenidos muestran una ventaja ambiental de la intermodalidad cuando las rutas están cubiertas por buques portacontenedores (Lee et al., 2010; Usabiaga et al., 2013; Martínez-López et al., 2016) y desventaja cuando están cubiertas por Ro- Ros (Usabiaga et al., 2013). Sin embargo, la mayoría de estos estudios se basan en buques con plantas de propulsión convencionales (motores a base de combustible convencional y sin catalizador, Tier II) y camiones con tecnología por debajo de Euro VI.

Con el fin de recoger esta realidad, esta tesis no sólo evaluará el rendimiento medioambiental de la intermodalidad durante la optimización para buques con propulsión convencional, sino que incluirá diferentes plantas propulsivas, sistemas de mitigación y combustibles en los buques para identificar la solución más conveniente frente al transporte unimodal,

asumiendo para este último, tecnología Euro VI. Por tanto, estas opciones de propulsión serán incluidas en el modelo matemático.

3 DESAFÍOS MEDIOAMBIENTALES INMINENTES PARA EL SHORT SEA SHIPPING EN EL UNIÓN EUROPEA

La Unión Europea (UE) ha instado a la Organización Marítima Internacional (OMI) a implementar instrumentos globales para la internalización de los costos externos por el transporte marítimo (Directiva 2009/29 / EC, considerado 3). De hecho, en el 2017, el Parlamento Europeo decidió incluir '*shipping for 2023*' en el *EU's Emissions Trading System* (EU ETS) si la estrategia de la OMI era insuficiente. Esta preocupación se recoge en el actual Libro Blanco de Transporte (2011), el motor de la política europea (COM (2011) 144 final), que establece evitar "smart pricing" y distorsiones fiscales a través de la internalización de costes externos para todos los modos de transporte. Entre otras soluciones para el transporte marítimo, se incide especialmente en regular una operación portuaria más ecológica. En este sentido, dos propuestas son las preferentes, aunque ambas requieren importantes inversiones portuarias: instalaciones para *On-shore Power Supply* (OPS) y para el suministro de gas natural licuado (LNG).

A través de la Directiva 2014/94 / UE, la UE obliga a los puertos europeos a proporcionar las infraestructuras necesarias para permitir el uso generalizado de OPS para el 2025. A pesar de que la obligatoriedad de esta Directiva se basa en las mayores ventajas medioambientales que ofrece el OPS frente a otras soluciones (la eliminación de residuos portuarios, ruido, vibraciones, etc.) y que su aplicación conlleva una importante inversión pública para dotar a los puertos europeos de tales infraestructuras, el uso de tal servicio, conocido también como *Cold Ironing* (CI), está concebido actualmente como absolutamente voluntario para las navieras. Por tanto, la normativa europea actual (Directiva 1999/32/CE, Directiva 2005/33/CE) ha trasladado el éxito de tal iniciativa a la decisión de las navieras sobre su uso.

De nuevo, como fue expuesto en la sección anterior, esta actitud contrasta con la política de la UE hacia otros modos de transporte, donde una aplicación de '*user pays*' y '*polluter pays principle*'-PPP- no sólo se recoge en la Política Europea del Transporte (Libro Blanco sobre el Transporte, 2011), sino que se refrenda legislativamente (Directiva 1999 / 62 / CE modificada por la Directiva 2011/76 / UE y COM (2017) 275 final, ANEXO 1) y se implementa mediante impuestos y tasas (Schroten et al., 2019).

En vista a lo anterior, se espera en los próximos años un incremento progresivo de la exigencia medioambiental en la normativa de la UE para el transporte marítimo en general y para la operativa portuaria en particular. Se prevé así, un tratamiento normativo para el sector marítimo convergente con el del transporte por carretera. Esto es, incluir el pago obligatorio de los costes externos para internalizar el daño medioambiental de la actividad de los buques en el puerto. Esta esperada estructura tarifaria, en paralelismo con el transporte por carretera dependerá, por tanto, de la tecnología de los buques, pero también de la ubicación y densidad de las poblaciones de los *hinterlands* portuarios. Tomando como referencia el transporte por carretera europeo, las tarifas por uso de infraestructura deberán incluir un cálculo de costes externos preciso, donde se deberán tener en cuenta las

características antes mencionadas, para mantener la proporcionalidad del sistema tarifario y promover operaciones portuarias sostenibles. Sin embargo, el impacto de tal evolución normativa no parece claro desde la perspectiva del buque.

Los estudios académicos sobre la viabilidad del CI hasta ahora no sólo han analizado la cofinanciación de la UE para inversiones portuarias sin tener en cuenta tarifas (o tasas) portuarias adicionales para los buques (Innes y Monios, 2018; Zis, 2019), sino que incluso algunos autores han sugerido compensar a los operadores de los buques por el tiempo perdido durante la conexión / desconexión del CI (Zis et al., 2014). La mayoría de los estudios sobre OPS evalúan los beneficios sociales, esto es, monetarizando el impacto en la salud y el período de recuperación de la inversión portuaria al considerar diferentes tasas de penetración del uso del CI en la operativa de los buques (Zis et al., 2014; Ballini y Bonzzo, 2015; Innes y Monios, 2018; Zis, 2019; entre otros). A pesar de que los beneficios medioambientales del OPS son altamente dependientes de las características regionales de la red eléctrica en tierra (especialmente, la participación en la generación de electricidad por fuentes de energías renovables -RES-, Winkel et al., 2016), estos han resultado ser mayoritariamente positivos cuando los costes externos se evalúan desde el punto de vista de tierra (Ballini y Bonzzo, 2015, Innes y Monios, 2018, Zis, 2019, Winkel et al., 2016). Sin embargo, los resultados de Winkel et al. (2016) fueron notables: encontraron que la inversión en OPS no genera beneficios para la salud si la generación eléctrica en tierra es debida predominantemente a la quema de combustibles fósiles (esto es la mayoría de los casos de los estados insulares), de manera que el CI es incluso, una alternativa menos sostenible que la generación eléctrica por combustión en los motores auxiliares a bordo de los buques.

Desde la perspectiva del buque, Zis (2019) concluye que, cuando el coste del combustible es muy bajo la inversión en CI no es beneficiosa para los buques considerando sus costes operativos y su ciclo de vida (10 años), pero en otros escenarios la inversión podría ser interesante. Innes y Monios (2018) incluyen un breve análisis sobre la conveniencia del CI para los buques. Una vez más, su trabajo presenta al CI como una solución beneficiosa para las navieras cuando consideran el precio unitario de la electricidad frente al precio del combustible (ahorros anuales en los costes operativos). Sin embargo, en 2017 la Comisión Europea presentó un informe (Comisión Europea, 2017) cuyos resultados fueron menos favorables. El informe concluía que para los buques Ro-Ro de 25.000 GT (30 calls / año), los costes anuales del CI eran más altos en comparación con la producción de electricidad a bordo en puerto y sólo bonificaciones de hasta el 50% de las tasas portuarias harían posible la recuperación de la inversión en 10 años. Entre las razones, se puede destacar: la generación eléctrica a bordo está actualmente libre de impuestos (Kumar et al., 2019), mientras que la electricidad suministrada desde los puertos está sujeta a tasa impositiva según la normativa de la UE. Consecuentemente, la reducción de impuestos sobre la electricidad suministrada en el puerto fue el principal incentivo fiscal propuesto por los investigadores hasta ahora para impulsar el uso de CI (Ballini y Rozzo, 2015, Winkel et al., 2016). Así, algunos estados miembros ya aplican un tipo impositivo reducido para este suministro, que ha sido permitido temporalmente por la UE.

Spengler y Tovar (2020) concluyeron que la composición del tráfico portuario, especialmente el tipo de buque juega un papel importante en el potencial de la CI para la reducción de emisiones contaminantes. Más allá del tipo de buque, Sciberras et al. (2017) señalaron la importancia del perfil técnico y operativo de los buques sobre la reducción de emisiones cuando se evalúan tecnologías de mitigación, como el CI.

En este sentido, existe un amplio consenso sobre los principales beneficiarios potenciales del uso de CI: cruceros, buques Ro-Ro (Winkel et al., 2016; Innes y Monios, 2018) y buques portacontenedores (Ecofys, 2015) especialmente los *reefer* (Zis et al, 2014). Esto es así, no sólo por sus efectos medioambientales (altos consumos energéticos en puerto con tiempos de atraque medios), sino también porque este tipo de buques recalán habitualmente en los mismos puertos. Esto, junto con el alto impacto ambiental en los ciudadanos de las emisiones de NOx y SOx debido a la alta frecuencia de operación, hacen que el CI sea un interesante sistema de mitigación para el tráfico Short Sea Shipping (SSS). Esta realidad ha motivado proyectos europeos como ELEMED (CEF- Connecting Europe Facility, 2016-2018; Mertikas et al., 2018), que ha analizado el impacto de la CI en el corredor del Mediterráneo Oriental (es decir, Grecia, Chipre y Eslovenia; ver Metikas et al., 2018).

El potencial beneficio por uso de CI en el SSS junto al inminente cambio normativo en la U.E, fuerza a considerar en esta tesis la posible internalización de los costes externos por emisiones contaminantes en puerto, mediante la aplicación de tasas medioambientales a los buques, estando estas basados en la contaminación adicional generada por no utilizar CI en los puertos de la UE. Esta realidad genera, un desafío adicional para la optimización de flotas de SSS que deberán asumir nuevos costes tarifarios o bien una inversión adicional para el uso del CI, manteniendo la competitividad con la alternativa unimodal, de nuevo más regulada en términos medioambientales.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 3

El modelo matemático inicial y la inclusión de la valoración medioambiental

1 LA DEFINICIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

La definición del modelo consta de dos etapas: la definición del modelo matemático capaz de simular las características técnicas y operativas de la flota actuando en cadenas intermodales y la definición del marco de optimización para la resolución del modelo matemático.

Desde un punto de vista matemático el modelo está constituido por tres elementos: las variables, las funciones objetivo y las restricciones (ver Figura 2). Al mismo tiempo, las variables son divididas en tres tipos de acuerdo con sus roles en el proceso de optimización: los casos (variables discretas), variables continuas y los datos (variables no controlables, *inputs* impuestos por un escenario específico de análisis). Además, se pueden distinguir dos tipos de variables según su naturaleza: variables auxiliares, relativas a las características de Ingeniería y arquitectura naval y las variables principales que son aquellas relacionadas directamente con las funciones objetivo. El cálculo de las primeras es necesario, junto con el cálculo de las segundas, para determinar las funciones objetivo (ver Figura 2).

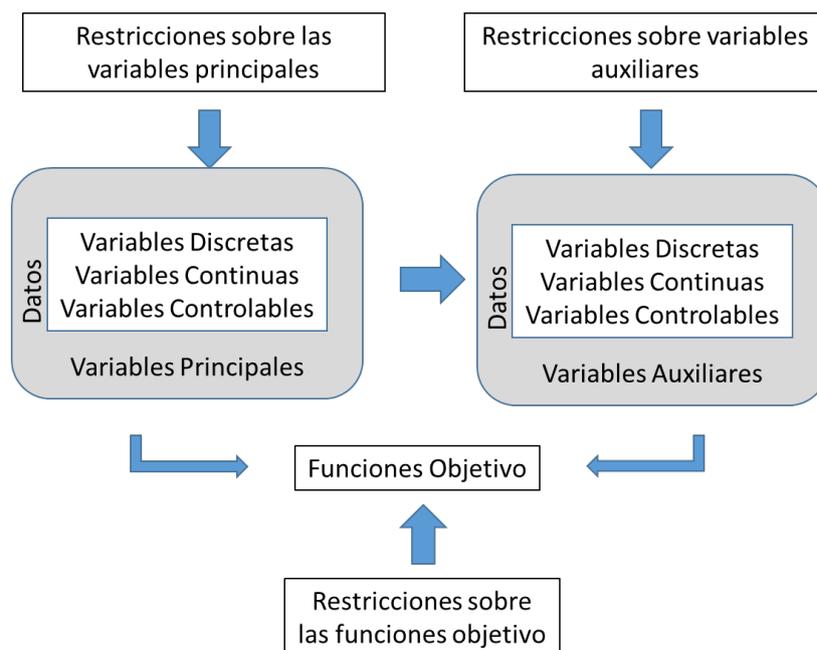


Figura 2. Integración de elementos en el modelo de optimización variables

Las variables y sus relaciones nos permitirán simular diferentes escenarios que se construirán con las posibles rutas (sus puertos), flotas y unidades de carga.

2 FORMULACIÓN

La primera parte del modelo está centrada en el diseño de buques portacontenedores desde un punto de vista técnico y operativo, para ello se ha seguido el modelo desarrollado por (Martínez-López et al., 2015a). Sin embargo, este se ha ampliado para atender no sólo la evaluación de la competitividad intermodal en términos de coste y tiempo sino también en términos de sostenibilidad. Siendo esta última considerada de acuerdo al impacto de las emisiones contaminantes en términos monetarios. En las siguientes secciones se muestra la construcción de las funciones objetivo del modelo.

2.1 FLOTAS, UNIDADES DE CARGA, RUTAS Y PUERTOS

La primera parte del modelo está centrada en el diseño de buques portacontenedores desde un punto de vista técnico y operativo, para ello se ha seguido el modelo desarrollado por (Martínez-López et al., 2015a). En este modelo el cálculo de las características técnicas de los buques está basado en las expresiones publicadas por diferentes autores (Lamb, 2004; Watson, 2002, etc). La arquitectura de los buques ha sido definida por: la eslora (L), la manga (B), el puntal (D), el calado (T), el francobordo (FB), el arqueo (GT), el volumen de carena (\bar{V}) el peso muerto (Δ), la velocidad (VB), la potencia propulsora (PB), la capacidad real de carga del buque ($G_p; \forall p \in PPP$), y la posible instalación de *bow thrusters* ($MMb; \forall b \in EBB$, entre otros (ver Figura 3 y Anexo 1)). Dada la importancia de la competitividad en términos de tiempo para este tipo de tráfico, la definición de la disposición de cámara de máquinas es calculada por el modelo considerando distintas combinaciones posibles (más allá de las convencionales), de tal manera se optimizará el tipo de maquinaria propulsora ($TME_e; \forall e \in EEE$), el número de motores o turbinas ($NME_i; \forall i \in I$), el tipo de propulsor ($TP_h; \forall h \in H$) y el número de líneas de ejes ($NSL_n; \forall n \in N$; ver Anexo 1).

El modelo de diseño propuesto fue validado a través de su aplicación a buques reales con dimensiones entre 85 y 200 metros de eslora entre perpendiculares (Martínez-López et al., 2015a) y los resultados alcanzados fueron muy cercanos a la realidad. El diseño correcto del buque junto con su número (NB), determina los costes de capital (Grosso et al., 2010) por la construcción de cada buque (CC) o su flete, además el número total de viajes anuales de la flota (N_{trips}) y la edad de los buques ($E_q; \forall q \in EQ$) resulta esencial para evaluar correctamente la competitividad de las cadenas multimodales porque influyen directamente en los costes fijos y variables que junto con los costes de capital determinarán el flete mínimo requerido.

La caracterización de las cadenas intermodales fuerza no sólo a considerar las características de las posibles unidades de carga que son compatibles con los portacontenedores ($PP=\{1, \dots, p\}$) junto con su peso ($P_p; \forall p \in PPP$): TEUs y FEUs sino también los camiones que los transportarán en los tramos por carretera de las cadenas multimodales o en la alternativa del transporte por carretera. Teniendo en cuenta el peso asumido para la carga (12,5t y 20,5t respectivamente) el camión considerado por defecto es un tráiler de carga general: con 40 toneladas de máxima carga bruta y 25 t de máxima carga neta (420 CV). Se trata de un vehículo de cinco ejes, clasificado como 'vehículo articulado' (Directiva 96/53/CE) y como categoría N_3 , vehículo pesado (HDV > 12t, Directiva 2007/46/CE). A pesar de que el camión considerado será el mismo para el transporte unimodal que para el transporte multimodal,

para todos los casos de carga ($PP=\{1,\dots,p\}$), la carga neta transportada por el camión será aquella correspondiente a la unidad de carga considerada ($P_p; \forall p \in PP$).

Desde un punto de vista medioambiental, las sucesivas normativas europeas que progresivamente restringieron las emisiones de los vehículos desde el 1995 (Directiva 91/542/EEC), clasificaron a través del tiempo los vehículos de carga como Euro I, EuroII, ..., Euro-IV, siendo esta clasificación la más reconocida en cuanto a tecnología de reducción de emisiones.

Además de la determinación de la capacidad de carga de los buques en unidades ($G_p; \forall p \in PP$), la selección de una unidad de carga particular también determina los posibles sistemas de manejo de la carga utilizados ($MG_g; \forall g \in GG$) (ver Figura 3).

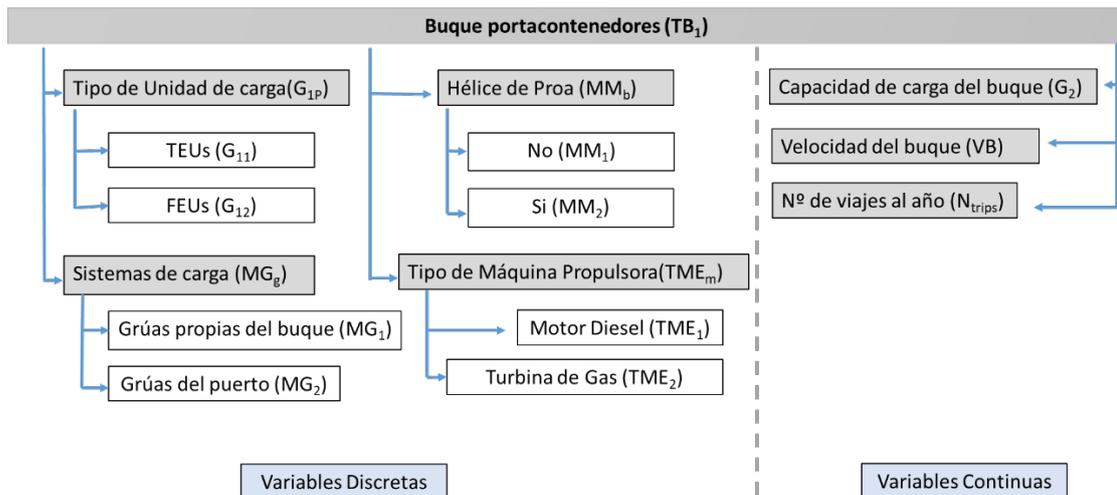


Figura 3. Variables principales del modelo

Las características de estos sistemas son críticas para la evaluación de la competitividad de las cadenas intermodales en términos de tiempo (tiempos de carga/descarga) y, desde luego, son altamente dependientes del puerto considerado para el estudio. En este modelo se asumirá para los contenedores, como hipótesis inicial, una ruta directa de carga en puerto (Daganzo, C., 2005), esto es, operaciones de carga bajo condiciones ideales (mínimos tiempos de tránsito dentro de puerto para los contenedores Martínez-López et al., 2015c).

Respecto a la selección de la ruta, el modelo ‘muchos a muchos’ (con varios tramos capilares, tramos por carretera y un tramo troncal, tramo marítimo, para las cadenas intermodales) resulta ser altamente adaptable a la mayoría de las rutas reales ‘puerta a puerta’ (Daganzo, 2005). Por esta razón, esta aproximación, matemáticamente definida por Martínez-López et al., 2015c (ver también Martínez-López et al., 2015b), ha sido considerada para la generación de rutas en este trabajo. En el modelo propuesto (ver figura 3), los puertos de origen ($M=\{1,\dots,m\}$) y destino ($K=\{1,\dots,k\}$), los orígenes ($Z=\{1,\dots,z\}$) y destinos en tierra de las cadenas intermodales ($DD=\{1,\dots,d\}$) junto con su posibilidad de ser seleccionados entre otros como origen inicial ($X_z; \forall z \in Z$) y destino final ($X_d; \forall d \in DD$) ha sido convenientemente integrado (ver Anexo 1).

Una vez las rutas han sido definidas (Martínez-López A. et al., 2015b, Martínez-López et al., 2015c), estas son caracterizadas por el uso de las distancias marítimas que se corresponden con las autopistas del mar ($DM_{mk}; \forall m \in M \wedge \forall k \in K$), el tramo troncal y las distancias por

carretera entre puntos extremos y puertos (los tramos capilares: $DR_{zm}^b, \forall z \in Z \wedge \forall m \in M$ and $DR_{kd}^b, \forall k \in K \wedge \forall d \in DD$) y la distancia de acarreo por carretera ($DR_{zd}^a, \forall z \in Z \wedge \forall d \in DD$).

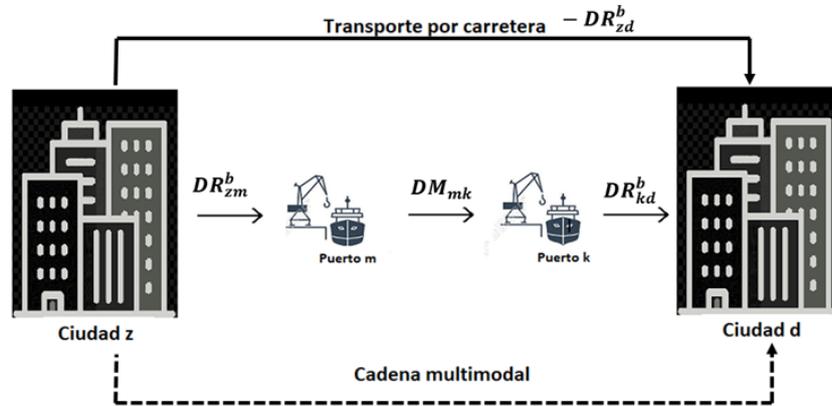


Figura 4. Modelo many to many para la generación de rutas.

Aun cuando las variables manejadas en la integración del modelo son numerosas (150 teniendo en cuenta los datos) sólo las variables principales han resultado ser independientes (siete variables, ver Figura 3). Estas variables principales coinciden con los parámetros iniciales que son normalmente solicitados por los armadores durante la fase de diseño conceptual del buque (Lamb, 2004).

Estas son, variables discretas que reflejan el conjunto de posibilidades evaluadas para su selección, como la edad de los buques ($Q=\{1,..q\}$), el grupo de posibles unidades de carga compatibles ($PP=\{1,..p\}$) y los posibles sistemas de manejo de la carga $GG=\{1,..g\}$). Además también existen variables continuas tales como la capacidad de carga de los buques ($G_p; \forall p \in PP$), la velocidad de los buques (VB) y el número de buques en la flota (NB) y la posible instalación de *bow thusters* ($BB=\{1,..b\}$) (ver Anexo 1).

El modelo matemático ha sido desarrollado teniendo en cuenta que el principal objetivo de este análisis es encontrar la opción de flota que articula la cadena intermodal más competitiva en comparación a la alternativa unimodal en términos de coste, tiempo y costes externos (emisiones medioambientales). Estos tres términos serán, por tanto, las funciones objetivo del proceso de optimización y serán descritas en las siguientes secciones.

2.2 FUNCIÓN OBJETIVO 1: MAXIMIZACIÓN DE LA DIFERENCIA EN TÉRMINOS DE COSTE

El coste del transporte unimodal (CU) y del transporte multimodal (CMU) es medida por tonelada y por viaje, esto es transporte 'puerta a puerta' entre cada par de nodos z y d , $\forall z \in Z, \forall d \in DD$ en cada dirección. F1 representa la primera función objetivo del modelo (ver expresión 1) en la búsqueda de la flota óptima para la autopista del mar. La cadena intermodal operada por una flota optimizada debe implicar una ventaja en términos de costes si es comparada con la alternativa de la carretera ($CU \gg CMU$). Esta ventaja será más favorable a la multimodalidad cuando la diferencia en términos de costes entre los distintos modos de transporte se maximice.

$$F1 = \max (CU - CMU) \quad (1)$$

El coste del acarreo terrestre (CU en la ecuación 2) es dependiente de la distancia real cubierta, por lo tanto, en su cálculo las probabilidades de los diferentes extremos de rutas de emitir y/o recibir mercancía (X_{jz}^c and X_d), las distancias (DR_{zd}^a) entre cada posible origen ($\forall z \in Z$) y destino ($\forall d \in DD$) y los costes relativos a las emisiones contaminantes (RE) deben ser considerados. Es necesario tener en cuenta que las probabilidades relativas a los orígenes están altamente condicionadas por el escenario evaluado ($\forall c \in ST$) y por el sentido del transporte ($\forall j \in J$), especialmente en líneas desequilibradas.

Los mismos parámetros, pero relativos a los tramos capilares de la red, acarreos terrestres en las cadenas intermodales (ecuaciones 4 y 5). Adicionalmente el precio unitario (€/km) del transporte por carretera ($CK_p^d; \forall p \in PP \wedge \forall d \in DIS$) que es relativo al tipo de carga es definido considerando la máxima velocidad permitida para los camiones (VT , en km/h), y obviamente es considerada para el cálculo del coste del transporte unimodal (ecuación 2) y los costes de los tramos terrestres del sistema multimodal (ecuaciones 4 y 5). Este valor también es dependiente del número de conductores necesarios para la conducción del camión ($\forall d \in DIS$)

$$CU = RE + \left(\sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_{jz}^c \times X_d \times DR_{zd}^a) \right) \times \left(\frac{1}{2} \right) \times \frac{CK_p^d}{P_p} \quad \forall p \in PP \wedge \forall d \in DD \wedge \forall z \in Z \wedge \forall j \in J \wedge \forall d \in DIS \quad (2)$$

El coste de la multimodalidad (ecuación 3) integra el coste de los tramos capilares (CMU_a ; $\forall a \in A$, ver Anexo 1): ‘puerta a puerto’ (CMU_1) y ‘puerto a puerta’ (CMU_2) por carretera y el tramo marítimo (CMU_3). En todos ellos se han incluido los costes externos debido a su impacto medioambiental: RE_a , $\forall a \in A$ (ver ecuaciones 4-6). Estos costes son definidos en la sección 4.1.4. El coste del tramo troncal de la cadena intermodal (tramo marítimo, ver ecuación 6) ha sido calculado a través de un modelo de costes (Martínez-López et al., 2015c) que integra todos los costes necesarios (CT_c ; $\forall c \in C$ ver Anexo 1) para la evaluación del flete mínimo requerido (para alcanzar el punto de equilibrio). Ya que estos costes son anuales, aparte del peso por unidad de carga (P_p ; $\forall p \in PP$), es necesario tener en cuenta los viajes anuales de la flota (N_{trips}) para obtener la expresión adecuada (euros por viaje y tonelada) en la ecuación (CMU_3). Estos costes integran la estructura tradicional de costes en el transporte marítimo: costes de capital, costes variables y fijos (Pérez-Mesa et al., 2010; Martínez-López et al., 2015c; Martínez-López et al., 2015a).

$$CMU = \sum_{a=1}^a CMU_a \quad \forall a \in A \quad (3)$$

$$CMU_1 = RE_1 + \left(\sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times DR_{zm}^b) \right) \times \left(\frac{1}{2} \right) \times \frac{CK_p^d}{P_p} \quad \forall p \in PP \wedge \forall m \in M \wedge \forall z \in Z \wedge \forall j \in J \wedge \forall d \in DIS \quad (4)$$

$$CMU_2 = RE_2 + \left(\sum_{d=1}^d (X_d \times DR_{kd}^b) \right) \times \frac{CK_p^d}{P_p} \quad \forall p \in PP \wedge \forall k \in K \wedge \forall d \in DD \wedge \forall d \in DIS \quad (5)$$

$$CMU_3 = RE_3 + \left(\frac{1}{G_p \times P_p \times N_{trips}} \right) \times \sum_{c=1}^{12} CT_c \quad \forall p \in PP \quad (6)$$

Las expresiones mostradas anteriormente (ecuaciones de la 2 a la 6) representan los costes totales relativos a los sistemas de transporte incluyendo los costes externos generados por las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera (RE_a , $\forall a \in A$, definidos en la sección 2.4). Debido al impacto de los costes externos en la calidad de vida de los ciudadanos, la ventaja

medioambiental ha sido considerada una función objetivo ($F3$) adicional e independiente en la búsqueda de la flota óptima para la operación de autopistas del mar. Este hecho ha motivado la consideración particular del modelo medioambiental.

2.3 FUNCIÓN OBJETIVO 2: MAXIMIZACIÓN DE LA DIFERENCIA EN TÉRMINOS DE TIEMPO

Una de las conclusiones más ampliamente aceptadas sobre el análisis de la competitividad del transporte intermodal frente a la carretera alcanzada por los estudios de elección modal (Feo et al., 2010; Garcia-Menendez and Feo-Valero., 2009) es que el punto más débil de la intermodalidad es el tiempo invertido en el transporte. A pesar de que estos estudios también determinan la importancia relativa del tiempo frente al coste como función de las características de la carga (Nellthorp et al., 2001) y del momento del estudio (Mangan et al., 2001), la evaluación de la competitividad del transporte intermodal en términos de tiempo resulta ser fundamental para el transporte ‘puerta a puerta’. Por esa razón el proceso de optimización de la flota debe estar orientado a asegurar una mayor competitividad de la multimodalidad en términos de tiempo: $F2$ (ver ecuación 7, donde tanto el tiempo invertido en el transporte unimodal TVU , como el tiempo invertido en la multimodalidad TVM son considerados en horas por viaje. Así cuanto mayor sea el valor de la función objetivo, mayor será la ventaja en tiempo asociada a la multimodalidad.

$$F2 = \max(TVU - TVM) \quad (7)$$

La estimación del tiempo dedicado al transporte unimodal (TVU , ecuación 8) y a los tiempos de acarreo terrestre (TVM_1 , TVM_2 , ecuaciones 10 y 11 respectivamente) son muy dependientes de las normativas regionales sobre transporte de mercancías por carretera. Las ecuaciones aquí mostradas recogen el caso particular de aplicación para Chile sobre máxima velocidad permitida para el camión (Ley Nº 18.290, Art. 145), y el máximo tiempo de conducción por día: 16 horas con dos conductores (24 horas se corresponderán con 16 horas de transporte efectivas cuando es obligatorio el uso de dos conductores) y descansos de dos horas cada 5 horas de conducción (artículo 25 bis del Código del Trabajo; Dirección de trabajo del gobierno de Chile, noviembre 2015). Como ejemplo de aplicación, en estas ecuaciones el primer miembro muestra información sobre las horas reales invertidas en periodos enteros de 16 horas (incluyendo paradas inesperadas) mientras que el segundo miembro refleja el tiempo conducido el último día de trayecto (menos de 16 horas)

$$TVU = (1/2) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_{jz}^c \times X_d) \times \left[\left\lfloor \frac{\left[\frac{DR_{zd}^a}{16 \times VT} \right] \times 1 + \frac{DR_{zd}^a}{VT}}{16} \right\rfloor \times 24 + \left[\left(\left\lfloor \frac{\left[\frac{DR_{zd}^a}{16 \times VT} \right] \times 1 + \frac{DR_{zd}^a}{VT}}{16} \right\rfloor \right) - \left\lfloor \frac{\left[\frac{DR_{zd}^a}{16 \times VT} \right] \times 1 + \frac{DR_{zd}^a}{VT}}{16} \right\rfloor \right] \times 16 \right] \quad (8)$$

En paralelo, el tiempo de transporte multimodal (TVM) integra la duración del tramo marítimo y los tramos por tierra (ecuación 9, ver Anexo 1). El tiempo invertido en el tramo marítimo (TVM_3 , ecuación 12) ha sido tomada como la suma del tiempo de navegación (TVB_1), dependiente de la velocidad del buque VB y de la distancia marítima ($DM_{mk}; \forall m \in M \wedge \forall k \in K$, ver ecuación 13), el tiempo de maniobra en puerto (TVB_2) y el tiempo de atraque (TVB_3) que, este último incluye los tiempos de carga y descarga. El tiempo de maniobra en puerto (TVB_2 , ver ecuación 14), es altamente dependiente del uso obligatorio de práctico (TS_1) y servicios de remolque (TS_2) requerido por las autoridades portuarias y el tiempo de amarre (TS_3)

$$TVM = \sum_{a=1}^a TVM_a \quad \forall a \in A \quad (9)$$

$$TVM_1 = (1/2) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times \left[\left[\frac{\left\lfloor \frac{DR_{zm}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zm}^b}{VT}}{16} \right] \times 24 + \left(\left[\frac{\left\lfloor \frac{DR_{zm}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zm}^b}{VT}}{16} \right) - \left[\frac{\left\lfloor \frac{DR_{zm}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{zm}^b}{VT}}{16} \right] \times 16 \right) \right] \quad (10)$$

$$TVM_2 = \sum_{d=1}^d (X_d \times \left[\left[\frac{\left\lfloor \frac{DR_{kd}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{kd}^b}{VT}}{16} \right] \times 24 + \left(\left[\frac{\left\lfloor \frac{DR_{kd}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{kd}^b}{VT}}{16} \right) - \left[\frac{\left\lfloor \frac{DR_{kd}^b}{16 \times VT} \right\rfloor \times 1 + \frac{DR_{kd}^b}{VT}}{16} \right] \times 16 \right) \right] \quad (11)$$

$$TVM_3 = \sum_{s=1}^s TVB_s \quad \forall s \in SS \quad (12)$$

$$TVB_1 = DM_{mk} / (VB \times 1.85)^1 \quad \forall m \in M \wedge \forall k \in K \quad (13)$$

$$TVB_2 = \sum_{w=1}^w TS_w \quad \forall w \in WW \quad (14)$$

2.4 FUNCIÓN OBJETIVO 3: MAXIMIZACIÓN DE LA DIFERENCIA EN COSTES MEDIOAMBIENTALES

Debido al daño medioambiental a la sociedad, la diferencia entre los costes externos asociados con las emisiones contaminantes para los sistemas de transporte será evaluada, también, como la tercera función objetivo del problema de optimización: F3 (ver ecuación 15). Para ello se han seguido las recomendaciones de Maibach et al. (2008), Ntziabchristos y Samaras, (2012) y Jiang et al. (2014), entre otros, para la estimación de los costes externos debidos a la contaminación del aire. Así estos costes se han calculado, para todos los sistemas de transporte evaluados, como la multiplicación de los costes unitarios de contaminantes por los coeficientes de emisión (ver ecuaciones 19, 21, 23 para el tramo marítimo, 28 para el transporte unimodal y 31 y 34 para los acarrees por carretera, ver además el Anexo 1).

Con el objetivo de establecer una comparación razonable entre los dos sistemas de transporte alternativos para evaluar sus costes externos en términos de impacto mediambiental, debemos evaluar las mismas emisiones contaminantes para todos los medios de transporte. Siguiendo las recomendaciones de la Unión Europea sobre contaminación medioambiental (Regulación (EC) No 595/2009 del Parlamento Europeo), los principales gases contaminantes son: CO, NO_x y partículas PM_{2.5}/PM₁₀, NH₃, CH₄, HCT y HCNC, pero excluyen las emisiones de SO₂. Sin embargo, el alto contenido en azufres de los combustibles (Wang and Cobett, 2007), ha motivado numerosos trabajos en los últimos años sobre emisiones contaminantes de azufre en el transporte marítimo. Como resultado, se han impuesto con carácter obligatorio, estrictas medidas de regulación para las emisiones de azufres en el fuel utilizado por los buques (MARPOL, Anexo VI revisado por la IMO-International Maritime Organization-). Por otro lado, resulta esencial la evaluación del cambio climático (Jiang et al. 2014, Maibach et al., 2008; Ntziabchristos and Samaras, 2012) debido a los gases de efecto invernadero emitidos por los sistemas de transporte (CO₂). Así, finalmente, debido a la importancia de los costes marginales externos (Vanherle and

¹ 1.85km=1 nudo náutico

Delhaye, 2010), los contaminantes medioambientales considerados en este estudio son ($U=\{1, \dots, u\}$): SO_2 , NO_x , y partículas $PM_{2.5}$, además de las emisiones en CO_2 .

De la misma manera, los mismos costes unitarios para las emisiones ($CF_{sufv}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$ -€ por kg de contaminante) han de ser aplicados (Maibach et al., 2008) para todos los tipos de vehículos de transporte (ver ecuaciones: 19, 21, 23, 28, 31 y 34). Los valores de los costes unitarios son dependientes del país ($FF=\{1, \dots, f\}$) y tipo de zona ($V=\{1, \dots, v\}$) donde se detectan las emisiones: zona metropolitana o zona urbana. Además, los costes unitarios relativos a la operación en una región marítima, navegación libre ($CF_{1u}; \forall u \in U$ ver ecuación 19), son independientes del tipo de zona y país. Los valores de estos costes fueron recogidos para distintos países por HEATCO (Bickel et al., 2006) for $PM_{2.5}/PM_{10}$ y por CAFE (Holland et al., 2005) para el resto de contaminantes.

$$F3 = \max(RE - MUE) \quad (15)$$

Tanto los costes externos del transporte unimodal (RE , ecuación 26) y los costes externos del transporte multimodal (MUE , ecuación 16) han sido considerados en euros por tonelada y viaje. Por esa razón la ecuación considera las variables: unidades de carga (su número y peso $G_p, P_p; \forall p \in P$) y el número anual de viajes N_{trips} . La expresión relativa al transporte multimodal integra los costes del tramo marítimo y los costes del acarreo terrestre ($RE_a; \forall a \in A$, ver ecuaciones 16, 17, 29 y 32, ver también Anexo 1)

$$MUE = \sum_{a=1}^a RE_a \quad \forall a \in A \quad (16)$$

$$RE_3 = CEM / (G_p \times P_p \times N_{trips}) \quad \forall p \in PP \quad (17)$$

$$CEM = \sum_{s=1}^3 CEM_s \quad \forall s \in SS \quad (18)$$

El método seguido para el cálculo de los costes relativos a las externalidades en el tramo marítimo (RE_3) está basado en una modificación de la estimación de los costes externos medioambientales para las emisiones de buques de Jiang et al., (2014, ver también Jiang y Kronbak, 2012). De acuerdo a este método, el cálculo debe tener en cuenta tres etapas con respecto al impacto en la salud de la población de la emisiones por transporte marítimo ($CEM_s; \forall s \in SS$): navegación libre, maniobrabilidad y atraque ($SS=\{1, \dots, s\}$).

Los factores de emisión para los buques ($EG_{su}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U$ ver ecuaciones 19, 21 y 23) han sido obtenidas de las hojas de cálculo de emisiones para buques portacontenedores desarrolladas por la Universidad Técnica de Dinamarca (DTU) y por la Universidad del Sur de Dinamarca (SDU) (<https://www.shipowners.dk/en/services/beregningsvaerktoejer/>). Esta herramienta está basada en un modelo de cálculo (Kristensen, 2012; Kristensen and Lützen, 2012), capaz de facilitar los coeficientes de emisión de los buques en base a sus características técnicas y operativas. Para la correcta integración de la hoja de cálculo de emisiones en el modelo matemático presentado en este trabajo, se han asumido ciertas hipótesis iniciales sobre el tipo de motor de los buques y su tecnología: media velocidad y motores Tier II operados con MDO (Marine Diesel Oil), por tanto, no se ha contemplado la instalación de scrubbers ni tampoco otras posibles alternativas para la reducción de emisiones.

Las expresiones 19, 20 y 22 presentan el cálculo de los costes anuales (€) de las externalidades para las diferentes etapas del tramo marítimo. Aun cuando todas ellas responden a la misma estructura: la suma de los costes para los diferentes contaminantes ($U = \{1, \dots, u\}$), esto es la multiplicación de los factores de emisión por los costes unitarios; los factores de emisión ($EG_{su}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U$) son medidos en diferentes unidades: kg /milla náutica para navegación libre (ver ecuación 19) y kg/h para maniobras (ecuación 21) y atraque (ecuación 23). Esto motiva que la ecuación 19 considere la variable de la distancia marítima ($DM_{mk}; \forall m \in M \wedge \forall k \in K$), mientras que las restantes integran las variables de tiempo (TVB_2 y TVB_3). Obviamente los países considerados para los costes unitarios y la definición de coeficientes de emisión en maniobras y operaciones de atraque serán únicamente aquellos de los puertos de origen y destino ($FF = \{1, \dots, f\}$).

$$CEM_1 = \sum_{u=1}^4 (EG_{1u} \times DM_{mk} \times 0.54 \times CF_{1u}) \times N_{trips} \quad \forall m \in M \wedge \forall k \in K \quad (19)^2$$

$$CEM_2 = 0.5 \times N_{trips} \times \sum_{f=1}^2 (CEM_{2f}) \quad (20)^3$$

$$CEM_{2f} = \sum_{u=1}^4 (EG_{2u} \times TVB_2 \times CF_{2ufv}) \quad \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (21)$$

$$CEM_3 = 0.5 \times N_{trips} \times \sum_{f=1}^2 (CEM_{3f}) \quad (22)$$

$$CEM_{3f} = \sum_{u=1}^4 (EG_{3u} \times TVB_3 \times CF_{3ufv}) \quad \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (23)$$

Los puertos serán considerados zonas metropolitanas ($v=1$) cuando la población de su hinterland ($PV_m; \forall m \in M; PV_k \forall k \in K$) supere los 0.5 millones de habitantes (ver 24 y 25; Holland et al.,2005; Bickel et al.,2006). En caso contrario, el puerto será considerado zona urbana ($v=2$).

$$CF_{2ufv} = \begin{cases} PV_m \geq 0.5; PV_k \geq 0.5 & CF_{2uf1} \\ PV_m < 0.5; PV_k < 0.5 & CF_{2uf2} \end{cases} \quad (24)$$

$$CF_{3ufv} = \begin{cases} PV_m \geq 0.5; PV_k \geq 0.5 & CF_{3uf1} \\ PV_m < 0.5; PV_k < 0.5 & CF_{3uf2} \end{cases} \quad (25)$$

Ntziabchristos and Samaras (2012) propusieron tres métodos de cálculo para determinar los coeficientes de emisión de los vehículos de transporte por carretera ($EGU_{uf}; \forall u \in U \wedge \forall f \in FF$) -gramos de contaminante por kilo de fuel consumido-: Tier I, Tier II y Tier III, siendo el último preferible. Después de la evaluación de los métodos sugeridos se decidió descartar el tercer método porque su aplicación requiere conocer con gran nivel de detalle la ruta, la operación en ella y el vehículo. Lo mismo ocurre con el método Tier II para el cálculo de los coeficientes de emisión de NO_x y $PM_{2.5}$, y para el cálculo de los coeficientes de CO_2 resulta útil sólo para camiones rígidos.

Dadas las unidades de los coeficientes de emisión para el transporte por carretera (ver Anexo 1) y su dependencia con los países afectados por el transporte, para calcular los costes externos (ver ecuaciones 26, 29 y 32), es necesario considerar no sólo el consumo de fuel de

2 milla náutica=0.54× 1/km

3 Como TVB_2 y TVB_3 (ver ecuaciones 21 y 23) incluyen, de manera agregada, el tiempo invertido en las operaciones de salida y de llegada en puerto (práctico, operaciones de remolque y actividades de carga/descarga respectivamente), es necesario aplicar un factor corrector (0,5) que considere los diferentes países afectados ($\forall f \in FF$) en el cálculo de CEM_2 y CEM_3 (ecuaciones 20 y 22).

los camiones ($FC_p; \forall p \in PP$ - gr fuel/km-), sino también la distancia cubierta por ellos (ver ecuaciones 28, 31 y 34) y observar su distribución entre los diferentes países: porcentaje de la distancia por carretera que pertenece a cada país en el transporte unimodal ($X_{fj}; \forall f \in FF$), los tramos de carretera desde los puertos de origen ($X_{fz}; \forall f \in FF \wedge \forall z \in Z$) y aquellos a los puertos de destino ($X_{fd}; \forall f \in FF \wedge \forall d \in DD$).

Después del análisis de los métodos previos, en este estudio se calcularán los coeficientes de emisión relacionados con el azufre (SO₂) considerando la información de Tier I sobre el contenido en azufre del fuel junto con el consumo de fuel facilitado en Tier II, por categoría de vehículo y su carga neta máxima. Además, para el cálculo de los coeficientes de emisión para NO_x, PM_{2.5} y CO₂ fueron calculados de acuerdo al procedimiento recogido en Tier I que considera los valores para los distintos tipos de camiones y tecnología medioambiental hasta Euro III.

$$RE = CET \times (1 / P_p) \quad \forall p \in PP \quad (26)$$

$$CET = \sum_{u=1}^u CET_u \quad (27)$$

$$CET_u = \sum_{f=1}^f (CF_{2uf2} \times FC_p \times EGU_{uf} \times 10^{-6} \times X_f \times \frac{1}{2} \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_{jz}^c \times X_d \times DR_{zd}^a)) \quad \forall p \in PP \wedge \forall u \in U \quad (28)$$

$$RE_1 = CETT_1 \times (1 / P_p) \quad \forall p \in PP \quad (29)$$

$$CETT_1 = \sum_{u=1}^u CETT_{1u} \quad (30)$$

$$CETT_{1u} = \frac{1}{2} \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times DR_{zm}^b \times FC_p \times 10^{-6} \times \sum_{f=1}^f (CF_{2ufv} \times X_{fz} \times EGU_{uf})) \quad \forall p \in PP \wedge \forall u \in U \quad (31)$$

$$RE_2 = CETT_2 \times (1 / P_p) \quad \forall p \in PP \quad (32)$$

$$CETT_2 = \sum_{u=1}^u CETT_{2u} \quad (33)$$

$$CETT_{2u} = \sum_{d=1}^d (X_d \times DR_{kd}^b \times FC_p \times 10^{-6} \times \sum_{f=1}^f (CF_{2ufv} \times X_{fd} \times EGU_{uf})) \quad \forall p \in PP \wedge \forall u \in U \quad (34)$$

Con la intención de simplificar el cálculo, los costes unitarios empleados en los camiones serán equivalentes a aquellos considerados en las operaciones de maniobra en puerto para el tramo marítimo ($s=2$; CF_{2ufv} ver ecuaciones 31 y 34), además las zonas de tránsito serán asumidas como zonas urbanas ($v=2$; CF_{2uf2}) para el transporte unimodal (ver ecuación 28). Por otro lado, los tramos por carretera del transporte multimodal serán considerados zonas metropolitanas (ver ecuación 35) cuando la distancia total de los acarrees capilares es menor que el radio metropolitano (RM) y la población media de los diferentes orígenes ($PVO_z; \forall z \in Z$) y destinos ($PVD_d; \forall d \in DD$) supera 0.5 millones de habitantes y/o la población del hinterland ($PV_m; \forall m \in M; PV_k; \forall k \in K$) sea mayor que 0.5 millones de habitantes. En caso contrario la zona será considerada urbana ($v=2$).

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

$$\text{CF}_{2\text{ufv}} = \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{1}{2} \right) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times \text{DR}_{zm}^b) \leq RM \\ \sum_{d=1}^d (X_d \times \text{DR}_{kd}^b) \leq RM \\ \text{CF}_{2\text{uf2}} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{1}{2} \right) \times \sum_{j=1}^j \sum_{z=1}^z (X_{jz}^c \times \text{PVO}_z) \geq 0.5 \quad \text{CF}_{2\text{uf1}} \\ \text{PV}_m \geq 0.5 \quad \text{CF}_{2\text{uf1}} \\ \sum_{d=1}^d (X_d \times \text{PVD}_d) \geq 0.5 \quad \text{CF}_{2\text{uf1}} \\ \text{PV}_k \geq 0.5 \quad \text{CF}_{2\text{uf1}} \end{array} \right. \quad (35)$$

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 4

Testeo del modelo obtenido a través de su aplicación a un caso real: el establecimiento de MoS en Chile

En este capítulo se presentará la aplicación del modelo introducido en la sección anterior a un caso real, con el objetivo de validar su utilidad. El caso de estudio seleccionado ha sido el establecimiento de MoS en Chile. Debido a las características geográficas singulares que presenta este país y al desafío al que actualmente se enfrenta por la apertura del Nuevo Canal de Panamá, su estudio se presenta especialmente interesante.

Con la apertura del Canal de Panamá, Chile espera una modificación significativa en el patrón de sus servicios de transporte marítimo: la llegada de buques más grandes, pero con un menor número de escalas en el país. Dado el mayor tamaño de los buques esperados, Chile está analizando centralizar su inversión en un único puerto "hub" en la Quinta Región (la región central del país), de forma que canalice el comercio marítimo exterior dejando al tráfico "feeder" el abastecimiento del resto del país (tráfico doméstico e interconexión entre regiones).

Como consecuencia de esta estrategia de transporte, Chile articulará mediante "hub and spoke traffic" redes intermodales realmente singulares, ya que, debido a la geografía del país, el acortamiento de la distancia en las rutas intermodales respecto a las unimodales es muy pequeño, y por tanto el desafío para el éxito intermodal es relevante.

En este contexto, el concepto europeo de Autopista del Mar-MoS, entendido como el grupo de servicios intermodales y puertos donde el SSS es capaz de ofrecer servicios de transporte "puerta a puerta" (European White Paper on Transport, 2011), se muestra como una prometedora solución para Chile. Consecuentemente, la aplicación del modelo presentado en esta tesis no sólo resultará de utilidad para determinar la combinación de rutas y flotas óptimas para Chile, sino que será una herramienta de apoyo a la decisión para determinar qué puerto está en mejor situación en la Región V para convertirse en puerto de gran escala. Es decir, qué puerto "hub" articulará rutas intermodales con mayores probabilidades de éxito.

Esta aplicación permitirá comprobar que el modelo propuesto ofrece resultados no sólo útiles para autoridades chilenas, sino también para cargadores, transitarios, autoridades portuarias, "policy makers" y por supuesto, compañías navieras.

1 VIABILIDAD OPERATIVA

Está ampliamente asumido que la utilidad de las autopistas del mar responde al interés general cuando el servicio ofertado suministra una frecuencia y carga movida mínima anual. Se tomará como referencia el servicio de transporte mínimo recogido en el acuerdo intergubernamental entre España y Francia para financiar y apoyar el establecimiento de autopistas del mar entre ambos países en su costa atlántica ('Declaration of intentions about Sea Motorways'; CIG, in July 2006; BOE Nº92, 2006):

- Que la cantidad mínima de unidades de carga movida en 5 años sea 350.000 (70.000 unidades al año) donde los dos primeros años se pide una frecuencia de 4 salidas a la semana por sentido (182 unidades por sentido y día).
- Que se muevan 100.000 unidades al año (desde el año 5 al año 10) con una frecuencia en cada dirección y sentido de 7 salidas a la semana (148 unidades por sentido y día).
- Que la cantidad mínima total movida en los 10 años sean 850.000 unidades (lo que supondría una cantidad mínima a cargar de 85.000 unidades al año) con una frecuencia de 4 salidas por semana en cada dirección (221 unidades por sentido y día).
- Las unidades de carga han de ser unidades transportadas por tierra, se pueden asumir equivalentes a semirremolques de camión.

Según lo anterior los viajes anuales que debe ofertar el servicio SSS serán como mínimo entre 4 y 7 salidas a la semana, entre 384 y 672 viajes al año que debe realizar la flota con un movimiento mínimo anual de 85000 unidades de carga (semirremolques de camión), 1.530.000 toneladas, asumiendo 18 toneladas por semirremolque de camión (Directiva Europea 96/53/CE para vehículos) y 12,5 toneladas por TEU (122.400 TEUs o 74.634 FEUs movidos al año). Se ha asumido, por tanto, como hipótesis inicial, tasa de ocupación media de los contenedores del 52% respecto a su capacidad neta de carga máxima (23,6 toneladas) planteando, así, una perspectiva conservadora sobre la evaluación de las toneladas mínimas exigidas.

Como primera estimación se comprobará si las necesidades de carga en Chile son tales que alcanzan este mínimo. Para ello habrá que establecer una primera aproximación a las redes de transporte a estudiar. Dada la geografía de Chile y la alta probabilidad de que el puerto *hub* se establezca en San Antonio o en Valparaíso (en el centro del país), resulta necesario considerar el establecimiento de dos posibles autopistas del mar: una que comunique el puerto *hub* con el norte (MoS norte) y otra con el sur (MoS sur).

El objetivo de seleccionar una autopista del mar en el norte y otra en el sur, responde al interés de centrar los esfuerzos de inversión en un único puerto central en Chile y establecer autopistas del mar con los puertos más convenientes en el norte y sur que garanticen rutas intermodales competitivas operando con flotas optimizadas. Como consecuencia de este análisis, para la selección de rutas óptimas para el establecimiento de autopistas del mar, se ha asumido que toda la fuerza exportadora/importadora de la zona (norte o sur) y la totalidad de su capacidad productiva para cabotaje será transportada a través de cada uno de los puertos evaluados.

Dos puertos serán aceptados como candidatos a *hub*: Valparaíso y San Antonio. Mientras que los puertos seleccionados como candidatos a puertos “spoke” para establecer autopistas del mar con el puerto *hub* han sido:

- Norte: Arica, Iquique, Angamos y Antofagasta
- Sur: San Vicente y Coronel

Los criterios de selección se han basado, además de en la situación geográfica de los mismos, en el volumen de mercancía contenerizable actualmente movida y como siguiente criterio la conectividad del puerto (Savonge y Lugo, 2014). Se ha hecho una excepción con Lirquen y Mejillones.

Este puerto no será considerado dada su proximidad geográfica con San Vicente (20 km) y su distancia a los principales núcleos urbanos de la región (equivalente a la de San Vicente). Consecuentemente, los resultados obtenidos de las redes articuladas a través de San Vicente serán muy similares a los obtenidos a través de Lirquen. Por tanto, sólo se estudiará como muestra el puerto de San Vicente, si bien se tendrá en cuenta la mercancía movida por Lirquen para determinar la capacidad de carga de la flota que abastecerá el sur del país. Lo mismo ocurrirá con el puerto de Mejillones, excesivamente próximo a Angamos, aunque con movimiento más relevante en mercancía de cabotaje que Angamos.

Tabla 1. Necesidades de transporte actual para líneas MoS in Chile

	Cabotaje (t)	Importación (t)	Exportación (t)	Total (t)
Arica	3,030	145,879	123,320	272,229
Iquique	8,005	71,308	408,945	488,258
Mejillones	243,928	0	222	244,150
Angamos	0	570,598	1,576,985	2,147,583
Antofagasta	576	254,348	1,224,927	1,479,851
Total Puertos Norte	255,539	1,042,133	3,334,399	4,632,071
Lirquen	3,015	61,068	3,143,269	3,207,352
San Vicente	189,854	562,984	3,517,887	4,270,725
Coronel	3,030	301,317	2,110,181	2,414,528
Total Puertos Sur	195,899	925,369	8,771,337	9,892,605

Tabla 2. Estimación de necesidades de servicio de transporte anual para líneas MoS en cada sentido.

	Norte-Sur&Centro(Exportaciones+cabotaje) (t)	Sur&Centro-Norte (Importaciones+cabotaje) (t)
Arica	124,835	147,394
Iquique	412,948	75,311
Mejillones	122,186	121,964
Angamos	1,576,985	570,598
Antofagasta	1,225,215	254,636
Total Norte	3,462,168	1,169,903
	Norte&Centro-Sur (Importaciones+cabotaje) (t)	Sur-Norte&Centro (Exportaciones+cabotaje) (t)
Lirquen	62,576	3,144,777
San Vicente	657,911	3,612,814
Coronel	302,832	2,111,696
Total Sur	1,023,319	8,869,287

En la Tabla 1 y Tabla 2 se puede encontrar un resumen de los datos facilitados por Directemar en el 2012 (tonelaje por importación y exportación por puerto y tipo de bien y el cabotaje por tipo de bienes según puerto también para el 2012). Se ha asumido que la mercancía

general y la refrigerada es susceptible de contenerización, considerando el elevado índice de contenerización encontrado.

La Tabla 2 muestra la mercancía de cada puerto evaluado que alimentaría la autopista del mar. En los puertos del norte se embarcaría hacia el puerto *hub* tanto la mercancía que se exporta (comercio exterior) como aquella de cabotaje con destino final el centro y sur del país, mientras que se desembarcaría, proveniente del puerto *hub*, la mercancía que se importa del exterior y la de cabotaje proveniente del sur y centro del País.

Tanto en el norte como en el sur, teniendo en cuenta ambos sentidos, se supera ampliamente las 1.530.000 toneladas anuales mínimas recomendadas para el establecimiento de una autopista del mar, tanto en la Etapa I como en la Etapa II. De hecho, en caso de que la totalidad de la mercancía tenida en cuenta en el análisis fuese contenerizable, y asumiendo un peso medio por TEU de 12,5t y por FEU de 20,5t la zona norte movería anualmente 370.566 TEUs (225.955 FEUs), mientras que la zona sur, movería 791,408.4 TEUs (482,566.098 FEUs).

Es de destacar el desequilibrio manifiesto en las posibles líneas, pero estas deben ser abastecidas por la capacidad de la flota considerando el sentido más exigente de la ruta, esto es, la exportación más cabotaje tanto en los puertos del sur (sentido sur-norte: 709,542 TEUs o 432,648 FEUs) como en los del norte (sentido norte-sur; 276,973 TEUs o 168,886 FEUs).

2 CONFIGURACIÓN DE LAS RUTAS

Para establecer las cadenas intermodales se han asumido modelos ‘many to many’ (ver Figura 4) lo que implican varios posibles orígenes (en el norte o en el sur) y varios posibles orígenes y/o destinos en tierra en el centro del país. Las distancias entre estos extremos de ruta y los puertos se conocen como extremos capilares de la red. Por tanto, tendremos extremos capilares centrales y extremos capilares norte, para la MoS norte, y extremos capilares sur, para la MoS sur, que se corresponden con los mayores centros de población. Esta hipótesis se ha tomado considerando que los centros más poblados tradicionalmente agrupan también los principales centros generadores y receptores de mercancía contenerizable (García-Alonso and Sánchez-Soriano, 2010). Se han considerado, por tanto, estos extremos de ruta constantes para todas las posibles autopistas del mar que articulen el tramo troncal de la cadena intermodal.

Se articularán, por tanto, todas las posibles autopistas del mar que unan cada posible puerto *hub* con cada puerto candidato a “spoke” para la zona norte y para la zona sur, asumiendo que en cada zona todas las rutas candidatas deberán tener capacidad para responder a las necesidades totales de tráfico de la zona.

Para establecer las rutas intermodales es necesario determinar los centros generadores/receptores de mercancía en tierra que serán asumidos como extremos finales de ruta. Como primera aproximación al problema se han asumido como tal las ciudades con sus zonas metropolitanas más pobladas para cada zona (Observatorio urbano del Ministerio de vivienda y urbanismo, Gobierno de Chile).

Dada la distancia de La Serena y Rancagua a los posibles puertos *hub* podrían asumirse como extremos de ruta alcanzables por el hinterland del puerto *hub*, así que esta posibilidad será analizada en una segunda etapa del estudio. Por tanto, se tomarán como extremos de ruta:

- Zona Norte: Iquique, Antofagasta
- Zona Centro: Santiago, Valparaíso y San Antonio en caso de que este sea el puerto *hub*; La Serena y Rancagua
- Zona Sur: Concepción y Temuco

Por tanto, las rutas a analizar son las mostradas en la imagen siguiente:

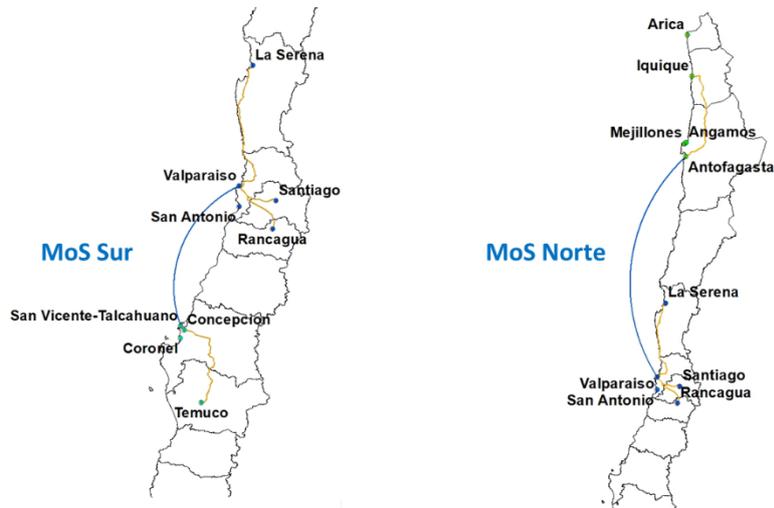


Figura 5. Autopistas del mar a evaluar, MoS Norte y Sur.

Es decir, Rutas marítimas:

- Valparaíso/destinos en el NORTE:
 - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-Valparaíso-Puertos del norte-Ciudades del norte (Iquique y Antofagasta):
 - Valparaíso-Arica
 - Valparaíso-Iquique
 - Valparaíso-Angamos
 - Valparaíso-Antofagasta
 - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)- Ciudades del norte (Iquique y Antofagasta).
- Valparaíso/destinos en el SUR:
 - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-Valparaíso-Puertos del sur-Ciudades del sur (Concepción y Tamuco):

- Valparaíso-San Vicente-Talcahuano
- Valparaíso-Coronel
- Unimodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-Valparaíso- Ciudades del sur (Concepción y Tamuco).
- San Antonio/destinos en el NORTE:
 - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*)-San Antonio-Puertos del norte-Ciudades del norte (Iquique y Antofagasta):
 - San Antonio-Arica
 - San Antonio –Iquique
 - San Antonio –Angamos
 - San Antonio –Antofagasta
 - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*)-San Antonio- Ciudades del norte (Iquique y Antofagasta).
- San Antonio/destinos en el SUR:
 - Intermodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)-San Antonio -Puertos del sur-Ciudades del sur (Concepción y Tamuco):
 - San Antonio -San Vicente-Talcahuano
 - San Antonio –Coronel
 - Unimodalidad: Extremos de ruta centrales (Santiago, Valparaíso, puerto *hub*, La Serena y Rancagua)- San Antonio - Ciudades del sur (Concepción y Tamuco).

3 ANÁLISIS DEL PROBLEMA

La aplicación del modelo a este caso particular se abordará en tres pasos consecutivos:

1. *Análisis de escenarios preliminares*: La competitividad de las cadenas intermodales articuladas a través de todas las posibles MoS (norte y sur) serán evaluadas bajo condiciones portuarias estándar. Con este análisis se pretende identificar las rutas con mayores posibilidades de éxito usando criterios puramente geográficos.

2. *Análisis de escenarios actuales:* Una nueva evaluación de la competitividad intermodal operada por flotas optimizadas bajo condiciones particulares, esto es, los valores reales para cada puerto evaluado.
3. *Análisis de sensibilidad:* Mediante la modificación del valor de variables iniciales clase, se construirán nuevos escenarios en los que se simulará el rendimiento de las flotas y rutas optimizadas. En esta última etapa se conocerá también la robustez de las decisiones tomadas y de los resultados esperados.

4 ADAPTACIÓN DEL MODELO

De acuerdo con la realidad expuesta en las secciones anteriores al modelo se le han aplicado las restricciones mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Restricciones del modelo.

RR1			$T < 10$
RR2			$FB > FB_{\text{mínimo}}$
RR3			$G_{p(\text{definitivo})} \geq G_{p(\text{diseño})}$
RR4			$B \geq 13.56$
RR5	$D \geq$		7.15 si $PB \leq 33.794$
			$5 \times 10^{-4} \times PB - 5.52$ si $33,794 < PB \leq 53,600$
RR6			$4.94 < L/B < 7.50$
RR7			$1.55 < B/D < 2.31$
RR8			$7.85 < L/D < 14.17$
RR9			$2.35 < B/T < 3.20$
RR10			$672 \geq Ntrips \geq 384$
RR11			$VB < (3,7 \times \nabla^{0,1667} / 0,514)$
RR12 (etapa II)	$G_p \times Ntrips \geq$	MOs (Norte)	370,566; si $G_p = G_1$
			225,955; si $G_p = G_2$
		MOs (Sur)	791,408; si $G_p = G_1$
			482,566; si $G_p = G_2$
RR13 (etapa II)	$(G_p/2) \times Ntrips \leq$	MOs (Norte)	276,973; si $G_p = G_1$
			168,886; si $G_p = G_2$
		MOs (Sur)	709,542; si $G_p = G_1$
			432,648; si $G_p = G_2$
RR15			$TVB \leq NB \times 12$

Las restricciones de RR1 a RR9 son aplicadas a las variables para asegurar la viabilidad técnica de los buques. Las restricciones RR10, la RR12 la RR13 y la RR15 son necesarias para que la flota alcance la capacidad de carga necesaria que asegure el transporte de la mercancía que actualmente es susceptible de ser contenerizable (ver Tabla 1 y Tabla 2).

La restricción RR11 asegura que los buques no alcancen la condición de Buque de alta velocidad (High speed Craft; High-Speed Craft Code MSC 36(63) and SOLAS, chapter X), esta

condición no es deseable por numerosas razones relativas a operatividad y eficiencia de los buques en este tipo de operaciones (Castells i Sanabra, 2009; UK Marine Motorways study, 2002-2003; SPIN-HSV project, 2003-2005).

4.1 EL MARCO DE OPTIMIZACIÓN

Una vez el modelo matemático ha sido desarrollado, es necesaria la identificación, a través del análisis del problema, del algoritmo de optimización más adecuado para resolverlo. Así, considerando la naturaleza del modelo, se puede concluir que es un problema multiobjetivo, no lineal y con restricciones no lineales. Los algoritmos evolutivos, (EA) son algoritmos metaheurísticos que han demostrado buenos resultados en términos de eficiencia y efectividad en este tipo de problemas. Debido a las características del problema, el algoritmo seleccionado ha sido el NSGA-II (Deb et al., 2002).

4.2 PROBABILIDADES DE DISTRIBUCIÓN DE MERCANCÍA EN LOS NODOS

A falta de datos más precisos se ha considerado que el reparto de la mercancía que llega a cada puerto entre sus extremos de ruta en el norte y en el sur también responderán a criterios poblacionales., Se asumirá, que sólo los extremos de ruta considerados (ver Figura 5) serán los generadores/receptores de la mercancía contenerizable a transportar en la región, tanto de exportación como de cabotaje hacia el sur y centro del País. Así para los tramos capilares:

- MoS NORTE:
 - Iquique: 214,586 habitantes ($X_d=X_1=43\%$)
 - Antofagasta: 285,255 habitantes ($X_d=X_2=57\%$)

- MoS SUR:
 - Concepción: 848,023 habitantes ($X_d=X_3=75,95\%$)
 - Temuco: 268,437 habitantes ($X_d=X_4=24,04\%$)

Si bien la definición de las probabilidades de reparto entre los nodos norte y sur resulta sencilla, ya que efectivamente estos se corresponden con los extremos finales o iniciales de ruta, la definición de tal probabilidad para los nodos centrales resulta más complicada.

Dada la motivación del establecimiento de estas autopistas del mar, estas rutas serán capaces de canalizar la mercancía interna con destino los nodos centrales del país o bien a los nodos norte/sur del país. Si efectivamente el destino final son los nodos centrales del país la cadena intermodal contará con ambas redes capilares, las del norte/sur y las del centro. Sin embargo, si la carga es originada en los nodos del norte, por ejemplo, y tiene como destino final los nodos del sur, la ruta intermodal articulada por el MoS norte tendrá como extremo de ruta final el propio puerto *hub*. Ya que de aquí a través de la MoS sur llegará hasta su destino final. Lo mismo ocurrirá con la mercancía que teniendo su origen en los nodos norteños sea para exportación. Su destino final en la cadena intermodal articulada a través del MoS norte finalizará en el puerto *hub* donde se transbordará a un buque, previsiblemente de mayor tamaño, que transporte la unidad de carga a su destino final. Obviamente esto ocurrirá en ambas MoS y ambos sentidos. Por tanto, esta realidad tiene que ser reflejada en el modelo mediante el reparto de probabilidades entre los extremos de

ruta centrales, de manera que, uno de ellos, por los motivos expuestos ha de ser el propio puerto *hub*.

Por tanto, ya que se ha decidido estimar el reparto en base a criterios poblacionales, será necesario estimar una población ficticia para el puerto *hub* en cada sentido del transporte, para así calcular su probabilidad de ser origen/destino con respecto a los otros nodos centrales.

- **MOS Norte:**
 - Sentido Norte-Sur:

La población ficticia para el puerto *hub* que recibe del norte: (PPC1) =población por cabotaje norte-sur (PCNS1) + población por exportación desde el norte (PEDN1):

- PCNS1 (población por cabotaje norte-sur): Asumiremos esta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta sureños (considerados para el MoS sur): 1,116,460 habitantes
- PEDN1: Considerando los datos facilitados por directemar (tonelaje por exportación por puerto y tipo de bien para el 2012), los puertos del norte (ver Tabla 1 y Tabla 2) exportan 3,334,399 t anuales de mercancía contenerizable.

- Sentido Centro-Norte:

La población puerto *hub* que envía al norte mercancía será: (PPC2) =población por cabotaje sur-norte (PCNS2) + población por importación hacia el norte (PEDN2):

- PCNS2 (población por cabotaje sur-norte): Asumiremos esta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta norteños: 499,841 habitantes
- PEDN2: población por importación hacia el norte. De acuerdo con Directemar (tonelaje por importación por puerto y tipo de bien para el 2012, (ver Tabla 1 y Tabla 2) importan 1,042,133 t anuales de mercancía contenerizable.

Dados los desequilibrios encontrados en carga movida según los sentidos de las rutas (norte-sur y sur-norte), el modelo se ha preparado para que las probabilidades de distribución entre nodos centrales recojan esta realidad (X^c_{jz} , siendo c la MOs norte o sur, j el sentido del transporte norte-sur o sur-norte y z cada nodo central).

Así la población equivalente en el puerto de carga *hub* será:

- Dirección Norte-Sur (PCNS1+PEDN1): 1.116.460 habitantes habitantes+211,514,019 habitantes=**212,630,479 habitantes**
- Dirección Sur-Norte (PCNS2+PEDN2): 499.841 habitantes habitantes+4,076,879 habitantes= **4,576,720 habitantes**

Por tanto, las probabilidades de reparto de la carga en los nodos centrales serán:

- **MoS Norte:**
 - Norte-Sur ($j=1$)
 - Santiago: 5,631,839 habitantes: $X^1_{11}=2.56\%$
 - Valparaíso: 824,006 habitantes: $X^1_{12}=0.37\%$
 - Puerto *hub*: 212,630,479 habitantes: $X^1_{13}=96.82\%$

- La Serena: 296,253 habitantes: $X^1_{14}=0.13 \%$
- Rancagua: 236,363 habitantes: $X^1_{15}=0.11 \%$

- Sur-Norte ($j=2$)
 - Santiago: 5,631,839 habitantes: $X^1_{21}=48.69\%$
 - Valparaíso: 824,006 habitantes: $X^1_{22}=7.12\%$
 - Puerto *hub*: 4,576,720 habitantes: $X^1_{23}=39.57\%$
 - La Serena: 296,253 habitantes: $X^1_{24}=2.56\%$
 - Rancagua: 236,363 habitantes: $X^1_{25}=2.04\%$

Donde el puerto *hub* será Valparaíso o San Antonio.

- **MOS sur:**

- Sentido Centro-Sur:

Población ficticia para puerto *hub* que envía al sur (PPC1) = población por cabotaje norte-sur (PCNS1) + población por importación desde el norte (PEDN1):

- PCNS1 (población por cabotaje norte-sur): Asumiremos esta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta sureños (considerados para el MoS sur): 1,116,460 habitantes
- PEDN1: población por importación que llega desde el norte. Considerando los datos facilitados por directemar (tonelaje por importación por puerto y tipo de bien para el 2012), así los puertos del sur (ver Tabla 1 y Tabla 2) importan 925,369t anuales de mercancía contenerizable.

- Sentido Sur-Norte:

Población puerto central que envía al norte (PPC2) = población por cabotaje sur-norte (PCNS2) + población por exportación hacia el norte (PEDN2):

- PCNS2 (población por cabotaje sur-norte): Asumiremos esta como la correspondiente a la población de los extremos de ruta norteños: 499,841 habitantes
- PEDN2: población por exportación hacia el norte. De acuerdo con directemar (tonelaje por exportación por puerto y tipo de bien para el 2012, ver Tabla 1 y Tabla 2) exportan 8,771,337t anuales de mercancía contenerizable.

Así la población equivalente en el puerto de carga será:

- Dirección Norte-Sur (PCNS1+PEDN1): 1.116.460 habitantes +10.547.654 habitantes=**11,664,114 habitantes**
- Dirección Sur-Norte (PCNS2+PEDN2): 499,841 habitantes habitantes+670.574.330 habitantes=**671,074,171 habitantes**

Por tanto, las probabilidades de reparto de la carga en los nodos centrales serán:

- Norte-Sur ($j=1$)
 - Santiago: 5,631,839 habitantes: $X^2_{11}=30.19\%$
 - Valparaíso: 824,006 habitantes: $X^2_{12}=4.42\%$
 - Puerto *hub*: 11,664,114 habitantes: $X^2_{13}=62.53\%$
 - La Serena: 296,253 habitantes: $X^2_{14}=1.59\%$

- Rancagua: 236,363 habitantes: $X^2_{15}=1.27\%$
- Sur-Norte (j=2)
 - Santiago: 5,631,839 habitantes: $X^2_{21}=0.83\%$
 - Valparaíso: 824,006 habitantes: $X^2_{22}=0.12\%$
 - Puerto *hub*: 671,074,171 habitantes: $X^2_{23}=98.96\%$
 - La Serena: 296,253 habitantes: $X^2_{24}=0.04\%$
 - Rancagua: 236,363 habitantes: $X^2_{25}=0.03\%$

4.3 COSTES UNITARIOS DEL TRANSPORTE POR CARRETERA Y COSTE DEL MDO

La definición del coste unitario de transporte por carretera CK_p (€/km), es un dato inicial que está en función del tipo de unidad de carga (TEU-12,5t y FEU-20,5t). Para ambas unidades de carga se asume un solo tipo de camión capaz de transportarlas, tanto en transporte unimodal como multimodal y este es un tráiler de carga general, con 40 t de máxima carga (26,5 t de máxima carga neta) por tanto suficiente para el transporte de un TEU o un FEU. Se trata de un vehículo de 420 CV articulado con 6 ejes (Heavy duty vehicle HDV>12 t, Directive 2007/46/CE of the European Parliament).

De acuerdo con el informe de la Subsecretaría de Transporte Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile ("Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana") en el 2011 a un camión con semirremolque le costaba el transporte de una tonelada: 18.8 \$/t-Km, esto supone: $CK_1:0.31€/Km$ y $CK_2:0.50€/km$. Según el banco mundial (<http://datos.bancomundial.org/indicador/EP.PMP.DESL.CD>) los precios del diésel para el usuario en Chile, bajaron un 12% en los últimos 4 años, por tanto esa bajada podría reflejarse en la actualización a valores del 2015 del coste del transporte de mercancía por carretera, así: $CK_1:0.27€/Km$ y $CK_2:0.44€/km$.

Los costes del Marine Diesel Oil para la operación del buque se han tomado los relativos a Diciembre del 2015, datos del puerto de Singapur (<http://www.bunkerworld.com/prices/>) Datos de Singapur $363 \$/t = 330.22€/t = 0.28€/l$

Para costes de escala (ver Anexo 2) se han empleado unos costes genéricos para la totalidad de los puertos evaluados, de manera que todos en el planteamiento actual compiten en igual de condiciones en términos de costes de escala (Análisis de escenarios preliminares). Una vez filtrados los puertos evaluados los datos se actualizarán con la información relativa a cada puerto (Análisis de escenarios actuales).

En movimiento de contenedores, son convencionales las grúas Portainer, Feeder, Panamax y Post Panamax, con capacidad de 10 filas (32Tn), 13 filas (36 Tn) y 17 filas (40 Tn) de contenedores respectivamente, que operan sobre vía de rodadura. Asumiendo una perspectiva conservadora, se tomará como referencia las grúas Portainer, cuya capacidad teórica es de 35 ciclos/h (información facilitada por las "Especificaciones técnicas de Paceco S.A."). Sin embargo, este rendimiento cae con contenedores llenos hasta 24 ciclos/h, por lo que se ha tomado, como primera consideración, una velocidad de carga descarga de 27 ciclos/h (confirmada por la consignataria "Pérez Torres S.A." y la terminal de contenedores "OPCSA").

Para la operación de las grúas Portainer se asumirán como necesarios 37 metros de eslora de buque para el posicionamiento de una grúa. Por tanto, el número de grúas que operarán en cada buque dependerán de la eslora del mismo. Se han asumido por tanto condiciones ideales para todos los puertos (disponibilidad de grúas suficientes) y una rotación media por grúa de 27 ciclos/h.

El resto de costes relativos a la construcción del buque, y su operación y mantenimiento han sido tomados de la publicación de Martínez-López et al. (2015c).

4.4 COSTES UNITARIOS PARA LAS EMISIONES CONTAMINANTES EN CHILE.

Los costes unitarios de los contaminantes: CF_{sufv} ; $\forall s \in S \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in F \wedge \forall v \in V$ -€ per kg of pollutant, han sido publicados por países en HEATCO (Bickel et al., 2006) para $PM_{2.5}/PM_{10}$ y CAFE (Holland et al., 2005) para el resto de emisiones con costes actualizados a valores del año 2010. Los valores de costes recogen aquellos costes relativos al transporte por carretera, ferrocarril transporte aéreo, navegación 'inland' y marítima. El modelo de cálculo tiene en cuenta las diferentes densidades poblacionales para cada tipo de país, las condiciones meteorológicas y los patrones de tráfico (distribución de las emisiones de exhaustación). Todo ellos directamente relacionado con el desarrollo económico del país. A falta de datos específicos sobre Chile y como primera aproximación a esta realidad, se emplearán los datos correspondientes al país publicado con un desarrollo económico más próximo a Chile. El país seleccionado ha sido Portugal.

La similitud en la actividad económica a efectos globales resulta similar en PIB y actividad económica exterior (ver Tabla 4). Si bien la diferencia de extensión entre ambos países es significativa respecto a sus poblaciones, lo que podría hacer pensar que la densidad poblacional también lo es y por tanto sus patrones de tráfico, la situación geográfica de ambos resulta similar con un índice de longitud de costa/superficie cercana a la unidad con clara influencia en el reparto modal del transporte. A tal efecto se han consultados las emisiones de CO_2 por habitante de ambos países (OCDE <http://www.oecd.org/centrodemexico/estadisticas/>) y en el 2011 las emisiones de Chile per cápita alcanzaban 4,4 t por habitante, mientras que en el caso de Portugal el índice era de 4,6t/habitante). Parece, por tanto, que el error asumido en aplicar los costes unitarios de Portugal a Chile no debería ser importante.

Tabla 4. Comparación Chile-Portugal en el 2014. (elaboración propia).

2014	Chile	Portugal
PIB (Mill euros)	194,123	173,446
Población (habitantes)	17,772,871	10,394,000
Exportaciones (Mill euros)	57,695	48,172.00
Importaciones (Mill euros)	54,457.70	58,854.00
Extensión (km ²)	756,096	92,210
Longitud de costa (km)	6435	943
Longitud de costa/superficie	0.85%	1.02%

Para la actualización de los costes al 2015, se utilizará el IPC (Instituto Nacional de estadística luso), que fue el índice utilizado por Jiang et al. (2012) para actualizar estos valores desde los datos publicados en el 2005 (referentes al año 2000) al 2010. Se han asumido los costes de

Portugal para Chile y los costes asociados a la navegación en sus aguas ribereñas. Así, finalmente los valores de los costes unitarios asumidos para Chile han sido los mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Factores de coste unitarios para contaminantes en el 2015. (€/Kg contaminante).

	NOx	SO ₂	PM _{2,5}		
			Metropolitana	Urbana	Exterior a zonas pobladas
Chile	1.807	4.863	352.952	116.153	52.365
Pacífico	2.055	2.826			7.193

En cuanto a la actualización de los costes de CO₂, simplemente se tomarán por interpolación para el 2015 los datos publicados por Maibatch et al. (2008) que tal y como afirma Jiang et al, (2012), debido al efecto global del daño, sus valores serán independientes de dónde se produzcan (0,0325€/kg CO₂ en 2015).

5 SIMULACIONES Y RESULTADOS

Para todas las etapas, la optimización llevada a cabo ha tenido en cuenta las tres funciones objetivo: F1 (maximización de la diferencia en términos de costes del transporte unimodal frente al multimodal); F2 (maximización de la diferencia en términos de tiempo del transporte unimodal frente al multimodal); F3 (maximización de la diferencia en términos de costes externos del transporte unimodal frente al multimodal). Las optimizaciones han sido llevadas a cabo con NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II), un algoritmo evolutivo multiobjetivo. Los parámetros optimizados han sido aquellos identificados como independientes en el modelo matemático:

- Velocidad del buque (VB) medida en nudos.
- Tipo de unidad de carga (PP), TEUs para genes positivos y FEUs para valores negativos.
- Capacidad de carga de diseño ($G_p; \forall p \in PP$) medida en unidades.
- Edad de los buques desde su construcción en años ($E_q; \forall q \in Q$).
- Sistemas de manejo de la carga ($MG_g; \forall g \in GG$) con grúas propias o de puerto.
- Instalación de Bow thruster ($MM_b; \forall b \in BB$) viable para valores negativos de los genes y positivos en caso contrario.
- Viajes anuales de la flota (N_{trips}).

Estos parámetros constituyen los cromosomas de la población de NSGA-II. Durante el proceso de evolución los genes toman valores entre -1 y 1, como es exigido cuando se usa JEAFF (Java Evolutionary Algorithm Framework) (Caamaño et al., 2010), la librería SW de algoritmos evolutivos empleado en este trabajo. Para la evaluación de las distintas soluciones, cada cromosoma es decodificado a sus posibles valores, indicados en la explicación del modelo desarrollado. Además, el algoritmo NSGA-II tiene una serie de parámetros de configuración. Los parámetros utilizados para las pruebas realizadas son los que se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de configuración para NSGA-II.

Operador	Parámetros	Valores
Tournament Selection	Pool Size	2
SBX-Crossover	Probability	5%
Polynomial Mutation	Probability	60%
	N	1

En cada experimento, se han ejecutado 50 pruebas independientes. Para comparar cada una de estas pruebas se utiliza la medida de hipervolumen (Zitzler et al., 2000). Esta medida permite comparar distintas ejecuciones de un mismo algoritmo comparando los frentes de Pareto obtenidos utilizando un único valor. De forma que, dados dos frentes de Pareto F1 y F2, F1 se considera mejor que F2 si el hipervolumen de F1 es mayor que el hipervolumen de F2.

Los algoritmos evolutivos son algoritmos iterativos que ejecutan en cada iteración lo que en computación evolutiva se conoce como generación. Esto es, en cada iteración se genera una población de posibles soluciones utilizando operadores de selección, cruce y mutación. Estas soluciones se evalúan según las funciones objetivo del problema concreto y el proceso continua hasta que se cumple el criterio de parada establecido. En este caso concreto, el criterio de parada utilizado en el algoritmo evolutivo es el número de llamadas a la función de evaluación y depende de la dimensión del problema. El número máximo de llamadas a la función de evaluación se establece en $10000 \cdot n$, siendo n la dimensión del problema, es decir, el número de variables a optimizar.

En todas las simulaciones, con independencia del escenario asumido, las soluciones de flota obtenidas que articulan rutas intermodales que maximizan la competitividad en términos de tiempo (F2; situadas en el extremo superior izquierdo del frente de Pareto) corresponden a flotas con buques rápidos y pequeños con reducida capacidad de carga que ayuda a minimizar los tiempos de carga/descarga en puerto. Esto implica altas potencias propulsivas y consecuentemente altas emisiones contaminantes. Esto, junto con el hecho de que toman poca ventaja de los efectos de economía de escala (reducida capacidad de carga) lleva a significativos costes externos, motivando la reducción de la ventaja en términos de costes (F1) para el transporte intermodal. Paralelamente las soluciones de flotas que maximizan la ventaja en términos de costes (F1) están situadas en el extremo opuesto del frente de Pareto. Estas flotas, que además resultan ser las más interesantes desde un punto de vista de contaminación medioambiental (F3) están constituidas por buques grandes y más lentos, que articulan rutas intermodales que llegan a ser inaceptables como alternativa a la unimodalidad en términos de tiempo.

5.1 ANÁLISIS DE ESCENARIOS PRELIMINARES.

En este primer análisis se pretende conocer las posibilidades que tiene cada puerto candidato a 'spoke' para articular rutas intermodales competitivas a través de MoS en relación a la unimodalidad. Tal evaluación supone considerar únicamente las características geográficas de los puertos, por tanto, se han asumido características estándar de productividad y costes de escala para todos los puertos (ver anexo 2). De igual manera, dada la cercanía entre los

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

puertos candidatos a hub (90 km entre S. Antonio y Valparaíso), se ha tomado únicamente uno: S. Antonio, en representación de ambos.

En las figuras siguientes (6 y 7) podemos observar las soluciones obtenidas para las rutas multimodales articuladas a través del posible puerto *hub* San Antonio. En los ejes se observan los valores alcanzados para F1 (€/tonelada y viaje) y F2 (horas/tonelada y viaje) además se muestra los resultados de F3 (€/tonelada y viaje) por emisiones contaminantes en escala de color (cuanto más amarillo es, más medioambientalmente competitiva es la intermodalidad). Los valores representan la diferencia, o ventaja, entre ambos sistemas de transporte. Cuando son negativos, los resultados favorecen a la unimodalidad y en caso contrario a la intermodalidad operada con las flotas optimizadas encontradas.

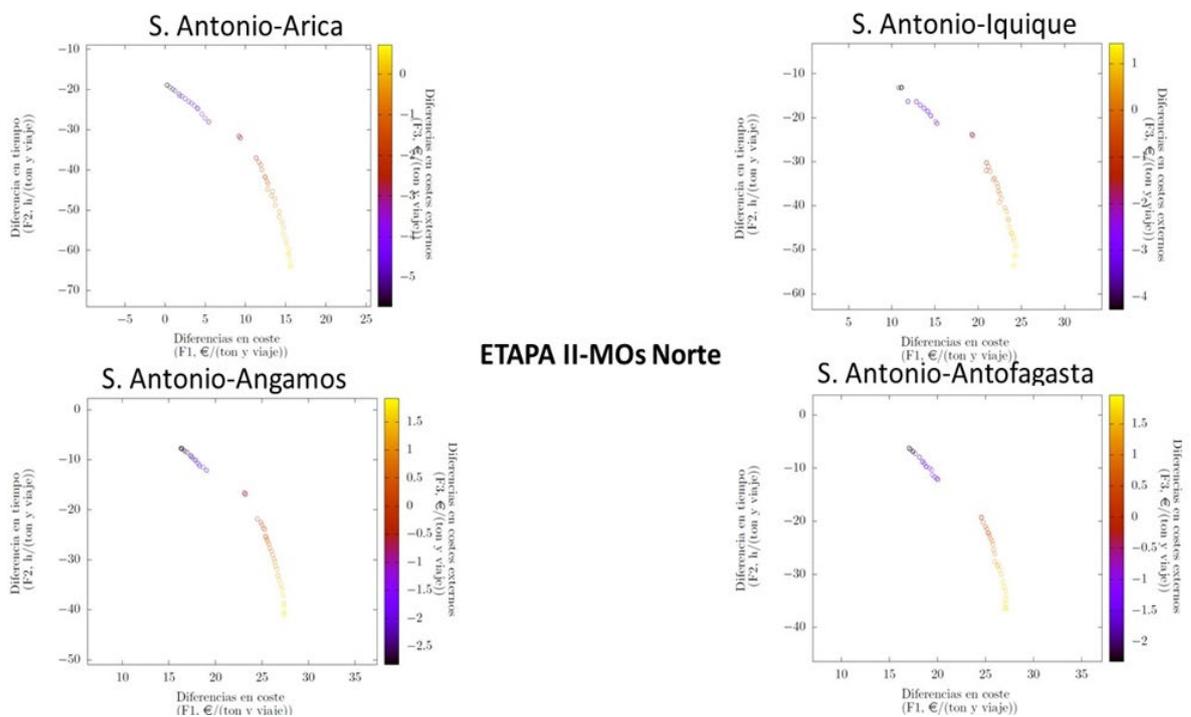


Figura 6. Resultados de rutas intermodales con MoS Norte.

ETAPA II-MOs Sur

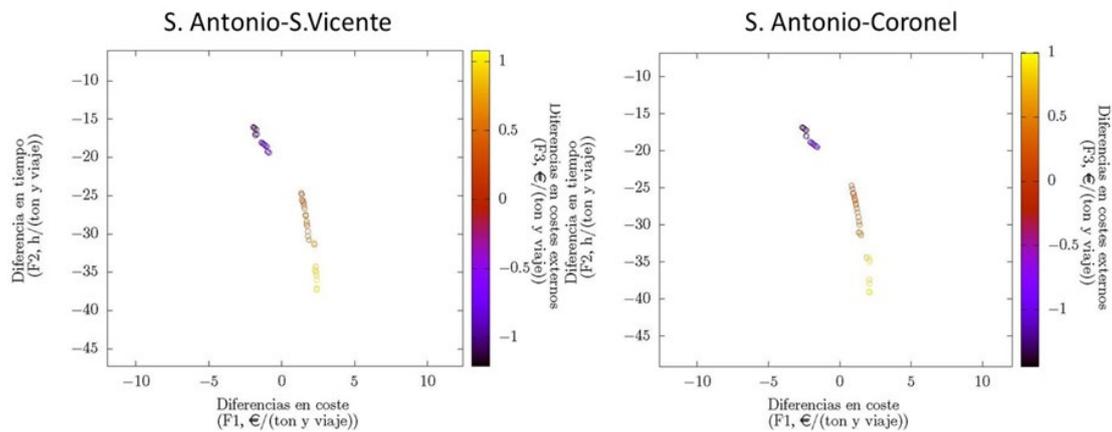


Figura 7. Resultados de rutas intermodales con MoS Sur.

Para la MoS norte, nos encontramos con valores negativos en la competitividad de las rutas intermodales en términos de tiempo. Siendo las rutas más favorables en términos de tiempo aquellas articuladas a través de San Antonio-Antofagasta, con diferencias mínimas de 6 horas por tonelada y viaje (ver Tabla 7). En términos de costes totales todas las cadenas intermodales a través de las MoS norte evaluadas resultan más interesantes que la alternativa unimodal, aunque de nuevo, San Antonio-Antofagasta articula las rutas con mayor ventaja, aunque muy próxima a San Antonio-Angamos. Respecto a la ventaja en costes medioambientales (F3), en todas las rutas se encuentran soluciones que alcanzan valores positivos, aunque muy moderados, y existen soluciones de flota con valores negativos. Efectivamente la dependencia de los costes por emisiones a las características de la cadena intermodal a la flota encontrada durante el proceso de optimización es muy alta.

Tabla 7. Rangos de resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MoS operando con flotas optimizadas.

MoS	Funciones Objetivo	Rango valores
San Antonio-Arica	F1(€/t y viaje)	[0;16]
	F2(h/t y viaje)	[-64;-19]
	F3(€/t y viaje)	[-6;0,62]
San Antonio-Iquique	F1(€/t y viaje)	[11;24]
	F2(h/t y viaje)	[-53;-17]
	F3(€/t y viaje)	[-4;2]
San Antonio-Angamos	F1(€/t y viaje)	[16;27]
	F2(h/t y viaje)	[-41;-7]
	F3(€/t y viaje)	[-3;2]
San Antonio-Antofagasta	F1(€/t y viaje)	[17;27]
	F2(h/t y viaje)	[-36;-6]
	F3(€/t y viaje)	[-2;2]
San Antonio-San Vicente	F1(€/t y viaje)	[-1.9;2.4]
	F2(h/t y viaje)	[-36;-16]
	F3(€/t y viaje)	[-1.1;0.9]
San Antonio-Coronel	F1(€/t y viaje)	[-2.6;2.1]
	F2(h/t y viaje)	[-34.9;-16.8]
	F3(€/t y viaje)	[-1.3;0.8]

Tabla 8. Características de algunas soluciones de flota obtenidas para las MoS en las redes de transporte de Etapa II con san Antonio como Hub.

Fleets	Arica	Iquique	Angamos	Antofagasta	San Vicente	Coronel
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs
Capacidad carga (G_p)	874 TEUs	852 TEUs	761 TEUs	608 TEUs	1.334 TEUs	1.330 TEUs
Velocidad buque (Kn)	17	20.56	17.26	16.90	16.11	16.58
Edad de los buques (E_q)	14 (E_3)	14(E_3)	14(E_3)	14(E_3)	14(E_3)	14(E_3)
Bow thruster	Si(MM_2)	Si (MM_2)	Si (MM_2)	Si (MM_2)	Si (MM_2)	Si (MM_2)
Sistemas de carga	Grúa Puerto (MG_2)	Port cranes (MG_2)				
Número de buques (NB)	6	5	5	4	3	3
Viajes anuales (N)	604	653	668	670	672	672
L (m)	134.38	134.96	127.56	118.49	158.2	157.8
B (m)	23.58	23.68	21.45	20.15	27.41	27.34
D (m)	11.34	11.39	10.55	9.85	13.32	13.27
GT (Ton)	10,202	9,631	8,231	6,798	16,612	16,268
Tipo de propulsor	Hélice Convencional (TP_1)					
Nº Lineas ejes	1 (NSL_1)					
Tipo motor propulsor	Diesel (TME_1)					
Número Motores	1 (NME_1)					
Resultados de Competitividad						
F1(€/($t \times$ viaje))	14.20	20.92	25.80	25.41	1.85	1.50
F2(h/($t \times$ viaje))	-50.35	-32.02	-27.58	-22.73	-30.75	-31.36
F3(€/($t \times$ viaje))	-0.17	-0.41	1.02	1.04	0.46	0.37

En la Tabla 8 se han recogido algunas soluciones de flota para la etapa II. Para Arica, San Vicente y Coronel se muestran las soluciones que maximizan la competitividad en términos de costes de las cadenas intermodales. Para Iquique, Angamos y Antofagasta las flotas mostradas son aquellas que articulan cadenas intermodales con resultados de competitividad intermedios en tiempo y costes. Para la MoS norte (Arica, Iquique y Antofagasta), las flotas obtenidas son buques entre $620 \leq TEUs \leq 1060$, $15 \leq VB \leq 25$ nudos y $117 \leq L \leq 140$ metros; Para San Vicente y Coronel las flotas obtenidas son buques entre $1180 \leq TEUs \leq 1500$, $15 \leq VB \leq 30$ nudos y $150 \leq L \leq 160$ metros; Es interesante destacar que los resultados obtenidos para las cadenas intermodales articuladas a través de las MoS norte, se

vuelven competitivos en términos de costes medioambientales ($F3 > 0$) a mayor velocidad cuanto menor es la distancia de la ruta marítima, así en San Antonio-Arica, la intermodalidad resulta medioambientalmente más conveniente que la carretera cuando las velocidades de los buques bajan de 17 kn mientras que ocurre lo mismo cuando los buques bajan de 24 kn en San Antonio-Antofagasta. Como consecuencia de la reducción de velocidad la línea debería operar con un buque más. En cuanto a las MoS sur, las cadenas intermodales dejan de ser competitivas en costes medioambientales, cuando los buques superan los 20 kn.

En este primer análisis el modelo matemático ha asumido igualdad en los costes de escala para todos los puertos y una situación operativa ideal en puerto para los buques: ruta directa en puerto para los contenedores y buques exentos de práctico y remolcador si cuentan con instalación de *bow thruster* (planteamiento clásico para la promoción de autopistas del mar). Adicionalmente, se ha asumido que el coste de las emisiones medioambientales en Chile (costes unitarios por emisiones contaminantes) y los coeficientes de emisión de los camiones son equiparables a los de Portugal, considerando el nivel de desarrollo del país en PIB y su geografía.

Se han analizado los resultados obtenidos tomando como posible *hub* San Antonio, asumiendo que los resultados para Valparaíso serán similares dada su cercanía geográfica.

En cualquier caso, parece que el puerto norteño con mejores perspectivas de ofrecer rutas multimodales competitivas a la carretera es Antofagasta, donde la ventaja de la intermodalidad en términos de costes es importante: 25.41€/t y viaje, mientras que en términos de tiempo la desventaja podría ser asumida por cierta clase de mercancía (22.73 horas aproximadamente respecto a la carretera que invierte 26.5 horas de media en el trayecto). Sería interesante por tanto, para esta autopista del mar, definir la importancia relativa de tiempo frente a coste para los cargadores y tipo de mercancía afectada. Angamos representa también una alternativa interesante para establecer la MoS norte, sin embargo, la desventaja en tiempo respecto a las cadenas articuladas a través de Antofagasta (casi 5 horas) y su mayor número de buques requeridos (5 frente a 4, ver Tabla 8) aconsejarían estudiar como primera opción Antofagasta como puerto periférico en el norte. En cuanto a las rutas del sur, si bien los resultados de las cadenas a través de San Vicente son similares a los de Coronel, existe una ligera ventaja para rutas articuladas a través de San Vicente en tiempo, costes externos e impacto medioambiental. Las rutas intermodales en el sur son absolutamente no competitivas en términos de tiempo (retrasos frente a la carretera de 31 horas de media cuando el tiempo medio por carretera es de 5.6 horas) y la ventaja en costes no parece suficiente para animar a elegir esta alternativa modal. Tanto para las MoS norte como para las MoS sur la ventaja de las cadenas intermodales en términos de impacto medioambiental son pequeñas, cuando son positivas. En este estudio se han considerado camiones Euro III y buques consumiendo continuamente MDO, sin ningún elemento de reducción de emisiones (catalizador, etc.), lo que obviamente influye negativamente en el impacto medioambiental de la multimodalidad. A pesar de este hecho, la razón fundamental de esta desventaja medioambiental es una combinación de factores, entre los que cabe destacar el excesivo tiempo en el transporte a través de la intermodalidad.

A la vista de los resultados, en las siguientes secciones se efectuará un segundo análisis sobre escenarios actuales, esto es, introduciendo valores reales de costes de escala y tiempos de operación para las rutas de la etapa II. Tales escenarios se determinarán tanto para Valparaíso como para San Antonio como posibles *hub* en sus rutas con Antofagasta en el norte y con San Vicente y Coronel en el sur.

5.2 ANÁLISIS DE ESCENARIOS ACTUALES.

Dados los resultados obtenidos en las secciones previas, conviene simular de nuevo el comportamiento de las rutas intermodales identificadas previamente como más interesantes, pero bajo condiciones operativas reales. Es decir, en el análisis anterior se asumieron condiciones idénticas de operación para todos los puertos estudiados en términos de eficiencia en tiempo y coste, que, aunque conveniente en primera aproximación, parece claramente insuficiente para determinar una competitividad realista de las cadenas analizadas.

Por tanto, con el objetivo de conocer las competitividades relativas alcanzadas por las cadenas intermodales frente a la unimodalidad, en esta sección se definirán las condiciones particulares de los puertos que determinan los escenarios actuales de operación de las cadenas intermodales.

Dos aspectos serán especialmente sensibles en la definición de estos nuevos escenarios: el número y eficiencia de los medios de carga portuarios y sus costes de escala. Con la correcta caracterización de estos aspectos pasaremos del análisis de escenarios previos (o ideales) al estudio de escenarios actuales (o particularizados a las condiciones portuarias actuales).

Los aspectos anteriores, incidirán en la modificación del modelo matemático previamente introducido (ver sección Formulación). Concretamente en el cálculo de los costes asociados al tramo marítimo de la cadena intermodal (CMU_3) que integran, entre otros, los costes de escala y de carga del buque en puerto (CT_7 , CT_8 , CT_9 , CT_{10} , CT_{11} y CT_{12})

$$CMU_3 = RE_3 + \left(\frac{1}{G_p \times P_p \times Ntrips} \right) \times \sum_{c=1}^{12} CT_c \quad \forall p \in PP \quad (36)$$

Así en el modelo original que simuló los escenarios previos, se definieron los siguientes costes para todos los puertos estudiados según la estructura tarifaria de un puerto europeo que es nodo de autopistas del mar activas:

CT_7 : tasa por uso del muelle al buque

CT_8 : tasa por uso de muelle a la mercancía

CT_9 : costes de practicaje

CT_{10} : costes de remolque

CT_{11} : costes de amarre

CT_{12} : costes de carga y descarga (transferencia de la carga)

La adaptación a la estructura de costes a los puertos chilenos se ha llevado a cabo considerando las tarifas y manuales de servicios publicados por las principales terminales marítimas de dichos puertos (CT_7 , CT_8 , CT_{11} y CT_{12}). En concreto se han considerado:

- Valparaíso: Terminal Pacífico Sur Valparaíso (Manual de los servicios de TPS, 2016 y Anexo de tarifas, 2016);
- San Antonio: San Antonio Terminal Internacional (Manual de los servicios de STI, 2013 y Anexo N°1 de tarifas vigentes a 2016);

- Antofagasta: Antofagasta Terminal Internacional S.A (Manual de los servicios de ATI, 2013 y Listado de tarifas ATI periodo 2015-2016);
- San Vicente: San Vicente Terminal Internacional S.A. (Manual de los servicios de SVTI, 2013 y tarifas vigentes a 2016:(<http://www.svti.cl/tarifas.html>);
- Coronel: Puerto de Coronel (Manual de los servicios de Puerto de Coronel, 2015 y Tarifario publicado a año 2016);

Para la adaptación de la estructura tarifaria correspondiente a los servicios de practicaje (*CT₉*) se ha utilizado lo dispuesto en:

- Reglamento de Practicaje y Pilotaje (cuarta edición, Dirección General del territorio marítimo y de Marina Mercante, 2015). En particular los artículos 20 y 21 sobre maniobras exentas de uso de práctico. Además, se ha tenido en cuenta Reglamento de Tarifas y Derechos de la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (2015). Capítulo III, art.301, usándose la tarifa globalizada para este servicio.

Finalmente, para la adaptación de la estructura tarifaria correspondiente a los servicios de remolque (*CT₁₀*) se han utilizado:

- A efectos de obligatoriedad de uso de remolcador y su tipo se han considerado los criterios publicados en las resoluciones de habilitación para las instalaciones portuarias de los puertos preseleccionados: Antofagasta, San Vicente, Coronel, Valparaíso y San Antonio. Dichas órdenes son publicadas por la Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante a través de las Capitanías portuarias correspondientes.
- A efectos de coste tarifario, después de evaluar las tarifas de remolque ofertadas por distintas compañías privadas, se puede concluir que las tarifas ofertadas por hora de servicio son prácticamente idénticas para los puertos: Antofagasta, Valparaíso, San Antonio, San Vicente y Coronel y además las tarifas ofrecidas por las diferentes empresas de remolque (Remolcadores Ultratug, CPT remolcadores, entre otros) son muy próximas entre sí. Por tanto, se tomarán las mismas tarifas de remolque para todos los puertos evaluados. Por otro lado, ante la incertidumbre del tiempo que efectivamente se invertirá en dichas maniobras se tomará el coste por faena (1 remolcador). Para este valor de tarifa, que está en función del registro bruto del buque (Gross Tonnage), se ha tenido en cuenta la oferta para este servicio de la empresa Saam (Sudamericana Agencias Aéreas y Marítimas) en el 2014.

Aunque efectivamente, los requisitos de empleo del servicio de remolque son mostrados en las resoluciones de habilitación para las instalaciones portuarias en función de las características propias del puerto, del buque, del capitán y de las condiciones meteorológicas del momento, todos ellos son con carácter general. Es decir, se enfatiza que la decisión última acerca de la cantidad de remolcadores a usar y el tipo en cada maniobra, será resuelta por la Autoridad Marítima. Para el caso de este estudio, considerando que las simulaciones buscan la optimización técnica y operativa de los buques, ha sido necesario establecer un marco de decisión sobre el número de remolcadores a utilizar basado únicamente en las características técnicas de los buques: sus GTs (Gross Tonnage), la instalación o no de Bow thrusters y su eslora.

Por otro lado, el tiempo de atraque (TVB_3) que incluye los tiempos de carga y descarga (ver ecuación 36) y el tiempo de maniobra en puerto (TVB_2 , ver ecuación 14 que incluye el tiempo invertido en uso obligatorio de práctico TS_1 , servicios de remolque TS_2 requerido por las autoridades portuarias y el tiempo de amarre TS_3), son altamente dependientes de las condiciones portuarias.

Los tiempos medios invertidos por uso de práctico, remolque y amarre se han considerado constantes en todos los puertos por falta de datos particularizados para cada puerto. Para el cálculo del tiempo de atraque (TVB_3) es necesario considerar el número máximo de grúas disponibles en puerto para operar en cada buque ($NG_m; \forall m \in M$ y $NG_k; \forall k \in K$) y sus velocidades medias de operación ($V_m; \forall m \in M$ y $V_k; \forall k \in K$).

$$TVB_3 = G_p \times \left(\frac{1}{V_m \times NG_m} + \frac{1}{V_k \times NG_k} \right) \quad \forall p \in PP \wedge \forall m \in M \wedge \forall k \in K \quad (37)$$

El número máximo de grúas disponibles para cada puerto serán las grúas que puedan operar a la vez considerando las dimensiones del buque siempre y cuando existan en el puerto grúas disponibles para ello. Por tanto, será necesario conocer cuántas y cuáles son las grúas disponibles en cada puerto.

Considerando las dimensiones de los buques obtenidos en el estudio de los escenarios preliminares sería suficiente el uso de grúas STS feeder para las MoS norte y STS feeder o Panamax para las MoS sur.

Se ha asumido la existencia de las siguientes grúas por puerto:

- San Antonio: 2 STS Panamax y 4 STS Post-Panamax
- Antofagasta: Tres grúas Gottwald
- Valparaíso: 3 STS Post-Panamax y 3 Super Post-Panamax
- San Vicente: 7 grúas móviles, 6 Gottwald y una Liebherr
- Coronel: 2 grúas Gantry y 2 grúas móviles.
- Para las grúas pórtico se ha asumido una velocidad media de 27 ciclos/h y 18 ciclos/h para las grúas móviles.

Así, con la combinación de las tasas e infraestructuras portuarias correspondientes a cada puerto que articula cada autopista del mar se han construido los escenarios actuales. La información específica para cada puerto está recogida en el Anexo 2.

La adaptación del modelo al escenario actual para los puertos chilenos ha supuesto la modificación del sistema de cálculo de algunas tasas aplicado para el escenario preliminar. Este es el caso, por ejemplo, del cálculo de la tasa por uso de muellaje a la nave; en el escenario preliminar se calculó en función del arqueado del buque ($TB_m; \forall m \in M$ y $TB_k; \forall k \in K$) mientras que en el escenario actual se calculó de acuerdo con el criterio publicado en los manuales de servicios de las terminales y su régimen tarifario, esto es, en función de la eslora de los buques ($TB^*_m; \forall m \in M$ y $TB^*_k; \forall k \in K$).

Con carácter general se puede afirmar que el escenario preliminar presentaba tasas por transferencia de la carga y por muellaje del buque menores. En cambio, las tasas de muellaje por la carga son mayores en el escenario preliminar. Por todo lo anterior, resulta complicado

a priori prever si el escenario actual será más o menos favorable a la multimodalidad en términos de costes respecto al escenario preliminar.

Es de destacar que en todos los puertos excepto el de Coronel se ha asumido que la tarifa de amarre está incluida en la tarifa de transferencia de la carga.

En el Anexo 2 se observa que las diferencias tarifarias entre San Antonio y Valparaíso son sólo significativamente superiores las de Valparaíso para transferencia de la carga. Esto indica que, previsiblemente los resultados de competitividad intermodal en términos de costes alcanzados por la intermodalidad a través de ambos puertos serán similares. Tampoco se aprecian diferencias relevantes entre la cantidad o eficacia de sus medios de carga/descarga (grúas), por tanto, en principio parece que las flotas halladas para ambas rutas serán muy próximas entre sí.

En el Anexo 2 se pueden ver también los valores asumidos para los costes relativos a la escala del buque en los distintos puertos candidatos a puerto 'spoke'. Estos puertos presentan tasas por muellaje de la carga significativamente mayores que los candidatos a puerto 'hub' siendo en Antofagasta donde esta tasa alcanza mayores valores.

En términos de competitividad en tiempo, las limitaciones de medios de carga y descarga y su eficiencia en los puertos periféricos sugieren resultados que penalicen la intermodalidad respecto a los resultados obtenidos en escenario preliminar.

En la Tabla 9 se pueden apreciar los rangos de resultados obtenidos para la competitividad de las cadenas intermodales frente a sus alternativas unimodales empleando las soluciones de flota obtenidas mediante el proceso de optimización aplicado a los escenarios actuales.

Tabla 9. Comparación de los resultados alcanzados por las cadenas intermodales articuladas a través de las MoS seleccionadas.

MOs	Funciones Objetivo	San Antonio	Valparaiso
Antofagasta	F1(€/t y viaje)	[6.14.;16.1]	[5.9.;15.5]
	F2(h/t y viaje)	[-44;-9.1]	[-38;-8]
	F3(€/t y viaje)	[-2;2]	[-2;2]
San Vicente	F1(€/t y viaje)	[-7.24;-3.1]	[-6.6;-2.0]
	F2(h/t y viaje)	[-37.2;-16.0]	[-37.8;-16]
	F3(€/t y viaje)	[-1.1;1.1]	[-1.2;1.1]
Coronel	F1(€/t y viaje)	[-8;-3.7]	[-7.5;-2,6]
	F2(h/t y viaje)	[-41.7;-18.2]	[-42.6;-18.1]
	F3(€/t y viaje)	[-1.3;0.9]	[-1.5;1,0]

Si comparamos los rangos de competitividad de la intermodalidad operada mediante flotas óptimas en los escenarios actuales en San Antonio frente a los obtenidos en los escenarios previos (ver Tabla 7) podemos concluir que sus variaciones en competitividad son más desfavorables en los escenarios actuales. Son relevantes las desviaciones en términos de costes en todas las rutas, lo que está de acuerdo con lo esperado ya que en todos los puertos se han encontrado desviaciones significativas de sus tarifas respecto al escenario preliminar (ver Anexo 2). Sin embargo, esta desventaja resulta crítica para las MoS sur donde en el escenario actual no se encuentran soluciones positivas ni en costes ni en tiempos (F1, F2).

Respecto a las MoS norte esta resulta ser más competitivas desde Valparaíso en términos de tiempo (ver Tabla 9). Esta ventaja se debe a la coincidencia del puerto con el propio extremo de ruta (La situación del puerto de Valparaíso se ha tomado coincidente con uno de los extremos finales de la carga $z=2$ y $z=3$, ver anexo) y a que la distancia marítima Antofagasta-Valparaíso es menor que Antofagasta-San Antonio. Ambos conceptos no se combinan en las MoS sur donde vemos que el efecto beneficioso de la situación de Valparaíso como nodo extremo de ruta se equilibra por estar más alejado que San Antonio de los puertos sureños. De ahí que las MoS sur no presenten ventaja en tiempo en Valparaíso respecto a San Antonio (ver F2 en Tabla 9).

En términos de coste resultan las rutas intermodales ligeramente más competitivas desde San Antonio para las MoS norte. Contrariamente, las soluciones encontradas a través del puerto de San Antonio son menos competitivas en coste frente a Valparaíso en las MoS sur (ver F1, Tabla 9). Esto es debido a que la diferencia entre sus tarifas por transferencia de la carga, favorable a S. Antonio, no es suficiente para equilibrar el menor coste del transporte unimodal desde una eventual descarga de mercancía exterior en San Antonio hacia la región sur en comparación con el mayor coste que tendría el transporte por carretera si la misma carga se transportase desde una hipotética descarga en Valparaíso (más al norte que San Antonio).

Por otro lado, y contrariamente a lo que ocurría en las MoS norte, en términos de tiempo, las MoS sur resultan ligeramente más competitivas a través de S. Antonio que a través de Valparaíso. Esto es así a pesar de ser más rápida la ruta unimodal a través de S. Antonio (5,64 horas) frente a Valparaíso (6,38 horas).

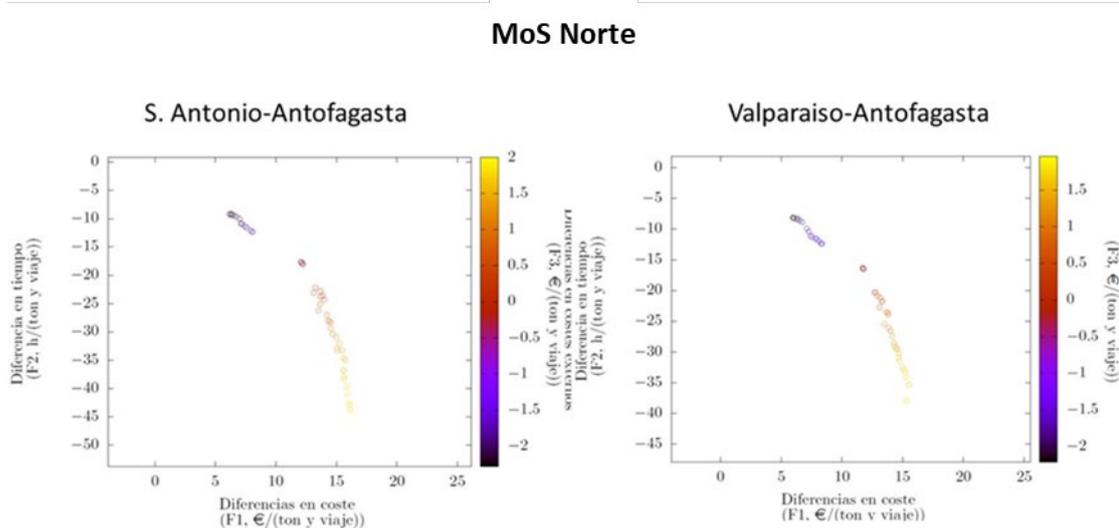


Figura 8. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MoS Norte (Escenario actual)

Para las MoS norte: San Antonio-Antofagasta y Valparaíso-Antofagasta las flotas obtenidas son buques entre $578 \leq TEUs \leq 1000$, $15 \leq VB \leq 30$ nudos y $117 \leq L \leq 140$ metros ((ver Figura 8). Respecto a la MoS sur (ver Figura 9 y Figura 10) a través de San Vicente (San Antonio-San Vicente y Valparaíso-San Vicente) y de Coronel (San Antonio-Coronel y Valparaíso-Coronel) las flotas obtenidas son buques entre $1199 \leq TEUs \leq 1589$, $15 \leq VB \leq 30$ nudos y $156 \leq L \leq 161$ metros. Es decir, flotas muy parecidas a las obtenidas en el escenario previo para todas las MoS pero con buques moderadamente más pequeños y rápidos.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

MoS Sur desde San Vicente

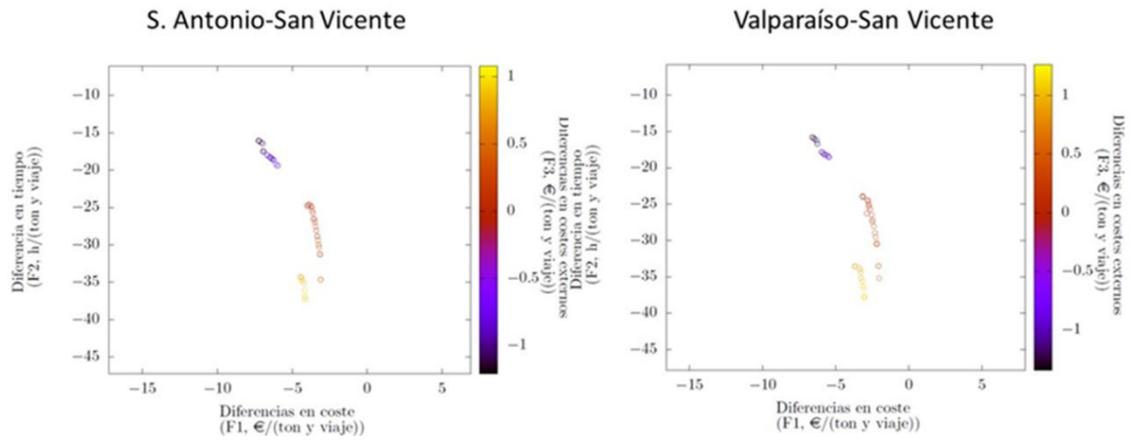


Figura 9. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MoS sur con San Vicente (Escenario actual)

MoS Sur desde Coronel

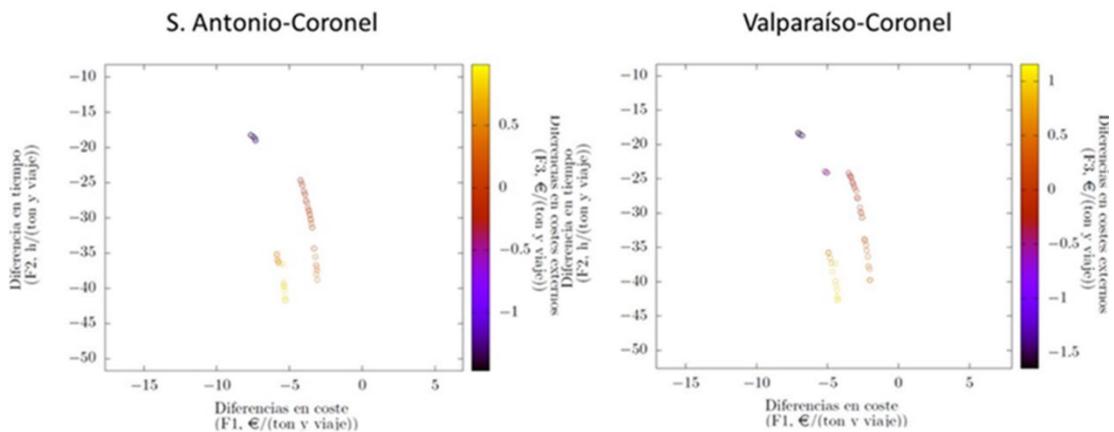


Figura 10. Resultados de rutas intermodales con flotas optimizadas para MoS sur con Coronel (Escenario actual)

En la Tabla 10 se han recogido algunas propuestas de flota entre las soluciones obtenidas de los frentes de Pareto. En concreto se ha seguido para la selección el mismo criterio que el empleado en el análisis de los escenarios preliminares: Para las redes articuladas a través de Antofagasta hemos adoptado una solución intermedia en términos de competitividad en tiempo y costes. Para aquellas articuladas a través de San Vicente y Coronel se han mostrado las soluciones que maximizan la competitividad en costes favorable a la intermodalidad.

Tabla 10. Características de algunas soluciones de flota obtenidos para las MoS en las redes de transporte para escenarios actuales

Puerto periférico (k)	Antofagasta		San Vicente		Coronel	
	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio
Puerto hub (m)	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio	Valparaiso	San Antonio
Unidad de carga más conveniente	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs	FEUs
Capacidad carga (G_p)	579 TEUs	583 TEUs	1,312 TEUs	1,311 TEUs	1,302 TEUs	1,302 TEUs
Velocidad buque (Kn)	18	18	19.00	19.33	20.8	21.0
Edad de los buques (E_q)	14 (E ₃)	14(E ₃)	14(E ₃)	14(E ₃)	14(E ₃)	14(E ₃)
Bow thruster	Si(MM ₂)	Si (MM ₂)	Si (MM ₂)	Si (MM ₂)	Si (MM ₂)	Si (MM ₂)
Sistemas de carga	Grúa Puerto (MG ₂)	Port cranes (MG ₂)				
Número de buques (NB)	4	4	3	3	3	3
Viajes anuales (N)	669	671	670	671	672	672
L (m)	118.36	119.23	158.00	158.00	158.00	158,2
B (m)	20.13	20.25	27.36	27.38	27.38	27.43
D (m)	9.84	9.90	13.29	13.31	13.30	13.33
GT (Ton)	6,658	6,746	15,283	15,251	14,809	14,836
Tipo de propulsor	Hélice Convencional (TP ₁)					
Nº Lineas ejes	1 (NSL ₁)					
Tipo motor propulsor	Diesel (TME ₁)					
Número Motores	1 (NME ₁)					
Resultados de Competitividad						
F1(€/t×viaje)	12.92	13.26	-3.23	-4.24	-3.61	-4.66
F2(h/(t×viaje))	-21.00	-22.17	-25.68	-25.41	-26.77	-26.20
F3(€/t×viaje)	0.87	0.71	0.33	0.26	0.07	0.02

Tal y como se esperaba, las flotas obtenidas para ambos puertos *hub* son muy parecidas entre sí (ver Tabla 10), siendo su diferencia más significativa los resultados de competitividad alcanzados para las cadenas intermodales articuladas a través de ellos (F1, F2 y F3). Lo mismo ocurre en las rutas a través de San Vicente y Coronel debido a la proximidad de ambos puertos periféricos en las MoS sur, donde todas las flotas obtenidas son muy parecidas. Además, estas flotas resultan ser similares a las obtenidas en los escenarios previos, si bien son ligeramente más pequeñas y rápidas (ver Tabla 8). Esto puede indicar que las características de los puertos estudiados (Valparaíso, San Antonio, Antofagasta, San Vicente) no presenten una influencia significativa en los resultados de flota óptima respecto a los

obtenidos en los escenarios previos (homogéneos, comunes y de recursos ilimitados en todos los puertos). En otras palabras, las características de las flotas optimizadas para las rutas parecen ser bastante estables, mostrando así cierta independencia a variaciones moderadas en las condiciones de contorno (tarifas, eficiencia de grúas, entre otros).

Así en la MoS norte, los resultados de competitividad en el escenario actual respecto a escenarios previos son peores tanto en tiempo como en coste; la diferencia en coste alcanza los 12.15€/t y viaje y la diferencia en tiempo llega a 0.5 horas entre ambos escenarios. El motivo fundamental son las condiciones tarifarias de San Antonio y las condiciones de Antofagasta tanto en grúas como en tarifas respecto a las asumidas en escenarios previos. En las MoS sur, son más ventajosas las rutas desde San Vicente que desde Coronel tanto en tiempo (una hora de diferencia entre ambos) como en coste (0.40 €/t y viaje), tal y como se encontró en el escenario preliminar, si bien el incremento de los costes tarifarios respecto al escenario preliminar ha imposibilitado encontrar alternativas intermodales competitivas en tiempo y coste a la carretera en el escenario actual.

Respecto al comportamiento de las MoS a través de los distintos puertos candidatos a *hub*, debido a sus tarifas más reducidas, San Antonio articula cadenas intermodales más competitivas en coste que las generadas a través de Valparaíso para las MoS norte. Sin embargo, esta ventaja (0.36€/t y viaje) no parece suficientemente amplia como para compensar de forma contundente la desventaja en tiempo que ofrecen las rutas intermodales a través de San Antonio respecto a aquellas articuladas a través de Valparaíso con la región norte (una hora). Aunque el valor del tiempo es muy dependiente del tipo de carga, para todas las MoS norte articuladas a través de cualquier candidato a *hub*, los resultados indican retrasos significativos de las cadenas intermodales respecto a la carretera (21 o 22 horas; F2) pero con ahorros relevantes (alrededor de 13€/t y viaje) respecto a la carretera. Lo contrario ocurre con las MoS sur, donde Valparaíso articula rutas más competitivas en coste (1€/t y viaje de diferencia) pero más lentas que desde San Antonio (alrededor de 0,4 horas), aunque en todos los casos alcanzan resultados negativos en competitividad respecto a la carretera.

6 CONCLUSIONES

En este capítulo se ha procedido al testeo del modelo matemático modificado para optimización de flotas de acuerdo a la competitividad de las rutas intermodales, a través de su aplicación a un caso real: el establecimiento de MoS en Chile.

Chile, presenta un caso singularmente interesante de aplicación y a través de su análisis hemos llegado a las siguientes conclusiones sobre la selección de puertos *hub and spoke* para la articulación de MoS: si bien los puertos *spoke* o periféricos para la articulación de las MoS están claros respecto a los resultados alcanzados: Antofagasta en el norte y San Vicente en el sur, los mismos resultados no son contundentes para la elección del puerto *hub*.

De acuerdo a esto, las rutas con mejores perspectivas para establecer autopistas del mar en Chile son:

- MoS Norte: Valparaíso/San Antonio-Antofagasta. Con las flotas sugeridas en la Tabla 10, permitiría alcanzar una competitividad significativa frente a las cadenas unimodales en coste y costes medioambientales mientras que existiría una

desventaja en tiempo que habría que considerar de acuerdo con los requisitos de transporte de la mercancía. La flota, para cualquiera de ambos *hubs* estaría compuesta por buques similares a: 'MV Green Fast' (600 TEUs y 17 kn, IMO 9128544); ' Reestborg '94' (558 TEUs, 17,5 kn IMO 9074913) o el *550 TEUs container feeder vessel* a 17,5 kn fabricado por Volharding en 2005 y testado en MARIN (Maritime Research Institute Netherlands).

<http://volharding.nl/items/pdfs/123850573820090331%20550%20TEU%20Container%20Vessel.pdf>

- MoS Sur: Valparaíso/San Antonio-San Vicente. De nuevo, considerando la flota optimizada mostrada en la Tabla 10, podemos concluir que las cadenas intermodales resultarían ser ligeramente competitivas en costes medioambientales, pero absolutamente no competitivas en costes totales y tiempos frente al transporte por carretera. Los buques que formarían la flota serían similares, aunque sin grúas a bordo al 'AS Felicia' (1,296 TEUs a 19.6 kn, IMO: 9395020) o al 'Fouma' (1,300 TEUs a 19 kn, IMO 9395082)

Respecto a la operatividad y capacidad de las autopistas del mar sugeridas operando con las flotas mostradas en la Tabla 10 y en el escenario actual, se garantizaría un servicio diario en cada sentido para ambas autopistas del mar con la siguiente capacidad:

- Valparaíso-Antofagasta: garantizarían un servicio capaz de mover 4,772,646 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 4,632,071 toneladas anuales para la MoS norte ver Tabla 1). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2) en Antofagasta actuarían 3 grúas y 3 en Valparaíso con las características asumidas en la sección anterior (Datos específicos para los puertos seleccionados).
- San Antonio-Antofagasta: garantizarían un servicio capaz de mover 4,883,202 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 4,632,071 toneladas anuales para la MoS norte ver Tabla 1). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2) en Antofagasta actuarían 3 grúas y 3 en San Antonio con las características asumidas en la sección anterior (Datos específicos para los puertos seleccionados).
- Valparaíso-San Vicente: garantizarían un servicio capaz de mover 9,902,935 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 9,892,605 toneladas anuales para la MoS sur ver Tabla 1). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2), sería necesario que San Vicente contase con 6 grúas operativas y Valparaíso con 4.
- San Antonio-San Vicente: garantizarían un servicio capaz de mover 9,917,715 toneladas anuales de mercancía (se habían estimado como requisito 9,892,605 toneladas anuales para la MoS sur ver Tabla 1). Para alcanzar las condiciones en competitividad en tiempo (F2), sería necesario que San Vicente contase con 6 grúas operativas y Valparaíso con 4.

De acuerdo con los resultados anteriores, se confirma la utilidad del modelo matemático desarrollado para identificación de MoS y selección de flotas optimizadas en casos reales de aplicación.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 5

Optimización de la propulsión de los buques en el modelo matemático

1 INTRODUCCIÓN

los objetivos de su optimización, este recoge posibilidades de disposición de la cámara de máquinas limitadas a dos posibles plantas propulsivas: motores de combustión interna convencionales y turbinas ($TME_e; \forall e \in EE$). Esta configuración inicial (junto con el número de motores o turbinas $-NME_i; \forall i \in I-$, el tipo de propulsor $-TP_h; \forall h \in H-$ y el número de líneas de ejes $-NSL_n; \forall n \in N-$; ver Anexo 1) permite aportar información sobre el rendimiento medioambiental de la intermodalidad en primera aproximación, pero resulta claramente insuficiente cuando consideramos la tendencia normativa actual. Así, las restricciones de emisiones en zonas ECA, que son obligatorias en todos los buques construidos a partir de enero del 2016 (restricciones de NOx, tecnología Tier-III en motores, MARPOL, Anexo VI) con operación en dichas áreas, serán aceptadas como obligatorias en este capítulo junto con las restricciones en emisiones de SOx y CO2 (zona SECA y Directive (EU) 2016/802) independientemente de su área de actividad.

Por tal motivo, este capítulo incorpora a la definición de la planta propulsiva, distintas posibilidades para el cumplimiento con las restricciones de zona ECA, las más exigentes, en el transporte marítimo (Bengtson et al., 2014; Brynolf et al., 2014): motores con combustibles pesados (HFO) (Tier III) y scrubber, motores con combustible ligero (MGO) (Tier III) y motores duales alimentados con LNG. De la misma manera, se considerará por defecto, tecnología Euro VI para el transporte por carretera (también la más restrictiva).

La incorporación de estas nuevas alternativas implica una modificación del modelo matemático inicial que debe ser capaz de reflejar las consecuentes modificaciones en:

- Costes de capital;
- Costes de mantenimiento;
- Costes de operación;
- Modificación del peso en rosca del buque, por tanto, variación del peso muerto y de la capacidad de carga;
- Modificación del volumen disponible para carga;
- Nuevos coeficientes de emisión ($EG_{su}; \forall s \in SS \wedge \forall u \in U$, ver Anexo 1).

2 LA MODIFICACIÓN DEL MODELO

El modelo buscado intenta definir la flota de portacontenedores más adecuada desde el punto de vista técnico y operativo para asegurar las mayores oportunidades de éxito de las cadenas intermodales frente a la alternativa unimodal, evaluando tres atributos bajo el supuesto de una flota de nueva construcción (ver Martínez-López et al., 2015b; Martínez-López et al., 2016): la competitividad relativa en términos de costes totales (F1), tiempo (F2) y costes ambientales (F3). La diferencia con el modelo previamente desarrollado (Martínez-López et al., 2015b; Martínez-López et al., 2016); es la incorporación de la optimización de las plantas de propulsión considerando los tres objetivos al mismo tiempo con la intención de ofrecer no sólo una alternativa de transporte competitiva para los propietarios o transitorios de carga, sino también la mejor alternativa desde el punto de vista de la sostenibilidad.

Si ya el modelo inicial proporcionaba un amplio número de variables (ver Figura 3) que permitían la definición completa de las flotas (características técnicas de los buques), el actual amplía ese número. Sin embargo, sólo siete variables son independientes, con las posibles combinaciones que se muestran en la Figura 11:

- Velocidad del buque (VB) medida en nudos.
- Tipo de unidad de carga ($PP = \{1, \dots, p\}$), con $\{1, 2\}$ como valores posibles: 1 para TEUs y 2 para FEUs (ver Anexo 1). Cada unidad de carga asume un peso neto medio ($P_p; \forall p \in PP$), 12.5 t para TEU ($P_1 = 12.5$) and 20.5 t para FEU ($P_2 = 20.5$)
- Capacidad de carga ($G_p; \forall p \in PP$) medida en unidades.
- Planta propulsiva ($TME_e; \forall e \in EE^*; EE^* = \{1, \dots, e\}$), con $\{1, 2, 3\}$ como valores posibles: 1 para motor semi-rápido de cuatro tiempos operando con MGO (Tier III), 2 motor semi-rápido de cuatro tiempos (Tier-III) con scrubber y operando con HFO, y 3 para motores duales con LNG.
- Sistemas de manejo de la carga ($MG_g; \forall g \in GG; GG = \{1, \dots, g\}$), con $\{1, 2\}$ como posibles valores: 1 para grúas del buque y 2 para grúas portuarias.
- Viabilidad del bow thruster ($MM_b; \forall b \in BB; BB = \{1, \dots, b\}$), con $\{1, 2\}$ como posibles valores: 1 sin bow thruster y 2 con bow thruster.
- Viajes anuales (N_{trips}).

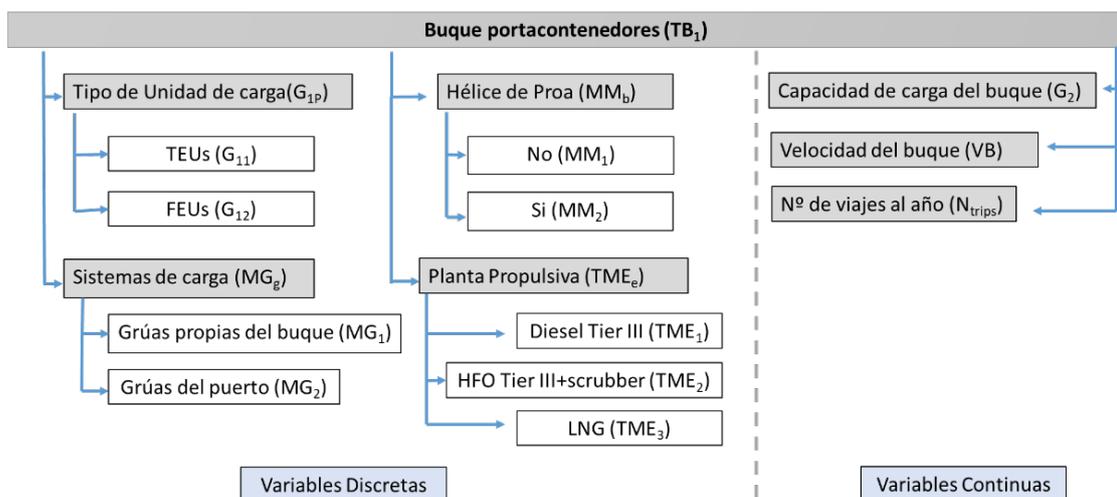


Figura 11. Variables no dependientes en el modelo matemático

La optimización de un modelo que evalúe la mejor opción para las plantas de propulsión de los buques requiere considerar los costes de su instalación y la posible reducción del espacio de carga para cada alternativa evaluada en la optimización (Panasiuk y Turkina, 2015).

Las características esperadas de los buques feeder optimizados, rápidos y pequeños (Martínez-López et al, 2015b; Martínez-López et al., 2016; Ng, 2009; Chang y Chow, 2010), llevan a asumir las necesidades de potencia que pueden ser proporcionadas por motores de cuatro tiempos semirápidos Tier III (OMI) en todos los casos. Esto implica la instalación de sistemas SCR (Selective Catalytic Reduction), excepto para los motores de gas.

Para alcanzar, como mínimo, los requisitos de emisión de la zona ECA, los combustibles considerados para las simulaciones son Low Sulphure Marine Gas Oil (LSMGO) con un contenido de azufre máximo del 0.1% (para TME₁), Heavy Fuel Oil (HFO) con un contenido de azufre del 2.7% (TME₂) y LNG (para TME₃).

La evaluación de las nuevas alternativas implica necesariamente, la definición de la disposición general de cámara de máquinas y esta está condicionada por su planta propulsora. Por lo que, si la planta seleccionada es TME₂, se debe disponer además el scrubber y consecuentemente evaluar no sólo su implicación en cuanto a empacho, sino también en cuanto a peso y su impacto en la capacidad de carga del buque.

La evaluación del empacho es especialmente significativa en las plantas de LNG debido a la disposición de los tanques de gas (opción TME₃), que implica además un incremento del peso (estructura y aislamiento de los tanques), reducción del espacio disponible para capacidad de carga y costes adicionales en comparación con la instalación de motores convencionales. Aunque existen diferentes tipos de tanques de LNG, este modelo asume el uso de tanques tipo C (tanques cilíndricos) con disposición horizontal, ubicados delante de la sala de máquinas. Por lo tanto, las dimensiones estándar de los tanques de gas proporcionadas por Wärtsilä (LNGPac⁴) y su peso operativo máximo se han tomado como datos de entrada para la adaptación del modelo. Asimismo, el modelo calcula la potencia requerida para alcanzar la velocidad óptima de servicio y, en base al consumo específico dado por el fabricante del motor (la información ofrecida por MAN Marine Engines and Systems), también calcula el volumen necesario de LNG considerando la autonomía de los buques. Con este volumen finalmente, el modelo define el número y tipo de tanques estándar necesarios. Una vez determinado el número y dimensiones de los tanques, el modelo sugiere la disposición de los tanques de LNG según el International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels (IMO IGF-Code, 2015⁵) y las reglas de diseño exigidas por el American Bureau of Shipping (reglas ABS, 2015⁶).

2.1 ADAPTACIÓN DE LAS FUNCIONES OBJETIVO

Tal y como se expuso en el capítulo tres, el modelo responde a la evaluación simultánea de tres funciones objetivo:

$$F_1 = \max(CU - CMU) \quad (1)$$

⁴ <http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/fuel-gas-handling/wartsila-lingpac> (Accessed, January, 2016)

⁵ The "International Code of Safety for Ships Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels" adopted by IMO's Maritime Safety Committee (MSC) in June 2015 will entry into force on 1 January 2017

⁶ "Guide for Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships". ABS. Rules & Guides. May 2015

$$F_2 = \max(TVU - TVM) \quad (7)$$

$$F_3 = \max(RE - MUE) \quad (15)$$

Que representan respectivamente, la ventaja de la intermodalidad frente a la unimodalidad en términos de coste (F1 en €/t y viaje), tiempo (h/t y viaje) y costes medioambientales (€/t y viaje).

Si bien, la incorporación a la optimización de variables relativas a la planta propulsora no influye significativamente en la función objetivo F2, sí es relevante su influencia en las funciones de costes tanto F1 como F2. En las siguientes secciones se detalla su impacto y su inclusión en el modelo matemático.

2.1.1 ADAPTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE COSTES PARA EL CÁLCULO DE F1

La función objetivo F1 (ver ecuación 1), maximización de la diferencia entre los costos totales de la alternativa de transporte por carretera (CU) y de la cadena intermodal (CMU) integra también los costes medioambientales para los sistemas de transporte (Martínez-López et al., 2016). Los costes asociados a las cadenas intermodales (CMU) consideran los costes de los tramos capilares y marítimos (CMU3, ver ecuación 6 en capítulo 3 y anexo 1) que obviamente están muy influenciados por la elección de la flota, el número de buques (NB) y sus dimensiones y características.

$$CMU_3 = RE_3 + \left(\frac{1}{G_p \times P_p \times Ntrips} \right) \times \sum_{c=1}^{12} CT_c \quad \forall p \in PP \quad (6)$$

Entre ellos, es conveniente destacar la influencia en este valor de la selección de la planta de propulsora: influencia en los costes de capital de los buques (CT1), por el coste de la planta propulsora (PMP), en el mantenimiento (CT4), y en los costes de combustible (CT6).

La estimación del coste de inversión en plantas propulsivas (PMP, ver ecuación 36), como parte fundamental del coste capital del buque (CT1) se definió a partir de la información publicada en *North European LNG Infrastructure Project (2012) by the Danish Maritime Authority (Danish Maritime Authority, 2012)* en base a datos ofrecidos por MAN Diesel & Turbo and Wärtsilä, actualizada al año de aplicación considerando el número de motores necesarios (NMP) y el coste unitario de la mano de obra (CMO, ver anexo 1). La misma fuente se ha utilizado para estimar el coste de los tanques de gas, en caso de que la opción evaluada sea la de motor dual a LNG.

$$PMP = \begin{cases} 180 \times PB \times 0.745 + 28 \times \left(PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMP \times CMO & \text{si } TME_e = TME_1 \\ 375 \times PB \times 0.745 + 38 \times \left(PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMP \times CMO & \text{si } TME_e = TME_2 \\ 595 \times PB \times 0.745 + 42 \times \left(PB \times \frac{0.74}{NMPa} \right)^{\frac{2}{3}} \times NMP \times CMO & \text{si } TME_e = TME_3 \end{cases} \quad (38)$$

La adaptación de los costes de mantenimiento (CT₄, ver ecuación 37) de acuerdo con las opciones evaluadas, ha tenido en cuenta, además de la edad de los buques (E_q, ∀q∈Q, ver

$$DT_1 = \begin{cases} (8 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0025 \times PB/NMP_a + 140.02) * 49200 / 42700 & \text{si} \\ TMM_m = TMM_1 & \end{cases} \quad (40)$$

$$\begin{cases} (6 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0018 \times PB/NMP_a + 136.89) & \text{si} & TMM_m = TMM_2 \\ (8 \times 10^{-8} \times (PB/NMP_a)^2 - 0.0025 \times PB/NMP_a + 140.02) & \text{si} & TMM_m = TMM_3 \end{cases}$$

2.1.2 ADAPTACIÓN DE LAS FUNCIONES DE COSTES EXTERNOS PARA EL CÁLCULO DE F3

La función objetivo F3 permite encontrar soluciones de flotas que permitan articular alternativas de transporte más sostenibles que la alternativa unimodal. Tal y como se vio en el capítulo 3, para ello es necesario calcular los costes relacionados con las emisiones para el transporte por carretera (RE en € / t y viaje) y para la cadena intermodal (MUE en € / t y viaje).

En el capítulo 3 se mostraba que, de los métodos sugeridos por Ntziachristos and Samaras (2012) para el cálculo de emisiones en el transporte por carretera (RE) se adoptaba el Tier 1 para el cálculo de todos los coeficientes de emisión ya que considera los valores para los distintos tipos de camiones y tecnología medioambiental hasta Euro III, excepto para el cálculo del consumo del camión que se adoptaba el Tier II considerando la categoría de vehículo y su carga neta máxima (ver Tabla 12). Sin embargo, este procedimiento no es válido si aceptamos tecnología Euro VI y si además tenemos en cuenta que la posibilidad de emplear combustible LNG, significa ampliar el número de contaminantes evaluados, incluyendo en el análisis la evaluación del Metano (CH₄).

Consecuentemente, la nueva evaluación de los costes medioambientales se ha centrado, para cada sistema de transporte, en los siguientes contaminantes ($U^* = \{1, \dots, u\}$, ver Anexo 1): SO₂ (sustancias acidificantes), NO_x (precursores de ozono), PM_{2,5} (masa particular de materia), y los gases de efecto invernadero CO₂ y CH₄. Por tanto, a diferencia del modelo inicial, el presente modelo introduce una evaluación medioambiental de CH₄ debido a la alta repercusión esperada de este contaminante en la operación de buques con sistemas de LNG por "methane slip" (Nielsen y Stenersen, 2010), es decir, fugas por el metano no quemado en la combustión y escapes de metano durante el "bunkering" (Bengtsson et al., 2014; Brynolf et al., 2014; Elgohary et al., 2015).

Por otro lado, debido al peso asociado a la carga de las unidades consideradas en este estudio (TEU y FEU) se han asumido Vehículos Pesados (HDV) N3 (Anexo II, Directiva 2007/46 / CE del Parlamento Europeo) con tecnología Euro VI (obligatoria en la UE a partir de enero de 2014) para el transporte terrestre.

Para el cálculo de los costes medioambientales relacionados con el transporte por carretera (RE, medido en € / tonelada y viaje, ver Anexo 1) se siguió el método de Ntziachristos y Samaras (2012) pero modificado respecto al modelo inicial (ver Figura 12). Esto se basa en la estimación de los coeficientes de emisión ($EGU_{up}; \forall u \in U \wedge \forall p \in PP$ -ver Anexo 1) -gr de contaminante por kg de combustible consumido para cada contaminante ($U^* = \{1, \dots, u\}$) y para cada unidad de carga transportada ($PP = \{1, \dots, p\}$). Considerando, los tres

procedimientos posibles publicados por Ntziachristos y Samaras; 2012: Tier 1, Tier 2 y Tier 3, el nuevo modelo ha incorporado del proceso Tier II la estimación del consumo de combustible por tipo de camión (FC_p ; $\forall p \in PP$ - gr fuel / km-) para HDV hasta 16 t para TEU y hasta 32 t para FEU. También se siguió Tier 2 para la estimación de los factores de emisión de NO_x y $PM_{2,5}$, con valores para HDV-Euro VI hasta 14 t para TEU y HD-Euro VI hasta 26 t para FEU. Finalmente, se utilizó el proceso Tier I para obtener los factores de emisión de CO_2 y SO_2 considerando el tipo de combustible y el año.

Tabla 12. Métodos seguidos estimación de los coeficientes de emisión para el transporte por carretera

		SO_2	NO_x	$PM_{2,5}$	CO_2	CH_4	$FC_p \forall p \in PP$
Modelo Inicial EGU_{uf} $\forall u \in U \wedge \forall f \in FF$	Tier 1	X	X	X	X	---	
	Tier 2						X
Modelo final EGU_{up} $\forall u \in U^* \wedge \forall p \in PP$	Tier 1	X			X	X	
	Tier 2		X	X			X

Para una correcta valoración de los costes medioambientales de las alternativas de transporte, los valores de coste unitario considerados para los contaminantes (CF_{ufv} ; $\forall u \in U^* \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$ - €/ kg contaminante) deben ser iguales para todos sistemas de transporte evaluados. Entonces, se ha tomado que los costos unitarios no solo dependen del tipo de contaminante ($U^* = \{1, \dots, u\}$) y del país europeo que soporta el transporte ($FF = \{1, \dots, f\}$) sino también sobre el tipo de zona de tránsito ($V = \{1, \dots, v\}$: zonas metropolitanas y urbanas (si la población supera o no los 0.5 millones de habitantes, respectivamente). El modelo considera los valores publicados de Korzhenevych et al. (2014) (en la versión inicial del modelo considerábamos los valores publicados por Maibach et al.,2008 con sus actualizaciones correspondientes) con respecto a los costes unitarios de daños de los principales contaminantes del transporte en 2010 para los países de la UE: $PM_{2,5}$, NO_x y SO_2 , aplicando el IPC (Índice de precios al consumo) para su actualización a valores de 2015.

Respecto a la valoración de los gases efecto invernadero, existe un cambio sustancial entre el valor unitario central para el CO_2 publicado por Maibach et al.,2008 (25€/t)- *Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector* y el publicado por Korzhenevych et al., 2014 (90€/t)- *Update of the Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector*-

Vistas las discrepancias se tomarán de referencia los valores publicados en la actualización del 2014 del "handbook" y se actualizarán a valores del 2015 según el IPC de los países.

Para la estimación del coste unitario del metano, se ha tenido en cuenta la relación de los gases efecto invernadero con el Global Warming Potential (GWP). Siendo $GWP=1$ para el CO_2 $GWP=25$ para el CH_4 (Korzhenevych et al.,2014) se siguen las recomendaciones de Maibach et al.,2008 que sugiere para evaluar los costes de los gases de efecto invernadero, multiplicar los factores de emisión equivalentes al CO_2 por el coste unitario central de este. Sin embargo, también se advierte de que la relación real entre ambos, a efecto de daños medioambientales, no es exactamente el GWP y que además esta varía en el tiempo. A pesar de esta advertencia la falta de información sobre el coste unitario del CH_4 , forzará a tomar su valor proporcionalmente a su GWP en relación al precio unitario del CO_2 .

Las ecuaciones 39-41 sustituyen a las ecuaciones 26-28 del primer modelo, que ofrecen información sobre los costes medioambientales vinculados al transporte por carretera.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

$$RE = CET_{pv} \times (1/P_p) \quad \forall p \in PP \wedge \forall v \in V \quad (41)$$

$$CET_{pv} = \sum_{u=1}^u CET_{upv} \quad \forall p \in PP \wedge \forall v \in V \quad (42)$$

$$CET_{upv} = \sum_{f=1}^f (CF_{ufv} \times FC_p \times EGU_{up} \times 10^{-6} \cdot X_f \times (\sum_{z=1}^z \sum_{d=1}^d (X_z \times X_d \times DR_{zd}^a))); \quad \forall u \in U^* \wedge \forall p \in PP \wedge \forall v \in V \quad (43)$$

El cálculo de los costes medioambientales de las cadenas intermodales (MUE en € / t y viaje, ver ecuación 16) integra los costes medioambientales de los tramos por carretera y de los costes marítimos en toda la cadena intermodal. Para los costes de los tramos capilares en tierra son también de aplicación las Expresiones 39-41 considerando sus respectivas distancias, mientras que para el cálculo de los costes relacionados con el tramo troncal (CEM en €/año o RE3 en € / t y viaje-Ver anexo 1 y ecuaciones 17 y 18) es necesario tener en cuenta las diferentes etapas de operación durante el transporte marítimo (SS = {1, ..., s}; Jiang et al., 2014): navegación libre, maniobras (puerto tiempo de piloto, tiempo de servicio del remolcador y tiempo de amarre) y atraque (operaciones de carga / descarga). Por tanto, esta consideración se mantendrá en los valores de coste unitario de los contaminantes para la evaluación del tramo troncal (CF_{sufv}; $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U^* \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$ - € / kg contaminante-ver Anexo 1-), aunque, los costes vinculados a la navegación libre (CEM1) no dependen del país ni del tipo de zona ($\forall f \in FF \wedge \forall v \in V$). Las ecuaciones 42-46 sustituyen a las del modelo inicial 19-23.

$$RE3 = CEM / (P_p \times N_{trip} \times G_p) \quad \forall p \in PP \quad (17)$$

$$CEM = \sum_{s=1}^3 CEM_s \quad \forall s \in SS \quad (18)$$

$$CEM_1 = \sum_{u=1}^4 (EG_{1u} \times DM_{1u} \times 0.54 \times CF_{1u}) \times N_{trips} + PB \times EF_e \times LF_1 \times TVB_1 \times 10^{-3} \times CF_{15} \times N_{trips} \quad \forall m \in M \wedge \forall k \in K \wedge \forall e \in EE^* \quad (44)$$

$$CEM_2 = 0.5 \times N_{trips} \times \sum_{f=1}^f (CEM_{2f}) \quad (45)$$

$$CEM_{2f} = \sum_{u=1}^4 (EG_{2u} \times TVB_2 \times CF_{2ufv}) + PB \times EF_e \times LF_2 \times TVB_2 \times 10^{-3} \times CF_{25f} \quad \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \wedge \forall e \in EE^* \quad (46)$$

$$CEM_3 = 0.5 \times N_{trips} \times \sum_{f=1}^f (CEM_{3f}) \quad (47)$$

$$CEM_{3f} = \sum_{u=1}^4 (EG_{3u} \times TVB_3 \times CF_{3ufv}) + PB \times EF_e \times LF_3 \times TVB_3 \times 10^{-3} \times CF_{35f} \quad \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \wedge \forall e \in EE^* \quad (48)$$

Las diferencias principales están en la inclusión de las emisiones de metano por uso de LNG a través de un segundo sumando (CEM₁, CEM_{2f}, CEM_{3f}, ver ecuaciones 44,46 y 48).

Las expresiones 42-46, al igual que en el modelo inicial, están en función del tiempo invertido en cada etapa (TVB₁ para la navegación, TVB₂ para las maniobras y TVB₃ para las actividades de carga / descarga en puerto). Igualmente, se han estimado los factores de emisión para los buques portacontenedores (EG_{su}; $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U$ en kg / nm y en kg / h ver Anexo 1) para todos los contaminantes, excepto para el metano (CH₄), a través de la herramienta de cálculo de emisiones para contenedores desarrolladas por la Universidad Tecnológica de Dinamarca y la Universidad del Sur de Dinamarca (Kristensen, 2012; Kristensen y Lützen, 2012) (<https://www.shipowners.dk/en/services/beregningsvaerktoejer/>). Sin embargo, a diferencia del primer modelo, se asumió en todos los casos un motor de velocidad media, pero con los sistemas de mitigación específicos para cada opción evaluada.

Finalmente, la última suma en las Expresiones 42, 44 y 46 representa los costes de CH₄ según el cálculo propuesto por la *United States Environmental Protection Agency* (US EPA, Elgohary et al., 2015; Banawan et al., 2010). Esto depende del factor de carga del motor en cada etapa de navegación ($LF_s; \forall s \in SS$), la potencia de propulsión de los buques (PB en kW) y el factor de emisión de CH₄ dado por la planta de propulsión evaluada ($EF_e; \forall e \in EE^*$).

A pesar de que está ampliamente aceptado que el CH₄ es 25 veces más dañino que el CO₂, la mayoría de los autores reconocen la incertidumbre sobre la cuantificación del “methane slip” para motores duales. Bengtsson et al. (2014) asumió un valor de 0.5 g / MJ (1.8 g / kWh) como un *methane slip* promedio para motores de gas; sin embargo, remarcaron que este valor puede variar entre 0.06 y 3.2 g / MJ (sube a 11.4 g / kWh). Brynolf et al. (2014), asumieron una proporción del 3% (30 kg / t LNG) como *methane slip* (sólo las emisiones de metano de los motores por combustión incompleta, excluyendo las fugas debido al proceso operativo al llenado los tanques de LNG) para los motores de combustible dual, pero reconocieron que este valor (5.79 g / kWh) era bastante inferior a las mediciones publicadas por Nielsen y Stenersen (2010), quienes propusieron una relación del 8% (80 kg / t GNL) para buques *supply* con motores de combustible dual (15.6 g / kWh). De hecho, este último estudio se refirió al tráfico de cabotaje (SSS en Noruega), y por lo tanto el estudio tiene máxima aplicación a nuestro caso. Finalmente, los fabricantes de motores también proporcionan algunas estimaciones sobre estos valores. Wärtsila (Contessi, 2013) publicó un valor de 6 g / kWh para sus motores duales, mientras que para los motores a base de combustible este valor alcanza (0.5–1 g / kWh). Esta última estimación también se aleja bastante de los valores obtenidos para las emisiones de metano dados por otros autores para motores a base de combustible: los buques ro-ro emitieron 0.0005 g / MJ (0.0017 g / kWh) de CH₄ según Brynolf (2014) y 0.040 g / kWh fueron emitidos por motores con un consumo específico entre 175 y 195 g / kWh según los resultados obtenidos por Nielson y Stenersen (2010).

Según la revisión anterior, el modelo asumirá un factor de emisión para CH₄ de $EF_3 = 5.79$ g / kWh para motores duales que operan con LNG (TMM₃) (Brynolf et al., 2014; Contessi, 2013) y $EF_1 = EF_2 = 0.040$ g / kWh para motores a base de combustible fósil (Nielsen y Stenersen, 2010).

2.2 ADAPTACIÓN DE LA DISPOSICIÓN GENERAL Y DE LA CAPACIDAD DE CARGA

La valoración de las nuevas alternativas propulsivas implica un incremento del rosca de los buques, y además una esperada reducción del volumen de carga disponible. Esto es así especialmente para el caso de la propulsión dual con LNG como combustible (TMM₃) y con motores con scrubber alimentados con HFO (TMM₂).

2.2.1 MOTORES DUALES (TMM₃)

El transporte de LNG y otros gases está regulado bajo el Código Internacional de la OMI para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel, “International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk” (IGC). Sin embargo, este Código adoptado en 1983, se ocupa sólo de la construcción de los buques que transportan LNG como carga, no como combustible (OMI, 1983).

Mientras tanto, la OMI emitió las directrices sobre la seguridad de las instalaciones de motores de gas natural en los buques [Resolución MSC. 285 (86)] en junio de 2009 bajo el título IMO “Interim Guidelines on Safety for Natural Gas-Fuelled engine installations in ships”. Esta Resolución proporciona una base jurídica suficiente para el uso de LNG como combustible. Sin embargo, no se trataba de una resolución de obligado cumplimiento. Por tal razón, en cada caso, la autorización del Estado de bandera era obligatoria junto con la aprobación de cada puerto que el buque desee visitar (OMI, 2009). Sin un estándar reconocido a nivel mundial para la construcción de buques con propulsión a LNG, un operador no tenía garantías de que un buque en particular tenga derecho a entrar en cualquier puerto de un Estado miembro de la OMI. Esto ha limitado las operaciones de los buques a navegaciones de cabotaje durante muchos años, como es el caso de los transbordadores y supplies de Noruega. Así, mientras se no se aprobó un Código de aplicación internacional, cada país desarrolló el suyo propio. Esto provocaba una gran falta de estandarización en construcción, procedimientos de bunkering y operación.

Finalmente, el código internacional para la construcción de buques propulsados por LNG fue adoptado el 12 de junio de 2015 durante la sesión 95 del Maritime Safety Committee (MSC) bajo la International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS). Se conoce como el Código Internacional de Seguridad para Buques Propulsados a Gas, “International Code of Safety for Ships using Gases or other Low-flashpoint Fuels” (IGF). Este código está enfocado en los buques que consumen LNG como combustible y no como carga. El objetivo del código IGF es proveer de directrices estándar de obligado cumplimiento a buques que usan combustibles con punto de ignición menor a 60°C. Que la OMI adopte este código es un paso muy importante, pues deroga la limitación del consumo de combustibles con punto de ignición por debajo de 60°C en el caso del LNG (OMI, 2015).

El código IGF es de aplicación para buques con más de 500 GT, gaseros, cualquier buque que sea reconvertido desde el día de su entrada en vigor, con independencia de su año de construcción. Sucesivamente está previsto que se desarrollen nuevos capítulos para otros combustibles con bajo punto de ignición como el metanol, LPG, etc. El código entró en vigor en julio de 2017.

El código IGF ofrece directrices sobre la colocación de tanques, aislamientos de tuberías, mamparos y disposición de cámara de máquinas. También establece la información que debe recoger el documento de entrega de bunker conocido como LNG Bunker Delivery Note (BDN). En él se deberá incluir la composición del LNG expresado en porcentaje de masa (m/m %) metano, etano, propano, isobutano, N-butano, pentano, hexano, nitrógeno y azufre. Sin embargo, el código IGF no trata la formación específica de la tripulación, ni los requerimientos operativos específicos entre puerto y buque. De manera que, este campo vuelve a quedar vacío. Para intentar cubrir esta área, la International Organization for Standardization (ISO), a través de su comité técnico 67, ha desarrollado un procedimiento estándar para la operación de toma de combustible. Se denomina *ISO /Technical Specification 18683:2015: Guidelines for systems and installations for supply of LNG as fuel to ships* y da directrices sobre la infraestructura de bunker en tierra y en el buque receptor, procedimientos de conexión y desconexión, seguimiento de las operaciones durante el suministro, mecanismo de parada de emergencia y proceso de control del proceso (ISO, 2015).

Las Sociedades de Clasificación no permiten inicialmente la colocación de tanques bajo zonas de acomodación o en zonas de evacuación. El reciente código IGF de 2015, sí que permite la colocación de los tanques bajo la acomodación si se ha realizado un correcto estudio de

riesgos. Establece también, las distancias mínimas que debe haber entre el tanque y los límites del casco (*"a safety distance between the outside insulation of the tank to shell being B/10. The tank connection space, the Fuel Gas Supply System rooms and the LNG Bunker Stations are located above the tank. All the requirements follow the latest version of the IMO IGF-Code"*).

Los tanques de almacenamiento con presiones de trabajo superiores a 10 bares, deberán ir sobre cubierta, pudiéndose colocar en espacios cerrados los depósitos que trabajen a presiones inferiores (*Rules & Guides.May 2015."Guide for Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships". ABS*⁷).

Por seguridad en caso de colisión, los tanques de gas deben estar situados más a popa de lo que están los tanques de fuel convencionales y lo más centrados con respecto a línea de crujía, siendo la distancia mínima de **0.08L metros** hacia popa del mamparo de colisión de proa y una separación mínima con respecto al costado de **B/5 m o 11.5 m**. (tomando el menor valor de ambos), para los buques de carga (*Rules & Guides.May 2015." Guide for Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships ". ABS*)

Las Sociedades de Clasificación en concordancia con el código IGF, actualmente permiten la disposición de los tanques de gas bajo la acomodación si se ha realizado un correcto estudio de riesgos y se adoptan medidas para la minimización de dichos riesgos. (*Rules & Guides.May 2015." Guide for Propulsion and Auxiliary Systems for Gas Fueled Ships ". ABS*). La preferencia de los armadores sobre la colocación será obviamente aquella que menos volumen de carga disminuya y la que menos comprometa su estabilidad.

En LNG se transporta licuado la presión de transporte depende de los tipos de tanques: A,B o C. Actualmente, los tanques más habituales y también los más ineficientes desde el punto de vista de empacho son los tanques C que son cilíndricos (Wärtsila-LNGPac-, ver Anexo 4)⁸. Se trata de tanques cilíndricos que cumplen con los requisitos OMI, los tanques tipo C trabajan a presiones entre 6 y 9 bares.

La disposición general base usada para la generación de buques en el modelo inicial es la del Royal Arctic Line, mostrada en la Figura 12.

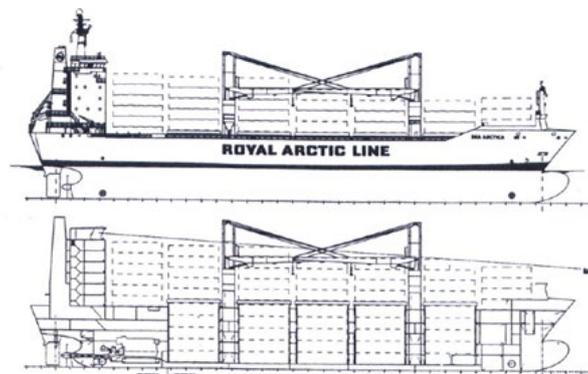


Figura 12. Disposición general base para el modelo inicial

⁷https://www.eagle.org/eagleExternalPortalWEB/ShowProperty/BEA%20Repository/Rules&Guides/Current/181_GasFueledShips/Guide (Accessed January 21)

⁸ <http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/fuel-gas-handling/wartsila-lingpac>

Dadas las distribuciones de contenedores bajo cubierta y sobre cubierta para los buques inicialmente obtenidos, con el objeto de minimizar el impacto sobre la reducción de la capacidad de volumen disponible para carga se instalarán los tanques de LNG en bodega y a proa de Cámara de Máquinas (ver Figura 13 y Figura 14).

Considerando la autonomía esperada para SSS (TVB1 \approx 35 horas y las potencias esperadas) no se esperan necesidades de almacenamiento de LNG por encima de 1000 m³. Tal y como se muestra en la Figura 14, previsiblemente se verá comprometida una bodega de contenedores, a proa de Cámara de máquinas.



Figura 13. Disposición de tanques de gas para propulsión con LNG.

(Fuente: <https://www.wartsila.com/marine/build/gas-solutions/fuel-gas-handling/wartsila-lngpac>)

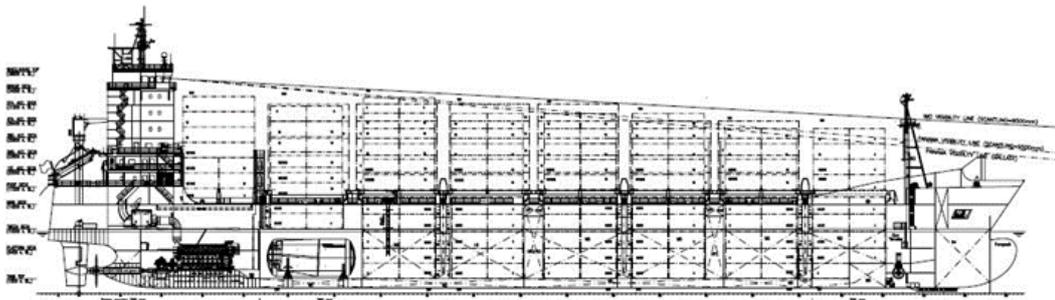


Figura 14. Disposición de tanques LNG aceptada en un buque portacontenedores

El modelo calcula el número necesario de tanques de gas (NT, ver Anexo 1) considerando tanques estándar, de forma que el número de tanques quede reducido a uno o dos (ver anexo 4). El modelo, determina además la eslora necesaria para estibar los tanques (LTK) y el puntal necesario (DTK). Además de la necesaria separación del casco de B/15, la norma exige espacio libre de al menos 0,8 metros sobre los tanques para su correcta manipulación e inspección. Todas estas restricciones junto con las dimensiones estándar de los tanques se han modelizado matemáticamente (ver sección 2 Anexo 3), para conocer el espacio disponible para carga. De la misma forma, considerando el consumo de los motores (DT1), los tanques necesarios (NT) y sus dimensiones (ver Anexo 4), se procede al cálculo del peso adicional y por tanto su impacto en el rosca del buque.

2.2.2 MOTORES CON SCRUBBER ALIMENTADOS CON HFO (TMM₂)

La alternativa propulsiva de motores con scrubber, fundamentalmente inciden en un incremento del peso en rosca y una elevación del centro de gravedad del buque. Para determinar el valor del peso del scrubber se ha considerado la información facilitada por Wartsilä (Sección 3 Anexo 3), de la cual se ha sacado por regresión la relación con la potencia propulsora (PB-ver Figura 15).

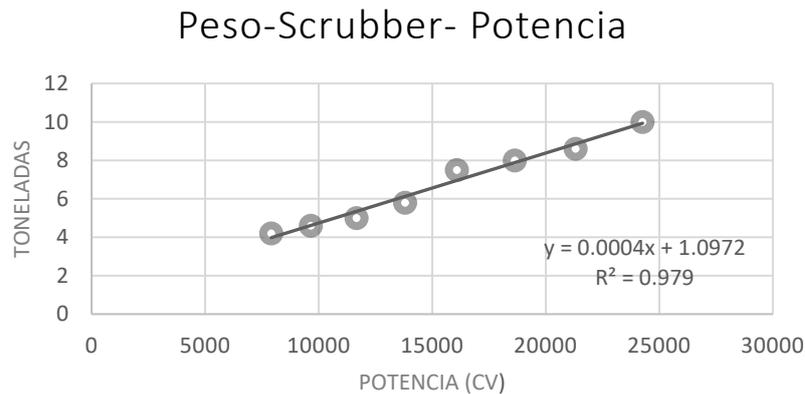


Figura 15. Relación del peso del scrubber frente a la potencia del motor propulsor

3 CASO DE APLICACIÓN

Los principales objetivos de la aplicación del modelo modificado son, por un lado, analizar el rendimiento del nuevo modelo en la búsqueda de soluciones de flota con plantas propulsivas optimizadas para maximizar las oportunidades de éxito de las cadenas intermodales frente a las unimodales considerando la normativa europea actualmente. Por otro lado, es necesario comprobar las ventajas aportadas por el modelo modificado frente al inicial. Para ello, se debe comparar los resultados de la optimización del modelo inicial con los aportados por el modelo final.

Debido a los motivos anteriores, el caso de aplicación seleccionado fue la MoS entre Vigo – St. Nazaire, esto es entre las costas atlánticas de España y Francia (Martínez-López et al., 2015b). Las cadenas intermodales articuladas a través de esta MoS permiten abastecer a ciudades como París, Lille y Rennes con carga procedente de la zona noroeste de España (ver Figura 16) a través de la costa atlántica francesa (y viceversa). Este MoS fue seleccionada, entre otras razones, porque se ha publicado previamente como un ejemplo donde la intermodalidad, que opera con flotas optimizadas obtenidas con el modelo inicial, presenta claras ventajas sobre el transporte por carretera en términos de tiempo y coste (Martínez-López et al., 2015b) debido a la diferencia significativa entre las distancias unimodal e intermodal (Martínez-López et al., 2015c). Además, la evaluación realizada con el modelo inicial sobre sostenibilidad de las cadenas intermodales operando con flotas optimizadas determinaba que la opción intermodal era más sostenible que la alternativa unimodal (Martínez-López et al. 2016) de acuerdo al escenario normativo del 2010. Esto fue así, teniendo en cuenta que el escenario normativo del 2010 implicaba la comparación con los camiones Euro I y que la optimización de las flotas con el modelo inicial no consideraba

ninguna tecnología de mitigación de emisiones (motores Tier II). Esta flota encontrada, junto con los resultados hallados, establecen un interesante punto de partida para comparar no sólo el rendimiento del modelo modificado respecto al inicial, sino también para conocer los efectos de la evolución normativa en los últimos años sobre la sostenibilidad de las cadenas intermodales a través de esta ruta marítima.

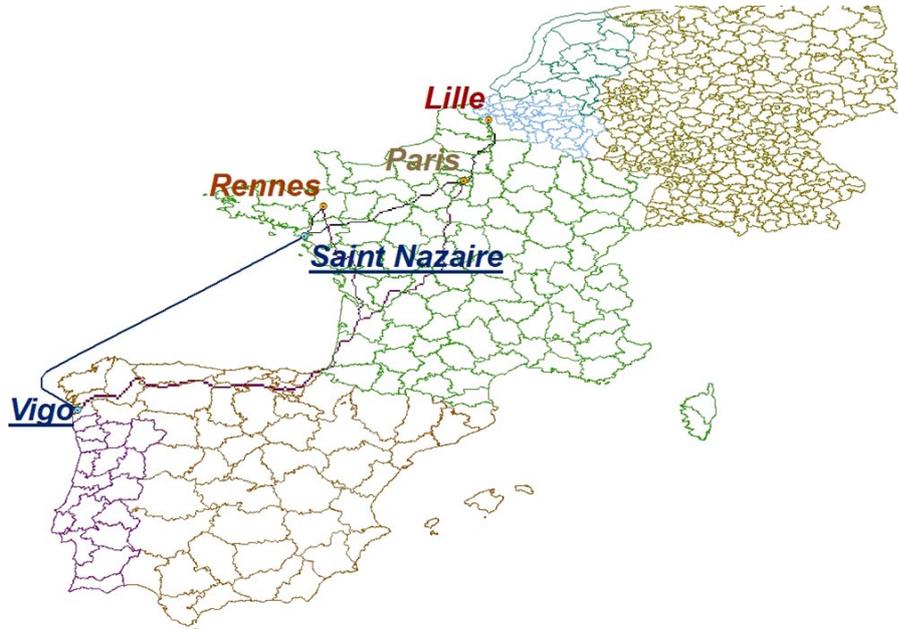


Figura 16. Red de transporte "one to many" asumida para el caso de aplicación

Para la resolución del modelo se ha aplicado el mismo algoritmo evolutivo (EA) que para la resolución del modelo inicial (ver capítulo 4). Las variables independientes (ver Figura 11) constituyen los cromosomas de la población NSGA-II. Durante el proceso evolutivo, estos genes toman valores entre -1.0 y 1.0 , como se requiere cuando se utiliza JEA (Caamaño et al., 2010), el marco de EA utilizado en este trabajo. Para la evaluación de las posibles soluciones, cada cromosoma se decodifica a sus posibles valores. El algoritmo NSGA-II se ha aplicado con los parámetros de configuración que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Configuración de parámetros para el algoritmo NSGA-II

Operator	Parameter	Value
Tournament selection	Pool size	2
SBX-crossover	Probability	5%
Polynomial mutation	Probability	60%
	N	1

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPROBACIÓN DEL RENDIMIENTO DEL MODELO MODIFICADO

Los resultados obtenidos del proceso de optimización para datos relativos al escenario del 2015 que consideran las tres funciones objetivo al mismo tiempo ($F1$, $F2$ y $F3$) se pueden ver en la Figura 17.

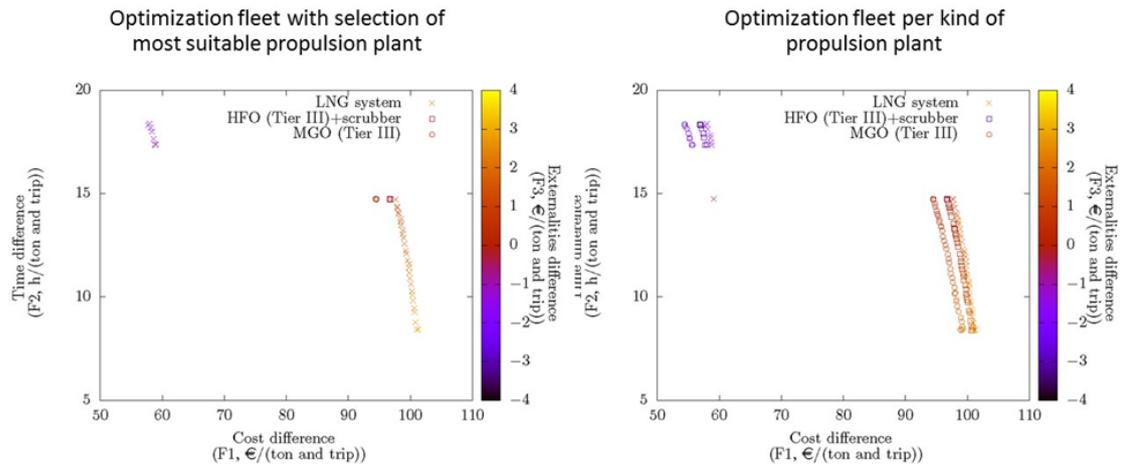


Figura 17. Frentes de Pareto para las flotas de feeder encontradas con el modelo modificado

La parte izquierda de la Figura 17 (figura de la izquierda) muestra el frente de Pareto para optimización libre, esto es con la posibilidad de elegir la planta de propulsión más adecuada entre todas las posibilidades (TMM_1 , TMM_2 y TMM_3) y a la derecha, figura de la derecha, se muestran los frentes de Pareto para procesos de optimización independientes; esto es, un proceso de optimización para cada tipo de planta propulsora.

A pesar del mayor coste de construcción de los buques propulsados a gas, la mayoría de las soluciones obtenidas con la optimización libre de la flota (ver el frente de Pareto izquierdo en la Figura 17) proporcionan buques con plantas propulsoras alimentadas con LNG (las cruces); además, estas soluciones de flota dan como resultado la articulación de las cadenas más sostenibles (el color de las cruces es más cercano al amarillo que los colores del resto de círculos y cuadrados alternativos). Se encontraron muy pocas soluciones operando con HFO (Tier III, esto es, con SCR) y scrubbers (cuadrados) o con MGO (motores Tier III, los círculos), como se puede observar en la parte izquierda de la Figura 17. Estas últimas soluciones generan cadenas intermodales con baja competitividad en términos de costes totales ($F1$) (ver derecha de Figura 17). Las soluciones que utilizan plantas MGO y HFO generan sistemas de transporte que logran resultados muy cercanos entre sí en términos de tiempo invertido ($F2$) (valores coincidentes para estas funciones objetivo; ver parte derecha de Figura 17) pero con diferencias más amplias en términos de coste total ($F1$) y resultados medioambientales ($F3$).

En la Tabla 14 se muestran las soluciones de flota que generan las cadenas intermodales más competitivas en la optimización libre, mostrándose los resultados ordenados con preferencia a los costes totales ($F1$). Por lo tanto, las soluciones que se muestran son las ubicadas a la derecha del eje horizontal en el frente de Pareto (ver la parte izquierda de la Figura 17). Las soluciones de LNG muestran una clara posición preferente en términos de costes ($F1$ y $F3$),

mientras que las plantas de motores a base de combustibles convencionales (TMM_1 y TMM_2) sólo proporcionan resultados interesantes en términos de tiempo (F_2) con el consiguiente aumento de la potencia requerida para propulsión y la consiguiente disminución de la competitividad respecto a la carretera en términos medioambientales.

Esto implica una pérdida de competitividad en términos de sostenibilidad en relación con el transporte por carretera para las cadenas que operan con flotas alimentadas con HFO (ver resultados negativos de F_3 en Tabla 14) y una equivalencia medioambiental con el transporte por carretera para las soluciones con plantas de MGO.

Tabla 14. Comparación de las soluciones de flota obtenidas en la optimización libre con mejores resultados en costes totales

Maritime Route	Vigo–St.Nazaire		
Year	2015	2015	2015
Type of cargo unit	TEUs	TEUs	TEUs
Amount of cargo (G_2)	184 (G_1)	174 (G_1)	174 (G_1)
Vessel speed (Kn)	19.49	25.39	25.39
Age of the vessels	New building	New building	New building
Bow thruster	No (MM_1)	No (MM_1)	No (MM_1)
Cargo handling system	Port cranes (MG_2)	Port cranes (MG_2)	Port cranes (MG_2)
Number of vessels (NB)	3	3	3
Yearly trips (N)	740	740	740
L (m)	77.60	77.37	77.37
B (m)	14.38	14.35	14.35
D to upper deck (m)	7.39	7.38	7.38
GT (Ton)	2417	2404	2404
Type of propeller	Conventional screw (TP_1)	Conventional screw (TP_1)	Conventional screw (TP_1)
Shaft lines	1 (NSL_1)	1 (NSL_1)	1 (NSL_1)
Type of main engine	Dual engine (LNG) (TMM_3)	Tier-III engine+scrubber (HFO) (TMM_2)	Tier-III engine (MGO) (TMM_1)
Objective Functions			
Main engines	1	1	1
PB (kW)	5316	9764	9764
F_1 (€/t and trip)	101.03	96.62	94.38
F_2 (h per trip)	8.48	14.75	14.75
F_3 (€/t and per trip)	2.85	-0.27	0.09

Con el fin de establecer una comparación realista de los comportamientos de las flotas con diferentes plantas propulsivas, se han considerado las optimizaciones independientes por tipo de planta de propulsión (ver Figura 17 a la derecha) analizando los resultados obtenidos por flotas de dimensiones y capacidad de carga similares, pero con diferente propulsión (ver Tabla 15).

Los resultados para los valores F_1 y F_2 que se muestran en la Tabla 15 son muy próximos para todas las soluciones. Sin embargo, los costes ambientales (F_3) asociados a cada alternativa son bastante diferentes (ver Tabla 15). De acuerdo con los resultados obtenidos, los costes de capital de los nuevos buques de construcción (ver costos de PMP de la Tabla 15) son más altos con las plantas de propulsión de LNG (25% más caras que las plantas de propulsión de MGO Tier III) seguidas por Tier III con scrubber operando con HFO (11% más caro que la planta de propulsión Tier III MGO). Prestando atención a los costes de combustible (CT_3), la alternativa que usa HFO presenta la mayor ventaja, seguida por la flota alimentada por LNG (CT_3), de acuerdo a los costes unitarios de combustible considerados (ver Tabla 11), A pesar de que la

alternativa de LNG requiere la mayor inversión (PMP), este coste se equilibra con otras alternativas mediante la reducción de los costes de mantenimiento (CT₂) y la moderación de los costes de consumo de combustible (ver Tabla 15).

Tabla 15. Comparación de las soluciones de flota obtenidas en optimizaciones independientes para flotas similares

Maritime Route	Vigo-St.Nazaire		
Year	2015	2015	2015
Type of cargo unit	TEUs	TEUs	TEUs
Amount of cargo (G₂)	184 (G ₂)	185 (G ₂)	184 (G ₂)
Vessel speed (Kn)	19.49	19.47	19.49
Age of the vessels	New building	New building	New building
Bow thruster	No (MM ₁)	No (MM ₁)	No (MM ₁)
Cargo handling system	Port cranes (MG ₂)	Port cranes (MG ₂)	Port cranes (MG ₂)
Number of vessels (NB)	3	3	3
Yearly trips (N)	740	740	740
L (m)	77.60	77.37	78.15
B (m)	14.38	14.35	14.46
D to upper deck (m)	7.39	7.38	7.41
GT (Ton)	2417	2402	2456
Type of propeller	Conventional screw (TP ₁)	Conventional screw (TP ₁)	Conventional screw (TP ₁)
Shaft lines	1 (NSL ₁)	1 (NSL ₁)	1 (NSL ₁)
Type of main engine	Dual engine (LNG) (TMM ₃)	Tier-III engine+scrubber (HFO) (TMM ₂)	Tier-III engine (MGO) (TMM ₁)
Main engines	1	1	1
PB (kW)	5316	5280	5421
Objective Functions			
F₁ (€/t per trip)	101.03	100.52	98.97
F₂ (h per trip)	8.48	8.42	8.39
F₃ (€/t per trip)	2.85	1.90	2.15
Costs (€)			
Propulsion plant cost (PMP)(€)	3,667,746 ⁹	2,435,671	1,318,239
Yearly maintenance (CT₂) costs (€)	79,399	294,918	265,521
Yearly combustible (CT₃) costs(€)	4,641,706	3,960,871	7,578,338
Yearly pollutant costs due to the shipping stage for the fleet (€)			
NO_x	321.252	589.682	602.530
SO₂	0	70.651	129.033
PM_{2,5}	18.251	322.236	166.339
CO₂	4.016.963	6.068.819	5.831.969
CH₄	1.159.433	8.760	8.951

⁹Este valor incluye el coste del sistema de tanques de gas

Aunque las alternativas de motor a base de combustibles convencionales presentan resultados bastante cercanos a la alternativa con LNG en términos de coste (F1), la ventaja medioambiental (F3) es favorable significativamente para el sistema con LNG (Tabla 15). La alternativa de flota con LNG (TMM₃) produce durante el transporte marítimo costes medioambientales (ver Expresión 17) de RE₃ = 3.27 € / t y viaje, y para la alternativa con plantas de motores a base de combustible convencional, RE₃ = 4.22 € / t y viaje para motores Tier III con scrubber (TMM₂) y RE₃ = 3,97 € / t y viaje para motores Tier III alimentados con MGO (TMM₁).

A partir de los datos de la Tabla 15, pueden analizarse los costes por contaminante durante la condición de navegación libre (de hecho, es esta condición de navegación la más relevante aportando más del 95% de los costes medioambientales totales durante el tramo marítimo). El motor a base de gas ofrece costes más bajos para todos los contaminantes excepto para el CH₄ (como se esperaba). Aceptando un contenido de azufre de 2.7% para HFO y 0.1% para MGO y capacidades de reducción de 98% para emisiones de SO₂ y 55% para emisiones de PM_{2,5} con el scrubber (Panasiuk y Turkina, 2015), las emisiones de SO₂ son menores con flotas con motor Tier-III con scrubber usando HFO (TMM₂) que para motores Tier III usando MGO (TMM₁), mientras que ocurre lo contrario con las emisiones de PM_{2,5} y CO₂ (ver Tabla 15). Finalmente, las emisiones de NO_x son prácticamente equivalentes para ambas alternativas de motores a base de combustible convencional (motores Tier III).

De esta forma, desde el punto de vista medioambiental (valores RE₃, ver expresión 17), incluso cuando se evalúan las emisiones de metano, la alternativa de flota con motor de gas (TMM₃) resulta ser la planta de propulsión más competitiva, seguida de la flota con motor MGO Tier III (TMM₁) y finalmente el motor HFO Tier III con scrubber (TMM₂). Asimismo, considerando una perspectiva más amplia que incluya los costes de capital y operativos para el transporte marítimo en cadena intermodal (F1), la flota con planta de propulsión de LNG (TMM₃) resulta ser la opción más competitiva por el equilibrio entre costes de combustible, costos de mantenimiento, y los costos de capital de la planta de propulsión y su equipo. La segunda opción en términos de costes totales (F1) es el motor HFO Tier III con scrubber (TMM₂) y la última es el motor MGO Tier III (TMM₁), debido a sus altos costes de combustible.

Es interesante resaltar que, de acuerdo con los resultados obtenidos, la instalación de los tanques de gas tiene una influencia limitada en la reducción de la capacidad de carga de los buques. Los buques obtenidos en la optimización sólo necesitan un tanque estándar para hacer frente a la autonomía requerida. La disposición asumida de los tanques, a proa de cámara de máquinas, reduce el espacio disponible en la bodega, pero aplicando la reglamentación, es posible la disposición de una fila de contenedores sobre los tanques y bajo cubierta principal. De hecho, esta pérdida de capacidad de carga disponible podría ser incluso menor si se utilizaran tanques fabricados ad-hoc en lugar de tanques estándar (alrededor de 54 m³ de capacidad necesaria frente a los 100 m³ del menor tanque de gas estándar disponible; LNGPac-105, ver Sección 2 Anexo 3).

Si bien los resultados obtenidos han demostrado que el modelo adaptado es viable para ofrecer soluciones útiles en aplicación a casos reales, es interesante conocer la robustez de los resultados alcanzados para este caso de aplicación. Así, considerando que los resultados alcanzados están fuertemente determinados por las condiciones del escenario de estudio y especialmente por los precios de los combustibles (ver Tabla 11) están lejos de ser concluyentes en cuanto a la selección de la planta de propulsión más adecuada para buques

feeder operando en condiciones de MoS. Con el fin de cuantificar el riesgo asumido al tomar la decisión sobre la planta propulsora más adecuada en base a ellos, se ha realizado un análisis de sensibilidad, donde el precio del LNG se modificó hasta en un 20% de su valor base (ver Tabla 11) manteniendo constante el resto de los precios de los combustibles. Sólo cuando el precio del LNG alcanza el 120% de su precio actual (ver Figura 18), las soluciones encontradas con combustible HFO (TMM₂) articulan cadenas que alcanzan el mismo nivel de competitividad en costes (F1) que las cadenas operadas con flotas que utilizan el sistema de LNG (ver Figura 18). No obstante, estos últimos (TMM₃) conservan una ventaja significativa en términos de costes medioambientales (F3) con respecto a las flotas con plantas de propulsión de HFO con scrubber (ver el color de las soluciones en la Figura 18).

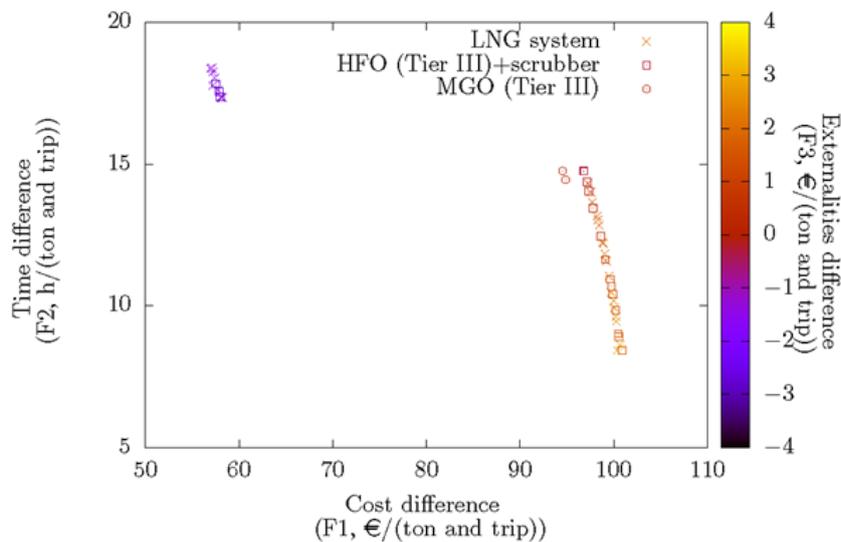


Figura 18. Frente de Pareto obtenido para optimización libre cuando el precio del LNG alcanza el 120% del valor base.

4.2 CAPACIDAD DEL MODELO MODIFICADO FRENTE AL MODELO INICIAL

Los buques propuestos por el modelo modificado considerando los datos de 2015 (ver Figura 17) se encuentran en los siguientes rangos de eslora (L), capacidad de carga de la embarcación (NC-número de TEU) y velocidad de los buques (VB), respectivamente: $77 \leq L \leq 89$ m; $173 \leq NC \leq 238$ TEU; $19.4 \leq VB \leq 27.7$ nudos. En comparación con la optimización realizada con datos del 2010 en la misma ruta con el modelo inicial (Martínez-López et al., 2016), es decir, asumiendo buques con motores Tier II (propulsión MGO) y camiones Euro I, los resultados del modelo modificado ofrecen buques ligeramente más grandes y más rápidos, y en términos de competitividad, sus valores de F1 son más amplios, sus valores de F2 son prácticamente los mismos y sus valores F3 son más bajos, como se esperaba. Es decir, si bien el modelo modificado ofrece mayores capacidades que el inicial, aportando la planta de propulsión más adecuada para los buques desde el punto de vista medioambiental y de inversión, la reducción de las emisiones contaminantes de la tecnología Euro I a Euro VI para los camiones supera a la mejora medioambiental que ofrece la tecnología naval (sistemas de mitigación y combustibles alternativos).

La Tabla 16 muestra las flotas optimizadas para los datos del 2015 con la selección de la planta de propulsión óptima (modelo modificado) y para los datos del 2010 asumiendo una planta de propulsión fija en el proceso de optimización (modelo inicial). Ambas soluciones corresponden a soluciones que maximizan el valor F3 entre las soluciones mostradas en los frentes de Pareto (ver Figura 17: para la optimización con valores de 2015).

Tabla 16. Comparación de soluciones de flota obtenidas por el modelo inicial (2010) y el modificado (2015)

Route	Vigo–St.Nazaire	
Year	2010	2015
Type of cargo unit	TEUs	TEUs
Amount of cargo (G₂)	210 (G ₁)	189 (G ₁)
Vessel speed (Kn)	19.19	19.81
Age of the vessels	New building	New building
Bow thruster	No (MM ₁)	No (MM ₂)
Cargo handling system	Port cranes (MG ₂)	Port cranes (MG ₂)
Number of vessels (NB)	3	3
Yearly trips (N)	740	740
L (m)	82.04	79.77
B (m)	15.00	14.68
D to upper deck (m)	7.59	7.48
GT (t)	2743	2489
Type of propeller	Conventional screw	Conventional screw (TP ₁)
Shaft lines	1	1 (NSL ₁)
Type of main engine	Tier-II. Diesel engine (MGO) (TMM ₁)	Dual engine (LNG) (TMM ₃)
Main engines	1	1
PB (kW)	5942	5573
Objective Functions		
F₁ (€/t per trip)	71.77	101.31
F₂ (h per trip)	8.40	8.44
F₃ (€/t per trip)	3.98	2.85

Nota: Se ha empleado el modelo inicial para la obtención de la flota de acuerdo con el marco normativo del 2010 (Martínez-López et al. ,2016)

Prestando atención al rendimiento de la flota optimizada que opera en la misma ruta (ver Tabla 16), pero optimizada para escenarios temporales diferentes, con un motor Tier II (MGO) en 2010 y con un motor de LNG en 2015 (la planta más sostenible), los resultados en términos de costes medioambientales para el tramo marítimo de las cadenas intermodales cubiertas por las son: RE3 = 3.12 € / t y viaje en 2010 y RE3 = 3.27 € / t y viaje en 2015. Por lo tanto, estos costes se incrementaron ligeramente a pesar de la reducción de las emisiones contaminantes de la flota en el 2015, esto se debió principalmente al incremento de los costes unitarios de los contaminantes (4.5% para el IPC en España y 5% en Francia de 2010 a 2015). Paralelamente, los costes medioambientales del transporte por carretera (el sistema de transporte alternativo) con camiones Euro I fueron RE = 10.69 € / t y viaje en 2010 y RE = 8.47 € / t y viaje en 2015 (una reducción del 21%), a pesar de que los costes de los contaminantes fueron más altos en 2015 que en 2010.

Consecuentemente, en los últimos años la evolución de la sostenibilidad de los sistemas de transporte a través de soluciones técnicas ha sido más favorable para el transporte terrestre que para el marítimo. Así, si bien el valor de F3 se mantiene positivo, y esto implica una ventaja favorable a la intermodalidad en términos de costes medioambientales, los resultados obtenidos confirman las consecuencias negativas de la desigualdad en el tratamiento normativo medioambiental del transporte terrestre en comparación con el transporte marítimo en la UE.

Por tanto, la necesidad de la modificación del modelo inicial está plenamente justificada, ya que ofrece una mayor capacidad para incrementar las posibilidades competitivas de la intermodalidad en escenarios normativos adversos. El modelo inicial, no sería capaz de ofrecer soluciones competitivas en términos medioambientales al transporte unimodal dado el marco normativo del 2015.

La diferencia significativa entre los resultados para el valor F1 obtenidos a partir de los datos de 2010 y de 2015 (ver Tabla 16) también es notable. La razón principal es la disminución del precio de los combustibles marinos y el aumento de los costes unitarios del transporte por carretera; el precio de MGO en 2010 aumentó hasta 0.89¹⁰ €/l en comparación con los valores de los combustibles en 2015 (ver Tabla 11). Por tanto, a pesar del incremento de los otros costes a lo largo del tiempo (coste de construcción o costes de tripulación, por ejemplo), los costes intermodales de la CMU (ver Anexo 1) fueron superiores en 2010 (una diferencia de 4.79 €/t y viaje para las flotas mostradas en la Tabla 16). Lo contrario ocurre con los costes unimodales (CU). La reducción de las emisiones de los camiones y sus costes medioambientales en 2015 (RE, que también están considerados en los costes unimodales totales) no fue suficiente para motivar una disminución de los costes totales en la unimodalidad a lo largo del tiempo, debido principalmente al aumento de los costes unitarios del transporte en camiones HDV-N3 (0.99 €/km en 2010 y 1.2 €/km en 2015; Observatorio de Costes de Transporte de Mercancías por Carretera, Ministerio de Fomento de España): CU = 137.51 €/t y viaje en 2010 y CU = 162.19 €/t y viaje en 2015.

5 CONCLUSIONES

Dada la desigual evolución de la normativa medioambiental de la UE con respecto a los niveles máximos permitidos de emisiones para los medios de transporte, existe un creciente debate en la comunidad científica sobre si el transporte marítimo de corta distancia integrado en cadenas intermodales sigue siendo el sistema de transporte más sostenible para el transporte puerta a puerta en el marco regulador actual. Teniendo en cuenta que no existe unidad de criterio respecto a qué tecnología marina existente es la más adecuada para enfrentar los próximos desafíos medioambientales, el debate tiene especial pertinencia.

Dada la realidad anterior, el modelo inicialmente planteado (ver capítulo 3) resulta insuficiente como herramienta para la toma de decisiones ya que no se planea la elección de ningún sistema de mitigación de emisiones para los buques. Con el fin de aportar información sobre este aspecto, este trabajo introduce una modificación del modelo matemático inicial

¹⁰ <http://www.bunkerindex.com> (December, 2010)

dotándolo de capacidad para calcular no sólo los costes medioambientales asociados al transporte por carretera en el marco normativo actual de la UE, sino también los costes medioambientales del transporte marítimo cuando diferentes opciones de mitigación son contempladas.

Así, durante el proceso de optimización, se evalúan las siguientes soluciones técnicas existentes para la propulsión de los buques compatibles en términos de emisiones con la normativa marítima actualmente más exigente (zonas ECA): motor de cuatro tiempos-Tier-III que funciona con MGO (TMM₁), un motor de cuatro tiempos Tier III con scrubber que se alimenta con HFO (TMM₂) y un motor dual de cuatro tiempos que funciona con LNG (TMM₃). El análisis de estas alternativas ha supuesto la modificación del modelo inicial para contemplar los nuevos costes de inversión, consecuencias en la reducción de la capacidad de carga, costes de mantenimiento y costes de combustible. Igualmente, el nuevo marco normativo en el transporte terrestre ha forzado a una modificación del método empleado para la cuantificación de los costes medioambientales en el modelo matemático. Como consecuencia de las alternativas propulsivas analizadas, las emisiones consideradas para el análisis se han ampliado a: NO_x, SO₂, PM_{2.5}, CO₂ y CH₄.

La aplicación de este modelo modificado a un caso real: la autopista del mar entre Vigo-St. Nazaire, ha permitido verificar el rendimiento del modelo y su utilidad. Pero además ha permitido extraer conclusiones más allá de la comprobación de la viabilidad del modelo:

- Los resultados obtenidos muestran que las flotas más adecuadas son las formadas por embarcaciones pequeñas y rápidas (como se esperaba) con plantas propulsoras de LNG. Solo las cadenas intermodales que operan con estas soluciones de flotas brindan una clara ventaja ambiental frente a la alternativa vial. A pesar de que se encontraron soluciones de flotas con otras plantas propulsivas, las cadenas intermodales operadas con estas soluciones resultan ser menos competitivas en costes totales que las cadenas operadas con flotas optimizadas que operan con LNG.
- Del análisis de la competitividad de las cadenas cubiertas por una misma flota (tamaño y características operativas similares) pero con diferentes plantas de propulsión, se concluyó que los mejores resultados medioambientales los obtuvieron las flotas con motores duales, seguidas de los motores operando con MGO y finalmente con HFO y scrubber. Asimismo, los mejores resultados de competitividad global se alcanzaron, nuevamente, a través de buques con propulsión a LNG seguidos de aquellos con motores con scrubber alimentados con HFO y finalmente motores con MGO.
- Estos resultados favorables para la propulsión con LNG, se obtuvieron a pesar de la reducción de la capacidad de carga disponible por la instalación de los tanques de LNG y su elevado coste de inversión.
- Dada la influencia del coste unitario de los combustibles en los resultados obtenidos, se ha realizado un análisis de sensibilidad para comprobar la robustez de las conclusiones anteriores. Se ha encontrado que sólo cuando el coste unitario del LNG se incrementa un 20% sobre el precio base en el precio del GNL (mientras el resto de los precios de los otros combustibles se mantienen constantes), existen soluciones de flota con motores Tier III con scrubber y HFO que articulan cadenas intermodales equivalentes en términos de costes totales que las operadas por flotas con LNG. Sin embargo, su ventaja medioambiental sigue siendo más pequeña que la ofrecida mediante propulsión con LNG.

Finalmente, con objeto de valorar las ventajas ofrecidas por el modelo modificado frente al inicial, se realizó una comparación de las soluciones obtenidas para la misma red de transporte con el modelo inicial (marco normativo del 2010), es decir, con el supuesto de motores Tier-II MGO para el buques y tecnología Euro I para camiones en comparación con la flota optimizada para el marco de 2015 con libre selección de la planta de propulsión. Los resultados muestran que sólo el modelo modificado es capaz de ofrecer soluciones de flota capaz de ofrecer cadenas intermodales competitivas al camión en el marco normativo del 2015.

Más allá del testeo del modelo, los resultados muestran una clara reducción de la ventaja medioambiental para la cadena intermodal en 2015 respecto a 2010. La optimización de la elección de la planta de propulsión en los buques, con la correspondiente reducción de las emisiones contaminantes (motor dual GNL frente a MGO Tier II) en el transporte marítimo no es suficiente para compensar la reducción en las emisiones de los camiones dada por la evolución normativa europea: tecnología Euro I a Euro VI.

Por lo tanto, aunque las cadenas intermodales cubiertas por flotas de buques optimizados siguen siendo competitivas en términos medioambientales en el marco normativo actual frente a la alternativa unimodal (Culliane y Culliane 2013; Hjelle, 2014), esta ventaja se ha visto reducida en los últimos años por la diferencia significativa en la evolución de los niveles de emisión permitidos para el transporte terrestre y el marítimo en la UE.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 6

Viabilidad técnica de la flota optimizada en términos de estabilidad

1 INTRODUCCIÓN

El objeto de este capítulo es verificar que el buque obtenido en el Capítulo 5 en aplicación del modelo matemático en cuestión, al que llamaremos buque óptimo, cumple con los criterios establecidos y de obligado cumplimiento del Código Internacional de Estabilidad sin avería, 2008 (Código IS 2008), adoptado el 4 de diciembre de 2008 mediante Resolución MSC 267(85).

El presente Código contiene criterios de estabilidad que serán de aplicación para buques portacontenedores de eslora igual o superior a 24 metros. A efectos del presente código un buque portacontenedores es un buque dedicado principalmente al transporte de contenedores marítimos.

En este capítulo definiremos el peso en rosca, el desplazamiento, el centro de gravedad del buque, así como sus condiciones de carga. Datos necesarios para realizar los ensayos de estabilidad y verificar la viabilidad del buque optimizado. Y en caso necesario tomar soluciones técnicas, respetando las formas, dimensiones principales y capacidades del buque, con objeto de hacer viable el modelo desde el punto de vista de la estabilidad.

El peso en rosca y el desplazamiento son calculados mediante el modelo matemático de optimización de nuestro buque óptimo. Estos valores son una primera aproximación que afinaremos su precisión con un cálculo desagregado, con objeto de definir con mayor exactitud el centro de gravedad (cdg) de los diferentes pesos del buque.

Mediante el software naval Maxsurf (Modeler y Stability), diseñaremos la Carena, definiremos sus formas, respetando las medidas principales de nuestro buque óptimo (L, B, D, T y Cb) y verificaremos el cumplimiento de los diferentes criterios de estabilidad de aplicación a nuestro tipo de buque.

2 DEFINICIÓN DEL COMPARTIMENTADO

2.1 COMPARTIMENTADO DEL BUQUE ÓPTIMO.

En el capítulo 5 hemos obtenido mediante el modelo matemático de optimización las dimensiones y características principales de nuestro buque óptimo que definimos en la siguiente tabla:

Tabla 17. Dimensiones y características principales de nuestro buque óptimo

Ruta	Vigo- St. Nazaire
Año	2015
Unidad de Carga	TEUs
Capacidad de carga (G₂)	184 (G ₂)
Velocidad del Buque (Kn)	19.49
Antigüedad de los buques	Nueva Construcción
Bow thruster	No (MM ₁)
Sistema de carga-Descarga	Grúas de Puerto (MG ₂)
Número de Buques (NB)	3
Viajes por año (N)	740
L (m)	77.60
B (m)	14.38
D Sobre cubierta (m)	7.39
GT (t)	2417
Tipo de hélice	Hélice convencional (TP ₁)
Nº Líneas de ejes	1 (NSL ₁)
Tipo motor principal	Motor Dual (LNG (TMM ₃))
Nº Motores Principales	1
Potencia Instalada (PB)	5316 kW

En la sección 1 del Anexo 4 reflejamos la tabla, con los valores de las dimensiones principales y auxiliares de nuestro buque óptimo, obtenidas mediante el modelo matemático, necesarias para realizar el modelado de la carena y compartimentado de dicho buque.

Mediante el software Maxsurf Modeler, realizamos un modelo 3D de la carena del buque óptimo (ver Figura 19):

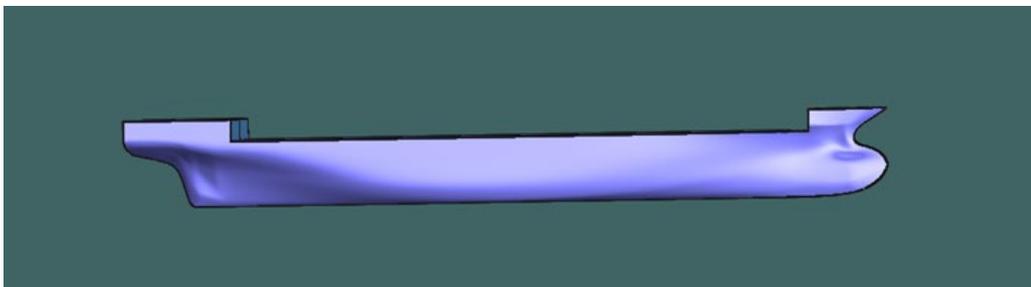


Figura 19. Carena en 3D del buque optimo

Respetando las dimensiones y características de las formas base del buque, definidas en la tabla de la sección 1 del Anexo 4.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

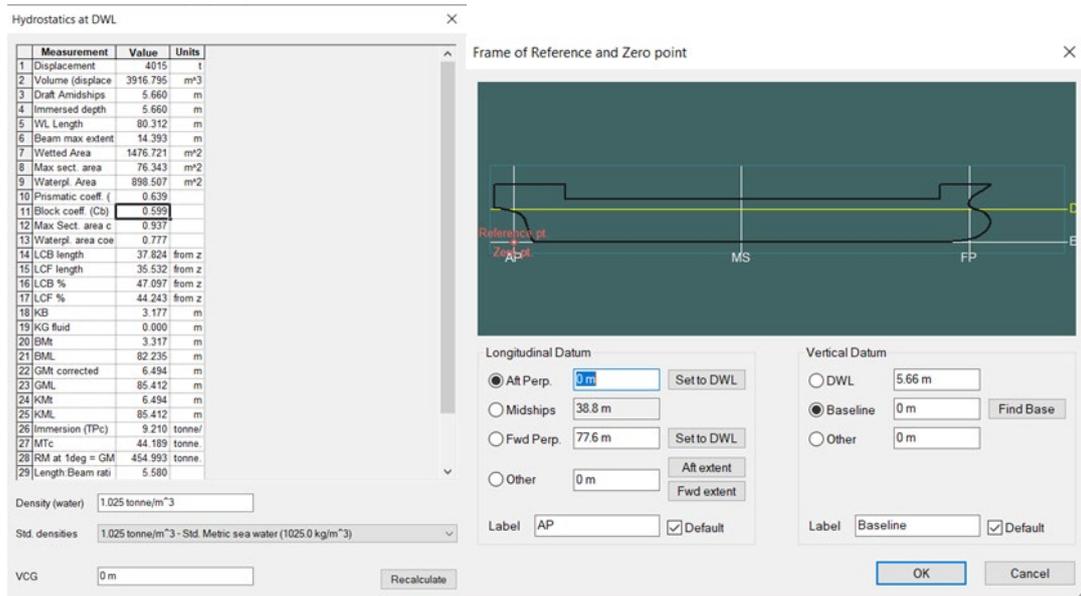


Figura 20. Cálculos Hidrostáticas para el calado de diseño y puntos de referencia de la carena del buque óptimo

Como queda reflejado en la Figura 20, y reflejamos en la siguiente tabla, las dimensiones principales: eslora entre perpendiculares (77.6 m), manga (14.38m) y calado (5.66m) de la carena modelada coinciden al 100 % con las de nuestro modelo óptimo. Y en referencia al coeficiente de bloque de la carena modelada Cb (0.599), tenemos un ajuste del 6% con respecto al coeficiente de bloque en el modelo matemático de optimización (0.565).

Tabla 18. Resumen comparativo de las dimensiones del modelo matemático y el buque óptimo

	Modelo Matemático de Optimización	Buque Óptimo
Eslora entre perpendiculares (L)	77.6 m	77.6 m
Manga (B)	14.38 m	14.35 m
Calado (T)	5.66 m	5.66 m
Coefficiente de Bloque (Cb)	0.565	0.599

Una vez definida la carena de nuestro buque óptimo, respetando las dimensiones principales de eslora, manga, puntal, calado y coeficiente de bloque, obtenidas en nuestro modelo matemático de optimización, procedemos a realizar el compartimentado del buque óptimo, siguiendo las dimensiones reflejadas en la tabla de la sección 1 del Anexo 4, de dicho modelo matemático de optimización. Dándonos las medidas y dimensiones de:

- Doble casco
- Doble fondo
- Eslora de cámara de máquinas
- Eslora de tanque LNG
- Retranqueos de dicho tanque con mamparos de cámara de tanque y plan de bodega.
- Posición del mamparo del pique de proa

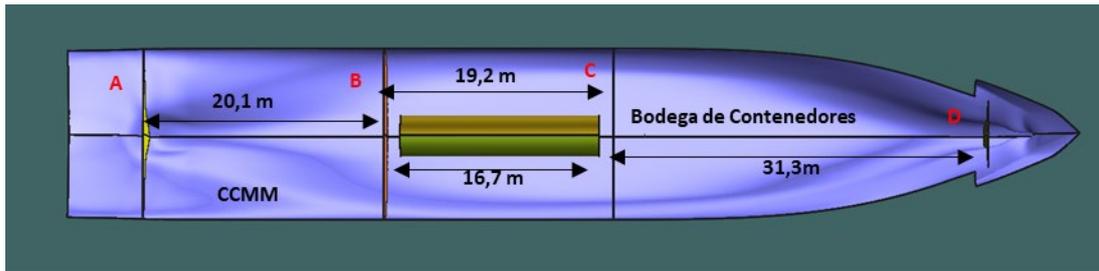


Figura 21. . Cotas de Cámara de Máquinas, Cámara de Tanque LNG y Bodega de contenedores del Buque óptimo

En la Figura 21 podemos ver la posición de los mamparos de proa (A) y popa (B) de cámara de máquinas, el mamparo de proa (C) de cámara de tanque LNG y el mamparo del pique de proa (D). Así como las dimensiones longitudinales de los diferentes compartimentos del buque, según las medidas obtenidas en el modelo matemático de optimización (Anexo 4, sección 1).

Mediante el software Maxsurf Stability, procedemos a definir en nuestra carena 3D, los diferentes compartimentos, el doble fondo, el doble casco, así como los tanques de consumo y almacén del buque óptimo.

Primeramente, definiremos los tanques de consumo y almacén necesarios para nuestro buque, así como su autonomía y consumo, para poder dimensionarlos y posteriormente ubicarlos en el buque.

Los tanques definidos y que calcularemos sus capacidades son:

- Tanque de LNG.
- Tanque de Diesel Marino (MDO)
- Tanque de agua potable
- Tanque de agua técnica
- Tanque de Aceites
- Tanque de Lodos

Nuestro buque tendrá una autonomía que cubrirá la distancia de ida y vuelta de los puertos de su ruta “Vigo-St. Nazaire”, que definiremos en 988 millas y daremos un margen para las maniobras (k) que estipularemos en 3 horas. Con una velocidad de servicio de 19.49 Kn. El tiempo que podrá navegar sin repostar será:

$$t_{navegación} = \frac{Autonomía}{Velocidad} + k = \frac{988 \text{ millas}}{19.49 \text{ Kn}} + 3 \cong 54 \text{ horas} \quad (49)$$

Una vez calculado el tiempo de servicio sin repostar, pasamos a dimensionar la capacidad de sus tanques de consumo definidos anteriormente:

-Tanque de LNG.

Viene definido en el modelo matemático, por lo que nuestro buque óptimo tendrá un tanque de LNG, de 100 m³, con una eslora de 16.7 m y un diámetro de 3.5 m.

-Tanques de Diésel Marino (MDO).

Debemos definir el consumo del Motor Principal (MMPP) y de los Motores Auxiliares (MMAA).

El motor principal (MMPP) es un motor dual de consumo principal de LNG, pero el fabricante indica que tiene un consumo residual de MDO de 3.9 g/kWh., para mantener la válvula piloto mientras está quemando LNG. La potencia propulsora calculada es de 5316 kW, según modelo matemático, para nuestro buque óptimo:

$$\text{Consumo MDO}_{MMPP} = \text{tiempo}_{nav.} \times C_e \times \text{Potencia}_{MMPP} \quad (50)$$

$$\text{Consumo MDO}_{MMPP} = 54 \times 3.9 \times 5316 = 1119.6 \text{ kg} = 1.12 \text{ t} \quad (51)$$

$$\text{Volumen MDO}_{MMPP} = \frac{\text{Consumo}_{MDO}}{\text{Densidad}_{MDO}} = \frac{1.12 \text{ ton}}{0.840 \text{ ton/m}^3} = 1.33 \text{ m}^3 \quad (52)$$

Los motores auxiliares (MMAA) según fabricante tienen un consumo de 210 gr/Kwh, y se estima una potencia para cubrir la demanda de energía eléctrica de 1050 Kw, para nuestro buque óptimo, tomándose como referencia buques de similares características:

$$\text{Consumo MDO}_{MMAA} = \text{tiempo}_{nav.} \times C_e \times \text{Potencia}_{MMAA} \quad (53)$$

$$\text{Consumo MDO}_{MMAA} = 54 \times 210 \times 1050 = 11907 \text{ kg} \cong 12 \text{ t} \quad (54)$$

$$\text{Volumen MDO}_{MMAA} = \frac{\text{Consumo}_{MDO}}{\text{Densidad}_{MDO}} = \frac{12 \text{ ton}}{0.840 \text{ ton/m}^3} \cong 14.3 \text{ m}^3 \quad (55)$$

Definiremos un tanque de MDO almacén que tenga la capacidad suficiente para almacenar el MDO del MMPP y del MDO de los MMAA. Teniendo una capacidad de 15.63 m³.

Definiremos también un tanque de uso diario de MDO, que tendrá la capacidad suficiente para almacenar 24 horas de consumo de combustible, debido al poco consumo de MDO del MMPP, este tanque de uso diario suministrará tanto a motores auxiliares como a motor principal. Su capacidad será de:

$$\text{Consumo MDO}_{Diario} = \text{MDO}_{MMPP \text{ Diario}} + \text{MDO}_{MMAA \text{ Diario}} \quad (56)$$

$$\text{Consumo MDO}_{Diario} = (24 \times 3.9 \times 5316) + (24 \times 210 \times 1050) \quad (57)$$

$$\text{Consumo MDO}_{Diario} = 0.498 + 5.23 = 5.73 \text{ ton} \quad (58)$$

$$\text{Volumen MDO}_{Diario} = \frac{\text{Consumo}_{MDO \text{ Diario}}}{\text{Densidad}_{MDO}} = \frac{5.73 \text{ ton}}{0.840 \text{ ton/m}^3} \cong 6.83 \text{ m}^3 \quad (2)$$

-Tanque de agua potable.

Según la Norma UNE-EN ISO 15748-2, para calcular la capacidad necesaria del tanque de agua potable, se deberá tener en cuenta el número de tripulantes, la autonomía, y un consumo de 175 litros por persona y día:

$$\text{Consumo Agua}_{potable} = n^{\circ} \text{ tripulantes} \times \text{tiempo de nav.} \times 175 \frac{\text{litros}}{\text{persona. día}} \quad (60)$$

$$\text{Consumo Agua}_{potable} = 16 \times 2.25 \times 175 = 6300 \text{ litros} \quad (3)$$

$$\text{Volumen Agua}_{potable} = \frac{\text{Consumo}_{\text{Agua potable}}}{\text{Densidad}_{\text{agua}}} = \frac{6300 \text{ litros}}{1000 \text{ litros/m}^3} = 6.3 \text{ m}^3 \quad (4)$$

-Tanque de agua técnica.

El agua técnica que se usará para la refrigeración de MMPP y MMAA. Se opta por seguir el valor de referencia (0,0188 kg/kWh), realizando un cálculo aproximado, en función de la potencia instalada:

$$\text{Consumo Agua}_{técnica} = \text{tiempo}_{nav.} \times C_e \times \text{Potencia}_{\text{instalada}} \quad (63)$$

$$\text{Consumo Agua}_{técnica} = 54 \text{ horas} \times 0.0188 \frac{\text{kg}}{\text{Kw.h}} \times 6366 \text{ Kw} = 6500 \text{ kg} \quad (64)$$

$$\text{Volumen Agua}_{técnica} = \frac{\text{Consumo}_{\text{Agua técnica}}}{\text{Densidad}_{\text{técnica}}} = \frac{6500 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 6.5 \text{ m}^3 \quad (5)$$

-Tanque de Aceite.

Obtenemos el consumo específico de aceite de lubricación de los catálogos de fabricantes de motores marinos, tomando como referencia un consumo medio de 0.4 g/kWh. En función de la autonomía y potencia instalada obtendremos el volumen de aceite necesario (calculamos sólo el consumo del MMPP, los motores auxiliares portan su propio tanque en su bloque motor).

$$\text{Consumo Aceite} = \text{tiempo}_{nav.} \times C_e \times \text{Potencia}_{\text{instalada}} \quad (6)$$

$$\text{Consumo Aceite} = 54 \text{ horas} \times 0.4 \frac{\text{g}}{\text{Kw.h}} \times 5316 \text{ Kw} \cong 115 \text{ kg} \quad (7)$$

$$\text{Volumen Aceite} = \frac{\text{Consumo}_{\text{Aceite}}}{\text{Densidad}_{\text{Aceite}}} = \frac{115 \text{ kg}}{900 \text{ kg/m}^3} \cong 0.13 \text{ m}^3 \quad (68)$$

-Tanque de lodos.

El tanque de lodos se dimensiona de acuerdo con el convenio MARPOL. En el Anexo 1, Regla 12.1 se indica, de manera orientativa la capacidad de dichos tanques de lodos.

Para el dimensionamiento y cálculo tomaremos la fórmula recomendada por MARPOL:

$$\text{Volumen Lodos} = K_1 \times C \times D = 0.005 \times 6.83 \times 2.25 \cong 0.075 \text{ m}^3 \quad (69)$$

Donde:

K₁: Coeficiente igual a 0,005 para buques en los que utilicen diésel-oil para maquinaria principal.

C: Consumo diario de diésel-oil (m³).

D: Duración máxima del viaje entre puertos en los que puede descargarse fangos en tierra (días).

En la siguiente tabla reseñamos las capacidades de los tanques calculados:

Tabla 19. Tabla resumen de capacidades de Tanques calculados

TANQUES	CAPACIDAD (m ³)
Tanque LNG	100
Tanque MDO Almacén	15.63
Tanque MDO Diario	6.83
Tanque Agua Potable	6.3
Tanque Agua Técnica	6.5
Tanque de Aceite	0.13
Tanque de Lodos	0.075

Conocida la capacidad de los tanques de consumo, así como las medidas de la manga del doble casco y puntal del doble fondo, calculados por el modelo matemático para nuestro buque óptimo. Introduciremos en el programa Maxsurf Stability las dimensiones de los tanques su posición y definiremos el doble fondo y el doble casco del buque óptimo, modelando el compartimentado interior del buque. La dimensiones y posición las introduciremos mediante la ventana "Room definition" definida en la sección 2 del Anexo 4.

En la Figura 22 y Figura 23 podremos ver cómo queda configurado los diferentes tanques de consumo, el doble casco, el doble fondo y el compartimentado del casco del buque. Pudiendo observar los espacios libres en el casco para el estibado de los contenedores.

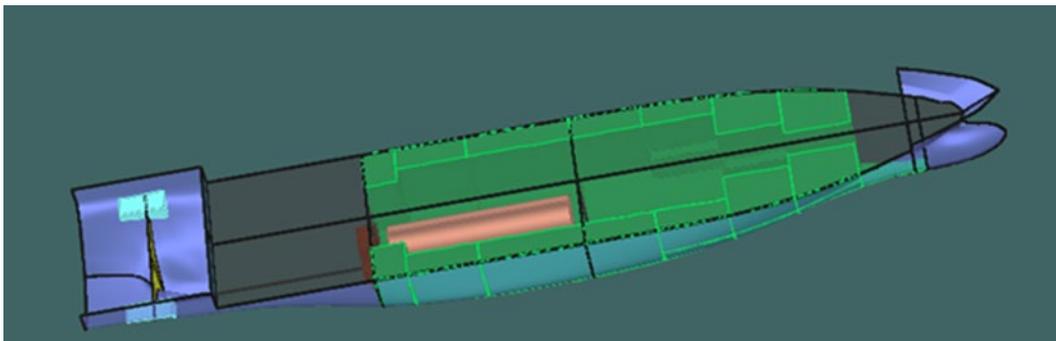


Figura 22. Modelado interior del doble fondo, doble casco y tanques de consumo

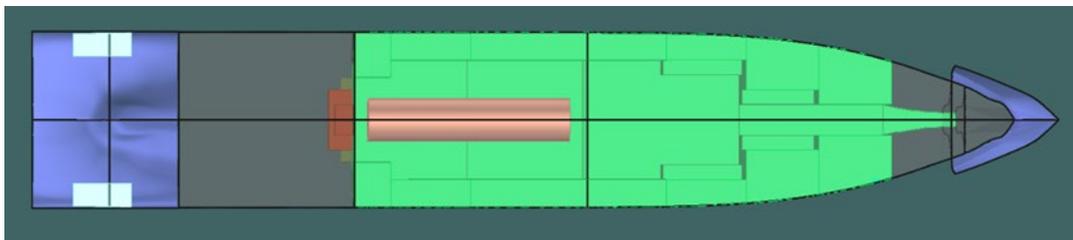


Figura 23, Vista en planta del doble casco, doble fondo y tanques de consumo

En la siguiente imagen podemos ver la colocación de los tanques de consumo, en el casco del buque.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

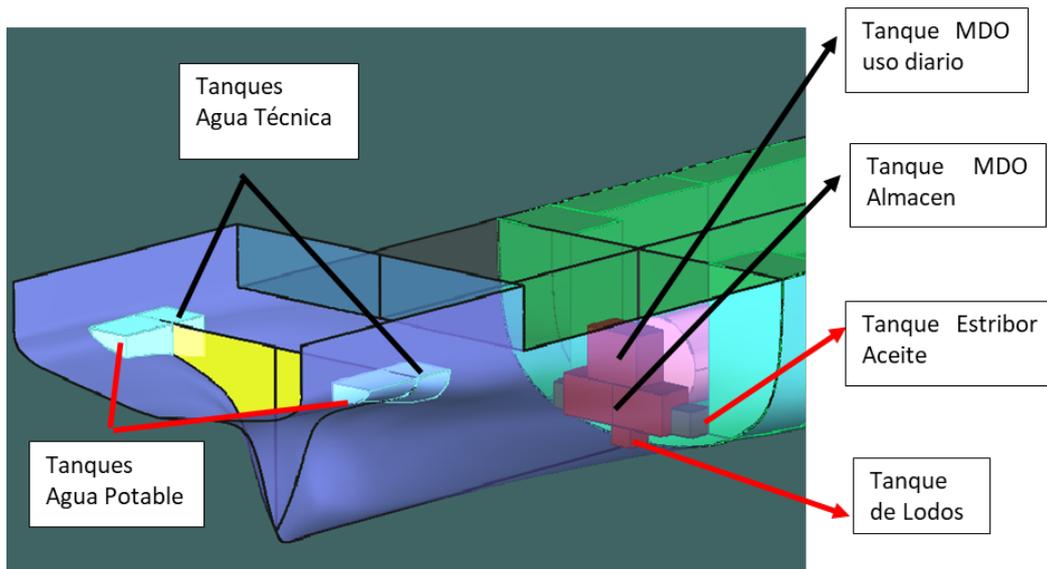


Figura 24. Posición de los tanques de consumo

Una vez definidos los tanques en el Maxsurf Stability el programa nos da la capacidad en m^3 , de los tanques definidos (sus medidas han quedado definidas en las "Room definition" sección 2 del Anexo 4). En la siguiente tabla comprobamos la capacidad calculada de los tanques con la capacidad de los tanques definidos en el modelo 3D de la carena del buque óptimo.

Tabla 20. Tabla resumen comparativa de las capacidades de los tanques calculados y dibujados

TANQUE	CAPACIDAD Tanques Calculados (m^3)	CAPACIDAD Tanques Diseñados (m^3)
Tanque LNG	100	100
Tanque MDO Almacén	15.63	16
Tanque MDO Diario	6.83	7.5
Tanque Agua Potable	6.3	7.07
Tanque Agua Técnica	6.5	6.792
Tanque de Aceite	0.13	2
Tanque de Lodos	0.075	0.892

Podemos comprobar que se cumplen las necesidades de consumo para la autonomía definida de nuestro buque óptimo.

Los tanques de doble fondo y doble casco serán utilizados como tanques de lastre, quedando definidas sus dimensiones en las "Room definition" sección 2 del Anexo 4.

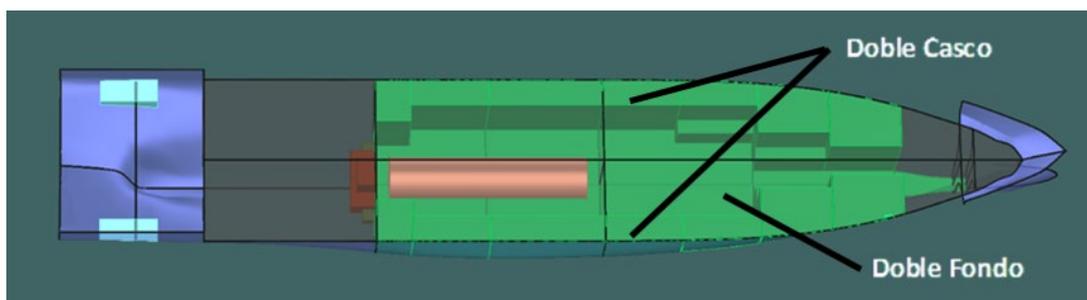


Figura 25. Denominación del doble casco y el doble fondo

Ahora debemos definir y calcular los diferentes pesos de nuestro buque óptimo:

- Peso en rosca
- Peso tripulación
- Peso respetos
- Peso víveres
- Peso de contenedores (TEUs)

Peso en Rosca.

El peso en rosca comprende el peso propio del casco, con su maquinaria y equipos. El cálculo para nuestro buque óptimo lo realizaremos mediante el modelo matemático desarrollado por (Martínez-López et al., 2015a), mediante el cálculo desagregado de las partidas que componen el peso en rosca:

$$PR = PS + Peso_{equipo} + Peso_{maquinaria} \quad (PS = \text{Peso del Acero}) \quad (8)$$

$$PS = 0.033 \times PS1 \quad (TB_q = TB_1) \quad (71)$$

$$PS1 = (1 + 0.5 \times (CB + (1 - CB) \times (0.8 \times DU - T) / (3T - 0.7))) \times (L(B + DU) + 0.85L(DU - T) + 0.8(1.45 \times L - 11))^{1.36} \quad (72)$$

Donde:

PR: Peso en Rosca

PS: Peso del Acero

CB: Coeficiente de bloque.

DU: Puntal Cubierta superior (m).

T: Calado de Diseño (m).

L: Eslora entre perpendiculares (m).

B: Manga (m).

TB₁: Buque Portacontenedores

$$Peso_{equipo} = Peso_{equipamiento} \times 0.3 + Peso_{escotillas} + Peso_{timón} \quad (73)$$

$$Peso_{equipamiento} = 0.33 \times L \times B \quad (9)$$

$$Peso_{escotillas} = L \times B \times \frac{0.65}{5} \times 0.541 + 0.25G2 \quad (TB_q = TB_1) \quad (75)$$

$$Peso_{timón} = \left(0.0224 \times \frac{L \times T \times \left(1.1 + 25 \times \frac{B^2}{L^2} \right)}{100 \times NLEn} \times VB^2 + 2 \right) \times NLEn \quad (VB \leq 35 \text{kn}) \quad (76)$$

Donde:

L: Eslora entre perpendiculares (m).

B: Manga (m).

T: Calado de Diseño (m).

NLEn: Nº de líneas de eje.

VB: Velocidad del buque (Kn).

TB₁: Buque Portacontenedores

$$Peso_{maquinaria} = Peso_{cámara_máquinas} \times (-6 \times 10^{-6} \times PB + 0,603) \times 0,5 + Peso_{propulsores} + Peso_{línea_ejes} + Peso_{máquina} \quad (77)$$

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

$$Peso_{cámara\text{máquinas}} = 60 \times PB \times \frac{0.747}{1000} + \text{tanques} \quad (TME_m=TME_3) \quad (78)$$

$$Peso_{propulsores} = NLE_n \times 0.12 \times (T)^3 \quad (VB \leq 35 \text{kn}) \quad (79)$$

$$Peso_{línea\text{ejes}} = NLE_n \times (0.0735 \times L - 1.956) \times (5 + 0.0164 \times L) \quad (80)$$

$$Peso_{maquina} = \frac{15}{1000} \times PB \times 0.747 \quad (TME_m=TME_3) \quad (81)$$

Donde:

PB: Potencia Propulsora (Cv).

T: Calado de Diseño (m).

NLE_n: Nº de líneas de eje.

VB: Velocidad del buque (Kn).

TB₁: Buque Portacontenedores.

TMM₃: Motor a Gas Dual.

Tanques: Peso de los tanques de LNG vacíos (t).

La siguiente tabla podemos ver el valor obtenido del Peso en Rosca junto con el valor de sus partidas de pesos desagregadas:

Tabla 21. Valor del Peso en Rosca

Peso del Acero	892.313 t
Peso Equipos	234.727 t
Peso Maquinaria	233.068 t
PESO EN ROSCA	1360.108 t

En la sección 3 del Anexo 4, podrán ver los valores de los diferentes pesos que componen cada partida del peso en rosca.

Una vez calculado el peso en rosca procedemos a calcular el centro de gravedad (cdg), su componente vertical (ZG) y su componente horizontal (XG). El modelo matemático no nos facilita este cálculo, aplicaremos para ello las fórmulas y métodos indicados en el libro Proyecto del buque de Fernando Junco Ocampo, para este tipo de buque.

Para el cálculo del centro de gravedad vertical (ZG) del rosca, desglosado en diferentes partidas, utilizaremos el método de Schneekluth, obteniendo el valor del ZG en función del puntal de la cubierta más alta multiplicado por un porcentaje:

Tabla 22. Posición vertical del centro de gravedad del Peso en Rosca desglosado, Método de SCHNEEKLUTH

Tipo de Buque	Acero %	Equipos %	Maquinaria %
Portacontenedores	55-63	86-105	29-53

Para el cálculo del centro de gravedad longitudinal (XG) de la rosca, desglosado en diferentes partidas, utilizaremos la fórmula de J.L. García Garcés para el peso del acero:

$$LG_{Peso\ Acero} = 0.37009 L_{PP} + 5.924 \quad L_{PP} : \text{Eslora entre perpendiculares} \quad (82)$$

Y para el Centro de Gravedad Longitudinal del Peso de Equipos seguiremos la recomendación que su valor se encontrará entre un 85-95 % del valor Centro de gravedad longitudinal del peso del acero y finalmente posicionaremos el Centro de gravedad longitudinal de la Maquinaria un 30 % a proa del Centro longitudinal de la Cámara de Máquinas, a causa del Tanque de LNG y equipos de regasificación.

Finalmente calcularemos el valor del Centro de gravedad vertical y longitudinal del Peso en Rosca en función de los centros de gravedad de las partidas de pesos desagregados que componen el peso en rosca:

$$XG = \frac{\sum(XG \times P_i)}{\sum P_i} \quad (83)$$

$$ZG = \frac{\sum(ZG \times P_i)}{\sum P_i} \quad (84)$$

Tabla 23. Valor del peso y coordenadas del centro de gravedad del rosca de buque óptimo

DESGLOSE DE PESOS	PESO (t)	ZG (m)	XG (m)
Peso del Acero (PS)	892.313	4.17	34.64
Peso Equipo	234.727	6.36	32.91
Peso Maquinaria	233.068	2.22	17.5
Peso en Rosca (PR)	1360.108	4.21	31.41

Peso Tripulación.

Para obtener el peso de la tripulación se considerará un peso por tripulante 150 kg y posicionaremos su centro de gravedad longitudinalmente en el centro de la habilitación y verticalmente sobre la línea de flotación. La tripulación del buque está compuesta por 16 personas:

Tabla 24. Peso y centro de gravedad tripulación

Peso tripulación (t)	ZG (m)	XG (m)
2.4	5.5	13.5

Peso Respetos.

En referencia al peso de los respetos, hemos considerado unas 5 toneladas y su centro de gravedad lo hemos situado en el centro de la cámara de máquinas.

Tabla 25. Peso y centro de gravedad respetos

Peso respetos (t)	ZG (m)	XG (m)
5	3.2	13.5

Peso Víveres.

Para el cálculo del peso de los víveres consideraremos un peso de 5Kg por persona y día. Posicionaremos su centro de gravedad en el mismo lugar que el peso de la tripulación. Recordamos que nuestra autonomía la hemos definido en 2.25 días (49).

Tabla 26. Peso y centro de gravedad víveres

Peso víveres (t)	ZG (m)	XG (m)
0.180	5.5	13.5

Peso de Contenedores (TEUs)

Para calcular el peso y centro de gravedad de los contenedores transportados por nuestro buque, debemos primeramente calcular la distribución y posicionamiento de los contenedores en la carena de nuestro buque óptimo, teniendo en cuenta los valores y parámetros en relación con el número de contenedores, su colocación y su distribución en altura, manga y puntal calculados en nuestro modelo matemático de optimización.

Tabla 27. Parámetros del modelo matemático de optimización en referencia a la disposición de los TEUs

Número de TEUs óptimos	184
Número máximo de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	160
Número máximo de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	37
Número de TEUs en puntal que puede llevar sobre bodega de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5

La distribución de contenedores de nuestro buque óptimo queda de la siguiente manera:

En la ilustración número 20 podemos ver las dimensiones de las bodegas de contenedores, así como de otros compartimentos del buque óptimo calculadas con el modelo matemático de optimización.

Bajo cubierta, diferenciaremos, bodega de contenedores, con 2 niveles en altura y bodega sobre tanque LNG, con un único nivel en altura. Teniendo ambas bodegas una capacidad total de 28 contenedores bajo cubierta

En la figura número 25 representamos el primer nivel de la bodega de contenedores, donde podemos observar que porta 4 contenedores en eslora y en la primera columna 4 contenedores en manga, siendo la siguiente columna de 3 y las dos últimas de un contenedor en manga.

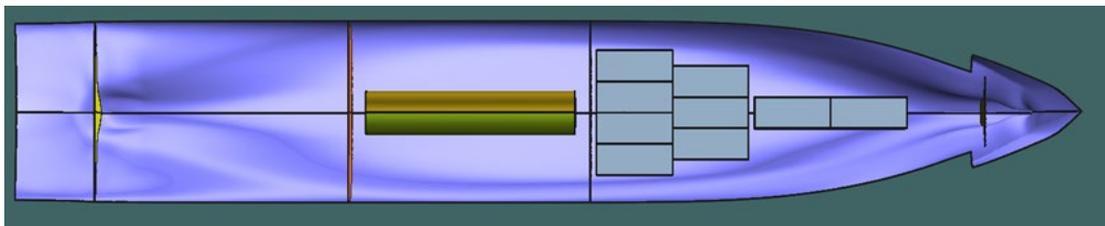


Figura 26. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores

En la Figura 27 representamos el primer nivel de la bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de bodega de contenedores, donde podemos observar que porta 4 contenedores en eslora y en la primera y segunda columna 4 contenedores en manga, siendo

la siguiente columna de 2 y las última de un contenedor en manga. Y en la bodega sobre tanque de LNG porta 2 contenedores en eslora y 4 contenedores en manga ambas columnas.

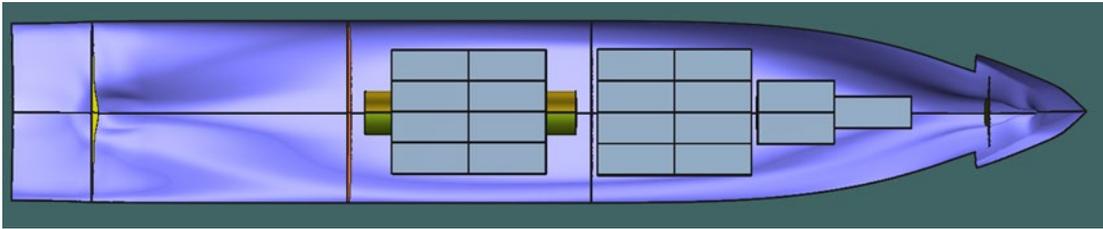


Figura 27. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de bodega de contenedores.

Sobre cubierta tendremos 9 columnas distribuidas y numeradas de popa a proa (9 contenedores en eslora), con 4 contenedores en puntal cada una, y 5 contenedores en manga las 6 primeras columnas, 4 contenedores en manga la 7ª columna, 3 contenedores en manga la 8ª columna y 2 contenedores en manga la 9ª y última columna. Haciendo un total de 156 contenedores sobre cubierta. Dicha distribución la podemos observar en la Figura 28 y Figura 29.

La zona de cubierta delimitada por la bodega sobre tanque LNG, tiene una brazola de 0,7 m de puntal, calculada en el modelo matemático de optimización.

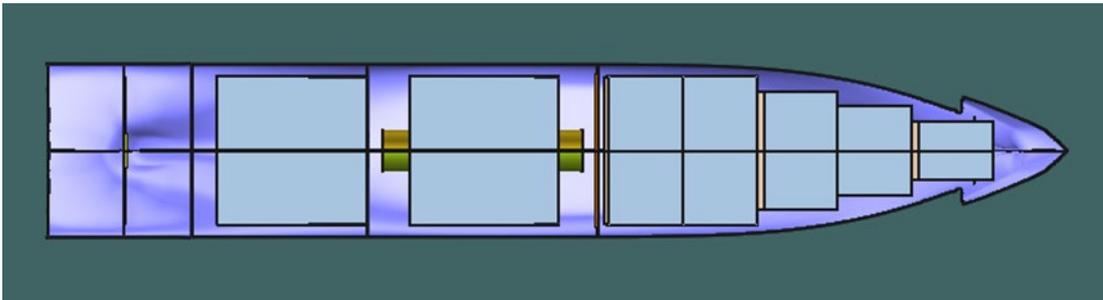


Figura 28. Vista en planta de la Disposición de contenedores sobre cubierta.

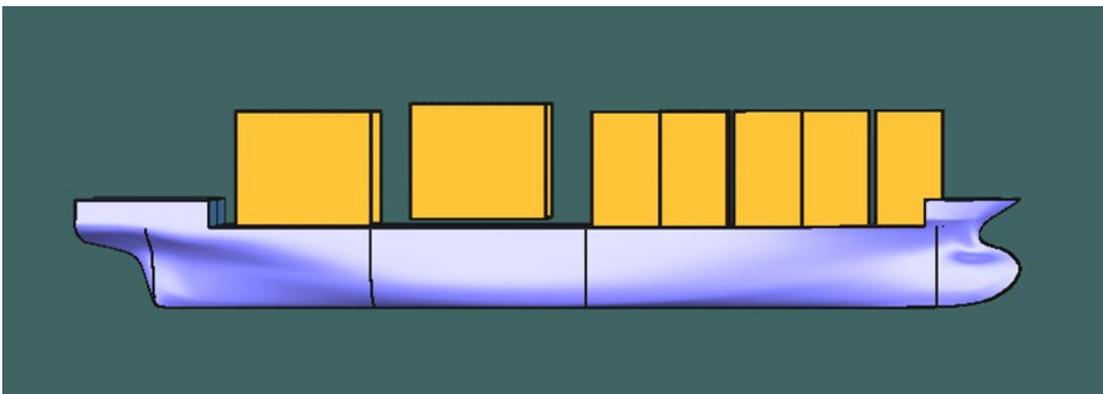


Figura 29. Vista en lateral de la Disposición de contenedores sobre cubierta.

La capacidad total del buque óptimo, respetando las dimensiones y parámetros calculados en nuestro modelo matemático de optimización será de 184 contenedores (TEUs).

Tabla 28. Distribución y capacidad de contenedores del buque óptimo

TEUs Bajo Cubierta	TEUs Sobre Cubierta	Total TEUs
28	156	184

En la Tabla 29 realizaremos una comparativa de los datos calculados en modelo matemático de optimización y el buque óptimo donde podemos comprobar que se han respetado las medidas y parámetros calculados en nuestro modelo matemático de optimización, a la hora de realizar el compartimentado, capacidad y distribución de contenedores en la carena del Buque óptimo.

Tabla 29. Comparación de datos obtenidos por el modelo matemático de optimización y la carena del buque óptimo

Parámetros	Modelo Matemático de Optimización	Carena Buque Óptimo
Número de TEUs óptimos (G2)	184	184
Número de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	160	156
Número de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	37	28
Número de TEUs en puntal sobre tanques de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5	4
Eslora Cámara de Máquinas (Lcc)	20.1 m	20.1 m
Eslora Necesaria para los Tanque LNG (Ltk)	19.2 m	19.2 m
Eslora desde la Perpendicular de proa al mamparo de colisión (Lmpp)	3.88 m	3.88 m
Manga Doble Casco (BDCC)	1.44 m	1.44 m
Altura doble fondo (HDF1)	0.9 m	0.9 m
Esalora de castillo (ET1)	4.88 m	4.88 m
Eslora de toldilla (ET2)	5.58 m	5.58 m
Número de tanques de LNG (NTnt)	1	1

Podemos ver que el grado de respeto de los datos obtenidos en nuestro modelo matemático es prácticamente total, únicamente no se ha respetado el número de TEUs en eslora en bodega, en una unidad, a causa de las formas finas de proa, exigidas por el coeficiente de bloque del modelo matemático.

Una vez calculada la distribución y número de contenedores de nuestro buque óptimo, procedemos a calcular el peso y centro de gravedad (longitudinal y vertical) de los contenedores. Tomaremos 12.5 toneladas, como peso de cada contenedor, ya que es una hipótesis de partida de nuestra optimización. Para el cálculo de los pesos y posición vertical y longitudinal del centro de gravedad de los contenedores, realizamos una hoja de cálculo, tomando como altura y longitud del contenedor 2.44 m y 6.06 m respectivamente y situando su centro de gravedad vertical al 45% de su altura y su centro de gravedad horizontal al 50% de su longitud, teniendo en cuenta también la altura de brazola de 0.7 m situada en la zona de cubierta sobre la bodega de tanque de LNG (Columnas 3 y 4), altura de doble fondo de 0.9 m y altura de bodega de tanque LNG de 5.26 m. En dicha hoja de cálculo posicionaremos los contenedores, calculando, la posición de los contenedores en coordenadas verticales y

horizontales, número de contenedores por columna bajo y sobre cubierta, el peso por columna y total de los contenedores y finalmente las coordenadas longitudinales y verticales de centro de gravedad de la carga. Los valores obtenidos en la hoja de cálculo quedan definidos en la sección 4 del Anexo 4.

En la Tabla 30 reseñamos el valor del peso total de los contenedores y la posición verticales y longitudinales del centro de gravedad del total de los contenedores.

Tabla 30. Peso total de contenedores y coordenadas del centro de gravedad de la carga

Peso Total de Contenedores (t)	ZG (m)	XG (m)
2300	11.38	40.95

Una vez calculados y definidos los pesos, el compartimentado y la distribución de la carga de nuestro buque óptimo, definiremos una condición de carga en el maxsurf stability, con objeto de realizar el cálculo de sus hidrostáticas y condición de equilibrio y dar por correcto el compartimentado y distribución de carga calculado en nuestro buque óptimo y así realizar el estudio de estabilidad completo del modelo.

La condición de carga elegida será: “salida de puerto con distribución de carga homogénea 12.5 toneladas por contenedor”, que es una hipótesis de partida de nuestra optimización, como reseñamos anteriormente. En la sección 5 del Anexo 6 podremos ver los valores de dicha condición de carga.

Para poder realizar los cálculos de estabilidad con el maxsurf stability deberemos definir los diferentes puntos de inundación progresiva de nuestro buque óptimo, que son aquellos que al sumergirse pueden embarcar agua a la zona estanca, tales como admisiones, ventilaciones, exhaustaciones, accesos, etc. Hemos definido como puntos de inundación progresiva la ventilación de cámara de máquinas estribor y babor y entrada al puente de gobierno estribor y babor. En la Tabla 31 definimos su posición de dichos puntos, en función de sus medidas longitudinales, verticales y transversales sobre el buque óptimo.

Tabla 31. Puntos de inundación progresiva

Puntos de inundación	X(m)	Y (m)	Z (m)
Ventilación Maquinas Br	15	-2	20
Entrada Puente Br	15	-6	20
Ventilación Maquinas Er	15	2	20
Entrada Puente Er	15	6	20

Una vez calculados y definidos los diferentes datos y parámetros anteriormente reseñados, realizaremos el cálculo mediante el software maxsurf stability de la condición de equilibrio para la condición de carga definida, obteniendo así los valores del equilibrio hidrostático del buque óptimo. Que nos permitirá una primera evaluación del diseño de nuestro buque óptimo. De una manera rápida y sencilla podremos comprobar la condición de equilibrio propuesta y visualizar las características de estabilidad inicial para la condición de carga establecida.

En la Tabla 32 reflejamos los resultados obtenidos mediante el estudio de equilibrio hidrostático con el software Maxsurf Stability, para la condición de carga anteriormente descrita de nuestro buque óptimo.

Tabla 32. Tabla resultados cálculo equilibrio hidrostático

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.355
Displacement t	3771
Heel deg	0.0
Draft at FP m	4.909
Draft at AP m	5.802
Draft at LCF m	5.400
Trim (+ve by stern) m	0.893
WL Length m	83.027
Beam max extents on WL m	14.389
Wetted Area m ²	1411.002
Waterpl. Area m ²	894.763
Prismatic coeff. (Cp)	0.610
Block coeff. (Cb)	0.536
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.929
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.749
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	36.994
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	34.915
KB m	3.033
KG fluid m	8.555
BMt m	3.491
BML m	87.329
GMt corrected m	-2.030
GML m	81.807
KMt m	6.524
KML m	90.356
Immersion (TPc) tonne/cm	9.171
MTc tonne.m	39.750
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	-133.617
Max deck inclination deg	0.6596
Trim angle (+ve by stern) deg	0.6596

De los datos obtenidos en la condición de equilibrio comprobamos que tiene un GM transversal (GMt) negativo (-2.041 m) (ver Tabla 32 negrita). Es decir, la altura metacéntrica es negativa, esto nos indica que la posición del centro de gravedad del buque (G) se encuentra por encima del Metacentro (M), que es el punto de intersección de las líneas verticales trazadas desde el centro de carena a pequeños ángulos de escora consecutivos, y se puede equiparar a un eje central cuando el buque está inclinado a pequeños ángulos de escora.

Esto nos indica que el buque óptimo tiene una estabilidad inicial negativa. Una embarcación en este estado muestra un equilibrio inestable y está en peligro de zozobrar. Por lo que esta configuración que hemos definido como buque óptimo no podemos darla por válida, siendo necesario realizar cambios en la distribución y posición de la carga y modificación del compartimentado interior, con objeto de intentar bajar el centro de gravedad del buque (G) intentando aumentar el número de contenedores que se transportan bajo cubierta.

Procedemos a elaborar una 1ª alternativa de compartimentado inicial con objeto de poder dar viabilidad al modelo de buque óptimo, intentando aprovechar más, el espacio sobre bodega de tanque de LNG, en la parte central del buque como podemos ver en la *Figura 27* y *Figura 28*.

2.2 1ª ALTERNATIVA DE COMPARTIMENTADO:

No variaremos las dimensiones principales del buque (L, B, T, D, Cb...) sólo redistribuiremos su compartimentado interior, con el objetivo de mantener iguales las hipótesis de optimización del modelo matemático y poder verificar la viabilidad de este modelo, desde punto de vista de la estabilidad.

Con objeto de poder recolocar una columna en la zona central del buque sobre la bodega del tanque de LNG e introducir 4 contenedores más, bajo cubierta, movemos hacia proa 70 cm el mamparo de proa de la bodega del tanque de LNG, quedando dicha bodega con una eslora de 19.9 m.

En la *Figura 30* podemos ver la posición de los mamparos de proa (A) y popa (B) de cámara de máquinas, que no se han modificado respecto al buque óptimo, el mamparo de proa (C) de cámara de tanque LNG, el cual se ha adelantado 70 cm hacia proa, con respecto al buque óptimo, y el mamparo del pique de proa (D), el cual tampoco se ha modificado con respecto al buque óptimo. Así como las dimensiones longitudinales de los diferentes compartimentos, que respetan las medidas obtenidas en el modelo matemático de optimización (Anexo 4, sección 1) y la nueva dimensión de la bodega de LNG, debido al adelanto de la posición del mamparo de proa de la bodega de LNG.

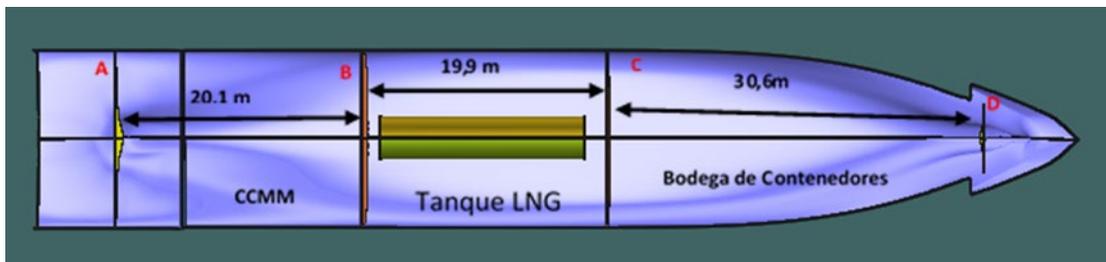


Figura 30 Cotas de Cámara de Máquinas, Cámara de Tanque LNG y Bodega de contenedores de la 1ª alternativa de compartimentado.

Los tanques de consumo, uso diario y LNG no sufren modificación por lo que quedarán con igual configuración y posición que los del buque óptimo (ver *Figura 23* y *Figura 24* y *Tabla 20*). En referencia al doble fondo y doble casco, no habrá modificación en la capacidad y posición de los mismos, siendo el único cambio que se aplicará con respecto al buque óptimo, la nueva división de los tanques de doble fondo y doble casco que quedan dentro de los límites de la bodega de LNG y de la bodega de contenedores, para que coincidan con los mamparos divisorios y columnas de contenedores transportados. Como se refleja en la *Figura 31*.

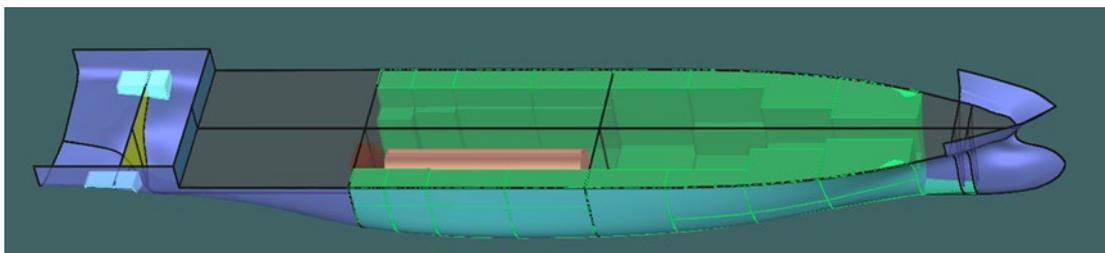


Figura 31. Modelado interior del doble fondo, doble casco y tanques de consumo de la 1ª alternativa de compartimentado.

Los tanques de doble fondo y doble casco, serán utilizados como tanques de lastre, quedando definidas sus dimensiones en las “Room definition” sección 6 del Anexo 4.

La distribución de contenedores de nuestra 1ª alternativa de compartimentado queda de la siguiente manera:

Bajo cubierta, seguimos diferenciando, bodega de contenedores, con 2 niveles en altura y bodega sobre tanque LNG, con un único nivel en altura. Teniendo ambas bodegas una capacidad total de 31 contenedores, transportados bajo cubierta.

En la Figura 32 representamos el primer nivel de la bodega de contenedores, donde podemos observar que porta 3 contenedores en eslora y en la primera columna 4 contenedores en manga, siendo la siguiente columna de 3 y la última de un contenedor en manga. En esta distribución de la 1ª alternativa de compartimentado, con respecto al buque óptimo hemos perdido un contenedor en eslora, por lo que hemos perdido la 4ª columna que del primer nivel de la bodega de contenedores del buque óptimo que solo portaba un contenedor. Transportando un total de 8 contenedores en este nivel.

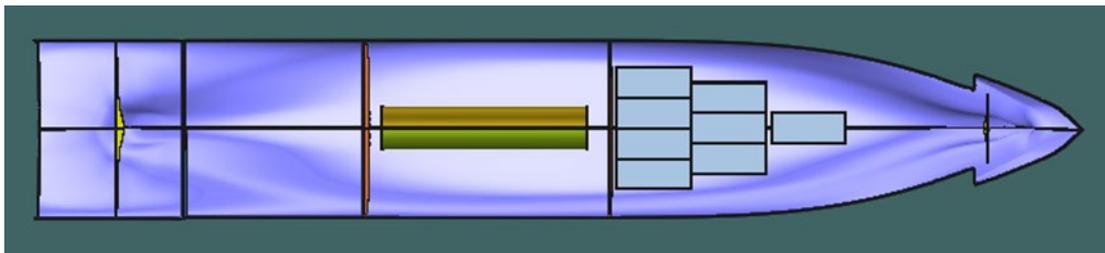


Figura 32. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores 1ª alternativa de compartimentado.

En la Figura 33 representamos el primer nivel de la bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de bodega de contenedores, donde podemos observar que porta 4 contenedores en eslora y en la primera y segunda columna 4 contenedores en manga, siendo la siguiente columna de 2 y las última de 1 contenedor en manga, permaneciendo igual con respecto a la disposición del buque óptimo. Y en la bodega sobre tanque de LNG porta 3 contenedores en eslora y 4 contenedores en manga en todas sus columnas, ampliando un contenedor más en eslora y 4 en manga con respecto a la distribución del buque óptimo. Transportando un total de 23 contenedores en este 2º nivel.

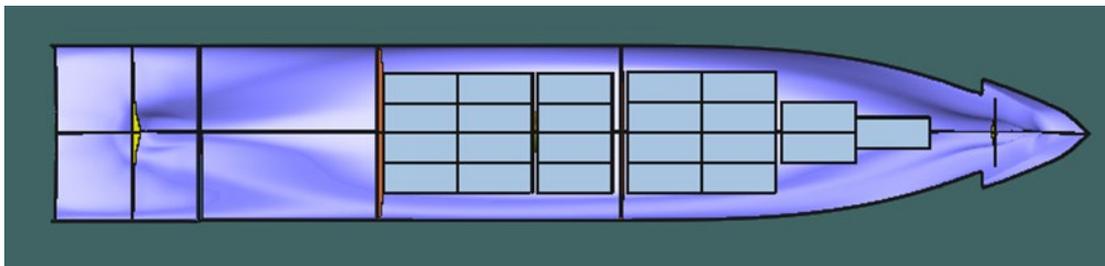


Figura 33. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de bodega de contenedores 1ª alternativa de compartimentado.

Sobre cubierta tendremos 9 columnas distribuidas y numeradas de popa a proa (9 contenedores en eslora), con 4 contenedores en puntal las 6 primeras columnas, las

columnas 7 y 8 tendrán 3 contenedores en puntal y la columna 9 tendrá 2 contenedores en puntal, y 5 contenedores en manga las 7 primeras columnas, 4 contenedores en manga la columna 8, y 3 contenedores en manga la columna 9 y última columna. Haciendo un total de 153 contenedores sobre cubierta. Dicha distribución la podemos observar en la Figura 34 y Figura 35.

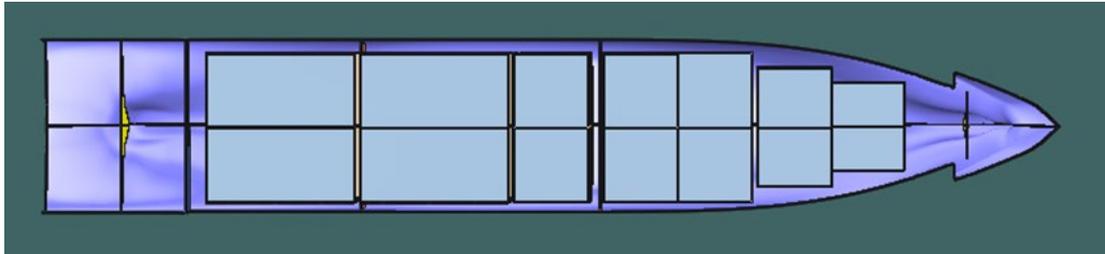


Figura 34. Vista en planta de la Disposición de contenedores sobre cubierta 1ª alternativa de compartimentado.

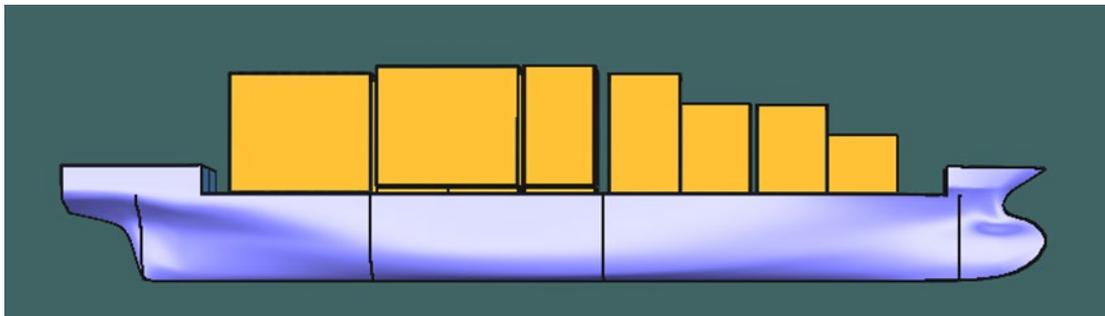


Figura 35. Vista en lateral de la Disposición de contenedores sobre cubierta 1ª alternativa de compartimentado.

Podemos ver en la Figura 35 que ahora las columnas de más a proa (Columnas 7, 8 y 9) portan menos contenedores en puntal con respecto al modelo del buque óptimo, ya que hemos introducido una columna más en la zona de la cubierta sobre la bodega de tanque LNG, permitido por el adelanto del mamparo de la bodega de tanque LNG.

Tabla 33. Distribución y capacidad de contenedores de la 1ª alternativa de compartimentado.

TEUs Bajo Cubierta	TEUs Sobre Cubierta	Total TEUs
31	153	184

Nuevamente realizaremos una comparativa entre los datos calculados en modelo matemático de optimización, el buque óptimo y la 1ª alternativa al buque óptimo, que reflejamos en la Tabla 34, donde podemos comprobar el grado de respeto de las medidas y parámetros calculados en nuestro modelo matemático de optimización, a la hora de realizar el compartimentado, capacidad y distribución de contenedores en la carena de la 1ª alternativa de compartimentado.

Vemos en la Tabla 34, que el grado de respeto de los datos obtenidos en nuestro modelo matemático es prácticamente total, no se ha respetado el número de TEUs en eslora en bodega, en dos unidades, en el primer nivel de bodega de contenedores, a causa de las formas finas de proa, al adelantar el mamparo de proa de bodega de tanques LNG en 0.7 m

respecto al del modelo matemático. Respetando todas las demás medidas y los valores de las hipótesis de optimización.

Tabla 34. Comparación de datos obtenidos por el modelo matemático de optimización, el buque óptimo y 1ª alternativa de compartimentado.

Parámetros	Modelo Matemático de Optimización	Carena Buque Óptimo	1ª Alternativa de compartimentado
Número de TEUs óptimos (G2)	184	184	184
Número de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	160	156	153
Número de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	37	28	31
Número de TEUs en puntal sobre tanques de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1	1	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2	2	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4	4	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5	4	3
Eslora Cámara de Máquinas (Lcc)	20.1 m	20.1 m	20.1 m
Eslora Necesaria para los Tanque LNG (Ltk)	19.2 m	19.2 m	19.9 m
Eslora desde la Perpendicular de proa al mamparo de colisión (Lmpp)	3.88 m	3.88 m	3.88 m
Manga Doble Casco (BDCC)	1.44 m	1.44 m	1.44 m
Altura doble fondo (HDF1)	0.9 m	0.9 m	0.9 m
Eslora de castillo (ET1)	4.88 m	4.88 m	4.88 m
Eslora de toldilla (ET2)	5.58 m	5.58 m	5.58 m
Número de tanques de LNG (NTnt)	1	1	1

En referencia al peso en rosca, peso de tripulación, peso de respetos y peso de víveres no hay modificación en referencia a nuestro buque óptimo, sólo sufrirá modificación la posición del centro de gravedad de la carga, que explicaremos en el párrafo siguiente (ver Tabla 23, Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26).

Una vez calculada la distribución y número de contenedores de nuestra 1ª alternativa de compartimentado, procedemos a calcular el centro de gravedad del peso de los contenedores (longitudinal y vertical), ya que el peso sigue siendo el mismo, al no variar el número de contenedores totales (184 TEUs) y seguir tomando el peso de 12.5 t por contenedor, ya que es una hipótesis de partida de nuestra optimización. Para el cálculo de la posición vertical y longitudinal de los contenedores, utilizaremos nuevamente la hoja de cálculo donde posicionaremos los contenedores, calculando con dicha hoja de cálculo, la posición de los contenedores en coordenadas verticales y horizontales, número de contenedores por columna bajo y sobre cubierta, el peso por columna y total de los contenedores y finalmente las coordenadas longitudinales y verticales de centro de gravedad de la carga. Los valores obtenidos en la hoja de cálculo quedan definidos en la sección 7 del Anexo 4.

En la Tabla 35 reseñamos el valor del peso total de los contenedores y la posición verticales y longitudinales del centro de gravedad del total de los contenedores de la 1ª alternativa de compartimentado.

Tabla 35. *Peso total de contenedores y coordenadas del centro de gravedad de la carga de la 1ª alternativa de compartimentado.*

Peso Total de Contenedores (t)	ZG (m)	XG (m)
2300	11.10	37.34

Una vez calculados y definidos los pesos, el compartimentado y la distribución de la carga de nuestra 1ª alternativa de compartimentado, definiremos una condición de carga en el maxsurf stability, con objeto de realizar el cálculo de sus hidrostáticas y condición de equilibrio y dar por correcto este nuevo compartimentado y distribución de carga calculado en nuestra 1ª alternativa de compartimentado y así realizar el estudio de estabilidad completo del modelo si procede.

La condición de carga elegida será igual que la tomada para el modelo buque óptimo: “salida de puerto con distribución de carga homogénea 12.5 toneladas por contenedor”, que, como ya reflejamos anteriormente, es una hipótesis de partida de nuestra optimización. En la sección 8 del Anexo 6 podremos ver los valores de dicha condición de carga “Load case”.

Una vez calculados y definidos los diferentes datos y parámetros anteriormente definidos, realizaremos nuevamente el cálculo mediante el software maxsurf stability de la condición de equilibrio para la condición de carga definida, obteniendo así los valores del equilibrio hidrostático del buque óptimo. Que nos permitirá una primera evaluación del nuevo diseño de nuestra 1ª alternativa al buque óptimo. De una manera rápida y sencilla podremos comprobar nuevamente si la nueva condición de equilibrio propuesta y visualizar las características de estabilidad inicial para la condición de carga establecida.

En la Tabla 36 reflejamos los resultados obtenidos mediante el estudio de equilibrio hidrostático con el software Maxsurf stability, para la condición de carga anteriormente descrita de nuestra 1ª alternativa al buque óptimo.

De los datos obtenidos en la condición de equilibrio (ver Tabla 35 **negrita**) volvemos a comprobar que tiene un GM transversal (GMt) negativo (-1.963 m). Es decir, volvemos a tener una estabilidad inicial negativa, es decir un equilibrio inestable, no pudiendo dar por válida esta compartimentación y distribución de carga de la 1ª alternativa de compartimentado.

Procedemos a elaborar una 2ª alternativa de compartimentado inicial con objeto de poder dar viabilidad al modelo de buque óptimo, intentando aprovechar más, el espacio de la bodega de tanque de LNG, en la parte central del buque como podemos ver en las Figura 32 y Figura 33.

Debemos realizar un compartimentado que nos permita introducir más contenedores bajo cubierta, y poder bajar el centro de gravedad de la carga (G), por lo que la única opción que nos queda es modificar la distribución del tanque de GNL y de su bodega, e intentar cargar más contenedores en el nivel más bajo de la bodega.

Tabla 36. Tabla resultados cálculo equilibrio hidrostático 1ª Alternativa de compartimentado.

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.232
Displacement t	3769
Heel deg	0.0
Draft at FP m	3.849
Draft at AP m	6.614
Draft at LCF m	5.452
Trim (+ve by stern) m	2.766
WL Length m	84.498
Beam max extents on WL m	14.390
Wetted Area m ²	1438.668
Waterpl. Area m ²	956.744
Prismatic coeff. (Cp)	0.593
Block coeff. (Cb)	0.468
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.918
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.787
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	34.654
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	32.610
KB m	3.089
KG fluid m	8.856
BMt m	3.808
BML m	106.668
GMt corrected m	-1.963
GML m	100.897
KMt m	6.894
KML m	109.689
Immersion (TPc) tonne/cm	9.807
MTC tonne.m	49.010
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	-129.152
Max deck inclination deg	2.0412
Trim angle (+ve by stern) deg	2.0412

2.3 2ª ALTERNATIVA DE COMPARTIMENTADO:

Nuevamente no variaremos las dimensiones principales del buque (L, B, T, D, Cb...) sólo redistribuiremos su compartimentado interior, con el objetivo de mantener iguales las hipótesis de optimización del modelo matemático y poder verificar la viabilidad de este modelo, desde punto de vista de la estabilidad.

En esta segunda alternativa, modificaremos el compartimentado y la disposición del tanque de GNL, montando en vez de un solo tanque de disposición longitudinal, montaremos 2 tanques de disposición vertical de 4 m de diámetro por 4 metros de alto, con una capacidad suficiente (90 m³) para cubrir la autonomía del buque. Dichos tanques estarán situados en la cámara de tanques de GNL a proa de la cámara de máquinas, que quedará con una eslora de 6.75 m. También ampliaremos la eslora de castillo 1.5 m La disposición la podemos ver en la figura siguiente.

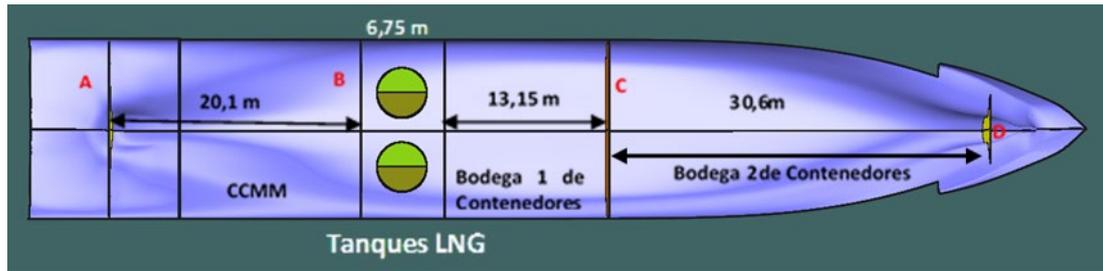


Figura 36. Cotas de Cámara de Máquinas, Cámara de Tanque LNG y Bodega de contenedores de la 2ª alternativa de compartimentado.

De esta manera podemos aprovechar la zona de la cámara de GNL, en la parte central del buque, para colocar 8 contenedores en su nivel más bajo de bodega, como vemos en la Figura 38.

Los tanques de consumo y uso diario no sufren modificación por lo que quedarán con igual configuración y posición que los del buque óptimo (ver Figura 23 y Figura 24 y Tabla 20).

En referencia al doble fondo y doble casco, no habrá modificación en la capacidad, posición y división de los mismos con respecto a la 1ª alternativa de compartimentado. Como se refleja en la Figura 37.

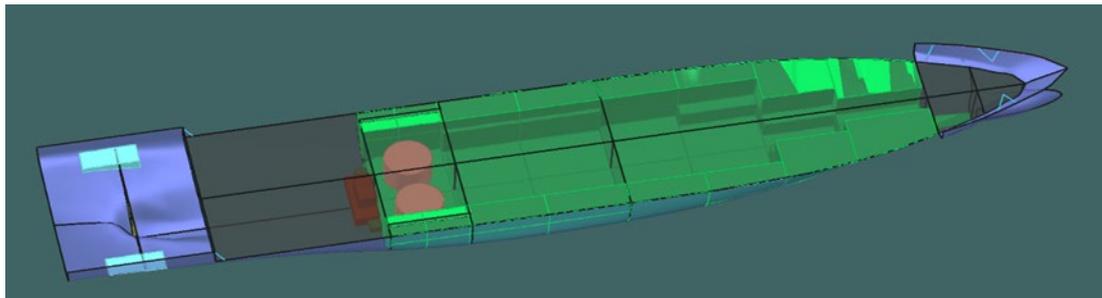


Figura 37. Modelado interior del doble fondo, doble casco y tanques de consumo de la 2ª alternativa de compartimentado.

Los tanques de doble fondo y doble casco serán utilizados como tanques de lastre, quedando definidas sus dimensiones en las "Room definition" sección 9 del Anexo 4.

La distribución de contenedores de nuestra 2ª alternativa de compartimentado queda de la siguiente manera:

Bajo cubierta, tendremos, dos bodegas de contenedores, con 2 niveles en altura y una bodega sobre tanque LNG, con un único nivel en altura. Teniendo las tres bodegas una capacidad total de 39 contenedores, transportados bajo cubierta.

En la Figura 38 representamos el primer nivel de las bodegas de contenedores, donde podemos observar que, la primera bodega de contenedores porta 2 contenedores en eslora, con 4 contenedores en manga ambas columnas y que la segunda bodega de contenedores porta 3 contenedores en eslora y en la primera columna 4 contenedores en manga, siendo la siguiente columna de 3 y la última de un contenedor en manga. En esta distribución de la 2ª alternativa de compartimentado, con respecto a la 1ª alternativa de compartimentado hemos ganado dos contenedores en eslora, por lo en referencia al modelo matemático de optimización cumplimos los 5 contenedores en eslora bajo cubierta. Transportando un total de 16 contenedores en este 1º nivel.

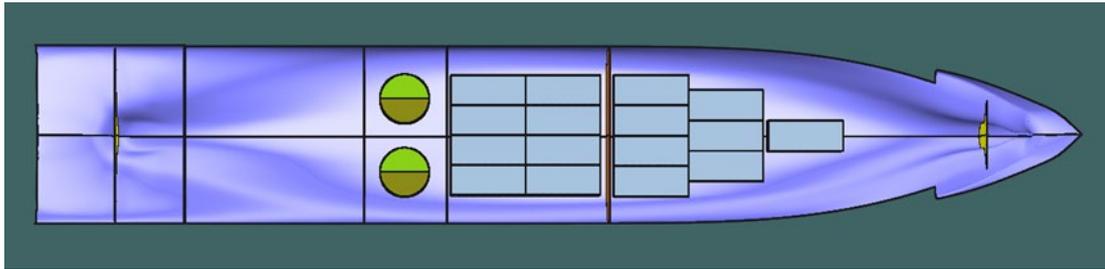


Figura 38. Disposición de contenedores primer nivel de bodegas de contenedores 2ª alternativa de compartimentado.

En la Figura 39 representamos el primer nivel de la bodega de contenedores sobre tanque LNG y el segundo nivel de las bodegas de contenedores, donde podemos observar, que queda igual con respecto a la distribución de la 1ª alternativa de compartimentado, con la única diferencia que hemos creado una nueva bodega de contenedores al retranquear hacia popa la cámara de tanques de LNG. Transportando un total de 23 contenedores en este 2º nivel, como en la 1ª alternativa del buque óptimo.

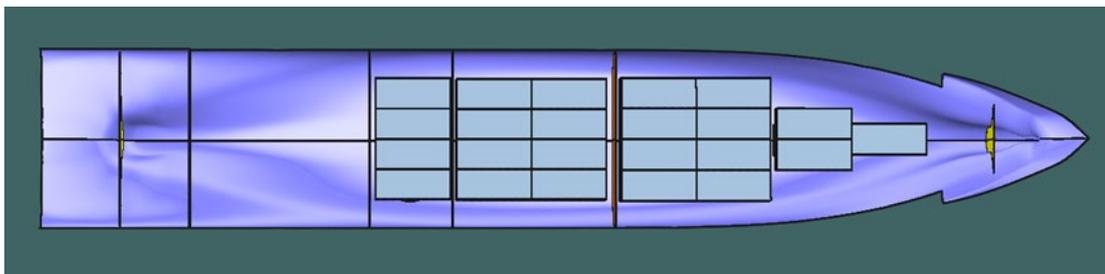


Figura 39. Disposición de contenedores primer nivel bodega de contenedores sobre tanque LNG y segundo nivel de las bodegas de contenedores 2ª alternativa de compartimentado.

Al igual que en la 1ª alternativa de compartimentado, sobre cubierta portaremos 9 columnas distribuidas y numeradas de popa a proa (9 contenedores en eslora), con la diferencia, que las 4 primeras columnas tendrán 4 contenedores en puntal, y las columnas restantes tendrán 3 contenedores en puntal y 5 contenedores en manga las 7 primeras columnas, 4 contenedores en manga la columna 8, y 3 contenedores en manga la columna 9 y última columna. Haciendo un total de 145 contenedores sobre cubierta. Dicha distribución la podemos observar en la Figura 40 y Figura 41.

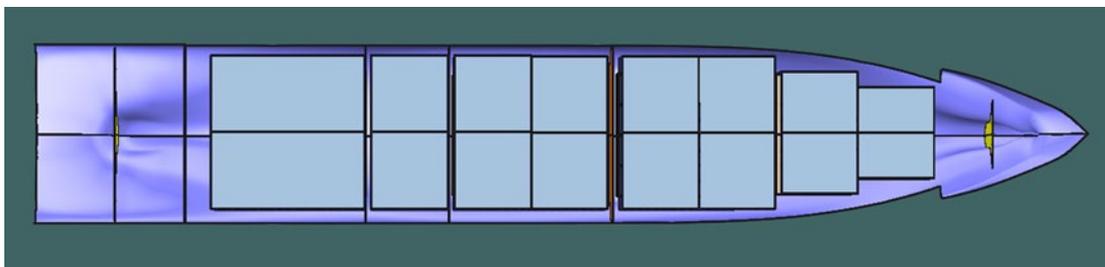


Figura 40. Vista en planta de la Disposición de contenedores sobre cubierta 2ª alternativa de compartimentado.

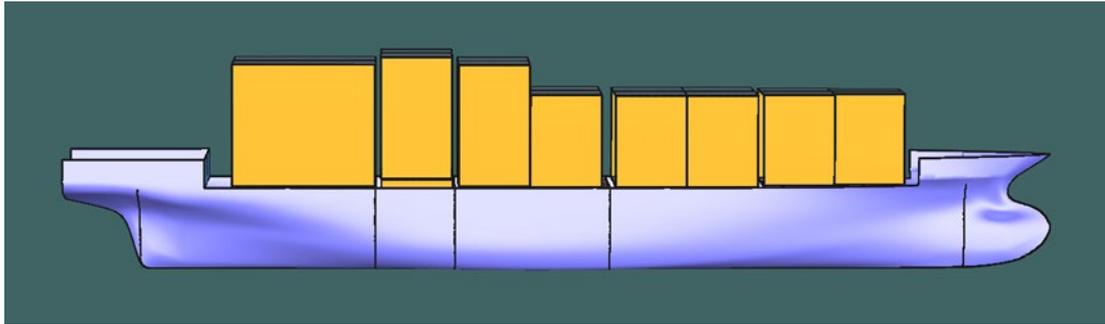


Figura 41. Vista en lateral de la Disposición de contenedores sobre cubierta 2ª alternativa de compartimentado.

Podemos ver en la Figura 41 que ahora las columnas de más a popa (Columnas 1, 2, 3 y 4) portan 4 contenedores en puntal y el resto 3 contenedores en puntal.

Tabla 37. Distribución y Capacidad de contenedores de la 2ª alternativa de compartimentado

TEUs Bajo Cubierta	TEUs Sobre Cubierta	Total TEUs
39	145	184

Nuevamente realizaremos una comparativa entre los datos calculados en modelo matemático de optimización, el buque óptimo, la 1ª alternativa de compartimentado y esta 2ª alternativa de compartimentado, que reflejamos en la Tabla 38, donde podemos comprobar el grado de cumplimiento de las medidas y parámetros calculados en nuestro modelo matemático de optimización, a la hora de realizar el compartimentado, capacidad y distribución de contenedores en la carena de la 2ª alternativa de compartimentado.

Vemos en la Tabla 38 que el grado de respeto de los datos obtenidos en nuestro modelo matemático es prácticamente total nuevamente, se ha variado el número y dimensiones de los tanques de LNG, modificando esta acción el tamaño de la cámara de tanques de LNG. Y también hemos variado la eslora de castillo (ver Tabla 38, reseñados en negrita), con objeto de mejorar la flotabilidad. Respetando todas las demás medidas y los valores de las hipótesis de optimización.

En referencia al peso en rosca, peso de tripulación, peso de respetos y peso de víveres no hay modificación en referencia a nuestro buque óptimo, sólo sufrirá modificación la posición del centro de gravedad de la carga, que explicaremos en el párrafo siguiente. (ver Tabla 22, Tabla 23, Tabla 24 y Tabla 25).

Una vez calculada la distribución y número de contenedores de nuestra 2ª alternativa de compartimentado, procedemos nuevamente a calcular el centro de gravedad del peso de los contenedores (longitudinal y vertical), ya que el peso sigue siendo el mismo, al no variar el número de contenedores totales (184 TEUs) y seguir tomando el peso de 12.5 t por contenedor, ya que es una hipótesis de partida de nuestra optimización. Para el cálculo de la posición vertical y longitudinal de los contenedores, utilizaremos nuevamente la hoja de cálculo donde posicionaremos los contenedores, calculando con dicha hoja de cálculo, la posición de los contenedores en coordenadas verticales y horizontales, número de contenedores por columna bajo y sobre cubierta, el peso por columna y total de los contenedores y finalmente las coordenadas longitudinales y verticales de centro de gravedad

de la carga. Los valores obtenidos en la hoja de cálculo quedan definidos en la sección 10 del Anexo 4.

Tabla 38. Comparación de datos obtenidos por el modelo matemático de optimización, la carena buque óptimo, 1ª alternativa de compartimentado y 2ª alternativa de compartimentado.

Parámetros	Modelo Matemático Optimización	Carena Buque Óptimo	1ª Alternativa de compartimentado	2ª Alternativa de compartimentado
Número de TEUs óptimos (G2)	184	184	184	184
Número de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	160	156	153	145
Número de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	37	28	31	39
Número de TEUs en puntal sobre tanques de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1	1	1	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2	2	2	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4	4	4	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5	4	3	5
Eslora Cámara de Máquinas (Lcc)	20.1 m	20.1 m	20.1 m	20.1
Eslora Necesaria para los Tanque LNG (Ltk)	19.2 m	19.2 m	19.9 m	6.75 m
Eslora desde la Perpendicular de proa al mamparo de colisión (Lmpp)	3.88 m	3.88 m	3.88 m	3.88 m
Manga Doble Casco (BDCC)	1.44 m	1.44 m	1.44 m	1.44 m
Altura doble fondo (HDF1)	0.9 m	0.9 m	0.9 m	0.9 m
Eslora de castillo (ET1)	4.88 m	4.88 m	4.88 m	
Eslora de toldilla (ET2)	5.58 m	5.58 m	5.58 m	5.58 m
Número de tanques de LNG (NTnt)	1	1	1	2

En la Tabla 39 reseñamos el valor del peso total de los contenedores y la posición verticales y longitudinales del centro de gravedad del total de los contenedores de la 2ª alternativa de compartimentado.

Tabla 39. Peso total de contenedores y coordenadas del centro de gravedad de la carga de la 2ª alternativa de compartimentado.

Peso Total de Contenedores (t)	ZG (m)	XG (m)
2300	10.22	37.28

Una vez calculados y definidos los pesos, el compartimentado y la distribución de la carga de nuestra 2ª alternativa de compartimentado, definiremos una condición de carga en el maxsurf stability, con objeto de realizar el cálculo de sus hidrostáticas y condición de equilibrio y dar por correcto este nuevo compartimentado y distribución de carga calculado en nuestra 2ª alternativa de compartimentado y así realizar el estudio de estabilidad completo del modelo si procede.

La condición de carga elegida será igual que la tomada para el modelo buque óptimo: “salida de puerto con distribución de carga homogénea 12.5 toneladas por contenedor”, que, como

ya reflejamos anteriormente, es una hipótesis de partida de nuestra optimización. En la sección 11 del Anexo 4 podremos ver los valores de dicha condición de carga “Load case”.

Una vez calculados y definidos los diferentes datos y parámetros anteriormente definidos, realizaremos nuevamente el cálculo mediante el software maxsurf stability de la condición de equilibrio para la condición de carga definida, obteniendo así los valores del equilibrio hidrostático del buque óptimo. Que nos permitirá una primera evaluación del nuevo diseño de nuestra 2ª alternativa de compartimentado. De una manera rápida y sencilla podremos comprobar nuevamente si la nueva condición de equilibrio propuesta y visualizar las características de estabilidad inicial para la condición de carga establecida.

En la Tabla 40 reflejamos los resultados obtenidos mediante el estudio de equilibrio hidrostático con el software Maxsurf stability, para la condición de carga anteriormente descrita de nuestra 2ª alternativa de compartimentado.

Tabla 40. Tabla resultados cálculo equilibrio hidrostático 2ª Alternativa de compartimentado

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.233
Displacement t	3744
Heel deg	0.0
Draft at FP m	4.252
Draft at AP m	6.615
Draft at LCF m	5.456
Trim (+ve by stern) m	2.763
WL Length m	84.496
Beam max extents on WL m	14.389
Wetted Area m ²	1432.773
Waterpl. Area m ²	954.417
Prismatic coeff. (Cp)	0.594
Block coeff. (Cb)	0.465
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.928
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.785
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	34.597
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	32.551
KB m	3.099
KG fluid m	7.892
BMt m	3.805
BML m	103.114
GMt corrected m	-0.643
GML m	102.318
KMt m	6.901
KML m	110.145
Immersion (TPc) tonne/cm	9.783
MTc tonne.m	49.363
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	-64.735
Max deck inclination deg	2.0394
Trim angle (+ve by stern) deg	2.0394

De los datos obtenidos en la condición de equilibrio volvemos a comprobar que tiene un GM transversal (GMt) negativo (-0.643 m) (ver Tabla 40 negrita). Pero con un valor mucho menor que los anteriores, el cual podremos conseguir que sea positivo, realizando una distribución de pesos de los contenedores y los tanques de lastre. Por lo que damos por buena esta compartimentación y ya en el estudio de estabilidad realizaremos diferentes distribuciones de carga que validen el modelo diseñado.

2.4 DECISIÓN:

La Tabla 41 muestra los resultados de las tres configuraciones y compartimentaciones del buque portacontenedores calculado en referencia a nuestro modelo matemático de optimización.

Tabla 41. Resumen de los datos obtenidos por el modelo matemático de optimización, la carena buque óptimo, 1ª alternativa de compartimentado y 2ª alternativa de compartimentado.

Parámetros	Modelo Matemático de Optimización	Carena Buque Óptimo	1ª Alternativa de compartimentado	2ª Alternativa de compartimentado
Eslora entre perpendiculares (L)	77.60 m	77.60 m	77.60 m	77.60 m
Manga (B)	14.38 m	14.38 m	14.38 m	14.38 m
Calado (T)	5.66 m	5.66 m	5.66 m	5.66 m
Puntal (D)	7.39 m	7.39 m	7.39 m	7.39 m
Coefficiente de bloque (Cb)	0.565	0.599	0.599	0.599
Desplazamiento (Δ)	3658 t	3771 t	3769 t	3744 t
Peso en Rosca (PR)	1360 t	1360 t	1360 t	1360 t
Número de TEUs óptimos (G2)	184	184	184	184
Número de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	160	156	153	145
Número de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	37	28	31	39
Número de TEUs en puntal sobre tanques de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1	1	1	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2	2	2	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4	4	4	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5	4	3	5
Eslora Cámara de Máquinas (Lcc)	20.1 m	20.1 m	20.1 m	20.1
Eslora Necesaria para los Tanque LNG (Ltk)	19.2 m	19.2 m	19.9 m	6.75
Eslora desde la Perpendicular de proa al mamparo de colisión (Lmpp)	3.88 m	3.88 m	3.88 m	3.88 m
Manga Doble Casco (BDCC)	1.44 m	1.44 m	1.44 m	1.44 m
Altura doble fondo (HDF1)	0.9 m	0.9 m	0.9 m	0.9 m
Eslora de castillo (ET1)	4.88 m	4.88 m	4.88 m	7.98 m
Eslora de toldilla (ET2)	5.58 m	5.58 m	5.58 m	5.58 m
Número de tanques de LNG (NTnt)	1	1	1	2
Capacidad Total tanques de LNG	80.2 m ³	100 m ³	100 m ³	90 m ³
Altura Metacéntrico transversal (GMt)	-	-2.03 m	-1.96 m	-0.64 m

En la Tabla 41 podemos ver y comprobar el grado de correspondencia entre los datos calculados en nuestro modelo matemático y las configuraciones de las carenas modeladas con el programa maxsurf. Vemos que las dimensiones principales no han sido modificadas con respecto al modelo matemático (L, B, T, D.....), únicamente se ha modificado un 6% el coeficiente de bloque (Cb), que hemos dado por bueno, al generar el modelo 3D, con el programa maxsurf modeler. Siendo las otras únicas modificaciones con respecto al modelo matemático las generadas en el compartimentado y distribución de los contenedores, con objeto de reducir el GMT negativo que el buque óptimo obtenía en el estudio de equilibrio para la condición de carga salida de puerto con distribución de carga homogénea (12.5 t por contenedor), como podemos ver en la tabla. Siendo para ello necesario aumentar el número de contenedores transportados bajo cubierta, con el objeto de bajar el centro de gravedad del buque. Como ya comentamos el modelo de compartimentación elegido es el que hemos llamado "2ª alternativa de compartimentado", ya que es el modelo de compartimentado que menor valor negativo de GMT nos da (Inferior a un metro) que podremos modificar y hacerlo positivo con una distribución de carga adecuada (ver Tabla 40).

El objetivo del siguiente apartado será comprobar el cumplimiento de los criterios de estabilidad mediante el estudio de las diferentes condiciones de carga, que debemos definir con el objeto de verificar la viabilidad del modelo.

Deliremos cuatro condiciones de carga, con dos situaciones cada una, de entrada y salida a puerto, donde variaremos los consumos (100% consumos a la salida de puerto y 10% los consumos a la llegada a puerto):

1. Condición de navegación en lastre, el buque irá sin contenedores.
2. Condición de máxima carga, contenedores en bodega con un peso de 24 t y los contenedores en cubierta con una carga más ligera entre 12.5, 7 y 2.5 t.
3. Condición de carga homogénea, todos los contenedores tendrán un peso 5 t.
4. Condición de carga con el número máximo de contenedores a 12.5 t.

El estudio de las condiciones de carga se realiza utilizando el programa de diseño naval Maxsurf Stability

3 ESTUDIO DE ESTABILIDAD INTACTA DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA DEL MODELO MATEMÁTICO

El objetivo de este apartado será comprobar el cumplimiento de los criterios de estabilidad mediante el estudio de las diferentes condiciones de carga definidas anteriormente de nuestro buque "2ª alternativa de compartimentado".

Tabla 42. Datos buque en estudio "2 Alternativa de compartimentado"

Parámetros	2ª Alternativa de compartimentado
Eslora entre perpendiculares (L)	77.60 m
Manga (B)	14.38 m
Calado (T)	5.66 m
Puntal (D)	7.39 m
Coefficiente de bloque (Cb)	0.599
Desplazamiento (Δ)	3744 Tn
Peso en Rosca (PR)	1360 Tn
Número de TEUs óptimos (G2)	184
Número de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	145
Número de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	39
Número de TEUs en puntal sobre tanques de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5
Eslora Cámara de Máquinas (Lcc)	20.1
Eslora Necesaria para los Tanque LNG (Ltk)	6.75
Eslora desde la Perpendicular de proa al mamparo de colisión (Lmpp)	3.88 m
Manga Doble Casco (BDCC)	1.44 m
Altura doble fondo (HDF1)	0.9 m
Eslora de castillo (ET1)	7.98 m
Eslora de toldilla (ET2)	5.58 m
Número de tanques de LNG (NTnt)	2
Capacidad Total tanques de LNG	90 m ³

3.1 CRITERIO DE ESTABILIDAD

La resolución MSC.267(85), recoge el Código Internacional de Estabilidad sin avería, 2008 (2008 IS CODE), que establece los siguientes criterios de estabilidad.

Criterios relativos a las propiedades de la curva de brazos adrizantes:

- El área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no será inferior a 0.055 m.rad hasta un ángulo de escora $\varphi=30^\circ$ ni inferior a 0.09 m.rad hasta un ángulo de escora $\varphi=40^\circ$, o hasta el ángulo de inundación φ_f si es inferior a 40°

- Además el área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de GZ) entre los ángulos de escora de 30° y 40° o entre 30° y φ_f , si este es inferior a 40° , no será inferior a 0.03 m.rad

- El brazo adrizante GZ será como mínimo de 0.20 m a un ángulo de escora igual o superior a 30°

- El brazo adrizante máximo corresponderá a un ángulo de escora preferiblemente superior a 30° pero no inferior a 25°

- La altura metacéntrica inicial GM_0 no será inferior a 0.15 m

Además, hay que cumplir los criterios para viento. El procedimiento es el siguiente:

- Someter el buque a la presión de un viento constante que actúa perpendicularmente al plano de crujía, lo que tendrá como resultado el correspondiente brazo escorante (lw_1)
- Suponer que a partir de ángulo de equilibrio resultante φ_0 el buque se balancea por la acción de las olas hasta alcanzar un ángulo de balance φ_1 a barlovento. Se prestará atención al efecto de un viento constante de forma que se eviten ángulos de escora excesivos.
- A continuación, se someterá al buque a la presión de una ráfaga de viento que dará como resultado el correspondiente brazo escorante (lw_2)
- En estas circunstancias, el área "b" debe ser igual o superior al área "a"

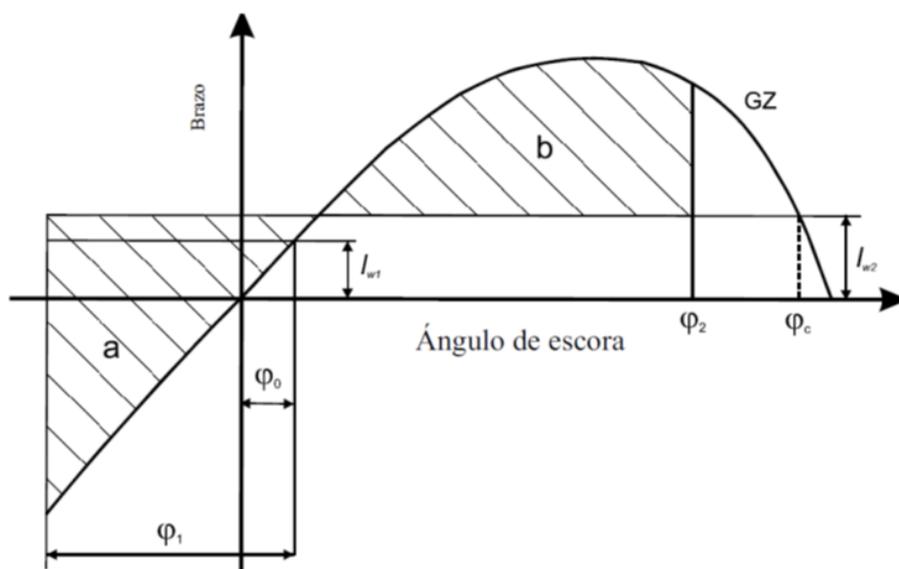


Figura 42. Viento y balance intensos

Fuente: [https://www.boe.es/eli/es/ai/2008/12/04/\(4\)](https://www.boe.es/eli/es/ai/2008/12/04/(4))

Donde los ángulos de la ilustración 40 se definen del siguiente modo:

- φ_0 = ángulo de escora provocado por un viento constante
- φ_1 = ángulo de balance a barlovento debido a la acción de las olas
- φ_2 = ángulo de inundación descendente (φ_f), o 50° , o φ_c , tomando de estos valores el menor.

Siendo:

- φ_f = ángulo de escora al que se sumergen las aberturas del casco, superestructuras o casetas que no puedan cerrarse de modo estanco a la intemperie. Al aplicar este criterio no hará falta considerar abiertas las pequeñas aberturas por las que no pueda producirse inundación progresiva
- φ_c = ángulo de la segunda intersección entre la curva de brazos escorantes lw_2 y la de brazos GZ

3.2 CONDICIONES DE CARGA.

Estudiaremos las siguientes condiciones de carga:

1. Condición de navegación en lastre, el buque irá sin contenedores.
2. Condición de máxima carga, contenedores en bodega con un peso de 24 t y los contenedores en cubierta con una carga más ligera entre 12.5 y 7 t.
3. Condición de carga homogénea, todos los contenedores tendrán un peso 5 t.
4. Condición de carga con el número máximo de contenedores a 12.5 t.

Para cada una de estas condiciones de carga se analizan dos situaciones, salida de puerto con el 100% de consumos y llegada a puerto con el 10% de los consumos.

3.3 CONDICIONES PREVIAS.

Para entender nuestra distribución de carga debemos definir una serie de grupos de pesos, que hemos adoptados para nuestro estudio de estabilidad:

- Pesos Fijos: Es la suma del peso en rosca ya calculado (Tabla 21), del peso de la tripulación (Tabla 24) y del peso de los respetos (Tabla 25).
- Prueba de Contenedores: Nos define el peso total de los contenedores transportados en la condición de carga en estudio y su centro de gravedad.

No se aplicará corrección por superficies libres en los tanques de lastre, ya que en las distintas condiciones de carga irán llenos o vacíos, por lo que no aplica esta corrección. Tampoco será de aplicación la corrección en los tanques de consumo, son tanque de dimensiones pequeñas y el valor del momento generado por la superficie libre del tanque dividido por el desplazamiento del buque da un valor inferior al 0.01 m, en todos los casos.

Deberemos también definir los puntos de inundación progresiva, que situaremos en las entradas de babor y estribor del puente, así como a babor y estribor del guadalcalor.

Tabla 43. Puntos de Inundación progresiva.

Key point	Type
Ventilación Maquinas Br	Downflooding point
Entrada Puente Br	Downflooding point
Ventilación Maquinas Er	Downflooding point
Entrada Puente Er	Downflooding point

3.4 ESTUDIO DE LAS CONDICIONES DE CARGA

El estudio de las condiciones de carga se realiza mediante la utilización del programa informático Maxsurf Stability. Para cada condición de carga se realizaremos los siguientes pasos:

1. Partiendo del compartimentado realizado en el apartado 2 se definen los distintos pesos fijos, el llenado de cada tanque y sus centros de gravedad en la tabla "Loadcase" y el programa nos calcula la situación de equilibrio para dicha distribución,
2. Para el cálculo de las características hidrostáticas del buque en esta condición de carga se utiliza la opción "Equilibrium" mostrando una tabla resumen.
3. Introduciendo el valor de los ángulos de -30 a 90 grados, mediante la opción "Large Angle Stability" se calcula la estabilidad a grandes ángulos.
4. El programa nos muestra los resultados de cada criterio de estabilidad, para el cual se han de calcular las diferentes áreas y centroides. Estos se muestran en la tabla resumen "Criteria"

También debemos comprobar que, para cada situación de carga descrita, cumple con el calado mínimo que permita el correcto funcionamiento de la hélice (4.20 m) y un trimado no superior a 15% de su Lpp. (1.16 m)

3.4.1 CONDICIÓN DE NAVEGACIÓN EN LASTRE.

En esta condición de carga el buque no transportará ningún contenedor

Es necesario definir el área lateral de la superestructura y su centro de gravedad vertical (KG), para el cálculo de los criterios de viento, ya que no está dibujada en el modelo de maxsurf.

Tabla 44. Área latera y KG de la superestructura

Área (m ²)	KG (m)
106.10	15.10

3.4.1.1 Salida de Puerto con el 100% de los consumes.

En esta condición el buque no transporta ningún contenedor y sus tanques de consumo están al 100%. La distribución de sus diferentes pesos y llenados, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 12 del Anexo 4 "Load case, Condición de lastre, Salida de puerto".

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 45. Datos Equilibrio en la Condición de Lastre salida de Puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	4.018
Displacement t	2581
Heel deg	0.0
Draft at FP m	3.746
Draft at AP m	4.291
Draft at LCF m	4.029
Trim (+ve by stern) m	0.545
WL Length m	79.639
Beam max extents on WL m	14.359
Wetted Area m ²	1141.582
Waterpl. Area m ²	797.715
Prismatic coeff. (Cp)	0.597
Block coeff. (Cb)	0.517
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.909
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.698
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.756
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	37.322
KB m	2.280
KG fluid m	3.879
BMt m	4.160
BML m	99.588
GMt corrected m	2.561
GML m	97.989
KMt m	6.440
KML m	101.865
Immersion (TPc) tonne/cm	8.177
MTc tonne.m	32.594
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	115.372
Max deck inclination deg	0.4025
Trim angle (+ve by stern) deg	0.4025

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el caldo mínimo de popa y tiene un GM positivo.

En la sección 13 del anexo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto

La Tabla 46 muestra la comprobación del cumplimiento de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 46. Tabla comprobación cumplimiento criterios de estabilidad intacta, para condición de lastre salida puerto.

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: IMO roll back angle	18.7	deg			
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	21.3423	Pass	+577.25
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	37.5373	Pass	+627.95
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	16.1950	Pass	+842.17
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	1.791	Pass	+795.50
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	48.2	Pass	+92.73
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0.150	m	2.561	Pass	+1607.33
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16.0	deg	1.2	Pass	+92.29
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80.00	%	4.63	Pass	+94.21
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100.00	%	598.81	Pass	+498.81

También mostraremos en la sección 14 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de lastre salida de Puerto.

3.4.1.2 Llegada a Puerto con los consumos al 10%.

En esta condición el buque no transporta ningún contenedor y sus tanques de consumo están al 10%. La distribución de sus diferentes pesos, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 15 del Anexo 4 “Load case, Condición de lastre, Llegada a puerto”.

En la sección 16 del anexo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto.

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 47. Datos de Equilibrio en la Condición de Lastre Llegada a puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	4.193
Displacement t	2724
Heel deg	0.0
Draft at FP m	3.939
Draft at AP m	4.446
Draft at LCF m	4.203
Trim (+ve by stern) m	0.507
WL Length m	79.643
Beam max extents on WL m	14.365
Wetted Area m ²	1172.660
Waterpl. Area m ²	806.582
Prismatic coeff. (Cp)	0.602
Block coeff. (Cb)	0.526
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.913
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.705
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.775
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	37.164
KB m	2.376
KG fluid m	3.906
BMt m	4.030
BML m	96.300
GMt corrected m	2.499
GML m	94.770
KMt m	6.405
KML m	98.673
Immersion (TPc) tonne/cm	8.267
MTC tonne.m	33.267
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	118.825
Max deck inclination deg	0.3746
Trim angle (+ve by stern) deg	0.3746

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el caldo mínimo de popa y tiene un GM positive.

La Tabla 48 muestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

También mostraremos en la sección 17 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de lastre llegada a Puerto.

Tabla 48. Tabla comprobación de cumplimientos criterios de estabilidad para la condición de lastre llegada a puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.3: IMO roll back angle	19.0	deg			
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	20.8648	Pass	+562.10
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	36.5673	Pass	+609.14
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	15.7025	Pass	+813.52
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	1.725	Pass	+762.50
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	47.3	Pass	+89.09
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.2.4: Initial GMT	0.150	m	2.499	Pass	+1566.00
267(85) Ch2 General Criteria	- 2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16.0	deg	1.2	Pass	+92.67
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80.00	%	4.64	Pass	+94.20
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100.00	%	580.12	Pass	+480.12

3.4.2 CONDICIÓN DE MÁXIMA CARGA

En esta condición estudiaremos la estabilidad para una distribución de carga con un número máximo de contenedores (184) y la máxima carga que podrá transportar el buque, donde los contenedores de bodega portarán un peso de 24 t y los contenedores sobre cubierta tendrán una carga de 12.5 t, 7 t, 5 t y 2.5 t (Contenedores vacíos).

En la Figura 43 se realiza una representación de la disposición y la carga de los contenedores en eslora identificadas por las filas, manga representado por el número inicial reseñado en cada contenedor y puntal definidos por las columnas. Quedando identificado también el peso de cada contenedor.

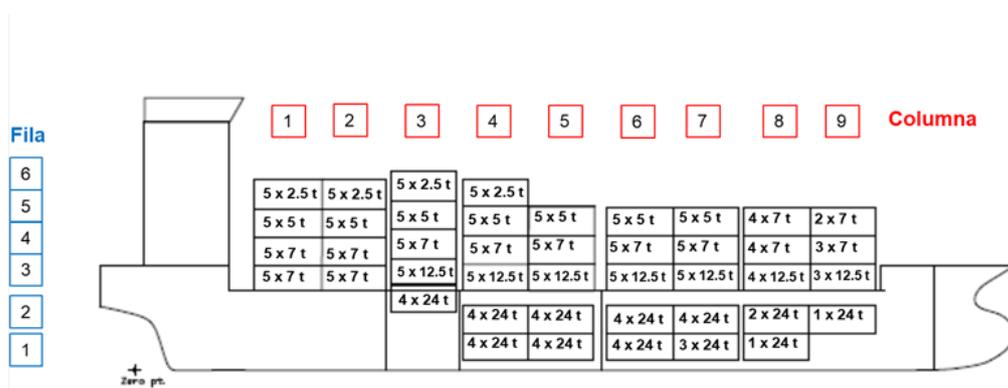


Figura 43. Distribución de contenedores en número y peso, en eslora, manga y puntal (Máxima Carga)

En la siguiente tabla definimos nuevamente la distribución de los contenedores con su número y peso, por columna y fila, identificando los contenedores transportados sobre y bajo cubierta.

Tabla 49. Distribución en número y peso de los contenedores en la condición de máxima carga

FILAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	COLUMNAS
6	5 x 2.5t	5 x 2.5t	5 x 2.5t	5 x 2.5t	-	-	-	-	-	
5	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	4 x 7t	2 x 7t	
4	5 x 7t	5 x 7t	5 x 7t	5 x 7t	5 x 7t	5 x 7t	5 x 7t	4 x 7t	3 x 7t	
3	5 x 7t	5 x 7t	5 x 12.5t	5 x 12.5t	5 x 12.5t	5 x 12.5t	5 x 12.5t	4 x 12.5t	3 x 12.5t	
2	-	-	4 x 24t	4 x 24t	4 x 24t	4 x 24t	4 x 24t	2x 24t	1 x 24t	
1	-	-	-	4 x 24t	4 x 24t	4 x 24t	3 x 24t	1 x 24t	-	TOTAL
Σ	20 - 107.5t	20 - 107.5t	24 - 231t	28 - 327t	23 - 314.5t	23 - 314.5t	22 - 290.5t	15 - 178t	9 - 96.5t	184 - 1967t

Se realizará una hoja de cálculo en Excel definiendo el peso de los contenedores en bodega y sobre cubierta, su distribución y su centro de gravedad, con las altura y medidas de la carena, con el objeto de calcular el centro de gravedad de la carga. Los valores obtenidos en la hoja de cálculo quedan definidos en la sección 18 del Anexo 6.

A modo de resumen el buque porta 184 TEUS, con un peso total de 1967 toneladas:

- Bajo cubierta: 39 TEUS con un peso de 24 t cada uno.
- Sobre cubierta: 145 TEUS de los cuales, 32 tienen un peso de 12.5 t, 58 tienen un peso de 7 t, 35 tienen un peso de 5t y 20 van vacíos con un peso de 2.5 t.

Es necesario definir el área lateral de la superestructura y las columnas de contenedores que porta sobre cubierta y su centro de gravedad vertical (KG), para el cálculo de los criterios de viento, ya que no están dibujadas en el modelo de maxsurf.

Tabla 50. Área Lateral y KG (Máxima carga)

Área (m ²)	KG (m)
596.90	12.56

3.4.2.1 Salida de Puerto con el 100% de los consumos.

En esta condición el buque transporta 184 contenedor y sus tanques de consumo están al 100%. La distribución de sus diferentes pesos, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 19 del Anexo 4 "Load case, Condición de máxima carga, Salida de puerto".

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 51. Datos de Equilibrio en la Condición de Máxima Carga Salida de puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.399
Displacement t	3792
Heel deg	0.0
Draft at FP m	4.854
Draft at AP m	5.943
Draft at LCF m	5.460
Trim (+ve by stern) m	1.089
WL Length m	83.665
Beam max extents on WL m	14.390
Wetted Area m ²	1420.210
Waterpl. Area m ²	904.497
Prismatic coeff. (Cp)	0.603
Block coeff. (Cb)	0.523
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.931
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.751
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	36.699
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	34.445
KB m	3.076
KG fluid m	5.723
BMt m	3.493
BML m	90.059
GMt corrected m	0.845
GML m	87.411
KMt m	6.568
KML m	93.125
Immersion (TPc) tonne/cm	9.271
MTc tonne.m	42.712
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	55.901
Max deck inclination deg	0.8041
Trim angle (+ve by stern) deg	0.8041

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el caldo mínimo de popa y tiene un GM positive.

En la sección 20 del anexo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto.

La Tabla 52 muestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 52. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios de estabilidad para la condición de Máxima Carga salida de puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: IMO roll back angle	19.0	deg			
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	6.4755	Pass	+105.49
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	9.2360	Pass	+79.11
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	2.7605	Pass	+60.60
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.322	Pass	+61.00
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	25.5	Pass	+1.82
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0.150	m	0.844	Pass	+462.67
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16.0	deg	6.2	Pass	+61.31
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80.00	%	45.88	Pass	+42.65
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100.00	%	123.74	Pass	+23.74

También mostraremos en la sección 21 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de carga máxima en salida de puerto.

3.4.2.2 Llegada a Puerto con los consumos al 10%.

En esta condición el buque transporta 184 contenedor y sus tanques de consumo están al 10%. La distribución de sus diferentes pesos, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 22 del Anexo 4 “Load case, Condición de máxima carga, Llegada a puerto”.

En la sección 23 del anexo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto.

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 53. datos Equilibrio en la Condición de Máxima Carga Llegada a puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.340
Displacement t	3727
Heel deg	0.0
Draft at FP m	4.898
Draft at AP m	5.781
Draft at LCF m	5.384
Trim (+ve by stern) m	0.884
WL Length m	82.947
Beam max extents on WL m	14.389
Wetted Area m ²	1400.963
Waterpl. Area m ²	890.791
Prismatic coeff. (Cp)	0.607
Block coeff. (Cb)	0.532
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.930
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.746
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	36.971
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	34.917
KB m	3.032
KG fluid m	5.759
BMt m	3.489
BML m	87.733
GMt corrected m	0.762
GML m	85.006
KMt m	6.521
KML m	90.759
Immersion (TPc) tonne/cm	9.131
MTc tonne.m	40.830
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	49.570
Max deck inclination deg	0.6525
Trim angle (+ve by stern) deg	0.6525

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el caldo mínimo de popa y tiene un GM positivo.

La Tabla 54 muestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 54. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios estabilidad para la condición de Máxima Carga llegada a puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: IMO roll back angle	18.7	deg			
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	6.0995	Pass	+93.55
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	8.7488	Pass	+69.66
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	2.6493	Pass	+54.13
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.309	Pass	+54.50
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	25.5	Pass	+1.82
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.4: Initial GMt	0.150	m	0.762	Pass	+408.00
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (\leq)	16.0	deg	7.1	Pass	+55.78
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (\leq)	80.00	%	48.28	Pass	+39.65
	Area1 / Area2 shall not be less than (\geq)	100.00	%	120.28	Pass	+20.28

También mostraremos en la sección 24 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de carga máxima en llegada a puerto.

3.4.3 CONDICIÓN DE CARGA HOMOGÉNEA

En esta condición estudiaremos la estabilidad para una distribución de carga (184 TEUs), donde los contenedores de bodega y sobre cubierta tendrán un peso de 5 t (carga Homogénea).

En la Figura 44 , se realiza una representación de la disposición y la carga de los contenedores en eslora identificados por las filas, manga representado por el número inicial reseñado en cada contenedor y puntal definidos por las columnas. Quedando identificado también el peso de cada contenedor.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

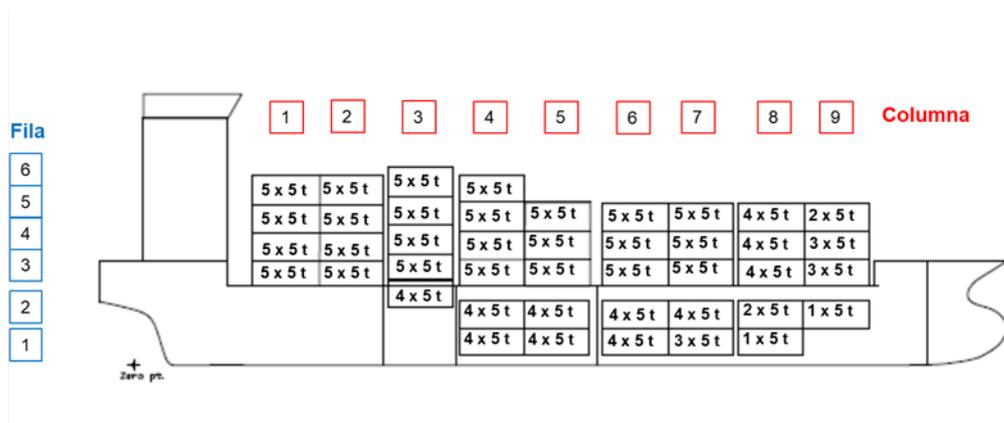


Figura 44. Distribución de contenedores en número y peso, en eslora, manga y puntal (Carga homogénea)

En la siguiente tabla definimos nuevamente la distribución de los contenedores con su número y peso, por columna y fila, identificando los contenedores transportados sobre y bajo cubierta.

Tabla 55. Distribución en número y peso de los contenedores en la condición de carga homogénea

FILAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	COLUMNAS
6	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	-	-	-	-	-	
5	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	4 x 5t	2 x 5t					
4	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	4 x 5t	3 x 5t					
3	5 x 5t	5 x 5t	5 x 5t	4 x 5t	3 x 5t					
2	-	-	4 x 5t	4 x 5t	4 x 5t	4 x 5t	4 x 5t	2 x 5t	1 x 5t	
1	-	-	-	4 x 5t	4 x 5t	4 x 5t	3 x 5t	1 x 5t	-	TOTAL
Σ	20 - 100t	20 - 100t	24 - 120t	28 - 140t	23 - 115 t	23 - 115t	22 - 110t	15 - 75t	9 - 45t	184 - 920t

Se realizará una hoja de cálculo en Excel definiendo el peso de los contenedores en bodega y sobre cubierta, su distribución y su centro de gravedad, con las altura y medidas de la carena, con el objeto de calcular el centro de gravedad de la carga. Los valores obtenidos en la hoja de cálculo quedan definidos en la sección 25 del Anexo 4.

A modo de resumen, el buque porta 184 TEUS, con un peso total de 920 toneladas:

- Bajo cubierta: 39 TEUS con un peso de 5 t cada uno.
- Sobre cubierta: 145 TEUS con un peso de 5 t cada uno.

Es necesario definir el área lateral de la superestructura y las columnas de contenedores que porta sobre cubierta y su centro de gravedad vertical (KG), para el cálculo de los criterios de viento, ya que no están dibujadas en el modelo de maxsurf.

Tabla 56. Área Lateral y KG (Carga homogénea)

Área (m ²)	KG (m)
596.90	12.56

3.4.3.1 Salida de Puerto con el 100% de los consumos.

En esta condición el buque transporta 184 contenedor y sus tanques de consumo están al 100%. La distribución de sus diferentes pesos, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 26 del Anexo 4 “Load case, Condición de carga homogénea, Salida de puerto”.

En la sección 27 del anexo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto.

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 57. Datos Equilibrio de carga homogénea Salida de Puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	4.773
Displacement t	3223
Heel deg	0.0
Draft at FP m	4.337
Draft at AP m	5.209
Draft at LCF m	4.802
Trim (+ve by stern) m	0.872
WL Length m	80.999
Beam max extents on WL m	14.379
Wetted Area m ²	1281.687
Waterpl. Area m ²	845.752
Prismatic coeff. (Cp)	0.606
Block coeff. (Cb)	0.523
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.923
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.726
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.205
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	36.156
KB m	2.709
KG fluid m	5.658
BMt m	3.711
BML m	89.925
GMt corrected m	0.762
GML m	86.976
KMt m	6.420
KML m	92.629
Immersion (TPc) tonne/cm	8.669
MTc tonne.m	36.128
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	42.864
Max deck inclination deg	0.6434
Trim angle (+ve by stern) deg	0.6434

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el caldo mínimo de popa y tiene un GM positive.

La Tabla 58. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios estabilidad para la condición de carga Homogenea salida de Puertomuestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 58. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios estabilidad para la condición de carga Homogenea salida de Puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: IMO roll back angle	17.8	deg			
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	7.1914	Pass	+128.20
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	11.7929	Pass	+128.70
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	4.6015	Pass	+167.70
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.474	Pass	+137.00
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	32.7	Pass	+30.91
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.4: Initial GMT	0.150	m	0.762	Pass	+408.00
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16.0	deg	8.3	Pass	+47.82
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80.00	%	42.85	Pass	+46.44
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100.00	%	232.65	Pass	+132.65

También mostraremos en la sección 28 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de carga máxima en salida de puerto.

3.4.3.2 Llegada a Puerto con los consumos al 10%.

En esta condición el buque transporta 184 contenedor y sus tanques de consumo están al 10%. La distribución de sus diferentes pesos, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 29 del Anexo 4 “Load case, Condición de carga homogénea, Llegada a puerto”.

En la sección 30 del anexo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 59. Datos equilibrio de carga homogénea Llegada a Puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	4.706
Displacement t	3159
Heel deg	0.0
Draft at FP m	4.408
Draft at AP m	5.005
Draft at LCF m	4.725
Trim (+ve by stern) m	0.597
WL Length m	80.304
Beam max extents on WL m	14.377
Wetted Area m ²	1267.409
Waterpl. Area m ²	836.373
Prismatic coeff. (Cp)	0.610
Block coeff. (Cb)	0.537
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.921
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.724
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.543
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	36.447
KB m	2.664
KG fluid m	5.699
BMt m	3.726
BML m	89.096
GMt corrected m	0.692
GML m	86.061
KMt m	6.390
KML m	91.757
Immersion (TPc) tonne/cm	8.573
MTc tonne.m	35.029
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	38.118
Max deck inclination deg	0.4411
Trim angle (+ve by stern) deg	0.4411

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el caldo mínimo de popa y tiene un GM positive.

La Tabla 60. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios de estabilidad para la condición de carga homogénea llegada a puertomuestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 60. Tabla comprobación de cumplimiento de criterios de estabilidad para la condición de carga homogénea llegada a puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: IMO roll back angle	17.5	deg			
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	6.7086	Pass	+112.89
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	11.1209	Pass	+115.66
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	4.4122	Pass	+156.69
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.455	Pass	+127.50
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	32.7	Pass	+30.91
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.4: Initial GMT	0.150	m	0.692	Pass	+361.33
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (\leq)	16.0	deg	9.2	Pass	+42.36
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (\leq)	80.00	%	44.42	Pass	+44.48
	Area1 / Area2 shall not be less than (\geq)	100.00	%	216.92	Pass	+116.92

También mostraremos en la sección 31 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de carga homogénea en llegada a puerto.

3.4.4 CONDICIÓN DE CARGA CON EL NÚMERO MÁXIMO DE CONTENEDORES A 12.5 TONELADAS

En esta condición estudiaremos la estabilidad para una distribución de carga, donde los contenedores de bodega y sobre cubierta portarán un peso de 12.5 t (carga de optimización) Siendo su número máximo de 128 TEUs.

En la Figura 45, se realiza una representación de la disposición y la carga de los contenedores en eslora identificados por las filas, manga representado por el número inicial reseñado en cada contenedor y puntal definidos por las columnas. Quedando identificado también el peso de cada contenedor.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

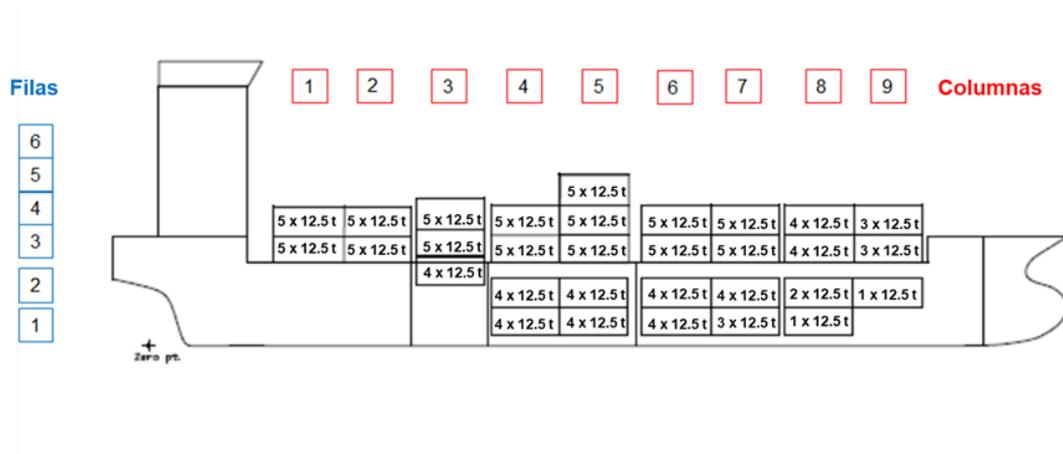


Figura 45. Distribución de contenedores en número y peso, en eslora, manga y puntal (Carga 12.5t)

En la siguiente tabla definimos nuevamente la distribución de los contenedores con su número y peso, por columna y fila, identificando los contenedores transportados sobre y bajo cubierta.

Tabla 61. Distribución en número y peso de los contenedores en la condición de carga de 12.5t por contenedor

FILAS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	COLUMNAS
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
5	-	-	-	-	5 x 12.5t	-	-	-	-	
4	5 x 12.5t	5 x 12.5t	5 x 12.5t	4 x 12.5t	3 x 12.5t					
3	5 x 12.5t	5 x 12.5t	5 x 12.5t	4 x 12.5t	3 x 12.5t					
2	-	-	4 x 12.5t	4 x 12.5t	4 x 12.5t	4 x 12.5t	4 x 12.5t	2 x 12.5t	1 x 12.5t	
1	-	-	-	4 x 12.5t	4 x 12.5t	4 x 12.5t	3 x 12.5t	1 x 12.5t	-	TOTAL
Σ	10 - 125t	10 - 125t	14 - 175t	18 - 225t	23 - 287.5t	18 - 225t	17 - 212.5t	11 - 137.5t	7 - 87.5t	128 - 1600t

Se realizará una hoja de cálculo en Excel definiendo el peso de los contenedores en bodega y sobre cubierta, su distribución y su centro de gravedad, con las altura y medidas de la carena, con el objeto de calcular el centro de gravedad de la carga. Los valores obtenidos en la hoja de cálculo quedan definidos en la sección 32 del Anexo 4.

A modo de resumen, el buque porta 128 TEUS, con un peso total de 1600 toneladas:

- Bajo cubierta: 39 TEUS con un peso de 12.5 t cada uno.
- Sobre cubierta: 89 TEUS con un peso de 12.5 t cada uno.

Es necesario definir el área lateral de la superestructura y las columnas de contenedores que porta sobre cubierta y su centro de gravedad vertical (KG), para el cálculo de los criterios de viento, ya que no están dibujadas en el modelo de maxsurf.

Tabla 62.. Área Lateral y KG (Carga 12.5 t)

Área (m2)	KG (m)
409.71	11.49

3.4.4.1 Salida de Puerto con el 100% de los consumos.

En esta condición el buque transporta 128 contenedores y sus tanques de consumo están al 100%. La distribución de sus diferentes pesos, así como sus principales datos los podemos ver en la sección 33 del Anexo 4 “load case con el número máximo de contenedores a 12.5 t”.

En la sección 34 del anexo del capítulo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto.

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 63. Datos equilibrio de número máximo de contenedores a 12.5 t Salida de Puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.381
Displacement t	3745
Heel deg	0.0
Draft at FP m	5.176
Draft at AP m	5.585
Draft at LCF m	5.398
Trim (+ve by stern) m	0.409
WL Length m	81.485
Beam max extents on WL m	14.389
Wetted Area m ²	1399.846
Waterpl. Area m ²	880.277
Prismatic coeff. (Cp)	0.619
Block coeff. (Cb)	0.560
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.930
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.751
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.487
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	35.456
KB m	3.038
KG fluid m	5.676
BMt m	3.431
BML m	84.143
GMt corrected m	0.794
GML m	81.506
KMt m	6.470
KML m	87.181
Immersion (TPc) tonne/cm	9.023
MTC tonne.m	39.331
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	51.867
Max deck inclination deg	0.3019
Trim angle (+ve by stern) deg	0.3019

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el calado mínimo de popa y tiene un GM positivo.

La Tabla 64 muestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 64. Tabla comprobación de criterios de estabilidad para la condición de carga con número máximo de contenedores a 12.5 t Salida de Puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: IMO roll back angle	19.6	deg			
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	6.3700	Pass	+102.14
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	9.2428	Pass	+79.24
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	2.8728	Pass	+67.13
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.325	Pass	+62.50
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	25.5	Pass	+1.82
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt	0.150	m	0.794	Pass	+429.33
267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (<=)	16.0	deg	6.1	Pass	+61.66
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (<=)	80.00	%	38.86	Pass	+51.43
	Area1 / Area2 shall not be less than (>=)	100.00	%	143.60	Pass	+43.60

También mostraremos en la sección 35 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de carga con número máximo de contenedores a 12.5 t Salida de Puerto:

3.4.4.2 Llegada a Puerto con los consumos al 10%.

En esta condición el buque transporta 128 contenedores y sus tanques de consumo están al 10%. La distribución de sus diferentes pesos así como sus datos los podemos ver en la sección 36 del Anexo 4 “load case con el número máximo de contenedores a 12.5 t”.

En la sección 37 del anexo del capítulo 4 se adjunta la tabla que muestra los datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga. Los datos de esta tabla son los necesarios para la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto.

Con dicha condición de carga obtenemos la siguiente condición de equilibrio:

Tabla 65. Datos equilibrio de número máximo de contenedores a 12.5 t Llegada a Puerto

Equilibrium	
Draft Amidships m	5.318
Displacement t	3680
Heel deg	0.0
Draft at FP m	5.233
Draft at AP m	5.403
Draft at LCF m	5.325
Trim (+ve by stern) m	0.170
WL Length m	80.576
Beam max extents on WL m	14.388
Wetted Area m ²	1383.248
Waterpl. Area m ²	869.449
Prismatic coeff. (Cp)	0.625
Block coeff. (Cb)	0.574
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.929
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.750
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.778
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	35.845
KB m	2.996
KG fluid m	5.711
BMt m	3.434
BML m	82.796
GMt corrected m	0.719
GML m	80.081
KMt m	6.430
KML m	85.792
Immersion (TPc) tonne/cm	8.912
MTc tonne.m	37.974
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	46.168
Max deck inclination deg	0.1257
Trim angle (+ve by stern) deg	0.1257

Donde verificamos que cumple con el trimado máximo permitido, el calado mínimo de popa y tiene un GM positivo.

La Tabla 66 muestra la comprobación de los criterios de estabilidad en estado intacto de nuestro buque para la condición de carga establecida:

Tabla 66. Tabla comprobación de criterios de estabilidad para la condición de carga con número máximo de contenedores a 12.5 t Llegada a Puerto

Code	Criteria	Value	Units	Actual	Status	Margin %
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: IMO roll back angle	19.3	deg			
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 30	3.1513	m.deg	6.0074	Pass	+90.63
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 0 to 40	5.1566	m.deg	8.7557	Pass	+69.80
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.1: Area 30 to 40	1.7189	m.deg	2.7483	Pass	+59.89
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.2: Max GZ at 30 or greater	0.200	m	0.312	Pass	+56.00
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.3: Angle of maximum GZ	25.0	deg	25.5	Pass	+1.82
267(85) Ch2 General Criteria -	2.2.4: Initial GMt	0.150	m	0.719	Pass	+379.33
267(85) Ch2 General Criteria -	2.3: Severe wind and rolling				Pass	
	Angle of steady heel shall not be greater than (\leq)	16.0	deg	5.2	Pass	+67.24
	Angle of steady heel / Deck edge immersion angle shall not be greater than (\leq)	80.00	%	31.70	Pass	+60.38
	Area1 / Area2 shall not be less than (\geq)	100.00	%	190.82	Pass	+90.82

También mostraremos en la sección 38 del anexo 4 la gráfica GZ para la condición de carga con número máximo de contenedores a 12.5 t Llegada a Puerto:

4 CONCLUSIONES

Modelada la carena del Buque óptimo en el Maxsurf (Modeller y stability), es decir el obtenido con el modelo matemático de optimización, calculados y dibujados sus tanques de consumo, así como los tanques de doble casco y doble fondo y realizado el compartimentado definido en nuestro modelo matemático se ha comprobado el incumplimiento de los criterios de estabilidad. Consecuentemente, fue necesario realizar dos modificaciones en dicho compartimentado hasta conseguir un modelo viable capaz de superar dichos criterios. Para ello fue necesaria la redistribución y división del tanque de LNG lo que permitió poder ampliar el número de contenedores transportados en bodega y cumplir así con la curva de KG máximo.

La respuesta del modelo fue analizada para 4 condiciones de carga, cada una en 2 situaciones distintas de navegación: salida y entrada en puerto, con las siguientes características:

- Condición 1: Condición de lastres, el buque no transportaba ningún contenedor.
- Condición 2: Condición de carga homogénea, buque transportaba 184 contenedores con una carga de 5 t. por contenedor. Transportando un total de 920 t.

- Condición 3: Condición de carga máxima, el buque transporta 184 contenedores con una carga distribuida de 24 t., 12 t., 7 t., 5 t. y 2.5 t. Con la estiva de los contenedores más pesados en bodega y primer nivel de cubierta. Transportando un total de 1967 t.
- Condición 4: Condición de número máximo de contenedores a 12.5 t, el buque transporta 128 contenedores con una carga de 12.5 t. por contenedor. Transportando un total de 1600 t.

En la Tabla 67 se muestra el compartimentado finalmente seleccionado para el buque óptimo. Tal y como se puede ver, fue sólo necesaria la modificación de la cámara de tanques de LNG para albergar 2 tanques de disposición vertical. En la propuesta de compartimentado óptimo sugerido por el modelo se asumió un único tanque de LNG con disposición horizontal. Con este nuevo compartimentado sería posible el transporte de 184 contenedores (capacidad de carga del modelo óptimo-ver capítulo 5) cumpliendo los criterios establecidos y de obligado cumplimiento del Código Internacional de Estabilidad sin avería, 2008 (Código IS 2008), adoptado el 4 de diciembre de 2008 mediante Resolución MSC 267(85). Sin embargo, la carga por contenedor para dicha condición de carga sería heterogénea. Considerando que el modelo de optimización acepta 12,5 t/TEU, esta situación sería viable con el nuevo compartimentado (ver Tabla 67) cargando 128 TEU.

Tabla 67. Resumen de los datos obtenidos por el modelo matemático de optimización y 2ª alternativa al buque óptimo.

Parámetros	Buque Óptimo	2ª Alternativa de Compartimentado
Eslora entre perpendiculares (L)	77.60 m	77.60 m
Manga (B)	14.38 m	14.38 m
Calado (T)	5.66 m	5.66 m
Puntal (D)	7.39 m	7.39 m
Coefficiente de bloque (Cb)	0.565	0.599
Desplazamiento (Δ)	3658 Tn	3744 Tn
Peso en Rosca (PR)	1360 Tn	1360 Tn
Número de TEUs óptimos (G2)	184	184
Número de TEUs sobre cubierta (NCSCp)	160	145
Número de TEUs bajo cubierta (NCHOp)	37	39
Número de TEUs en puntal sobre tanques de LNG y bajo cubierta (NCD2)	1	1
Número de TEUs en puntal en bodega (NCD)	2	2
Número de TEUs en manga en bodega (NCB)	4	4
Número de TEUs en eslora en bodega (NCL)	5	5
Eslora Cámara de Máquinas (Lcc)	20.1 m	20.1
Eslora Necesaria para los Tanque LNG (Ltk)	19.2 m	6.75
Eslora desde la Perpendicular de proa al mamparo de colisión (Lmpp)	3.88 m	3.88 m
Manga Doble Casco (BDCC)	1.44 m	1.44 m
Altura doble fondo (HDF1)	0.9 m	0.9 m
Eslora de castillo (ET1)	4.88 m	7.98 m
Eslora de toldilla (ET2)	5.58 m	5.58 m
Número de tanques de LNG (NTnt)	1	2
Capacidad Total tanques de LNG	80.2 m ³	90 m³

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Capítulo 7

Comportamiento de las flotas optimizadas ante la evolución normativa medioambiental en puerto

La entrada en vigor de la obligatoriedad de facilitar infraestructuras para el Cold Ironing (CI) en los puertos de los países miembros (Directive 2014/94/EU), adelanta una mayor exigencia normativa respecto a las emisiones contaminantes permitidas en puerto. Este capítulo analizará la posibilidad de que en los próximos años se establezca un sistema tarifario en puerto que incentive el CI para el SSS, de forma que, estableciendo un paralelismo con el sistema tarifario por uso de infraestructuras en el transporte terrestre se simulen los efectos de tal coste operativo, o en su defecto la inversión adicional en el equipamiento necesario para usar CI, sobre la competitividad del SSS.

Aceptando esta hipótesis, los resultados de rendimiento obtenidos a través del modelo desarrollado en esta tesis se pueden ver afectados significativamente. Con objeto de conocer tal afectación, en este capítulo se modelará matemáticamente un posible sistema tarifario de cobro en puerto basado en la diferencia de emisiones por uso de CI (provocadas por generación eléctrica en tierra) frente a las emisiones de los motores auxiliares a bordo.

El resultado de la modelización se aplicará no sólo al escenario (Vigo-St.Nazaire) y flota óptima obtenidos en el capítulo 5 (buques feeder) sino también a otras rutas que afecten a regiones cuyos sistemas eléctricos en tierra sean lo suficientemente diferentes como para aportar información que permita alcanzar conclusiones más amplias. Igualmente, las flotas analizadas se ampliarán más allá de las obtenidas en el Capítulo 5, incluyendo Ro-Pax convencionales que aporten un punto de referencia para comparar el rendimiento del CI en otros contextos de SSS.

Finalmente, el capítulo se completa con el análisis del proyecto de inversión en el equipo necesario para usar CI y su sensibilidad a las variables clave.

1 INTRODUCCIÓN

Se conoce por *Cold Ironing* (CI) al proceso de suministro eléctrico de los buques desde la red de tierra cuando están atracados. Por lo tanto, con el CI el consumo de electricidad durante el atraque se satisface conectando los buques a la red eléctrica en tierra. En consecuencia, los motores auxiliares de los buques, que suelen suministrar la electricidad para mantener

su funcionamiento durante el atraque, se apagan y esto conlleva un ahorro de emisiones al no quemar combustibles en puerto. El suministro eléctrico siempre produce emisiones contaminantes durante la generación (fuentes terrestres), sin embargo, las ventajas del uso de CI descansan en la reubicación de la fuente de emisión fuera de los puertos. Los beneficios potenciales de la CI aumentan al considerar las ubicaciones de los puertos y su presión de actividad. Las emisiones de los buques, en términos de NOx y SOx, tienen un impacto directo en la ciudadanía, por lo que la actividad portuaria de los buques es especialmente dañina debido a la existencia de importantes núcleos de población en los *hinterlands*.

Si bien la alternativa de CI ha sido abordada en trabajos previos (ver Capítulo 2), la mayoría de ellos han centrado su análisis en el punto de vista portuario (inversión en instalaciones) asumiendo que el papel principal de los puertos es velar por el interés general. Se obtuvieron importantes conclusiones a partir de modelos capaces de estimar las ventajas medioambientales después de la dotación de infraestructuras para CI en los puertos. Sin embargo, en la mayoría de los casos, estos beneficios se obtuvieron a través del análisis de proyectos de inversión para los puertos, donde la perspectiva del buque apenas se abordó más allá de su disposición a utilizar CI (tasas de penetración).

Este capítulo presenta un enfoque diferente del CI, ya que no sólo asume las emisiones portuarias como un coste adicional para los buques a través de su cobro por tarificación, sino que también examina el impacto de una posible adaptación del buque para uso de CI en el rendimiento económico de los operadores de buques que operan en Short Sea Shipping (SSS). Además, el trabajo proporciona información útil sobre la influencia de diferentes variables en los resultados esperados: el precio de la electricidad del puerto, el coste del combustible, los costes de capital, el tiempo invertido en la conexión a tierra y el valor de las tasas medioambientales.

1.1 ACTUALES INICIATIVAS EN LOS PUERTOS EUROPEOS

En la Unión Europea (UE), desde 2010 los puertos comunitarios exigen un límite máximo de concentración de azufre del 0,1% para los combustibles marinos utilizados por los buques de navegación interior y los buques atracados (Directiva 2005/33 / CE que modifica la Directiva 1999/32 / CE). A pesar de esta restricción, la Comisión reconoció en 2006 que la regulación establecida hasta la fecha era insuficiente para mantener la calidad del aire en los puertos europeos. En consecuencia, recomendó el uso de On-Shore Power Supply (OPS) por los buques atracados en puertos comunitarios (Recomendación 2006/339 / CE), ya que proporciona beneficios adicionales, como la reducción del ruido, especialmente para aquellos puertos situados cerca de zonas residenciales. Posteriormente, la COM 2013 (295) señaló la necesidad de requisitos más estrictos sobre el rendimiento medioambiental de los buques en los puertos.

En un paso más, la Directiva 2014/94 / UE exige una adaptación de las instalaciones portuarias para que se incluyan en los marcos de políticas nacionales, lo que involucrará a los estados miembros invirtiendo para garantizar un suministro de ESS para los buques, especialmente en los puertos de la Red Central TEN-T, para diciembre de 2025. Paralelamente, el Reglamento (UE) (2017/352) ha declarado la intención de definir criterios comunes (entre la Comisión Europea y los Estados miembros) para la tarificación ambiental voluntaria. Sin embargo, este Reglamento también da libertad a los puertos para establecer su propio sistema de tarificación ambiental, y esto ha generado una multitud de soluciones

que han sido adoptadas por los puertos (Sornn-Friese et al., 2021). Los puertos europeos han basado sus estrategias comerciales en alentar a los operadores de buques a utilizar la IC haciéndola más atractiva: los gobiernos nacionales están apoyando las inversiones en infraestructura portuaria e incluso los costos de operación. Para coordinar la implementación en todos los puertos, la Dirección General de Movilidad y Transporte de la Comisión de la UE (DG MOVE) realizó un estudio en 2017 sobre las tarifas de infraestructura portuaria a partir de criterios de sostenibilidad (Comisión Europea, 2017). Entre las conclusiones, son necesarias reducciones significativas en las cuotas portuarias (hasta un 50% aplicado como cargo ambiental por el uso de CI) para mantener el interés del operador de buques en el uso de CI.

En un paso posterior, la Directiva 2014/94/UE exige una adaptación de las instalaciones portuarias que debe estar recogida en el marco regulatorio de las políticas nacionales, que implicará que los estados miembros inviertan lo necesario para asegurar el suministro eléctrico desde tierra (OPS) a los buques a partir de diciembre del 2025. La directiva obliga especialmente a garantizar tal suministro desde los puertos pertenecientes a la *Trans-European Transport Network (TEN-T)* (Regulation (EU) No 1315/2013). Paralelamente, el Reglamento (UE) (2017/352) ha declarado la intención de definir criterios comunes (entre la Comisión Europea y los Estados miembros) para la tarificación medioambiental voluntaria. Sin embargo, este Reglamento también da libertad a los puertos para establecer su propio sistema de tarificación medioambiental, y esto ha generado a lo largo de estos años una multitud de soluciones que han sido adoptadas por los diferentes puertos europeos (Sornn-Friese et al., 2021). La mayoría de los puertos europeos han basado sus estrategias comerciales en animar a los operadores de buques a utilizar el CI mostrando esta solución como la más atractiva: los gobiernos nacionales están financiando las inversiones en infraestructura portuaria e incluso los costos de operación vinculados. Para coordinar la implementación de este "*green charging*" en todos los puertos europeos, la *EU Commission's Directorate-General for Mobility and Transport (DG MOVE)* impulsó un estudio en 2017 sobre la tarificación de la infraestructura portuaria a partir de criterios medioambientales (Comisión Europea, 2017). Entre las conclusiones obtenidas destaca que, son necesarias reducciones significativas en las tasas portuarias (hasta un 50% aplicado como *Environmental charging* por el uso de CI) para mantener el interés del operador de buques en el CI.

En la misma línea, la *Green Guide* (ESPO, 2012) y el *ESPO Environmental Report* (2019), ambos publicados por la *European Sea Ports Organization* (ESPO), animan específicamente a las autoridades portuarias a ser proactivas en la gestión de la calidad del aire incluyendo las instalaciones de OPS como "*infraestructuras blandas*" (política TEN-T) y argumentan que las bonificaciones o reducciones en las tasas portuarias deben ser considerarse para estimular el uso del CI a corto plazo.

La mayoría de los programas medioambientales aplicados por los puertos europeos se basan en índices o certificaciones ambientales (Energy Efficiency Design Index-EEDI-, Environmental Ship Index-ESI, Green Award- Comisión Europea, 2017-), o incluso en el cumplimiento de "Guías de buenas prácticas medioambientales" a nivel nacional (como el Real Decreto Legislativo 2011/2 de España). De esta manera, los buques certificados pueden obtener descuentos sobre las tasas portuarias base.

La implementación de los programas medioambientales en los puertos de la UE (principalmente programas de reducciones tarifarias), no está condicionada por el tamaño del puerto. Sin embargo, los puertos de mayor tamaño, debido a su mayor capacidad

financiera, pueden implementar más fácilmente programas de tarificación ambiental (Comisión Europea, 2017).

Oslo, Marsella y Gotemburgo, entre otros, aplican diferenciaciones ambientales en las tarifas portuarias que se basan en una reducción para aquellos buques que utilizan CI. El puerto de Estocolmo, por ejemplo, no solo aplica estas reducciones, sino que además ofrece una subvención de 1 millón de coronas suecas (99.000 €) para la modernización de los buques Ro-Pax que hacen escala regularmente en el puerto (Ports of Stockholm, 2020).

2 EL MÉTODO

Para evaluar con precisión el impacto de la CI en la actividad del SSS, las siguientes secciones presentan un modelo de cálculo capaz de cuantificar su rendimiento en términos monetarios.

2.1 IMPACTO MEDIOAMBIENTAL DEL COLD IRONING.

Esta sección presenta el modelo matemático para calcular el coste de la contaminación atmosférica de los buques SSS en puerto bajo dos circunstancias: la generación convencional de electricidad a bordo (motores auxiliares) y a través del uso de CI. Si bien el CI es sólo una alternativa para el tiempo de atraque de los buques, con el fin de ofrecer un conocimiento más amplio sobre la contaminación en puerto, el modelo también recoge la evaluación de la contaminación atmosférica generada durante la condición de maniobras de los buques. Así, las ecuaciones 85 y 87 proporcionan el coste medioambiental anual (€/ año) de la operación de un buque convencional (generación de electricidad a bordo) durante la fase de maniobras (CEM_{2x} , $\forall x \in X$, ver Anexo 5) y atraque (CEM_{3x} , $\forall x \in X$) en una línea SSS.

$$CEM_{2x} = Ntrips \times \sum_{k=1}^2 (CEM2xk) \quad \forall x \in X \quad (85)$$

$$CEM_{2xk} = \sum_{u=1}^5 (EG2ux \times (TVB2) \times CF2ufv); \quad \forall x \in X \wedge \forall k \in K \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (86)$$

$$CEM_{3x} = Ntrips \times \sum_{k=1}^2 (CEM3xk) \quad \forall x \in X \quad (87)$$

$$CEM_{3xk} = \sum_{u=1}^5 (EG3ux \times (TVB3x) \times CF3ufv); \quad \forall x \in X \wedge \forall k \in K \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (88)$$

De la misma forma, la ecuación 89 (CEG_x , $\forall x \in X$) ofrece información sobre los costes medioambientales anuales durante el atraque cuando el buque está conectado a la red eléctrica de tierra (opción CI).

$$CEG_x = Ntrip \times \sum_{k=1}^2 (CEGxk) \quad \forall x \in X \quad (89)$$

$$CEG_{xk} = \sum_{u=1}^5 (EFGuk \times (TVB3x + ST) \times PAx \times CF3ufv); \quad \forall x \in X \wedge \forall k \in K \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V \quad (90)$$

Estas expresiones (85-90) cuantifican en términos monetarios el impacto de los contaminantes ($U^{**} = \{1, \dots, u\}$): NO_x (precursores del ozono), SO_2 (sustancias acidificantes), $PM_{2.5}$ (masa de materia particulada), PM_{10} y los gases de efecto invernadero CO_2) que son emitidos al aire por diferentes tipos de buques compatibles con la actividad de SSS ($X = \{1, \dots, x\}$), contenedores y buques Roll-on, Roll-off al operar en diferentes puertos ($K = \{1, \dots, k\}$) pertenecientes a distintos países ($FF = \{1, \dots, f\}$).

Por las características de la red eléctrica en tierra, la ecuación 90 no sólo integra las variables recogidas en las ecuaciones (85-88), relativas a las emisiones de los buques: viajes anuales de las rutas (N_{trip}), el tiempo (horas) invertido en las distintas etapas (TVB₂-tiempo de maniobra-, TVB_{3x}; $\forall x \in X$ -tiempo de atraque-), factores de emisión, costes unitarios de los contaminantes, sino que además considera la potencia eléctrica necesaria para operar durante el atraque en puerto (PA_x ; $\forall x \in X$) y el tiempo de retraso por conexión (ST).

Las ecuaciones 85-88 sustituyen a las relativas a cálculo de costes externos del modelo inicial (20-23, ver capítulo 3), por las siguientes razones: los contaminantes considerados en el modelo inicial ($U = \{1, \dots, u\}$, ver Anexo 5), se amplían incluyendo las emisiones PM_{10} ($U^{**} = \{1, \dots, u\}$) debido a su significancia en los informes de emisiones por generación eléctrica en tierra. Por otro lado, las ecuaciones del modelo original (20-23) sólo recogían la evaluación para buques *feeder* por lo que las invalidaba para el análisis actual que incluye buques Ro-Pax ($X = \{1, \dots, x\}$, ver Anexo 5). Finalmente, las ecuaciones actuales (85-88) a diferencia de las iniciales, incluyen no sólo la diferenciación por países ($FF = \{1, \dots, f\}$), sino también por puertos ($K = \{1, \dots, k\}$). Esto es así debido a que, aunque dos puertos pertenezcan a un mismo país y esto implique los mismos costes unitarios para los contaminantes, la generación eléctrica en tierra puede deberse a fuentes muy diferentes según las regiones, lo que condicionará los coeficientes de emisión.

Al igual que en el modelo inicial (ver Capítulo 3), el coste unitario de los contaminantes (CF_{sufv} ; $\forall s \in S \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$) implica el 'coste de daños' debidos de las emisiones de transporte (€/kg) teniendo en cuenta la ubicación geográfica del puerto ($FF = \{1, \dots, f\}$) y la densidad de población de sus hinterlands ($V = \{1, \dots, v\}$). Para los casos europeos, tal y como se mencionó en los capítulos 3 y 5, la Comisión Europea publica periódicamente esta información en el *Handbook on the external costs of transport* (actualizado por última vez en 2019; Van Essen et al., 2019) para cada país. Las sucesivas actualizaciones se pueden estimar a través del Índice nacional de Precios al Consumo -IPC- para cada país (por ejemplo, a través del Instituto Nacional de Estadística de España, el Instituto Nacional de Estadística y Estudios Económicos de Francia, etc.).

Los factores de emisión de los buques durante las operaciones portuarias: maniobras (EG_{2ux} ; $\forall u \in U^{**} \wedge \forall x \in X$, ver ecuación 86) y atraque (EG_{3ux} ; $\forall u \in U^{**} \wedge \forall x \in X$ ver ecuación 88) son altamente dependientes del tipo de motor y potencia demandada en cada etapa operativa. Estos factores de emisión (kg/h) se han obtenido a través de las herramientas de cálculo desarrolladas por Kristensen y Bingham (2020) (disponibles en: <https://gitlab.gbar.dtu.dk/oceanwave3d/Ship-Desmo>.) para buques portacontenedores (la versión actualizada respecto a los capítulos 3 y 5) y para los buques Ro-Pax (Kristensen y Psaraftis, 2016). Por otro lado, los factores de emisión relacionados con la red eléctrica en tierra (EFG_{uk} ; $\forall u \in U \wedge \forall k \in K$, ver ecuación 90) son consecuencia directa de las fuentes predominantes en las plantas de generación terrestres. Consecuentemente, la ubicación del puerto y el peso relativo de fuentes renovables en el mix energético terrestre son los principales responsables de estos factores de emisión (kg / kW.h).

Para los casos de aplicación europea, los factores de emisión de la red eléctrica ($EFG_{uk}; \forall u \in U \wedge \forall k \in K$) se pueden obtener por país y año a través del *European Pollutant Release and Transfer Register -E-PRTR-* (Regulation (EC) No 166/2006) junto con las Estadísticas de Energía publicadas por EUROSTAT (*EU Commission, DG Energy, Unit A4, 2020*). A pesar de que el *E-PRTR* contiene un registro de 91 contaminantes diferentes, sin embargo, las emisiones $PM_{2.5}$ no se proporcionan específicamente. Debido al importante impacto de este contaminante en la salud humana (en 2016 cerca de 412.000 muertes prematuras en Europa se debieron a la exposición prolongada a este contaminante - *European Environment Agency, 2019-*), la cantidad de $PM_{2.5}$ se estimará, por tanto, a través de su relación con el contaminante PM_{10} (ver Tabla 68), ya que la información sobre este último sí está recogida en *E-PRTR*.

EUROSTAT (*EU Commission, DG Energy, Unit A4, 2020*) recoge información sobre *Gross Electricity Generation*, por combustible o fuente, así como por tipo de generación. En este caso, el peso de la fuente en la generación de la red eléctrica puede ser calculado para cada país y año haciendo posible estimar la cantidad de $PM_{2.5}$ a partir de la información de PM_{10} . Sin embargo, esta información no está disponible en EUROSTAT para niveles geográficos más pequeños que un país.

Tabla 68. Emission factors $PM_{2.5}/PM_{10}$ for source category in energy industries (g/GJ)

<i>Hard Coal</i>	<i>Brown Coal</i>	<i>Natural Gas</i>	<i>Derived Gases</i>	<i>Heavy fuel Oil</i>	<i>Other Liquified fuels</i>	<i>Biomass</i>
'9/20'	'9/20'	'0.9/0.9'	'5/5'	'18/13'	'2/1'	'38/33'

(Source: *European Environment Agency, 2009*)

Así, para los casos de aplicación a regiones o provincias, se deben consultar los datos oficiales de las instituciones locales. Por otro lado, el *E-PRTR-* (Regulation (EC) No 166/2006) no sólo ofrece información por tipo de sector económico (NACE) y actividad industrial, sino también información desagregada más allá del nivel nacional.

2.2 TARIFA MEDIOAMBIENTAL Y TASAS PORTUARIAS

A partir de 2025, los puertos de la Unión Europea pertenecientes a la *TEN-T Core Network* deberán ser capaces de suministrar electricidad en tierra a los buques (Directiva 2014/94 / UE) y, como consecuencia, se espera que una legislación más estricta y armonizada sobre las emisiones portuarias que garantice la internalización de los costes externos.

Por tanto, a corto y medio plazo, se espera una evolución normativa en los puertos hacia los principios medioambientales - *core calculation principles* - que rigen actualmente el transporte por carretera de la UE (impuestos a los propietarios de los camiones y tasas de infraestructura por su uso, Shroten et al., 2019). Se trata de un sistema de tarificación obligatorio en la UE para el uso de la infraestructura basado en una variación de las tarifas de acuerdo con el rendimiento medioambiental de los vehículos, de igual forma, el sistema esperado en puerto tendrá en cuenta el rendimiento medioambiental de los buques.

Al igual que se aplica en los sistemas de tarificación por carretera para camiones pesados-HGV- (Directiva 1999/62 / CE modificada por la Directiva 2011/76 / UE y COM (2017) 275 final, ANEXO 1), el cálculo del importe de la tarifa medioambiental en puerto debe tener en

cuenta el exceso de emisiones de la tecnología utilizada por los buques sobre aquellas que son emitidas por la alternativa tecnológica más sostenible (*pollutant differentiation charging*, ver ecuaciones 85-90). Por defecto, las emisiones de CI (véanse las ecuaciones 89 y 90) pueden asumirse como valores de referencia para los niveles mínimos de emisión en puerto. Por lo tanto, mientras que para los buques conectados a la red eléctrica en tierra la tarifa medioambiental alcanza un valor mínimo, los buques alimentados por los motores a bordo deben pagar una tarifa variable basada en las emisiones adicionales que se generan por encima de los niveles de emisión del CI.

Aunque el valor de la tarifa medioambiental depende de la ubicación del puerto (vinculado al valor local del coste monetario de los contaminantes - costes unitarios – y a la densidad de población del hinterland), se espera que la estructura de la tarifa sea común y armonizada para todos los estados miembros basada en el tamaño de los buques y su tecnología medioambiental.

En este sentido, es interesante tener en cuenta que, mientras que las tasas portuarias básicas (equivalentes a las tarifas por uso de infraestructura en tierra) deben percibirse para recuperar los costes de construcción, mantenimiento y operación de las instalaciones (las tasas portuarias europeas actuales no incluyen el cálculo de costos externos por ley), la tarifa medioambiental propuesta debería cubrir los daños medioambientales causados por las emisiones atmosféricas de los buques en el puerto (véanse las ecuaciones 85-90). En consecuencia, debido a la importante inversión portuaria requerida para proporcionar instalaciones de CI (\$ 2 millones para una terminal de contenedores de 1,3 millones de TEU, -Zis, 2019- € 7,4 millones para el puerto de Aberdeen -Innes y Monios, 2018), el siguiente paso en la modificación tarifaria, sería una revisión cuidadosa de la estructura tarifaria en puerto que garantice la recuperación de estas inversiones a través de las tasas portuarias.

2.3 TIEMPOS PORTUARIOS

La reducción del tiempo invertido en las operaciones portuarias ha demostrado ser por sí mismo, un sistema de mitigación de contaminación, especialmente en SSS (Johnson y Styhre, 2015), donde la alta frecuencia de escala y la inoperatividad nocturna habitual (a menudo períodos de atraque desde las 23 h. 7 am) ocasionan un alto peso relativo del tiempo en puerto en la actividad total de los buques. A este respecto, es importante considerar que, más allá de la perspectiva ambiental, los tiempos portuarios muchas veces condicionan no sólo los costes operativos del SSS (los costos de operación portuaria pueden llegar al 46% de los costos totales, Martínez-López A. et al., 2016), sino también su competitividad como alternativa viable al transporte unimodal (Suárez-Alemán et al., 2014).

A pesar de la relevancia del tiempo en las operaciones portuarias, el tiempo de atraque adicional debido a la conexión / desconexión en tierra aún no está oficialmente inventariado, y la información publicada al respecto varía entre diez minutos y dos horas (Zis T., 2019), llegando incluso a seis horas si existe algún problema (Tseng et al., 2015). Entre otras razones, esta variación se debe a la dependencia de la conexión de los buques a la habilidad del operador del puerto, a la demanda del servicio y a la limitación de las instalaciones. Consecuentemente los tiempos de retraso por conexión a la red deben incorporarse en cualquier cálculo de rendimiento de CI, ya que este tiempo adicional podría hacer inviable la alternativa de conexión a tierra para buques SSS (Zis T. et al., 2014).

Si consideramos que la evaluación de CI es un planteamiento muy reciente, cuando los puertos en estudio no ofrecen información se aceptará una hora adicional como un valor realista para el tiempo de retraso por conexión / desconexión (ST , ver ecuación 90). Igualmente, cuando se desconozca el tiempo invertido en la etapa de maniobras (TVB_2), se tomará 30 minutos como tiempo probable (Zis et al., 2014). Finalmente, para los buques que operan bajo condiciones SSS, la etapa de inoperatividad nocturna -hotelling stage- debe agregarse al tiempo de atraque en el análisis global. Las expresiones publicadas por Martínez-López et al. (2015), pueden usarse para estimar los tiempos de carga / descarga ($TVB_{3x}; \forall x \in QX$) cuando estos tiempos no están disponibles.

2.4 COSTES DE CAPITAL PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA NECESARIO PARA USO DE CI EN BUQUES SSS Y SUS COSTES OPERATIVOS EN PUERTO.

De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (OMI, 2017) el coste de capital requerido -CAPEX- para el reequipamiento de los buques Reefer y Ro-Pax para CI depende del tamaño del buque. De tal manera que, para feeders entre 1,000-5,000 GT el rango de CAPEX es entre 50,000-350,000 \$, mientras que para buques Ro-Pax de 10,000-25,000 GT el rango CAPEX es 100,000-400,000 \$. Si bien no existe una relación directa entre GT y la instalación de energía eléctrica, esta información se puede tomar como una primera aproximación (ver ecuaciones 91 y 92, conversión monetaria diciembre 2017: 1 € = 1.19US \$) debido a su correcta correspondencia con casos reales (información facilitada por los astilleros de reparación de Las Palmas de Gran Canaria para la implantación de sistemas On-Shore-power embarcados en un buque de 12,895 GT Ro-Pax: " Volcán de Taburiente " - IMO: 9348558-en 2020).

$$CAPEX_{feeder} = 63.025 GT - 21008 (\text{€}) \quad 1000 \leq GT \leq 5000 \quad (91)$$

$$CAPEX_{ro-pax} = 16.807 GT - 84034 (\text{€}) \quad 10000 \leq GT \leq 25000 \quad (92)$$

Existe un alto nivel de heterogeneidad entre los puertos para la comercialización de electricidad. La mayoría se rigen por acuerdos específicos entre la empresa de suministro de electricidad y la empresa naviera de SSS (por ejemplo, Gotemburgo, Suecia). Sin embargo, hay casos en los que el puerto juega un papel como institución intermedia, especialmente cuando los terminales y puntos de conexión son compartidos por barcos de varias compañías navieras. En otros casos, las autoridades portuarias establecen precios máximos para el suministro eléctrico (por ejemplo, puerto de Melilla, España). De esta forma, el precio de la electricidad suele estar condicionado por el sistema de suministro: alta o baja tensión.

2.5 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR) PARA LAS NAVIERAS

En esta sección, la TIR se considera una herramienta de evaluación para analizar la inversión en el acondicionamiento de los buques mediante CI. La ecuación 93 muestra la expresión de la TIR debido a la instalación del CI y su funcionamiento:

$$Nb. CAPEX_x = \sum_{y=1}^Y \left(\frac{\Delta(CFF_x)_y}{(1+TIR)^y} \right) \quad \forall x \in X \quad (93)$$

El primer elemento en esta ecuación implica los costos de capital necesarios (NB. CAPEX, ver Apéndice A) para todos los buques de la flota (NB), en una línea particular de SSS, mientras que en el segundo elemento se recoge la diferencia entre el Flujo de Caja Neto, entre operar con y sin instalación de CI, $(\Delta(CFF_x)_y; \forall x \in X \wedge \forall y \in Y$ ver Apéndice A), para cada año (y) del ciclo de vida del buque ($Y = \{1, \dots, y\}$).

$$\Delta(CFF_x)_y = (CIT + ECCL_x - ECOB_x - (CEM_{3x} - CEG_x))_y \quad \forall x \in X \wedge \forall y \in Y \quad (94)$$

La expresión 94 recoge las variables clave en la diferencia de Flujo Neto de Caja para las alternativas operativas durante el tiempo de atraque: los costes del tiempo de retraso por conexión / desconexión (CIT), el coste de la electricidad del buque por uso de CI (ECCL_x; $\forall x \in X$) y el del suministro eléctrico del buque cuando es generado por los motores a bordo (ECOB_x; $\forall x \in X$) durante el tiempo de atraque. Por último, también se integra la tarifa medioambiental por exceso de emisiones (CEM_{3x}-CEG_x; véanse las ecuaciones 87 y 89). Además, el flujo de caja (ecuación 94) debe incluir el flujo financiero (pago de intereses y pago de capital) cuando la instalación se paga a través de un préstamo.

En este análisis, no se han asumido descuentos en las tasas portuarias por uso de CI, ni se incluido subvenciones públicas para el reequipamiento de los buques; en consecuencia, esta evaluación proporciona información sobre la capacidad de la tarifa medioambiental para incentivar por sí misma el uso de CI. Además, aunque el tiempo adicional por conexión en el puerto implica un amplio abanico de consecuencias en la operativa del SSS, se puede hacer un primer acercamiento al perjuicio que ocasiona a través del sobre coste en la tasa del buque por el exceso de tiempo.

3 CASOS DE APLICACIÓN

Los estudios de caso seleccionados intentan ser lo suficientemente representativos para obtener hallazgos significativos mediante la comparación del rendimiento del CI no sólo en diferentes escenarios, sino también a través de diferentes flotas. De tal manera que los estudios de caso seleccionados son casos de aplicación donde los beneficios esperados del uso del CI podrían alcanzar niveles máximos. Este objetivo pasa por analizar las líneas SSS más exigentes energéticamente: servicios de transporte de alta frecuencia (cinco escalas / semana) y operar con buques de alto requerimiento eléctrico en puerto: buques Ro-Pax (Winkel et al., 2016; Innes y Monios, 2018) y buques alimentadores con contenedores refrigerados (Zis et al, 2014, Ecofys, 2015).

El análisis considera primeramente las flotas que se muestran en la Tabla 69; buques portacontenedores optimizados (ver Tabla 15 en capítulo 5, con capacidad de hasta 184 contenedores refrigerados) (Martínez-López et al., 2018) y buques convencionales Ro-Pax, operando ambos en condiciones SSS. Cabe destacar, que la flota optimizada tomada para el análisis no ha sido la solución de flota con motor dual alimentado con LNG porque no existe registro de emisiones de metano de la generación eléctrica en tierra que puedan alimentar la comparación con el metano emitido durante la maniobra de este tipo de buques. Por tal razón, con el fin de efectuar una comparación realista se ha optado por comparar la flota optimizada con sistema de propulsión motor Tier III operando con LSMGO (la segunda opción

más eficiente desde el punto de vista medioambiental, ver Tabla 15). Finalmente se ha ampliado la potencia requerida por este barco durante la navegación con el fin de que pudiese alimentar la planta eléctrica durante la navegación a través de una PTO (Power Take-off) para mantener los reefers. Por tanto, las plantas eléctricas de los buques portacontenedores están diseñadas para satisfacer la demanda de todas las unidades de carga de los contenedores como reefers (las necesidades más exigentes de energía eléctrica). Asimismo, la disposición de la sala de máquinas de los buques Ro-Pax está diseñada asumiendo dos motores principales, (con dos alternadores accionados por estos; PTOs acoplados a sus reductoras), que mueven dos hélices. Esta configuración de tren propulsivo, junto con la instalación de dos hélices de proa, mejora significativamente la capacidad de maniobra de estos buques, pero también aumenta su demanda eléctrica (ver Tabla 69).

Así mismo, prestando atención al balance eléctrico de los buques, la condición de navegación más exigente es la maniobra. Esto es así porque esta condición demanda una potencia eléctrica adicional para abastecer, además de los sistemas de gobierno y amarre, los propulsores de proa (ver Tabla 69). Este hecho, junto con la relevancia del tiempo invertido en maniobra sobre el tiempo completo para operación en SSS, obliga a incluir esta condición de navegación en el análisis.

Tabla 69. Características técnicas de las flotas consideradas para los casos de aplicación.

		Feeder Vessel (reefer)**	Ro-Pax Vessel***
Technical Features	Cargo units	184 (reefer containers)	Pax: 1,000 Lane length for trailers: 1,600m Cars:160 Reefer [container plugs]:100
	Lbp(m)	78.15	153.25
	B(m)	14.46	28.65
	D(m)*	7.41	13.85
	GT	2456	26916
	Service Speed (kn)	19.49	23
	Main Engine (kW)	7000	2X15600
	Type of Main Engine	Tier III (MGO)	Tier III (MGO)
	Auxiliary engines (kW)	2 x 662	3x1254
	Power take off -PTO- (kW)	1500	2x1000
	Bow thruster (kW)	350	2x1000
Electricity demand	Manouvering (kW)	1620	4936
	Berthing (kW)	1200	1880
Electricity support	Manouvering	PTO+1 auxiliary engine	2 PTO+3 auxiliary engines
	Berthing	2 auxiliary engines	2 auxiliary engines
Maritime-Route 1		Vigo (Spain)-St.Nazaire (France)	
Maritime-Route 2		Las Palmas (Gran Canary island)-Huelva (Spain)	
Maritime-Route 3		Las Palmas (Gran Canary island)-Sta.Cruz de Tenerife (Tenerife island)	

*Depth to upper continuous deck for Ro-Pax vessel.

**More technical features in Martínez-López et al., 2018.

***More technical features on base vessels: "Sorolla"(<http://www.hibarreras.es/?page=lis-ferries&idp=10.>) and "Martí i Soler"(<http://www.hibarreras.es/?page=lis-ferries.2&idp=35.>)

Finalmente, los buques Ro-Pax asumidos para los casos de aplicación requieren energía suficiente para alimentar en puerto: capacidad de conexión para 100 unidades de carga refrigerada (camiones), alta capacidad para gambuzas frigoríficas, sistemas de aire acondicionado, dos puertas-rampa de popa y una cubierta móvil en el garaje (*movil cardeck*). Es necesario tener en cuenta que en el análisis no se han tenido en cuenta las emisiones de las calderas de los buques, ya que la conexión a tierra no es una alternativa para su actividad (Zis et al, 2014, Zis T., 2019). En consecuencia, a pesar de que el buque está conectado a la red terrestre durante la condición de atraque, las calderas de los buques están trabajando

para proporcionar el vapor necesario para los serpentines de calefacción de los tanques de combustible (entre otros usos).

La Tabla 69 también muestra las rutas marítimas seleccionadas para los casos de estudio. Estas rutas consideran puertos que pertenecen a redes eléctricas con grandes diferencias en términos de sostenibilidad. El primero, entre Vigo en el Noroeste de España y St. Nazaire en Bretaña (Francia), fue considerado por ser la ruta de optimización considerada en el capítulo 5, pero además resulta especialmente significativa debido la diferente huella medioambiental de los sistemas eléctricos de ambos países (ver Tabla 70 en el apartado de resultados). Además, esta ruta opera actualmente como Autopista del Mar (MoS), permite ampliar el análisis comparando el rendimiento del CI de buques no convencionales (buques feeder optimizados) frente a buques convencionales. El estudio de caso 2, entre las Islas Canarias (puerto de Las Palmas) y la Península Ibérica (Huelva, España) representa una ruta marítima representativa entre la Europa continental y sus islas. Cada isla se abastece de sus propias plantas de generación eléctrica y, por lo tanto, la sostenibilidad de su red es completamente diferente a la del continente (ver Tabla 70). Finalmente, el estudio de caso 3, entre dos de las islas del archipiélago canario (Las Palmas y Sta. Cruz de Tenerife), presenta una de las rutas marítimas más frecuentes de Europa (interinsular) pero con la singularidad de una escasa cuota de fuentes de energía renovables (nivel RES-*Renewable Energy Sources*) en su generación eléctrica.

Los tiempos de operación en puerto se estimaron a través de expresiones publicadas por Martínez-López et al. (2015) para buques SSS (buques Feeder y Ro-Pax). Los resultados fueron testados a través de valores reales del puerto de Las Palmas (un tiempo promedio de carga / descarga de 3.5 y 2.3 horas para Feeder y Ro-Pax respectivamente, y 30 minutos para la etapa de maniobras). Además, se asumió un tiempo de inoperación-*hotelling time*- de 8 horas al día (de 23 pm a 7 am) para cada línea.

A pesar de que algunos de los puertos de estudio están implicados en proyectos de CI (como el proyecto de **Core LNGas hive project**: <http://corelngashive.eu/en/>), ninguno de ellos tiene actualmente instalaciones de suministro en tierra permanentes para el tráfico de SSS. Por lo tanto, se asumió 1 hora como tiempo de retraso por conexión / desconexión para todos los casos. Además, dado que los puertos españoles no son autónomos para decidir sus tasas portuarias (se rigen por las restricciones impuestas por el Real Decreto Legislativo 2011/2), parece razonable asumir, precios unitarios máximos para el suministro eléctrico en puerto de acuerdo a los que actualmente impone el puerto de Melilla (uno de los primeros puertos de España con instalaciones de suministro *on-shore power supply*): 0,065 € / kWh para grandes consumidores (120.000kWh / tres meses) y 0,167 € / kWh para el resto de casos (2017 tarifas de servicio, <https://www.puertodemelilla.es/index.php/servicios/tasas-y-tarifas>).

En cuanto a la producción eléctrica a bordo, se aplicará como precio base para LSMGO (MGO 0,1% contenido en azufre), según su ruta (ver tabla 70):

Tabla 70. Precio base del LSMGO

Puerto de repostaje del LSMGO (MGO con 0.1 % contenido en azufre)	Coste del LSMGO (diciembre 2017)	Ruta del buque
Gibraltar*	574.00 \$ / tm.	Canarias y el sur de la Península Ibérica
Rotterdam**	532.50 \$ / tm.	Norte de España y Francia

*Fuente: <https://shipandbunker.com/prices/emea/medabs/gi-gib-gibraltar#LSMGO> (año 2017)

**Fuente: <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#LSMGO> (año 2017)

Finalmente, los casos de aplicación han asumido un ciclo de vida de 10 años para el análisis del proyecto de inversión (el período de amortización de la inversión). En todos los casos, el coste debido al exceso de tiempo en el puerto por conexión CI se ha estimado sobre el extracoste de las tasas portuarias.

4 RESULTADOS

A pesar de la diferencia en las distancias marítimas, se han tomado las mismas características de operación (cinco llamadas por semana, ver Tabla 72 y Tabla 73) para los servicios de transporte para todas las rutas del estudio con el fin de simplificar su comparación y determinar la influencia de las características de la red eléctrica en tierra y de la flota en el rendimiento del CI.

4.1 ESTIMACIÓN DE LOS FACTORES DE EMISIÓN PARA LAS REDES ELÉCTRICAS EN LOS CASOS DE APLICACIÓN.

La información publicada por EUROSTAT (*EU Commission, DG Energy, Unit A4, 2020*) sobre Generación Eléctrica -*Gross Electricity Generation* - por tipo de generación se utilizó como base para la estimación relativa a la red eléctrica de Francia y de la España continental, mientras que, para las islas, se consideró la información publicada en el Anuario de Energía de Canarias (Gobierno de Canarias, 2018). Esta información (ver Tabla 71), junto con la relación entre PM_{2.5} y PM₁₀, publicada en el E-PRTR (Tabla 68), ha permitido obtener los factores de emisión de estos contaminantes (ver Tabla 72).

Tabla 71. Generación eléctrica por tipo de fuel en 2017 (%)

	<i>Hard coal</i>	<i>Brown coal</i>	<i>Oil and petroleum products</i>	<i>Natural gas and manufactured gas</i>	<i>Solid biofuels and renewable wastes</i>	<i>Renewable</i>	<i>Nuclear</i>	<i>Main Activity Electricity and Only Plants [TWh]</i>
SPAIN	15.44 %	0.93%	5.72%	23.68%	1.86%	31.31%	21.06%	239.59
FRANCE	2.28%	0.00%	1.24%	7.64%	1.01%	16.84%	70.98%	530.76
GRAN CANARY ISLAND	0.00%	0.00%	91.86%	0.00%	0.00%	8.14%	0.00%	3.48
TENERIFE ISLAND	0.00%	0.00%	92.27%	0.00%	0.24%	7.49%	0.00%	3.53

Finalmente, los factores de emisión para el resto de los contaminantes de las plantas de generación eléctrica en tierra (actividad principal-NACE: 35.1- generación, transmisión y distribución de energía eléctrica-) no sólo para los países (Francia y España), sino también para las islas, se han tomado de la información publicada en el E-PRTR (Regulation (CE) nº 166/2006).

Considerando lo anterior, la Tabla 72 muestra los factores de emisión estimados finalmente para las redes europeas consideradas en los casos de aplicación: España, Francia, Gran Canaria e isla de Tenerife (EFGuk; $\forall u \in U^{**} \wedge \forall k \in K$).

Tabla 72. Factor medio de emisión para las redes europeas en 2017

	NO _x (g/kW.h)	SO ₂ (g/kW.h)	PM _{2.5} (g/kW.h)	PM ₁₀ (g/kW.h)	CO ₂ (g/kW.h)
SPAIN (continental)	0.567	0.402	0.012	0.013	291.369
FRANCE	0.066	0.042	0.001	0.001	4.301
GRAN CANARY ISLAND	1.796	0.785	0.030	0.015	656.034
TENERIFE ISLAND	2.344	0.762	0.033	0.016	645.609

4.2 TARIFAS MEDIOAMBIENTALES

La Tabla 73 y la Tabla 74 ofrecen los ahorros anuales en emisiones por suministro de electricidad desde tierra. Se asume que este ahorro es el valor de la tasa medioambiental que deben pagar los operadores de los buques cuando no utilizan CI en los casos de aplicación.

La cuantificación en términos monetarios de las emisiones portuarias para el suministro de energía a bordo y la alternativa del CI muestra, como se esperaba, que la 'clasificación de ventaja' para el uso de CI está fuertemente condicionada por la sostenibilidad de la generación de energía de la red eléctrica del puerto. Por lo tanto, independientemente del tipo de buque, las rutas marítimas a través de St. Nazaire alcanzan la mayor reducción de emisiones en comparación con el suministro a bordo (ver Tabla 73 y Tabla 74), ya que por encima del 80% del miz energético de la red en Francia proviene de fuentes sin emisiones contaminantes (es decir, energía nuclear y renovables ver Tabla 71).

Esta ventaja inicial para el uso de CI a través de la ruta Vigo-Sant Nazaire (norte de España y Francia) se reduce casi a la mitad cuando el puerto francés es sustituido por un puerto insular (Las Palmas de Gran Canaria) desde el sur de la península española (Huelva, ver Tabla 73 y Tabla 74), llegando a una reducción del 80% sobre la ventaja inicial, cuando ambos puertos involucrados son puertos insulares (Las Palmas-Sta. Cruz de Tenerife, ver Tabla 73 y Tabla 74). Nuevamente, la peso de las fuentes renovables y nucleares en la generación de la red eléctrica en tierra explica esta realidad (la contribución de las RES al mix energético de la España continental es casi del 50%; mientras que en las redes insulares apenas llega al 8%, ver Tabla 71).

La Tabla 73 y Tabla 74 muestran que el uso de CI ofrece una ventaja adicional para las flotas de feeders sobre los Ro-Pax, debido principalmente a los mayores tiempos portuarios durante el atraque de los feeders. Esta característica operativa conduce a una menor sensibilidad de esta flota a los tiempos de retraso por conexión / desconexión en comparación con los buques Ro-Pax. Por lo tanto, a pesar de sus menores requerimientos de energía en puerto (1200 kw frente a 1880 kw para Ro-Pax, ver Tabla 69), la flota de feeders es la principal beneficiada por CI en los casos de estudio.

Aunque en todos los casos analizados, el uso del CI ha demostrado ser una alternativa más sostenible que el suministro de electricidad a bordo (reducciones positivas de emisiones en todos los casos), la escasa contribución de las RES en la producción de electricidad en la red de Tenerife (ver Tabla 71) explica que la conexión de buques a la red de tierra en Sta. Cruz de

Tenerife sea menos sostenible que el suministro a bordo cuando se evalúa un único viaje (447,30 € / viaje frente a 435,6 € / viaje, verTabla 73). Esta realidad podría incluso descartar la alternativa de CI para los buques Ro-Pax en Sta. Cruz de Tenerife ya que, además de la baja sostenibilidad de la red, sus cortos tiempos de atraque se ven penalizados significativamente por los tiempos de retraso por conexión / desconexión a la red de tierra (496,72 € / viaje frente a 406,67 € / viaje, ver Tabla 73). De forma que, sólo cuando se considera en el análisis el tiempo de inactividad del buque (*hotelling time* en puerto de 23 a 7 horas), el balance medioambiental se vuelve favorable al uso de CI en Sta. Cruz de Tenerife. Estos resultados confirman cuantitativamente las 'voces de alarma' sobre la conveniencia y el rendimiento esperado de la CI en las islas (Winkel et al., 2016.) cuando operar buques con escalas cortas (Khersonsky et al 2007; Zis et al., 2014).

Tabla 73. Reducción de emisiones por uso de CI en buques feeder

		Vigo-St. Nazaire		Las Palmas -Huelva		Las Palmas -Sta. Cruz de Tenerife		
Ntrips (yearly_trips)		476		476		476		
Calls per week and direction		5		5		5		
Number of vessels (NB)		3		4		1		
Maritime distance (Nautical Miles)		464		702		53		
		Vigo	St. Nazaire	Las Palmas	Huelva	Las Palmas	Sta. Cruz Tenerife	
Feeder	Manouering emissions per trip and port-CEM_{2,1k}-(€/trip)	111.94	246.41	157.40	111.94	157.40	111.94	
	Manouering emissions per trip (€/trip)	358.35		269.34		269.34		
	Manouering emissions per year-CEM_{2,1}-(€/year)	170,576.54		128,205.88		128,205.88		
	On-board power supply	Berthing emissions per trip and port-CEM_{3,1k}-(€/trip)	435.60	882.76	611.50	435.60	611.50	435.60
		Berthing emissions per trip(€/trip)	1,318.36		1,047.10		1,047.10	
		Berthing emissions per year-CEM_{3,1}-(€/year)	1,135,935.53		902,214.20		902,214.20	
		Port emissions per trip (€/trip)	1,676.71		1,316.44		1,316.44	
		Port emissions per year (€/year)	1,306,512.07		1,030,420.08		1,030,420.08	
	On-shore power supply	Berthing emissions per trip and port-CEG _{1k} -(€/trip)	201.38	79.62	474.78	201.38	474.78	447.30
		Berthing emissions per trip (€/trip)	281.00		676.16		922.08	
		Berthing emissions per year-CEG ₁ -(€/year)	133,754.15		537,175.34		742,583.35	
		Port emissions per trip (€/trip)	639.35		945.50		1.191.42	
		Port emissions per year (€/year)	370,533.14		665,381.22		870,789.22	
	Save emissions by on-shore power supply per year (€)	935,978.93		365,038.86		159,630.85		
	Emissions reduction by on-shore power supply per year (%)	71.64%		35.43%		15.49%		

Es interesante observar que, aunque las emisiones durante la maniobra tienen una influencia limitada sobre la totalidad de las emisiones portuarias (13-20% de las emisiones totales), el

peso relativo de las emisiones durante la maniobra (CEM_{2,1} ver Tabla 72 y CEM_{2,2} Tabla 73) aumenta significativamente cuando se utiliza CI (emisiones portuarias al año en el suministro de energía en tierra) superando el 50% en Vigo-St. Nazaire (ver Tabla 72 y Tabla 73). Esto sugiere la necesidad de implementar sistemas de mitigación adicionales durante el tiempo de maniobra (Sciberras E. A., et al., 2017) más allá de los motores Tier III (ver Tabla 69).

Tabla 74. reducción de emisiones por uso de CI en buques Ro-Pax

		Vigo-St. Nazaire		Las Palmas -Huelva		Las Palmas -Sta. Cruz de Tenerife		
Ntrips (yearly_trips)		476		476		476		
Calls per week and direction		5		5		5		
Number of vessels (NB)		3		4		1		
Maritime Distance (Nautical Miles)		464		702		53		
		Vigo	St. Nazaire	Las Palmas	Huelva	Las Palmas	Sta. Cruz Tenerife	
Ro-Pax	Manouvering emissions per trip and port-CEM _{2,2k} -(€/trip)	286.74	605.33	402.94	286.74	402.94	286.74	
	Manouvering emissions per trip (€/trip)	892.07		689.68		689.68		
	Manouvering emissions per year-CEM _{2,2} -(€/year)	424,623.52		328,287.88		328.287.88		
	On-board power supply	Berthing emissions per trip and port-CEM _{3,2,k} -(€/trip)	406.67	608.38	592.08	406.67	592.08	406.67
		Berthing emissions per trip (€/trip)	1,015.05		998.75		998.75	
		Berthing emissions per year-CEM _{3,2} -(€/year)	1,065,296.48		1,048,194.01		1,048,194.01	
		Port emissions per trip (€/trip)	1,907.12		1,688.43		1,688.43	
		Port emissions per year (€/year)	1,489,920.00		1,376,481.89		1,376,481.89	
	On-shore power supply	Berthing emissions per trip and port-CEG _{2k} -(€/trip)	228.89	82.55	532.83	228.89	532.83	496.72
		Berthing emissions per trip (€/trip)	311.44		761.72		1.029.55	
		Berthing emissions per year-CEG ₂ -(€/year)	252,019.93		700,096.69		966,074.57	
		Port emissions per trip (€/trip)	1,203.51		1,451.40		1,719.23	
		Port emissions per year (€/year)	676,643.44		1,028.384.56		1,294,362.44	
	Save emissions by on-shore power supply per year (€)	813,276.56		348,097.33		82,119.45		
	Emissions reduction by on-shore power supply per year(%)	54.59%		25.29%		5.97%		

4.3 TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

La Tabla 75 muestra la TIR de la inversión en equipamiento de los buques usar CI (ver Tabla 69) en las rutas consideradas en el caso de aplicación. Cuando se analiza la TIR, los buques feeder continúan siendo los que más se benefician del reequipamiento de CI. Además del

ahorro de la tarifa medioambiental (ver Tabla 73), existe una ventaja adicional por su menor tamaño (GT, ver Tabla 69). Esto influye directamente en el coste extra por tiempo adicional de conexión en el puerto (tasa del buque) e indirectamente en la inversión en reequipamiento (ver Tabla 75 y ecuaciones 93 y 94).

Tabla 75. Tasa Interna de Retorno (TIR) para operadores de buques

	Vigo-St. Nazaire		Las Palmas -Huelva		Las Palmas -Sta. Cruz de Tenerife	
Ntrips (yearly_trips)	476		476		476	
Calls per week and direction	5		5		5	
Number of vessels (NB)	3		4		1	
Maritime distance (Nautical miles)	464		702		53	
Vessel	Feeder	Ro-Pax	Feeder	Ro-Pax	Feeder	Ro-Pax
Retrofitting investment(€)	-401,344	-	-	-1,473,373	-133,781	-368,343
		1,105,030	535,126			
Net cash flow difference _first year(€)	1,048,668	863,099	531,201	526,831	326,512	281,400
TIR(%)	261	78	99	34	244	76

La TIR obtenida en todos los casos ha demostrado ser lo suficientemente interesante como para aconsejar la inversión en CI desde la perspectiva del operador del buque. Es notable que incluso en la ruta entre Las Palmas-Sta. Cruz de Tenerife, con bajos ahorros en términos de tarifa medioambiental (ahorros de emisiones limitados, ver Tabla 73 y Tabla 74), se beneficiaría del uso de CI. Esto se debe a una menor inversión inicial en el reequipamiento de un sólo buque junto con menores costes operativos, ya que el coste base para la electricidad en tierra en 2017 (0.065 € / kWh) ofrece, en sí mismo, una alternativa más competitiva que el LSMGO (0,1% de contenido de azufre MGO de 482,35 € / tm, Gibraltar en 2017) para la generación de electricidad durante el atraque.

Prestando atención a la diferencia de flujo de caja neto por uso de CI en el primer año ($\Delta(CFF_x)_1$, ver ecuación 94), en todos los casos es positivo, e incluso en algunos casos supera la inversión inicial (ver Tabla 75). A pesar de que en este análisis no se contempla financiación externa, el periodo máximo de recuperación de la inversión es de cuatro años (para el servicio Ro-Pax entre Las Palmas y Huelva). Consecuentemente, la tarifa medioambiental en las condiciones asumidas para los casos de aplicación, resulta ser una herramienta útil para promocionar el uso del CI desde el punto de vista de la naviera.

4.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Considerando los resultados favorables de la TIR obtenidos para los casos de aplicación (escenarios base), es necesario un análisis de sensibilidad para conocer no sólo la robustez de este primer análisis, sino también su dependencia de las variables implicadas en el diseño del escenario. Dado que los resultados obtenidos de los casos de aplicación (escenarios base, ver Tabla 76) han sido positivos (Tabla 75), se aceptará que son estos los escenarios optimistas en el análisis de sensibilidad. A continuación, se definieron escenarios más "desfavorables" o pesimistas, asumiendo valores más bajos para el precio del combustible (suministro on-board). Además, también se tomaron valores más altos para los precios

unitarios de la electricidad suministrada en tierra para caracterizar estos escenarios pesimistas. Los valores mencionados para este escenario pesimista son los más altos o los más bajos registrados, por las mismas fuentes, en los casos base (ver Tabla 76).

Tabla 76 Escenarios para el análisis determinístico de sensibilidad

	Base escenario	Pessimistic scenario
Unitary cost for on-shore electricity supply (€/kW.h)	0.065	0.12
LSMGO (0.1% S) (€/mt)_Rotterdam	447.06	310.08
LSMGO (0.1% S) (€/mt)_Gibraltar	482.35	337.81

En la Tabla 76 se muestran los resultados del análisis de sensibilidad cuando se solicita un crédito para el 70% de la inversión de reequipamiento en CI, con un período de devolución de cinco años y con una tasa de interés del 6%. Aparte de los casos base (escenario optimista), el análisis determinístico muestra los resultados obtenidos para escenarios pesimistas (ver Tabla 76). En este último caso, escenario pesimista, la viabilidad del servicio feeder entre Vigo-San Nazaire es la única garantizada, ya que se encontraron valores negativos de TIR para el resto de las rutas (ver Tabla 77).

Tabla 77. Análisis de sensibilidad

	Vigo-St. Nazaire				Las Palmas -Huelva				Las Palmas -Sta. Cruz de Tenerife			
	Feeder		Ro-Pax		Feeder		Ro-Pax		Feeder		Ro-Pax	
Análisis Probabilístico	Media_TIR=510%		Media_TIR =90%		Media_TIR =90%		Media_TIR= (-7)%		Media_TIR =128%		Media_TIR =(3%)	
Análisis Determinístico	Base case	Pessimistic scenario	Base case	Pessimistic scenario	Base case	Pessimistic scenario	Base case	Pessimistic scenario	Base case	Pessimistic scenario	Base case	Pessimistic scenario
TIR	816%	328%	205%	---	276%	---	67%	---	758%	---	199%	---

Con el fin de ofrecer una perspectiva más amplia, se llevó a cabo un análisis probabilístico a través de "simulaciones de Montecarlo" tomando valores para las variables principales (ver Figura 46. Cuadro de sensibilidad en el análisis probabilístico), según funciones de probabilidad. Estas funciones (basadas en distribuciones triangulares) han tomado un rango del 20% para los valores más y menos probables sobre los valores del caso base.

Así, para las variables de la Tabla 76 se asumieron los valores medios como casos base, mientras que para los valores de las demás variables se tomaron los de los casos de aplicación (ver sección 4.2). Los valores medios de las distribuciones obtenidas de las simulaciones para la TIR (con un nivel de confianza del 95%) se recogen en la Tabla 77. Estos resultados concluyen la falta de viabilidad para la inversión en la adaptación de los buques al CI en los los tráficos Ro-Pax entre Las Palmas-Huelva y entre islas (Las Palmas-Sta. Cruz de Tenerife). El gráfico de sensibilidad (ver Figura 46), muestra la contribución de la varianza a los resultados de la TIR, y proporciona evidencias de que la influencia de una tarifa medioambiental específica es realmente útil cuando el beneficio medioambiental es significativo (rutas Vigo-San Nazaire). Sin embargo, en escenarios donde el ahorro de emisiones es moderado (Huelva-Las Palmas), el 'incentivo por evitar la tarifa medioambiental' es insuficiente en sí mismo para hacer viable la inversión de los buques en CI, ya que la diferencia del coste operativo (electricidad en tierra frente al coste del combustible) resulta ser el parámetro más influyente en la viabilidad de estos escenarios.

El análisis de sensibilidad confirma los hallazgos iniciales sobre la menor incidencia de los tiempos de retraso por conexión / desconexión para los feeders. La tabla de sensibilidades (ver Figura 46) muestra el menor peso relativo de las tasas del buque (que miden la penalización por el tiempo adicional de conexión) en la variación de la TIR para los buques feeder en relación con las flotas de Ro-Pax.

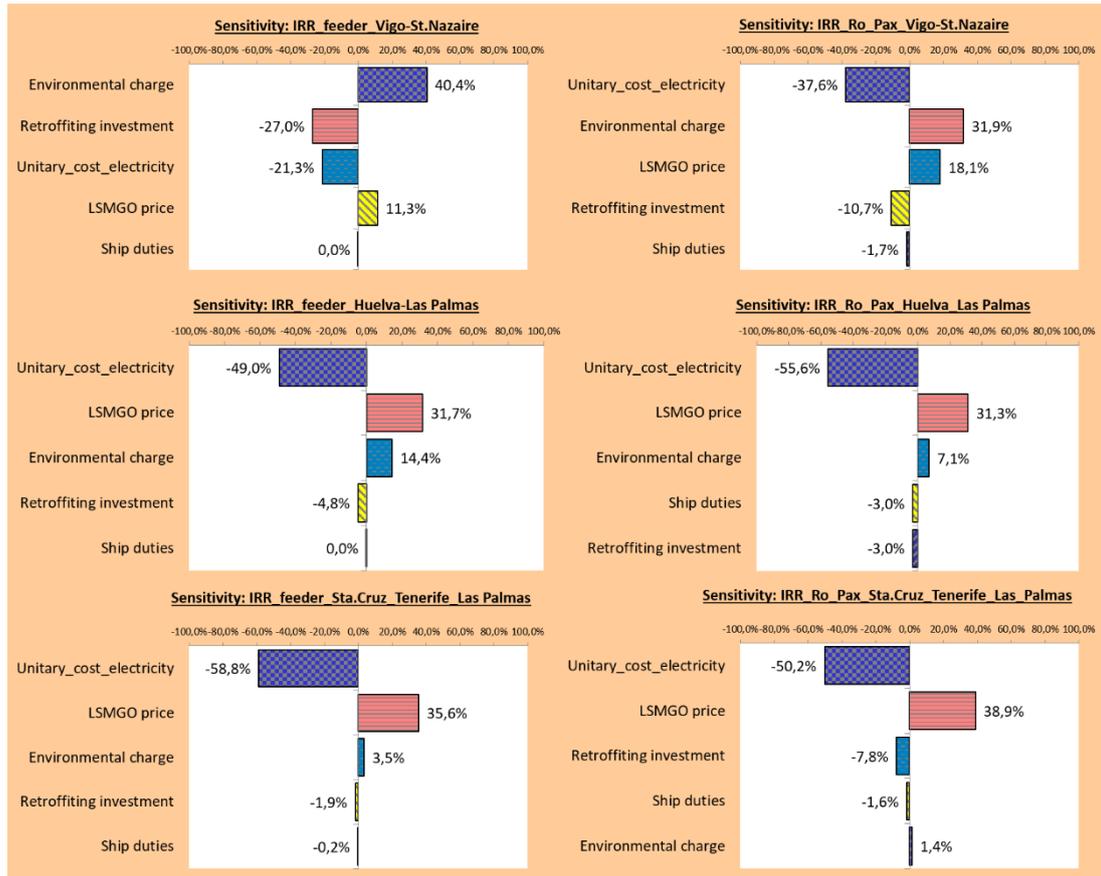


Figura 46. Cuadro de sensibilidad en el análisis probabilístico

5 CONCLUSIONES

La obligación de proporcionar infraestructuras de CI en los principales puertos de la UE a partir de 2025 (Directiva 2014/94 / UE) sugiere un cambio legislativo hacia la armonización de las estructuras tarifarias medioambientales en los puertos europeos (*green charging*). Esta evolución, previsiblemente más exigente, tendrá un relevante impacto en el rendimiento del SSS. Este capítulo asume, como primera aproximación al impacto sobre el SSS, una evolución similar de la normativa medioambiental portuaria a la del transporte por carretera en la UE (Directiva 1999/62 / CE modificada por la Directiva 2011/76 / UE y COM (2017) 275 final, ANEXO 1), mediante el cobro de una tarifa medioambiental basada en un sistema de cobro diferencial en base a la alternativa tecnológica más sostenible. Así, los buques en puerto previsiblemente pagarán una tarifa medioambiental, vinculada a la diferencia de emisiones entre el uso del CI y el suministro de electricidad a bordo, que

incentivará a que los buques se reequipen para poder usar el CI y evitar el pago de la tarifa que recoge en términos económicos, el daño extra causado por la contaminación.

A la luz de lo anterior, este trabajo introduce un método que es capaz de cuantificar las tarifas medioambientales para las flotas SSS que operan en una ruta específica. De tal forma que, el capítulo presenta el impacto económico de esta tarifa medioambiental, no sólo en la operación de la flota obtenida en el capítulo 5 como óptima para una ruta determinada, sino que además amplía el análisis a flotas Ro-Pax y a otras rutas para ofrecer conclusiones más amplias. Además, se evalúa la conveniencia de una posible reforma del buque para posibilitar el CI bajo el análisis del proyecto de inversión usando la TIR como herramienta de evaluación. Por tanto, se considera el análisis en todo momento desde la perspectiva de la naviera.

El método se ha aplicado a varias rutas europeas (que ofrecen diversidad en los mix energéticos de sus redes eléctricas) donde operan buques Feeder y Ro-Pax. Aunque los resultados se obtuvieron de casos de aplicación específicos, estos son lo suficientemente representativos como para permitir la extrapolación de las conclusiones a escenarios similares. Así, los resultados indican que las tarifas medioambientales contribuirían a impulsar la modificación de los buques SSS para el uso del CI ya que fortalecería la viabilidad de su inversión si operan en rutas donde CI ofrece un ahorro de emisiones significativo respecto a la generación a bordo (ahorro de la tarifa medioambiental). Además, esa viabilidad en estas rutas estaría poco condicionada por los parámetros que condicionan el escenario (coste de combustible y precio unitario de la electricidad en puerto). Contrariamente, en rutas cuyos puertos ofrecen servicios de CI con bajos beneficios ambientales en relación con el suministro eléctrico a bordo, la tarifa medioambiental no sería suficiente. En este último caso, la viabilidad de la adaptación de CI en los buques depende en gran medida de los costos de operación (coste de combustible frente al precio de la electricidad en tierra) independientemente de la aplicación de la tarifa medioambiental.

En consecuencia, los puertos ubicados en regiones con una alta proporción de RES en la generación eléctrica en tierra obtendrían amplias ventajas de la introducción de una tarifa medioambiental, mientras que aquellos puertos cuyas redes eléctricas aún dependen en gran medida de los combustibles fósiles podrían incluso ser penalizados por el uso generalizado del CI independientemente de la aplicación de tarifa medioambiental. Sin embargo, las externalidades adicionales (como la contaminación acústica, la generación de desechos portuarios, las vibraciones, etc.) también deben considerarse en el futuro en el cálculo de la tarifa medioambiental para proporcionar evaluaciones más precisas de los daños causados. Asimismo, las autoridades y los *policy makers* deberían incluir el impacto social de la tarifa medioambiental en el análisis coste-beneficio del CI, cuando se evalúe como un todo (Comisión Europea, 2015).

Por otro lado, el análisis realizado en este capítulo también muestra que los feeder optimizados, con tiempos de atraque más prolongados por escala y menores GT, en relación con buques convencionales Ro-Pax, serían los que más se beneficiarían del uso de CI con aplicación de la tarifa medioambiental, ya que implica menores costes de inversión para su reequipamiento y menor sensibilidad al tiempo adicional en puerto por conexión / desconexión del CI.

Si bien el método de cálculo de la tarifa medioambiental presentado en este capítulo estima el nivel de emisiones contaminantes diferenciadas (*pollutant differentiation system*), siguiendo la evolución del transporte por carretera como ejemplo, se espera una aplicación simplificada del *Tier system* (categorías Euro para camiones) en primera aproximación. Esta

realidad impulsa futuras líneas de investigación. Así, una de ellas debe abordar la categorización ambiental de los buques considerando el ESI (iniciativa de IAPH) como indicador inicial. Para ello, además de incluir las emisiones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el cálculo del ESI, los niveles actuales requeridos por la OMI deben ser reemplazados por emisiones de CI en las expresiones ESI. Así, el cálculo de la tarifa medioambiental podría abordarse desde la adaptación del método propuesto en este capítulo a través de la inclusión de un indicador ESI modificado.

Capítulo 8

Conclusiones y futuras líneas de investigación

El principal objetivo de este trabajo es proporcionar una herramienta de evaluación que aporte evidencias cuantitativas sobre la conveniencia de operar autopistas del mar integradas en cadenas intermodales.

Para ello se ha desarrollado un modelo matemático capaz de evaluar la competitividad relativa en términos de tiempo y coste (por tonelada y viaje) para el transporte intermodal articulado a través de una autopista del mar y su alternativa unimodal (la carretera), pero siendo capaz también de evaluar sus ventajas medioambientales.

Así, el modelo permitió comparar los resultados obtenidos sobre competitividad relativa para las posibles autopistas del mar operando con flotas optimizadas, sugiriendo la mejor combinación de flota y ruta para unos orígenes y destinos finales que dicta la cadena intermodal. La optimización se llevó a cabo mediante algoritmos evolutivos multiobjetivo, lo que nos permitió definir, no sólo las variables técnicas y operativas de la flota (características de arquitectura naval, capacidad de carga, número de buques, velocidad, frecuencia, etc.), sino también el tipo de unidades de carga que más favorecerán la intermodalidad.

Este objetivo principal se ha conseguido a través de la consecución de objetivos parciales.

El primero de ellos era el desarrollo de un modelo de optimización capaz de superar las carencias de modelos anteriores, incluyendo la evaluación de criterios medioambientales y la ampliación del "scope" a contextos de trabajo más amplios que la Unión Europea (U.E.).

Este modelo se ha utilizado para la optimización de flotas de acuerdo con la competitividad de las rutas intermodales, a través de su aplicación a un caso real: el establecimiento de MoS en Chile. Esto se planteó como el segundo objetivo parcial de nuestro trabajo. Así, se nos presenta un caso singularmente interesante de aplicación y a través de su estudio llegamos a una serie de conclusiones de interés sobre la selección de puertos hub (principales) y spoke (periféricos) para la articulación de MoS: si bien los puertos spoke o periféricos para la articulación de las MoS quedan claros respecto a los resultados obtenidos, los mismos resultados no son tan concluyentes para la elección del puerto hub. Sin embargo, se puede concluir que los resultados obtenidos nos permiten confirmar la utilidad del modelo matemático desarrollado para la identificación de MoS y la selección de flotas optimizadas en casos reales de aplicación.

Como tercer objetivo parcial se planteó la búsqueda del sistema propulsivo y combustible óptimos para los buques optimizados por el modelo. Con el desarrollo dispar de la normativa

medioambiental de la UE con respecto a los niveles máximos permitidos de emisiones para los medios de transporte, existe un creciente debate en la comunidad científica sobre si el transporte marítimo de corta distancia (SSS) integrado en cadenas intermodales sigue siendo el sistema de transporte más sostenible para el transporte puerta a puerta en el marco regulador actual. Al respecto, los resultados de este capítulo muestran que el sistema de LNG es la planta de propulsión más adecuada para flotas de contenedores que operan en condiciones de MoS, lo que, además, maximiza las oportunidades de éxito de la intermodalidad. No obstante, otras consideraciones que no han sido evaluadas en este trabajo pueden jugar un papel fundamental en la toma de decisiones sobre la planta de propulsión de estos buques, como la incertidumbre sobre la disponibilidad de LNG en los puertos, la diferencia en el tiempo invertido en los procesos de repostaje de LNG en comparación con los combustibles convencionales, o el mercado de segunda mano de los buques de gas (LNG). En tal caso, la segunda opción que permite que las cadenas intermodales sean competitivas en términos de costos globales y ambientales es el motor diesel de cuatro tiempos Tier III con scrubber operando con HFO.

Como cuarto objetivo parcial se comprobó la viabilidad técnica de nuestro modelo en términos de estabilidad, evaluando la alternativa inicial y modificando el compartimentado y la distribución y cantidad de carga transportada hasta obtener un buque que resultaba técnicamente (desde el punto de vista de la estabilidad transversal) viable.

Como último objetivo parcial se realizó la comprobación del comportamiento de los buques óptimos ante desafíos normativos portuarios (Cambios normativos en términos de sostenibilidad). A partir de 2025 (Directiva 2014/94 / UE), se impone un cambio legislativo hacia la armonización de las estructuras tarifarias medioambientales en los puertos europeos (green charging). Esta evolución, previsiblemente más exigente, tendrá un impacto relevante en el rendimiento del SSS. Este trabajo introduce un método que es capaz de cuantificar las tarifas medioambientales para las flotas SSS que operan en una ruta específica. Así, se presenta el impacto económico de esta tarifa medioambiental, no sólo en la operación de la flota obtenida como óptima para una ruta determinada, sino que además amplía el análisis a flotas Ro-Pax y a otras rutas para ofrecer conclusiones más amplias. Además, se evalúa la conveniencia de una posible reforma del buque para posibilitar el Cold Ironing (CI) bajo un análisis del proyecto de inversión, usando la TIR como herramienta de evaluación. Por tanto, se considera el análisis, en todo momento, desde la perspectiva de la naviera.

En este punto, puede concluirse que los puertos ubicados en regiones con una alta proporción de RES en la generación eléctrica en tierra obtendrían amplias ventajas de la introducción de una tarifa medioambiental, mientras que aquellos puertos cuyas redes eléctricas aún dependen en gran medida de los combustibles fósiles podrían incluso ser penalizados por el uso generalizado del CI independientemente de la aplicación de tarifa medioambiental. Sin embargo, las externalidades adicionales (como la contaminación acústica, la generación de desechos portuarios, las vibraciones, etc.) también deben considerarse en el futuro en el cálculo de la tarifa medioambiental para proporcionar evaluaciones más precisas de los daños causados. Asimismo, las autoridades y los policy makers deberían incluir el impacto social de la tarifa medioambiental en el análisis coste-beneficio del CI, cuando se evalúe como un todo (Comisión Europea, 2015). Por último, también se muestra que los feeder optimizados, con tiempos de atraque más prolongados por escala y menores GT, en relación con buques convencionales Ro-Pax, serían los que más se beneficiarían del uso de CI con aplicación de la tarifa medioambiental, ya que implica menores costes de inversión para su reequipamiento y menor sensibilidad al tiempo adicional en puerto por conexión / desconexión del CI. Cabe mencionar que en este punto se

debería abordar la actualización del tiempo en puerto calculado para el buque óptimo, ya que se consideró la carga/descarga de la totalidad de los 184 contenedores y, sin embargo, este escenario es poco realista, ya que el escenario más cercano a la realidad vendría caracterizado por un proceso de carga/descarga de 128 TEUs.

En resumen, esta tesis ha propuesto y validado una herramienta que ofrece soluciones realistas al dimensionamiento óptimo de flotas multimodales asegurando su sostenibilidad medioambiental.

Como trabajos futuros se deberá integrar en el modelo otras consideraciones que no han sido evaluadas en este trabajo, como los condicionantes ya descritos relativos a la relación con la tecnología y operativa del LNG, como la disponibilidad de LNG en los puertos, los tiempos de repostaje de LNG en comparación con los combustibles convencionales y la evolución del mercado de segunda mano de los buques de gas (LNG).

Por último, sería necesario trabajar en la implementación en el modelo propuesto de la nueva política de descarbonización de la Unión Europea que, junto con *la global sulphur cap*, se encamina a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [COM (2021) 562 final y COM (2021) 563 final], reseñando entre otras medidas propuestas, la penalización del uso de combustibles fósiles con un impuesto junto con el pago por el peso (t) de las emisiones de CO₂ producidas (inclusión del transporte marítimo en la *EU-Emission Trading System*).

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

BIBLIOGRAFÍA

- Acciario M., 2014. Real option analysis for environmental compliance: LNG and emission control areas. *Transportation Research Part D*, 28, 41-50.
- Banawan, A., El Gohary, M., Sadek, I., 2009. Environmental and economical benefits of changing from marine diesel oil to natural-gas fuel for short voyage high power passenger ships, *Proceedings of IMechE*, 224(2), 103-113.
- Baird A., 2007. The economics of Motorways of the Sea. *Maritime Policy & Management*, 34(4), 287-310.
- Ballini F. and Rozzo R., 2015. Air pollution from ships in ports: The socio-economic benefit of cold-ironing technology. *Research in Transportation Business & Management*, 17, 92-98.
- Bendall H., and Brooks M., 2011. Short Sea shipping: lessons for or from Australia. *Int. J. Shipping and Transport Logistics*, 3(4), 384-405.
- Bendall H., and Stent A A, 2001. A scheduling model for a high speed containership service: A hub and spoke short-sea application.. *Internat. J. Maritime Econom* 3(3), 262-277.
- Bengtsson, S., Fridell, E. and Andersson, K., 2014. Fuels for short sea shipping: a comparative assessment with focus on environment impact. *Proceedings of IMechE*, 228(1), 44-54.
- Bickel, P., Friedrich, R., Burgess, A., Fagiani, P., Hunt, A., Jong, G. D., Laird, J., Lieb, C., Lindberg, G., Mackie, P., Navrud, S., Odgaard, T., Ricci, A., Shires, J. and Tavasszy, L., 2006. HEATCO (Developing harmonised European approaches for transport costing and project assessment) Deliverable 5: Proposal for harmonised guidelines. Stuttgart: Institut für Energiewissenschaft und Rationelle Energieanwendung.
- Brynnolf, S., Magnusson, M., Fridell, E. and Andersson, K., 2014. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transportation Research Part D*, 28, 6-18.
- BOE Nº 92 (2006). *Boletín oficial del estado español nº 265. Bases reguladoras de las Autopistas del mar entre España y Francia* [Free translation in English: Rules for the Sea Motorways between Spain and France]. http://www.puertos.es/en/licitaciones/autopistas_mar/index.html. [Accessed 30 November 2009].
- Caamano, P., Tedin, R., Paz-Lopez, A., & Becerra, J. A. (2010). JEAf: A java evolutionary algorithm framework. In *Evolutionary Computation (CEC), 2010 IEEE Congress on* (pp. 1-8). IEEE.
- Castells i Sanabra, M. 2009. Short sea shipping efficiency analysis considering high-speed craft as an alternative to road transport in SW Europe. PhD Thesis. Department of Naval Science and Engineering, Polytechnic University of Cataluña.Spain.
- Carbon (SCC) Review—Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment. Final report to DEFRA. <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/carboncost/aeat-scc.htm>. [Accessed 19 January 2016].
- Contessi, C., 2013. Wartsila ship power 4 stroke applications development. Gas engine emissions Wartsila dual December2013. http://www.lngnordwest.de/files/lng_downloads/WS_131216/20131216%20Wartsila%20Leer_DF%20emission%20conference.pdf. [Accessed 19 January 2016].

- Culliane, K. and Culliane S., 2013. Atmospheric emissions from shipping: The need for regulation and approaches to compliance. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary* 33(4), 377-401.
- Culliane K. and Khanna M., 2000. Economies of scale in large containerships: Optimal size and geographical implications. *Journal of Transport Geography*, 8, 181–195.
- Chang C. and Chow I., 2010. The integrated plan of container management for a short-sea carrier. *Proceedings of 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists*. Lisbon.
- Christiansen, M, Fagerholt K. and Ronen D., 2004. Ship routing and scheduling: Status and perspectives. *Transportation Science* 38 (1), 1–18.
- Daganzo C., 2005. Many to many distribution' in Daganzo C. *Logistic systems Analysis*. Berlin Springer.
- Danish Maritime Authority, 2012. Appendix 3. Ship cost analysis. Appendices. North European LNG Infrastructure Project <http://www.dma.dk/themes/LNGInfrastructureProject/Documents/Final%20Report/Appendices%2020120528.pdf>. [Accessed 19 January 2016].
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. A. M. T., 2002. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 6(2), 182-197.
- Elgohary, M., Seddiek, I., Salem A., 2015. Overview of alternative fuels with emphasis on the potential of liquified natural gas as future marine fuel. *Proceedings of IMechE* 229(4), 365-375.
- Engineering & Physical Sciences Research Council (EPSRC) and UK Department for Transport DfT. (2002-2003) UK Marine Motorways Study. DfT LINK Future Integrated Transport (FIT) Programme.
- ESPO, 2012. Green Guide: towards excellence in port environmental management and sustainability. Available at: https://www.espo.be/media/espopublications/espo_green%20guide_october%202012_final.pdf. [Accessed September 2020].
- ESPO, 2019. Environmental Report: ecoportinsights, 2019 Available at: <https://www.espo.be/media/Environmental%20Report-2019%20FINAL.pdf>. [Accessed September, 2020].
- European Commission, 1999. Council Directive 1999/32/EC of 26 April 1999 relating to a reduction in the sulphur content of certain liquid fuels and amending Directive 93/12/EEC amending Directive 1999/32/EC as regards the sulphur content of marine fuels.
- European Commission, 2005. Directive 2005/33/EC amending Directive 1999/32/EC as regards the sulphur content of marine fuels.
- European Commission, 2009. Directive 2009/29/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 amending Directive 2003/87/EC so as to improve and extend the greenhouse gas emission allowance trading scheme of the Community (Text with EEA relevance).
- European Commission, 2011. Directive 2011/76/EU of the European Parliament and of the Council of 27 September 2011 amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures Text with EEA relevance.
- European Commission, 2014. Directive 2014/94/EU of the European parliament and of the council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure.

- European Commission, 2015. Guide to Cost-Benefit Analysis of Investment Projects: Economic appraisal tool for Cohesion Policy 2014-2020. Directorate-General for Regional and Urban policy.
- European Commission, 2017. Study on differentiated port infrastructure charges to promote environmentally friendly maritime transport activities and sustainable transportation. June, 2017.
- European Commission – DG Mobility and Transport. Unit A3 — Economic analysis and better regulation, January 2019.
- EU COM (2011) 144 Final, 2011. WHITE PAPER Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. Brussels.
- EU COM (2017) 275, 2017. ANNEX to the DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 1999/62/EC on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures (Text with EEA relevance). Brussels.
- EU Commission 2020, DG Energy, Unit A4, EUROSTAT: Energy Statistics. Energy datasheets: EU countries. Available at: <https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/information-on-energy-markets-in-eu-countries-with-national-energy-profiles/resource/24184068-8ec3-470a-ba28-5ca2317c6f6f>. [Accessed September, 2020].
- European Parliament and the Council of the European Union, 2006, REGULATION (EC) No 166/2006 concerning the establishment of a European Pollutant Release and Transfer Register and amending Council Directives 91/689/EEC and 96/61/ECE.
- European Environment Agency, 2009, 1.A.1 Combustion in energy industries GB2009 update June 2010 in 'EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2009', p. 96, EEA Technical Report No 9/2009, European Environment Agency.
- European Environment Agency, 2017. European Pollutant Release and Transfer Register. Available at: <https://prtr.eea.europa.eu/#/industrialactivity>. [Accessed September, 2020].
- European Environment Agency, 2019, Air quality in Europe-2019 report, EEA Report No 10/2019.
- Faber, J., Nelissen, D., Ahdour, S., Harmsen, J., Toma, S. and Lebesque, L., 2015. *Study on the Completion of an EU Framework on LNG-fuelled Ships and its Relevant Fuel Provision Infrastructure. Analysis of the LNG market development in the EU*. European Commission. Directorate-General for Mobility and Transport.
- Feng C. and Chang C., 2008. Optimal slot allocation in intra-Asia service for liner shipping company. *Maritime economics and logistics*, 10, 295-309.
- Feo, M., Espino R. and García, L., 2010. An stated preference analysis of Spanish freight forwarders modal choice on the south-west Europe Motorway of the sea. *Transport Policy*, 18, 60-67.
- Fermi F., Parolin R, and El Beyrouty K., 2019. Handbook on the external costs of transport. Version 2019.
- García-Alonso and Sánchez-Soriano. 2010. Analysis of the Evolution of the Inland Traffic Distribution and Provincial Hinterland Share of the Spanish Port System, *Transport Reviews*, 30(3), 275-297.
- García-Menendez L. and Feo-Valero M. 2009. European Common Transport Policy and Short Sea Shipping: Empirical Evidence Based on Modal Choice Models. *Transport Reviews*, 29(2), 239-259.
- Gesé X. and Baird A., 2013. Motorways of the sea policy in Europe. *Maritime Policy & Management*, 40(1), 10-26.

- Government of the Canary Islands, 2018. Economy, Industry and Trade Counseling. Anuario Energético de Canarias 2017. Available online: <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/jaxiistac/menu.do?uripub=urn:uuid:131cf873-66a9-408d-8cfa-537d6be05067>. [Accessed September,2020].
- González, M. and Trujillo, L. 2009. Efficiency Measurement in the Port Industry: A Survey of the Empirical Evidence, *Journal of Transport Economic and Policy*, 43(2),157-192.
- Grosso M., Lynce, A. and Silla A., 2010. Short Sea Shipping, intermodality and parameters influencing pricing policies: the Mediterranean case. *NETNOMICS: Economics research and Electronic Networking*,11 (1), 47-67.
- Hjelle M. H. (2010). Short Sea Shipping Green's Label at risk. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary*, 30(5), 617-640.
- Hjelle M. H. and Fridell E. (2012). When is Short Sea Shipping environmentally competitive? Oosthuizen J.(ed) Environmental Health –Emerging issues and practice. Croatia:InTech.
- Hjelle, M.H., 2014. Atmospheric emissions of short sea shipping compared to road transport though the peaks and troughs of short-term market cycles. *Transport Reviews: A Transnational Transdisciplinary* 34(3), 379-395.
- Holland, M., Pye, S., Watkiss, P., Droste-Franke, B., Bickel, P., 2005. Service contract for carrying out cost-benefit analysis of air quality related issues, in particular in the Clean Air for Europe (CAFE) programme. Damages per tonne of PM2.5, NH3, SO2, NOx and VOC's of EU25 Member State (excluding Cyprus) and surrounding seas. Oxon: AEA Technology Environment.
- Hsu Ch. And Hsieh Y. 2007. Routing, ship size,and sailing frequency decisión making for a maritime hub-and-spoke container network. *Mathematical and computer modelling*, 45, 899-916.
- IMO,2008. Revised MARPOL Annex VI: *Regulations for the prevention of air pollution from ships and NOx technical code* London:IMO Marine Environmental Protection Committee (MEPC).
- IMO Resolución A749 (18), aprobada el 4 de noviembre 1993, "Código de estabilidad sin averías para todos los tipos de buque regidos por los instrumentos de la OMI" Despues de varias enmiendas, ha sido modificada por las Resoluciones MSC 75/69 y MSC 85/26 Add1 ANNEX 2, 4 de diciembre de 2008, recogiendo en la Resolución MSC 267 (85) de 4 de diciembre de 2008.
- INE (2013). Instituto Nacional de Estadística de Chile. Anuarios Transporte por Carretera. Infografía del transporte por carretera 2013.
- International Maritime Organization. 2000: *International Code of Safety for High-Speed Craft* (resolution MSC.36 (63)) and *High-Speed Craft Code 2000*.
- International Maritime Organization. 1994: SOLAS (International Convention for the Safety of Life at Sea) Chapter X - *Safety measures for high-speed craft*.
- International Maritime Organization. 2000. International Code of Safety for High-Speed Craft (resolution MSC.36 (63)) and High-Speed Craft Code 2000.
- International Maritime Organization-IMO-, 2017. GloMEEP Project. Marine Environment Division of IMO. Available online: <https://glomeep.imo.org/technology/shore-power/> [Accessed November, 2020].
- Innes A and Monios J. 2018. Identifying the unique challenges of installing cold ironing at small and medium ports – The case of Aberdeen. *Transportation Research Part D* 62, 298–313.

- Jiang L., Kronbak J. and Christensen L., 2014. The cost and benefits of sulphur reduction measures: Sulphur scrubbers versus marine gas oil. *Transportation Research Part D*, 28, 19-27.
- Jiang L. and Kronbak J., 2012. The model of maritime external costs Work Package 1, report nº06, June 2012. Project n 2010-56: Emissionsbeslutningsstottesystem. Copenhagen: University of southern Denmark.
- Johnson, H., and Styhre, L., 2015. Increased energy efficiency in short sea shipping through decreased time in port. *Transport. Res. Part A: Policy Pract.* 71, 167–178.
- Kim J., Kim H. and Lee P. T., 2013. Optimising containership speed and fleet size under a carbon tax and an emission trading scheme. *Int. J. Shipping and Transport Logistics*, 5(6), 571-590.
- Kim H., Chang Y.T. and Kim K.T., 2012. An epsilon optimal algorithm considering greenhouse gas emissions for the management of a ship's bunker fuel. *Transportation Research Part D*. 17 (7), 97-103.
- Kristensen H. 2012. Energy demand and exhaust gas emissions of ships. Work Package 2 of Project Emissionsbeslutningsstottesystem. Copenhagen: Technical University of Denmark.
- Khersonsky, Y., Islam, M. and Peterson, K. 2007. Challenges of connecting shipboard marine systems to medium voltage shoreside electrical power. *Industry Applications*, IEEE 43(3): 838–844.
- Kristensen H.O and Bingham H., 2020. Project no. 2016-108: Update of decision support system for calculation of exhaust gas emissions. Report no.06, HOK Marineconsult ApS and Technical University of Denmark, May 2020.
- Kristensen H.O and Psaraftis H., 2016. Project no. 2014-122: Mitigating and reversing the side-effects of environmental legislation on Ro-Ro shipping in Northern Europe, Work Package 2.3, Report no. 07 HOK Marineconsult ApS and Technical University of Denmark, August 2016.
- Korzhenevych, A., Dehnen, N., Bröcker, J. and Holtkamp Meier, H., 2014. *Update of the Handbook on Estimation of External Costs in the Transport Sector*. European Commission – DG Mobility and Transport. Ricardo-AEA/R/ ED57769, Issue Number 1, 8 January 2014.
- Kumar, J., Kumpulainen, L. and Kauhaniemi, K., 2019. Technical design aspects of harbour area grid for shore to ship power: state of the art and future solutions. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 104, 840–852.
- Lützen M and Kristensen H. 2012. A model for prediction of propulsion power and emissions tankers and bulk carriers. *Proceedings of World Maritime Technology Conference, 2012*. Saint-Petersburg, Russia.
- Lagoudis I, Fragkos S. and Litinas N., 2010. Estimating optimum container and vessel fleet sizes in a cyclic liner service using a holistic approach *Int. J. Shipping and Transport Logistics*, 2(1), 4-21.
- Lamb, T., 2004. *Ship Design and Construction*. The Society of Naval and Marine engineering. Jersey City, (USA).
- Lee P., Hu K. and Chen T. 2010. External costs of domestic container transportation: short-sea-shipping versus trucking in Taiwan. *Transportation Reviews*, 30(3), 315-355.
- Lützen, M., Kristensen, H. 2012. A model for prediction of propulsion power and emissions tankers and bulk carriers. *Proceedings of World Maritime Technology Conference, 2012*. Saint-Petersburg, Russia.

- Maibach M. Schreyer C. Sutter D. Essen H.P.V., Boon B.H., Smokers R., Schrote A., Doll C., Pawlowska and B. Bak M. 2008. *Handbook on estimation of external costs in the transport sector*. Delft: CE Delft.
- Mangan, J., Lalwani, C. and Gardner, B. 2001. Identifying relevant variables and modeling the choice process in freight transportation. *International Journal of Maritime Economics*, 3(3), 278-297.
- Martin Stopford. 2009. *Maritime Transport* (3rd edition). New York: Routledge.
- Martínez-López, A., Caamaño. and P., Castro L.. 2015a. Definition of optimal fleets for Sea Motorways: the case of France and Spain on the Atlantic coast. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(1), 89-113.
- Martínez-López A, Munín Doce A. and García-Alonso L., 2015b. A multi-criteria decision method for the analysis of the motorways of the sea: the application to the case of France and Spain on the Atlantic coast *Maritime Policy and Management* 42 (6), 608-631.
- Martínez-López A., Kronbak J. and Jiang L. 2015c. Cost and time models for the evaluation of intermodal chains by using Short Sea Shipping in the North Sea Region: Rosyth-Zeebrugge route. *International Journal of Shipping and Transport Logistics*, 7(4), 494-520.
- Martínez-López, A., Caamaño, P. and Míguez, M., 2016. Influence of external costs on the optimisation of container fleets by operating under motorways of the sea conditions. *International Journal of Shipping and Transport Logistics* 8(6), 653-686.
- Martínez-López A., Caamaño Sobrino P., Chica González M., and Trujillo L. 2018. Influence of external costs on the optimisation of container fleets by operating under motorways of the sea conditions. *Transportation Research Part D*, 59, 134–147.
- Mbiydzenyuy, G., Persson, J. and Henesey, L. 2010. A decision support method for analysing a short sea shipping link from a port infrastructure perspective. *Proceedings of 2010 Annual Conference of the International Association of Maritime Economists*. Lisbon.
- Mertikas P., Dallas S.E., Spathis D., Kourmpelis T., Georgakopoulos I.P., Prousalidis J.M., Lyridis D.V., Nakos L., P. Mitrou P., and Georgiou V. 2018. Furthering the electricity to ships and ports: the ELEMED project. 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018). Doha, Qatar 10-12 April 2018.
- Medda, F. and Trujillo, L., 2010. Short Sea Shipping: an analysis of its determinants. *Maritime Policy and Management* 37(3), 285-303.
- National Institute of Statistics and Economic Studies of France, 2017. Available at: <https://www.insee.fr/en/statistiques/4771934#tableau-ipc-flash-g1-en>. [Accessed September, 2020].
- National Statistics Institute of Spain, 2017. Available at: https://www.ine.es/en/prensa/ipc_tabla_en.htm. [Accessed September 2020].
- Nellthorp, J., Sansom, T., Bickel, P., Doll, C. and Lindberg, G. 2001. *Valuation conventions for UNITE*. ITS, University of Leeds, Leeds.
- Ng, A.K.Y., 2009. Competitiveness of short sea shipping and the role of port: the case of North Europe *Maritime Policy and Management*, 36, 337-352.
- Ng A.K.Y. and Kee J. K.Y. 2008. The optimal ship sizes of container liner feeder services in Southeast Asia: a ship operator's perspective. *Maritime Policy & Management*, 35(4), 353-376.
- Nielsen, J. and Stenersen, D., 2010. Emission factors for CH₄, NO_x, particulates and black carbon for domestic shipping in Norway. Revision 1. Norwegian Pollution Agency. Marintek, Klima og forurensningsdirektoratet.

- Ntziabchristos and Samaras, 2012. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2009. Chapter: Passenger cars, light duty trucks, heavy duty vehicles including buses and motorbikes*. The European Environment Agency.
- Observatory of Road Freight Transport Costs, July 2015. General Department for Road Transport of the Secretariat of State for Transport of the Ministry of Public Works and Infrastructure. Government of Spain http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/TRANSPORTE_POR_CARRETERA/SERVICIOS_TRANSPORTISTA/OBSERVATORIO_COSTES/observatorios.htm. [Accessed January 2016].
- Otero Rivera, C. 2002a. Funciones matemáticas que relacionan las características principales en los buques portacontenedores (parte 1ª). *Ingeniería Naval*, 795, 84-93.
- Otero Rivera, C. 2002b. Funciones matemáticas que relacionan las características principales en los buques portacontenedores (parte 2ª). *Ingeniería Naval*, 796, 129-137.
- Paixao A.C. and Marlow P.B. 2002. Strengths and weaknesses of short sea shipping. *Marine Policy*, 26, 167-178.
- Panagakos G., Stamatopoulou E. and Psaraftis H. 2014. The possible designation of the Mediterranean Sea as a SECA: A case study. *Transportation Research Part D*, 28,74-90.
- Panasiuk, I. and Turkina, L., 2015. The evaluation of investments efficiency of SOx scrubber installation. *Transportation Research Part D* 40, 87-96.
- Perez-Mesa J., Cespedes-Lorente J. and Salinas-Andujar J. 2010. Feasibility study for a Motorway of the Sea (MOS) between Spain and France: Application to the transportation of Perishable Cargo. *Transport Reviews*, 30(4), 451-471.
- Psaraftis, H. N. and Zis, T., 2019, *European Policies for Short Sea Shipping and Intermodality Short Sea Shipping in the Age of Sustainable Development and Information Technology*. Routledge, 16 p.
- Ports of Stockholm, 2020. Onshore power connection for vessels. Available at: <https://www.portsofstockholm.com/about-us/environmental-work/environmental-measures/onshore-power-connection/> (Accessed January,2021).
- Sánchez, R.J. and Perroti, D.E. 2012. Looking into the future: big full containerships and their arrival to South American ports. *Maritime Policy & Management*, 39(6), 571-588.
- Sauri, S. 2006. Cost structure in a short sea shipping line. *Journal of Maritime Research*, 3(2), 53–66.
- Savonge R. and Lugo E. 2014. Diagnóstico y pronóstico sobre la oferta y demanda de servicios de transporte marítimo de naves de línea regular, entre Chile y el mundo. Subsecretaría de transportes (Ministerio de transportes y telecomunicaciones de Chile).
- Schroten A., Scholten P., Van Wijngaarden L., Van Essen H., Brambilla M, Gatto M., Maffii S.,Trosky F., Kramer H., Monden R., Bertschmann D., Killer M., Greinus A., Lambla V., El Beyrouty K., (Ricardo), Amaral S., Nokes T., and Coulon T. 2019. Transport taxes and charges in Europe. An overview study of economic internalisation measures applied in Europe. Directorate-General for Mobility and Transport. European Commission, March, 2019.
- Sciberras,E.A., Zahawib B., Atkinson D.J.,2017. Reducing shipboard emissions – Assessment of the role of electrical technologies. *Transportation Research Part D*, 51, 227–239.
- SignificantShips. 2014. The Royal Institution of Naval Architects. http://www.rina.org.uk/Significant_Ships_of_2014.html [Accessed 10 de Abril de 2016].
- Significant Ships of 1994, from Royal Institution of Naval Architects.

- Sornn-Friese H., Poulsen R.T., Nowinska A.U and de Langen P., 2021. What drives ports around the world to adopt air emissions abatement measures?. *Transportation Research Part D*, 90, 102644.
- Spengler T. and Tovar B., 2020. Potential of cold-ironing for the reduction of externalities from in-port shipping emissions: The state-owned Spanish port system case. *Journal of Environmental Management*, 279(2021), 111807.
- SPIN-HSV project. 2003-2005: *Shipping quality and safety of High-Speed Vessels. (Deliverable D5.8, Public Summary Report of work package n°5)* IV Framework Programme of the European Commission for Research and Development. <http://www.spin.mettle.org> [Accessed 3 March 2011].
- Suárez-Alemán, A., Trujillo, L. and Medda, F. 2015. Short Sea shipping and Intermodal competition, *Maritime Policy and Management*, 42(4), 317-334
- Suárez-Alemán, A., Cullinane, K. and Trujillo, L. (2014) Time at ports in Short Sea Shipping: when timing is crucial, *Maritime Economics and Logistics*, vol. 16(4), pp. 399-417.
- Subsecretaria de transportes del Gobierno de Chile. Ministerio de transportes y telecomunicaciones. 2009. Análisis económico al transporte de carga nacional.
- Subsecretaria de transportes del Gobierno de Chile. Ministerio de transportes y telecomunicaciones. 2011. Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana. Steer Davies Gleave.
- Tarifas Puerto de San Antonio, Chile. 2016. SAAM Puertos S.A. http://www.stiport.cl/quienes_somos/medios/manuales/tarifasgral.pdf. [Accessed 7 de Abril de 2016].
- Tarifas Puerto de Valparaíso, Chile. 2016. Terminal Pacífico Sur. http://portal.tps.cl/tps/site/artic/20060124/asocfile/20060124152711/anexo_tarifas_tps_12_mayo_2016.pdf. [Accessed 7 de Abril de 2016].
- Trujillo, L., Medda, F. and González, M. 2010. An analysis of short sea shipping as an alternative for freight transport, en: Cullinane, K. (ed) *The international Handbook of Maritime Economics*. Edward Elgar (UK). 10, 71-85.
- Trujillo, L. and Medda, F. 2009. A Boost for Short Sea Shipping: The Environmental and Economic Determinants. *The Environmentalist*, 80, 14-20.
- Tseng P.H. and Pilcher N., 2015. A study of the potential of shore power for the port of Kaohsiung, Taiwan: To introduce or not to introduce?. *Research in Transportation Business & Management*, 17, 83-91.
- Usabiaga J., Castells M., Martínez X. and Olcer A. 2013. A simulation model for road and maritime environmental performance assessment. *Journal of Environmental Protection*, 4, 683-693.
- Van Essen, H., van Wijngaarden, L., Schroten, A., Sutter, D., Bieler, C., Maffii, S., Brambilla, M., Fiorello, D., Fermi, F., and Parolin, R. 2020. Handbook on the external costs of transport, version 2019.1. <https://doi.org/https://op.europa.eu/s/pLqH>, <http://doi.org/10.2832/27212>.
- Vanherle K. and Delhaye E. 2010. External costs of maritime transport. Brussels: European Community of ship's owners' Associations (ECSA).
- Wang C. and Corbett J. 2007. The costs and benefits of reducing SO₂ emissions from ships in the US West Coastal waters. *Transportation research Part D*, 12 (8), 577-588.
- Wang, S. and Meng, Q. 2012. Liner ship fleet deployment with container transshipment operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(2), 470-484.

- Watkiss, P., Anthoff, D., Downing, T., Hepburn, C., Hope, C., Hunt, A. and Tol, R. S. J., 2006. *The Social Costs of Carbon (SCC) Review—Methodological Approaches for Using SCC Estimates in Policy Assessment*. Final report to DEFRA. <http://www.defra.gov.uk/environment/climatechange/carboncost/aeat-scc.htm> [Accessed 19 January 2016].
- Watson D. 2002. *Paractical Ship Design*. Elsevier. Oxford.
- WEST-MOS Project 2005-2008: *Western Europe Sea Transport & Motorways of the Sea Project. (2^oWork-Package Report)*. Co-financed by the European Union from the Trans-European Networks (TEN). [Accessed 3 March 2011].
- Winkel R., U. Weddige U., Johnsen D., Hoen V., and Papaefthimiou S., 2016. Shore Side Electricity in Europe: Potential and environmental benefits. *Energy Policy*, 88, 584–593.
- Zis T., North R.J., Angeloudisa P., Ochieng W. and Bell M.G.H. 2014. Evaluation of cold ironing and speed reduction policies to reduce ship emissions near and at ports. *Maritime Economics & Logistics*, 16, 371–398.
- Zis T.P.V., 2019. Prospects of cold ironing as an emissions reduction option. *Transportation Research Part A*, 119, 82–95.
- Zis T.P.V., Harilaos N. Psaraftis, Fabian Tillig, Jonas W. Ringsberg., 2020. Decarbonizing maritime transport: A Ro-Pax case study. *Research in Transportation Business and Management*. 37, 12 p., 100565.
- Zitzler, E., Deb, K. and Thiele, L. 2000. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. *Evolutionary Computation*, 8(2), 173-195.

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

ANEXO 1. CAPÍTULO 3

Sección 1. Anexo 1. Nomenclatura del Modelo

Variables principales:

Subíndices:

$BB=\{1,..,b\}$	Decisión sobre la instalación de bow thrusters en los buques: sin bow thrusters y con bow thrusters.
$GG=\{1,..,g\}$	Alternativas de sistemas de manejo de la carga: grúas de buque y grúas de puerto.
$PP=\{1,..,p\}$	Tipos de unidades de carga compatibles con los portacontenedores: TEUs y FEUs
$Q=\{1,..,q\}$	Grupo de posibles edades de la flota: 1, 6 y 14 años
$X=\{1,..,x\}$	Grupo de posibles tipos de buques analizados: feeder y Ro-Pax.

Variables:

VB	Velocidad del buque (Kn)
G_p	Unidades de carga que definen la capacidad del buque; $\forall p \in PP$
E_q	Edad del buque desde su adquisición; $\forall q \in Q$
MG_g	Sistemas de manejo de la carga en puerto; $\forall g \in GG$
MM_b	Medios de maniobra para los buques $\forall b \in BB$
N_{trips}	Número de viajes de la flota por año.

Variables auxiliares:

Superíndices:

$MTA=\{^a, ^b\}$	Alternativas modales de transporte: acarreo terrestre y cadenas intermodales, respectivamente.
$ST=\{^c\}$	Las rutas MoS evaluadas: MoS Norte y MoS Sur.
$DIS=\{^d\}$	Obligación de conducir con dos conductores en el camión (No y Sí)

Subíndices:

$A=\{1,..,a\}$	Diferentes tramos que integran las cadenas intermodales: los tramos capilares (tramos por carretera en ambas costas) y el tramo trunca (tramo marítimo).
----------------	--

$C=\{1,..,c\}$	Grupo de partidas de costes considerados para alcanzar el flete mínimo requerido en el transporte marítimo: costes de amortización, costes financieros, costes de seguro, costes de mantenimiento, costes de tripulación, costes de combustible, costes de escala en Puerto (tasas del buque, de la carga, tarifas por práctico, tarifas por remolque y tarifas por amarre y costes por carga/descarga).
$DD=\{1,..,d\}$	Los destinos finales en tierra (nodos) para la red de transporte: En el norte, Iquique, Antofagasta y La Serena; en el sur, Rancagua, Concepción y Temuco (Etapa 1) ó Concepción y Temuco (Etapa 2)
$EE=\{1,..,e\}$	El grupo de motores propulsores en el modelo inicial: motores diésel y turbinas.
$EE^*=\{1,..,e\}$	El grupo de motores propulsores en el modelo final: 1 motor semi rápido de cuatro tiempos operando con MGO (Tier III), 2 motor semi rápido de cuatro tiempos (Tier-III) con scrubber y operando con HFO, y 3 para motores duales con LNG.
$FF=\{1,..,f\}$	Los diferentes países que estarán afectados por las emisiones contaminantes durante el transporte. En este caso solo Chile estará afectado por el transporte, por tanto, $f=1$ y $f=2$ son relativos al mismo país.
$H=\{1,..,h\}$	Grupo de posibles propulsores para los buques: hélices convencionales y waterjets
$I=\{1,..,i\}$	Número de motores principales para los buques: de uno a cuatro.
$J=\{1,..,j\}$	Sentido del transporte (Norte-Sur y Sur-Norte)
$K=\{1,..,k\}$	Posibles puertos para establecer las autopistas del mar: Norte; Arica, Iquique, Mejillones y Antofagasta; Sur, San Vicente, Coronel y Puerto Montt.
$M=\{1,..,m\}$	Los posibles puertos <i>hub</i> : Valparaíso y San Antonio
$N=\{1,..,n\}$	Número de líneas de ejes en cámara de máquinas de los buques: de una a cuatro.
$RR=\{1,..,r\}$	Grupo de funciones objetivo para el modelo matemático: diferencia en términos de costes, diferencia en términos de tiempo y diferencia en términos de costes externos entre los modos unimodal y multimodal.
$SS=\{1,..,s\}$	Diferentes condiciones durante el transporte marítimo: navegación libre, maniobras (tiempo por uso de práctico, tiempo por uso de remolcador y tiempo por amarre) y atraque (operaciones de carga y descarga)
$TT=\{1,..,t\}$	Los tramos capilares en las redes intermodales (tramos por carretera en ambas costas)
$U=\{1,..,u\}$ and CO_2 .	Grupo de contaminantes evaluados en el modelo inicial: SO_2 , NO_x , $PM_{2.5}$

$U^* = \{1, \dots, u\}$	Grupo de contaminantes evaluados en el modelo final: SO ₂ , NO _x , PM _{2.5} , CO ₂ y CH ₄ .
$U^{**} = \{1, \dots, u\}$	Grupo de contaminantes evaluados en el modelo final: SO ₂ , NO _x , PM _{2.5} , PM ₁₀ y CO ₂ .
$V = \{1, \dots, v\}$	Grupos de regiones que caracterizan los valores de los costes unitarios de las emisiones contaminantes en los países: zona metropolitana y regiones urbanas.
$WW = \{1, \dots, w\}$	Grupo de servicios portuarios que integran la operación de maniobra de los buques: servicios de práctico, servicios de remolque y servicios de amarre.
$Y = \{1, \dots, y\}$	Grupo de años del ciclo de vida de un buque, son los años contemplados en el proyecto de inversión del sistema necesario para conexión CI.
$Z = \{1, \dots, z\}$	Los orígenes en tierra (nodos) para la cadena de transporte: centro; Santiago, Valparaíso y puerto de embarque (Valparaíso o San Antonio), en etapa 1 y Santiago, Valparaíso, puerto de embarque (Valparaíso o San Antonio), La Serena y Rancagua en etapa 2

Variables:

Δ	Desplazamiento del buque (t)
∇	Volumen de carena del buque (m ³)
B	Manga del buque (m)
$CAPEX$	Coste de capital del sistema para el CI (€)
CC	El coste de construcción del buque (€)
CEM	<i>Costes anuales relativos a las emisiones contaminantes en el tramo marítimo (€)</i>
CEM_s	Costes anuales relativos a las emisiones contaminantes para cada estado de operación en el tramo marítimo (€); $\forall s \in SS$
CEM_{sx}	Costes anuales relativos a las emisiones contaminantes para cada estado de operación en el tramo marítimo por tipo de buque (€); $\forall s \in SS \wedge \forall x \in X$
CEM_{sxx}	Costes anuales relativos a las emisiones contaminantes para cada estado de operación en el tramo marítimo, por tipo de buque y puerto implicado (€); $\forall s \in SS \wedge \forall x \in X \wedge \forall k \in K$
CEM_{sf}	Costes medioambientales anuales relativos a cada etapa del tramo marítimo en cada país afectado (€); $\forall s \in SS \wedge \forall f \in FF$
CET	Costes medioambientales anuales en el transporte unimodal (€)
CET_u	Costes anuales relativos a cada tipo de emission en el transporte unimodal contaminante (€); $\forall u \in U$
CET_{pv}	Costes anuales de emisiones relativos al transporte unimodal para cada unidad de carga (€); $\forall p \in PP \wedge \forall v \in V$
CET_{upv}	Costes anuales relativos a cada unidad de carga y por contaminante (€); $\forall u \in U^* \wedge \forall p \in PP \wedge \forall v \in V$

$CETT_t$	Costes anuales totales relativos a la contaminación medioambiental en los tramos de transporte por carretera de las cadenas intermodales (€); $\forall t \in TT$
$CETT_{tu}$	Costes anuales relativos a cada tipo de emisión contaminante en los tramos de acarreo por carretera (€); $\forall t \in TT \wedge \forall u \in U$
CF_{1u}	Costes unitarios para las diferentes emisiones contaminantes en navegación libre para el tramo marítimo (€/kG); $\forall u \in U$
CF_{sufv}	Costes unitarios para diferentes emisiones contaminantes en las etapas del transporte marítimo considerando los países afectados y las de las zonas afectadas (€/kG); $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U \wedge \forall f \in FF \wedge \forall v \in V$
CFf_x	Flujo de caja neto para una línea de SSS para cada tipo de buque (€) $\forall x \in X$
CIT	los costes ocasionados por el tiempo de retraso por conexión / desconexión del CI (€)
CK^d_p	Costes unitarios por kilómetro para el transporte unimodal, el valor es dependiente del número de conductores necesarios (€/km) $\forall p \in PP \wedge \forall d \in DIS$
CMO	Coste de la mano de obra (€/h)
CMU	Coste de la cadena intermodal (€/(t×trip))
CMU_a	Coste de un modo de transporte integrado en una cadena intermodal (€/(t×trip)); $\forall a \in A$
CT_c	Costes de los items que integran el coste mínimo requerido para el transporte marítimo (€); $\forall c \in C$
CU	Coste final de la alternative de transporte unimodal (€/(t×trip))
D	Puntal a cubierta principal (m)
DM_{mk}	Distancia marítima de la ruta (km); $\forall m \in M \wedge \forall k \in K$
DR^a_{zd}	Distancia para la alternativa unimodal (km); $\forall z \in Z \wedge \forall d \in DD$
DR^b_{zm}	La distancia de los tramos capilares para las cadenas intermodales hacia/desde los puertos candidatos (km); $\forall z \in Z \wedge \forall m \in M$
DR^b_{kd}	La distancia de los tramos capilares para las cadenas intermodales hacia/desde los puertos <i>hub</i> (km); $\forall k \in K \wedge \forall d \in DD$
$DT1$	Consumo específico de maquinaria principal (gr / (CV*h))
DTK	Puntal necesario para estibar los tanques de gas -LNG-(m)
$ECCL_x$	Coste de la electricidad del buque, por tipo de buque, usando CI (€) $\forall x \in X$
$ECOB_x$	Coste del suministro eléctrico del buque generado a bordo por tipo de buque (€) $\forall x \in X$
EF_e	Factor de emisión de metano para los distintos tipos de motores evaluados (g/kWh) $\forall e \in EE^*$
EFG_{uk}	Coeficientes de emisión para la generación eléctrica en tierra (kg/kW.h); $\forall u \in U \wedge \forall k \in K$
EG_{su}	Coeficientes de emisión para los buques portacontenedores para cada condición de navegación (kg/nm and in kg/h); $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U$

EG_{sux}	Coeficientes de emisión para cada condición de navegación y para cada tipo de buque (kg/nm and in kg/h); $\forall s \in SS \wedge \forall u \in U^{**}$
EGU_{uf}	Coeficientes de emisión para los camiones para cada contaminante (gr de contaminante/kg de fuel consumido); $\forall u \in U \wedge \forall f \in FF$
EGU_{up}	Coeficientes de emisión para los camiones para cada contaminante (gr de contaminante/kg de fuel consumido); $\forall u \in U^* \wedge \forall v \in V$
F_r	Función objetivo para el modelo de optimización; $\forall r \in RR$
FB	Francobordo del buque (m)
FC_p	Consumo de combustible de los camiones teniendo en cuenta la unidad de carga transportada. (gr fuel/km); $\forall p \in PP$
GT	Gross Tonnage of vessels (t)
HDF	Altura de doble fondo (m)
L	Eslora de los buques, por defecto entre perpendiculares (m)
LF_s	Factor de carga del motor principal para los distintos estadios de operación (%); $\forall s \in SS$
LTK	Eslora necesaria para estibar los tanques de gas-LNG-(m)
MUE	Costes medioambientales (€/ (t×trip)) asociados al transporte multimodal
NB	Número de buques
NC	Número de contenedores TEU como medida de la capacidad de carga de los buques
NG_k $\forall k \in K$	Número máximo de grúas operativas por buque en el puerto periférico
NG_m $\forall m \in M$	Número máximo de grúas operativas por buque en el puerto <i>hub</i>
NME_i	Número de motores propulsores para el buque; $\forall i \in I$
NMG_k	Número máximo de grúas disponibles para el puerto periférico; $\forall k \in K$
NMG_m	Número máximo de grúas disponibles para el puerto <i>hub</i> ; $\forall m \in M$
NMP	Número de máquinas propulsoras
NSL_n	Número de líneas de ejes en un buque; $\forall n \in N$
NT	Número de tanques de gas (LNG)
P_p	Peso de las unidades de carga (t); $\forall p \in PP$
PA_x (kW); $\forall x \in X$	Potencia eléctrica necesaria para condición de atraque por tipo de buque
PB	Potencia propulsora de los buques (HP)
PMP	coste de la planta de propulsora (€)
PV_k	Población en el hinterland de los puertos candidatos (millones de habitantes); $\forall k \in K$
PV_m	Población en el hinterland del puerto <i>hub</i> (millones de habitantes); $\forall m \in M$
PVD_d	Población de los posibles destinos finales (nodos) de las rutas de transporte routes (millones de habitantes); $\forall d \in DD$
PVO_z	Población de los posibles nodos origen de las rutas de transporte (millones de habitantes); $\forall z \in Z$
RE	Costes medioambientales (€/ (t×trip)) asociados al transporte por carretera

RE_a	Costes medioambientales (€/t×trip) asociados a los diferentes tramos de las cadenas intermodales $\forall a \in A$
RF	El factor de reducción de costes de mantenimiento por uso de LNG (€/kW)
RM	Radio metropolitano tomado como referencia para las distancias capilares en las cadenas intermodales (km)
ST	Tiempo de conexión para uso de cold ironing (h)
T	Calado del buque (m)
$TA1_k$	Tasa por servicio de amarre para buques por debajo de 3000 GT en puerto periférico; $\forall k \in K$
$TA2_k$	Tasa por servicio de amarre de buques por encima de 3000 GT en puerto periférico; $\forall k \in K$
$TA1_m$	Tasa por servicio de amarre para buques por debajo de 3000 GT en puerto periférico; $\forall m \in M$
$TA2_m$	Tasa por servicio de amarre de buques por encima de 3000 GT en puerto periférico; $\forall m \in M$
TC_{pk}	Tasa por transferencia de la carga; $\forall p \in P \wedge \forall k \in K$
TC_{pm}	Tasa por transferencia de la carga; $\forall p \in P \wedge \forall m \in M$
TB_k	Tasa por servicio de muellaje al buque en puerto periférico; $\forall k \in K$
TB_m	Tasa por servicio de muellaje al buque en puerto <i>hub</i> ; $\forall m \in M$
TM_{pk}	Tasa por servicio de muellaje a la carga en puerto periférico; $\forall p \in P \wedge \forall k \in K$
TM_{pm}	Tasa por servicio de muellaje a la carga en puerto <i>hub</i> ; $\forall p \in P \wedge \forall m \in M$
$TPC1$	Tasa por servicio de práctico para buques por debajo de 10000GT
$TPC2$	Tasa por servicio de práctico para buques por encima de 10000GT
$TR1$	Tasa por servicio de remolque para buques por debajo de 13000GT
$TR2$	Tasa por servicio de remolque para buques por encima de 13000GT
TME_e	Tipo de maquinaria principal para los buques; $\forall e \in E$
TP_h	Tipo de propulsor para los buques; $\forall h \in H$
TS_w	Tiempo dedicado a cada operación durante el estado de maniobra (h); $\forall w \in WW$
TVB_s	El tiempo invertido en los distintos estados de operación durante el transporte marítimo (h); $\forall s \in SS$
TVB_{3x}	El tiempo invertido en el atraque para los distintos tipos de buques (h); $\forall x \in X$
TVM	Tiempo invertido en el transporte intermodal (h)
TVM_a	Tiempo invertido en un modo de transporte Integrado en una cadena intermodal (h); $\forall a \in A$
TVU	Tiempo invertido en la alternativa unimodal (acarreo terrestre) (h)
VB	Velocidad del buque (Kn)
V_k	Velocidad media de las grúas en el puerto periférico $\forall k \in K$
V_m	Velocidad media de las grúas en el puerto <i>hub</i> $\forall m \in M$
VT	Velocidad del camión (km/h)
X_d	La probabilidad relative de entrega de una unidad de carga en un determinado nodo respecto al resto de posibles nodos del norte o del sur (%); $\forall d \in DD$

X_f	Porcentaje de la distancia por carretera en el transporte unimodal que pertenecen a cada país (%); $\forall f \in FF$
X_{fd}	Porcentaje de distancia por carretera desde los puertos candidatos en las cadenas intermodales que pertenecen a cada país (%); $\forall f \in FF \wedge \forall d \in DD$
X_{fz}	Porcentaje de distancia por carretera desde los puertos <i>hub</i> en las cadenas intermodales que pertenecen a cada país (%); $\forall f \in FF \wedge \forall z \in Z$
X_{jz}^c	La probabilidad relativa de entrega de una unidad de carga en un determinado nodo respecto al resto de posibles nodos del centro para cada tipo de ruta (MoS norte o MoS sur) y sentido (norte-sur o sur-norte) (%); $\forall z \in Z \wedge \forall c \in EST \wedge \forall j \in J$

Datos: valores asumidos como inputs en el caso de aplicación:

CK_p^d	Costes unitarios por kilómetro para el transporte por carretera, (TEUs y FEUs: $CK^1_1=0,27\text{€/km}$, $CK^1_2=0,44\text{€/km}$) y con dos conductores (TEUs and FEUs: $CK^2_1=0,32\text{€/km}$, $CK^2_2=0,53\text{€/km}$)
DM_{mk}	La distancia marítima de las rutas entre cada posible puerto <i>hub</i> (Valparaíso y San Antonio) y cada posible puerto candidato para el MoS norte (Arica, Iquique, Mejillones y Antofagasta) y para el MoS sur (San Vicente, Coronel y Puerto Montt)
DR_{zd}^a	Las distancias desde cada posible par de extremos de rutas: nodos centrales-nodos norte; nodos centrales-nodos en el sur.
DR_{kd}^b	Las distancias capilares de las cadenas intermodales en los puertos candidatos a constituir el MoS son aquellas entre los puertos del norte (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta) y cada una de las ciudades norteñas (Iquique, Antofagasta, La Serena) y entre los puertos del sur (San Vicente, Coronel, Puerto Montt) y las ciudades sureñas (Rancagua, Concepción, Temuco)
DR_{zm}^b	Las distancias capilares de las cadenas intermodales son aquellas entre los puertos <i>hub</i> (Valparaíso y San Antonio) y cada una de las ciudades centrales (Santiago, Valparaíso, y el propio puerto <i>hub</i>)
P_p	Peso de las unidades de carga (TEUs and FEUs: $P_1=12.5$ and $P_2=20.5t$)
PV_k	Población en el hinterland del Puerto candidato en los puertos del norte (Arica, Iquique, Mejillones, Antofagasta) y en los puertos del sur (San Vicente, Coronel, Puerto Montt, para etapa 1 y sólo los dos primeros para etapa 2)
PV_m	Población en los puertos <i>hub</i> ($PV_1=0.82$ millones de habitantes Valparaíso $PV_2=0.15$ millones de habitantes en San Antonio)
PVD_d	Población de los posibles extremos de ruta en el norte y en el sur (Iquique, Antofagasta, La Serena, Rancagua, Concepción y Temuco): $PVD_1=0,215$; $PVD_2=0.285$; $PVD_3=0.296$; $PVD_4=0.236$; $PVD_5=0.848$; $PVD_6=0.268$ millones de habitantes)
PVO_z	Población de los posibles extremos de ruta en el centro Rutas MoS norte (Santiago, Valparaíso, puerto de embarque): $PVO_1=5.61$; $PVO_2=0.824$; $PVO_3=0.145$ millones habitantes, para etapa 1 y para etapa 2; Santiago, Valparaíso, Puerto de embarque, La Serena y Rancagua; $PVO_1=5.61$; $PVO_2=0.824$; $PVO_3=0.145$; $PVO_4=0.296$; $PVO_5=0.236$)

<i>RM</i>	Metropolitan radius taken as a reference for the capillary distance in multimodal chains (30 km)
<i>VT</i>	Speed of truck (90 km/h)
<i>X_d</i>	Las probabilidades relativas de recibir o enviar una unidad de carga etapa 1: Iquique, Antofagasta, La Serena, Rancagua, Concepción, Temuco (MoS norte: $X_1=26,95\%$; $X_2=35,83\%$; $X_3=37,21\%$, $X_4=X_5=X_6=0\%$; MoS sur: $X_1=X_2=X_3=0\%$; $X_4=17,47\%$; $X_5=19,84\%$; $X_6=62,69\%$); etapa 2: Iquique, Antofagasta, Concepción, Temuco (MoS norte: $X_1=43\%$; $X_2=57\%$; $X_3=X_4=0\%$; MoS sur: $X_1=X_2=0\%$; $X_4=70.95\%$; $X_5=20.04\%$)
<i>X_f</i>	Porcentaje de las distancias terrestres para el transporte unimodal que pertenecen a cada país (Como ambos países son el mismo, Chile: $X_1=50\%$; $X_2=50\%$); $\forall f \in FF$
<i>X_{fd}</i>	Porcentaje de las distancias terrestres en los tramos capilares norte y sur para el transporte multimodal que pertenecen a cada país (Como sólo toca Chile: $X_{1d}=100\%$; $X_{2d}=0\%$); $\forall d \in DD$
<i>X_{fz}</i>	Porcentaje de las distancias terrestres en los tramos capilares del centro para el transporte multimodal que pertenecen a cada país (Como sólo toca Chile: $X_{1z}=100\%$; $X_{2z}=0\%$); $\forall z \in Z$
<i>X^c_{jz}</i>	Probabilidad relativa de entregar o recibir una unidad de carga en los nodos centrales para MoS norte :Etapa I: (Santiago, Valparaíso, Puerto de embarque): $X^1_{11}=4,88$; $X^1_{12}=0,71\%$; $X^1_{13}=94,39$; $X^1_{21}=55,26\%$; $X^1_{22}=8,09$; $X^1_{23}=36,64\%$; y para MoS sur (Santiago, Valparaíso, Puerto de embarque) $X^2_{11}=55,97\%$; $X^2_{12}=8,19\%$; $X^1_{13}=35,84\%$; $X^1_{21}=4,73\%$; $X^1_{22}=0,69$; $X^1_{23}=94,60\%$; Etapa II: (Santiago, Valparaíso, Puerto de embarque, La Serena y Rancagua): $X^1_{11}=4,70$; $X^1_{12}=0,70\%$; $X^1_{13}=94,16$; $X^1_{14}=0,25$; $X^1_{15}=0,20$; $X^1_{21}=60,39\%$; $X^1_{22}=88,30$; $X^1_{24}=3,17\%$; $X^1_{25}=2,53\%$; y para MoS sur (Santiago, Valparaíso, Puerto de embarque, La Serena y Rancagua) $X^2_{11}=30,19\%$; $X^2_{12}=4,42\%$; $X^2_{13}=62,53\%$; $X^2_{14}=1,59\%$; $X^2_{15}=1,27\%$; $X^2_{21}=0,83\%$; $X^2_{22}=0,12$; $X^2_{23}=98,96\%$; $X^2_{24}=0,04\%$; $X^2_{25}=0,03\%$)

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

ANEXO 2. CAPÍTULO 4

Sección1. Anexo 2. Costes Portuarios.

		Preliminary scenarios	Current scenarios				
		For every ports	Valparaíso	San Antonio	Antofagasta	S. Vicente	Coronel
Maximum Number of cranes/vessels (NC_k and NC_m)	units	no limit	6	6	3	7	4
Average speed/crane (V_k and V_m)	(cycle/h)	27	27	27	18	18	22.5
Ship dues (CT₇)	(€/GT h) ¹¹	0.0167	1.536	1.574	1.954	2.618	2.772
Cargo dues (CT₈)	(€/TEU)	32.73	7.95	8.3	63.86	33.86	34.08
	(€/FEU)	49.104	13.04	13.61	104.72	55.53	55.9
Pilot dues (CT₉)	(€) ¹²	231.28	112.68	112.68	112.68	112.68	112.68
	(€)	460.6	337.71	337.71	0	0	0
Towing dues (CT₁₀)	(€/tug)	420.12	995.35	995.35	995.35	995.35	995.35
	(€/tug)	1093.42	2190.69	2190.69	2190.69	2190.69	2190.69
Mooring dues (CT₁₁)	(€/mooring) ¹³	96.35	0	0	0	0	390.87
	(€/mooring)	316.15	0	0	0	0	390.87
Loading/unloading dues (CT₁₂)	(€/TEU) ¹⁴	24.81	83.35	73.05	82.54	63.63	72.72
	(€/FEU)	49.61	124.98	109.56	128.9	98.16	90.90

11 Ship duty for a vessel of 100 meters of length and 4520 GT=75.5€/h

12 Pilotage cost for 10000 GT 460.6€

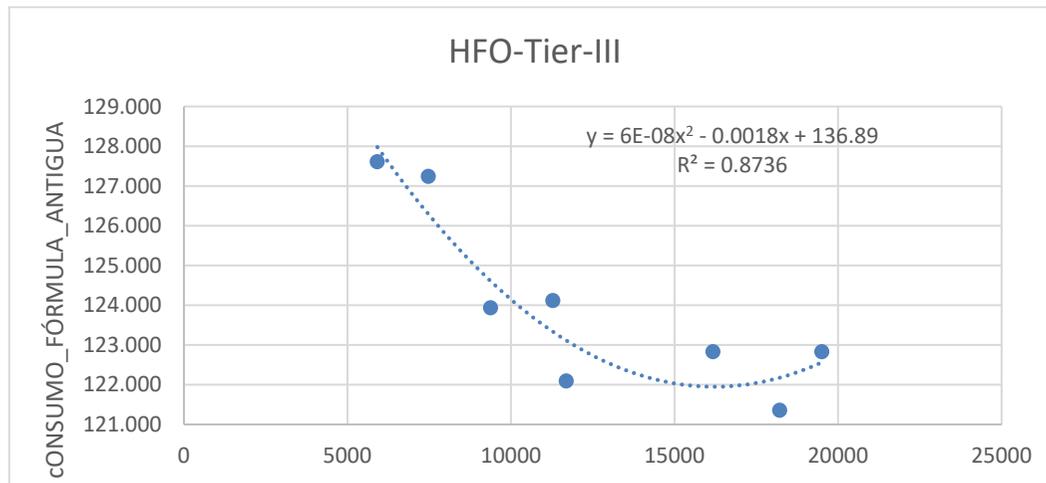
13 Mooring cost for 10000 GT 218.17€

14 Loading/unloading dues by assuming TEUs of 12.5 t and FEUs of 20.5 t

ANEXO 3. CAPÍTULO 5

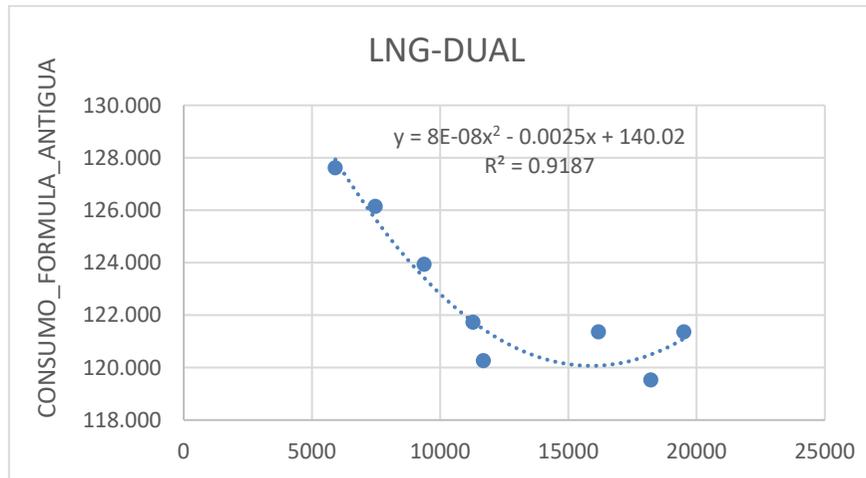
Sección 1. Anexo 3. Adaptación de consumos de motores para formulación:

Modelo de Motor	CV	Kw	Consumos fabricantes (g/cv)	Consumos Fórmula antigua (g/cv)	Consumos Fórmula nueva (g/cv)	Tipo Combustible	% Error_antigua	%ERROR_nueva
MAN 5S65ME C8	19510	14350	122.829	141.388	124.611	HFO	15	1.45
MAN 5S60ME C9	18219	13400	121.358	143.549	124.012	HFO	18	2.19
MAN 5S60ME C8	16179	11900	122.829	147.247	123.473	HFO	20	0.53
MAN 5G50ME C9	11693	8600	122.093	156.614	124.046	HFO	28	1.60
MAN 5S50ME C8	11285	8300	124.116	157.550	124.218	HFO	27	0.08
MAN 5S46ME B8	9381	6900	123.932	162.101	125.284	HFO	31	1.09
MAN 5G40ME C9	7478	5500	127.242	166.956	126.785	HFO	31	-0.36
MAN 5S35ME B9	5914	4350	127.609	171.173	128.343	HFO	34	0.58



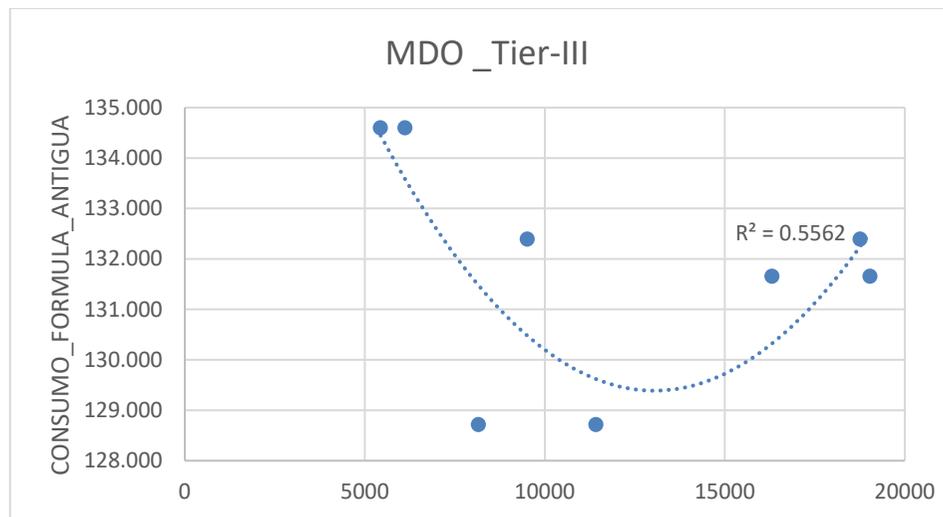
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Modelo de Motor	CV	Kw	Consumos fabricantes (g/cv)	Consumos Fórmula antigua (g/cv)	Consumos Fórmula nueva (g/cv)	Tipo Combustible	% Error	%ERROR_nueva
MAN 5S65ME C8	19510	14350	121.358	116.674	121.696	LNG	-4	0.00
MAN 5S60ME C9	18219	13400	119.519	118.457	121.027	LNG	-1	0.01
MAN 5S60ME C8	16179	11900	121.358	121.508	120.513	LNG	0	-0.01
MAN 5G50ME C9	11693	8600	120.25425	129.238	121.726	LNG	7	0.01
MAN 5S50ME C8	11285	8300	121.725	130.010	121.996	LNG	7	0.00
MAN 5S46ME B8	9381	6900	123.932	133.766	123.608	LNG	8	0.00
MAN 5G40ME C9	7478	5500	126.138	137.773	125.799	LNG	9	0.00
MAN 5S35ME B9	5914	4350	127.609	141.253	128.033	LNG	11	0.00

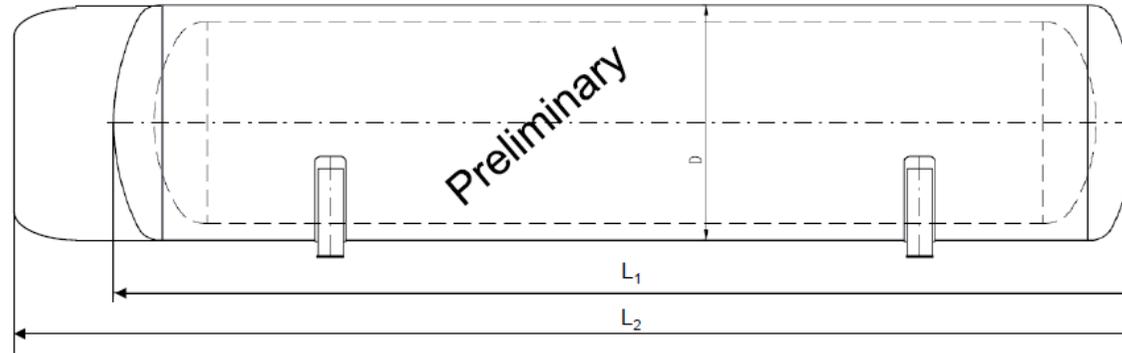


Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Modelo de Motor	CV	Kw	Consumos fabricantes (g/cv)	Consumos Fórmula antigua (g/cv)	Consumos Fórmula nueva (g/cv)	Tipo Combustible	% Error	%ERROR_nueva
MAN 14V51/60DF	19034	14000	131.655	135.176	128.527	MDO	3	6.34
MAN 12V48/60B	18762	13800	132.390	135.608	128.377	MDO	2	5.21
MAN 12V51/60DF	16315	12000	131.655	139.760	127.583	MDO	6	5.15
MAN 6L48/60CR	11421	8400	128.713	149.503	129.040	MDO	16	7.72
MAN 7L51/60DF	9517	7000	132.390	153.810	130.702	MDO	16	5.32
MAN 10L32/44CR	8158	6000	128.713	157.063	132.265	MDO	22	8.73
MAN 9L32/40	6118	4500	134.597	162.221	135.197	MDO	21	6.38
MAN 8L32/40	5438	4000	134.597	164.014	136.330	MDO	22	7.88



Sección 2. Anexo 3. Tanques de gas cilíndricos y modelización de su estiba.



Type		LNGPac 105	LNGPac 145	LNGPac 184	LNGPac 239	LNGPac 284	LNGPac 280	LNGPac 308	LNGPac 339	LNGPac 402	LNGPac 440	LNGPac 465	LNGPac 520	LNGPac 527
Geometric volume	[m ³]	105	145	194	239	284	280	308	339	402	440	465	520	527
Net volume (90%)	[m ³]	100	130	175	215	256	252	277	305	362	396	418,5	468	474,3
Diameter	[m]	3,5	4,0	4,3	4,3	4,3	4,8	4,8	5,0	5,0	5,6	5,0	5,6	5,0
Tank length	[m]	16,7	16,9	19,1	23,1	27,1	21,3	23,4	23,5	27,5	23,8	31,5	27,8	35,5
Cold box	[m]	2,5	2,5	2,7	2,7	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5
Total length	[m]	19,2	19,4	21,8	25,8	30,1	24,3	26,4	26,5	30,5	26,8	35,0	31,3	39,0
LNGPac empty weight*	[ton]	47	62	77	90	104	105	113	119	135	142	152	162	168
LNGPac max operating weight*	[ton]	94	127	164	198	231	233	252	271	316	340	362	397	406
Theoretical Max. Autonomy	[MWh]	244	318	427	525	625	616	677	745	884	967	1022	1143	1159

(Fuente: <http://www.wartsila.com/products/marine-oil-gas/gas-solutions/fuel-gas-handling/wartsila-lingpac> (Accessed, January, 2016))

MODELIZACIÓN MATEMÁTICA DEL EMPACHO NECESARIO PARA ESTIBA DE TANQUES DE LNG

$$\text{Distancia} = \max(\text{HDF}, B/15)$$

$$\text{Volumen_liquido} \leq 100 \text{ y } 76/100 * B \geq 3,5 + 2 * B/5 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=1 \\ \text{LTK}=19,1 \\ \text{DT}=3,5 + \text{distancia} + 0,8 \end{array} \right.$$

$$100 > \text{volumen_liquido} \geq 130 \text{ y } 76/100 * B \geq 4 + 2 * B/5 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=1 \\ \text{LTK}=19,4 \\ \text{DT}=4 + \text{distancia} + 0,8 \end{array} \right.$$

$$135 > \text{volumen_liquido} \geq 175 \text{ y } 76/100 * B \geq 4,3 + 2 * B/5 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=1 \\ \text{LTK}=21,8 \\ \text{DT}=4,3 + \text{distancia} + 0,8 \end{array} \right.$$

$$175 > \text{volumen_liquido} \geq 200 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 3,5 + 2 * B/5 + 0,8 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=2 \\ \text{LTK}=19,2 \end{array} \right.$$

$\text{DT}=3,5 + \text{distancia} + 0,8$

$$175 > \text{volumen_liquido} \geq 200 \text{ y } 76/100 * B < 2 * 3,5 + 2 * B/5 + 0,8 \text{ y } 76/100 * B \geq 4,3 + 2 * B/5 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=1 \\ \text{LTK}=25,8 \\ \text{DT}=4,3 + \text{distancia} + 0,8 \end{array} \right.$$

$$200 > \text{volumen_liquido} \geq 256 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 4 + 2 * B/5 + 0,8 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=2 \\ \text{LTK}=19,4 \end{array} \right.$$

$\text{DT}=4 + \text{distancia} + 0,8$

$$200 > \text{volumen_liquido} \geq 256 \text{ y } 76/100 * B < 2 * 4 + 2 * B/5 + 0,8 \text{ y } 76/100 * B \geq 4,3 + 2 * B/5 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=1 \\ \text{LTK}=30,1 \\ \text{DT}=4,3 + \text{distancia} + 0,8 \end{array} \right.$$

$$256 > \text{volumen_liquido} \geq 350 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 4,3 + 2 * B/5 + 0,8 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=2 \\ \text{LTK}=21,8 \\ \text{DT}=4,3 + \text{distancia} + 0,8 \end{array} \right.$$

$$256 > \text{volumen_liquido} \geq 350 \text{ y } 76/100 * B < 2 * 4,3 + 2 * B/5 + 0,8 \text{ y } 76/100 * B \geq 5 + 2 * B/5 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{NT}=1 \\ \text{LTK}=30,5 \end{array} \right.$$

$$DTK=5+distancia+0.8$$

$$350 > volumen_liquido \geq 418 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 4,3 + 2 * B/5 + 0,8 \left\{ \begin{array}{l} NT=2 \\ LTK=25,8 \\ DTK=4,3+distancia+0.8 \end{array} \right.$$

$$NT_{nt}=NT_1$$

$$350 > volumen_liquido \geq 418 \text{ y } 76/100 * B < 2 * 4,3 + 2 * B/5 + 0,8 \text{ y } 76/100 * B \geq 5 + 2 * B/5$$

$$\left\{ \begin{array}{l} NT=1 \\ LTK=35 \\ DTK=5+distancia+0.8 \end{array} \right.$$

$$418 > volumen_liquido \geq 474 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 4,3 + 2 * B/5 + 0,8 \left\{ \begin{array}{l} NT=2 \\ LTK=30,1 \end{array} \right.$$

$$DTK=4,3+distancia+0.8$$

$$NT_{nt}=NT_1$$

$$418 > volumen_liquido \geq 474 \text{ y } 76/100 * B < 2 * 4,3 + 2 * B/5 + 0,8 \text{ y } 76/100 * B \geq 5 + 2 * B/5$$

$$\left\{ \begin{array}{l} NT=1 \\ LTK=39 \\ DTK=5+distancia+0.8 \end{array} \right.$$

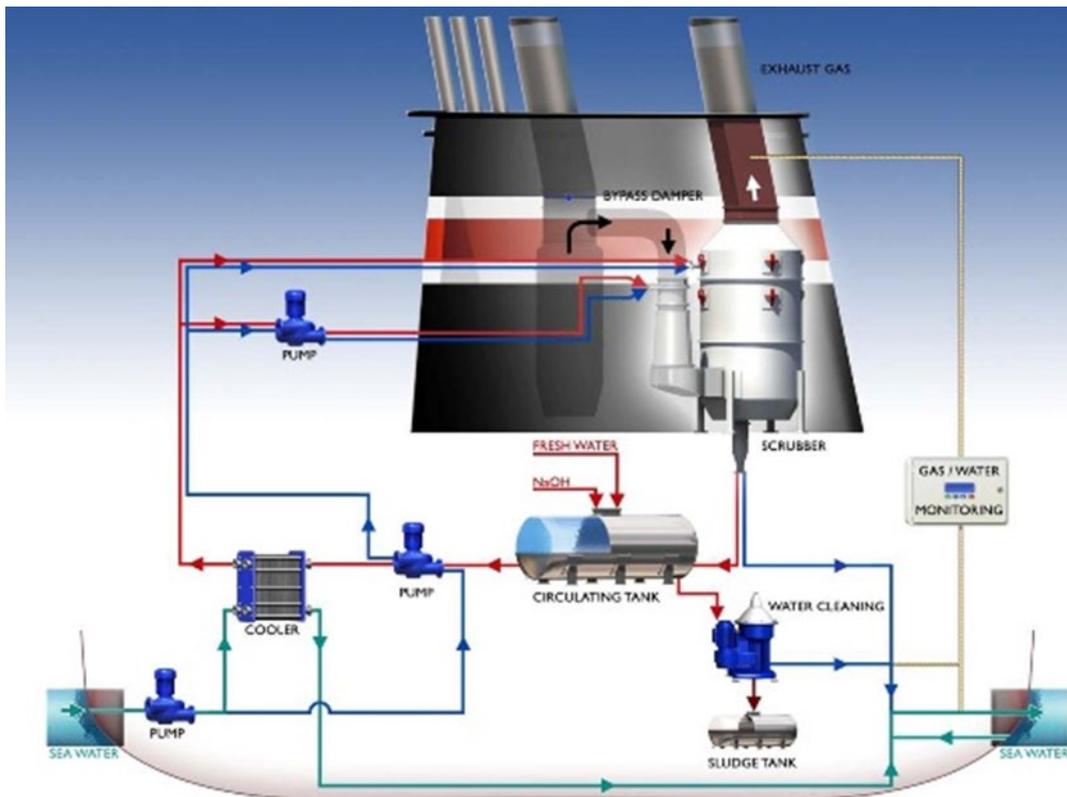
$$474 > volumen_liquido \geq 600 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 5 + 2 * B/5 + 0,8 \left\{ \begin{array}{l} NT=2 \\ LTK=26,5 \\ DTK=5+ distancia+0.8 \end{array} \right.$$

$$600 > volumen_liquido \geq 840 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 5 + 2 * B/5 + 0,8 \left\{ \begin{array}{l} NT=2 \\ LTK=35 \\ DTK=5+ distancia+0.8 \end{array} \right.$$

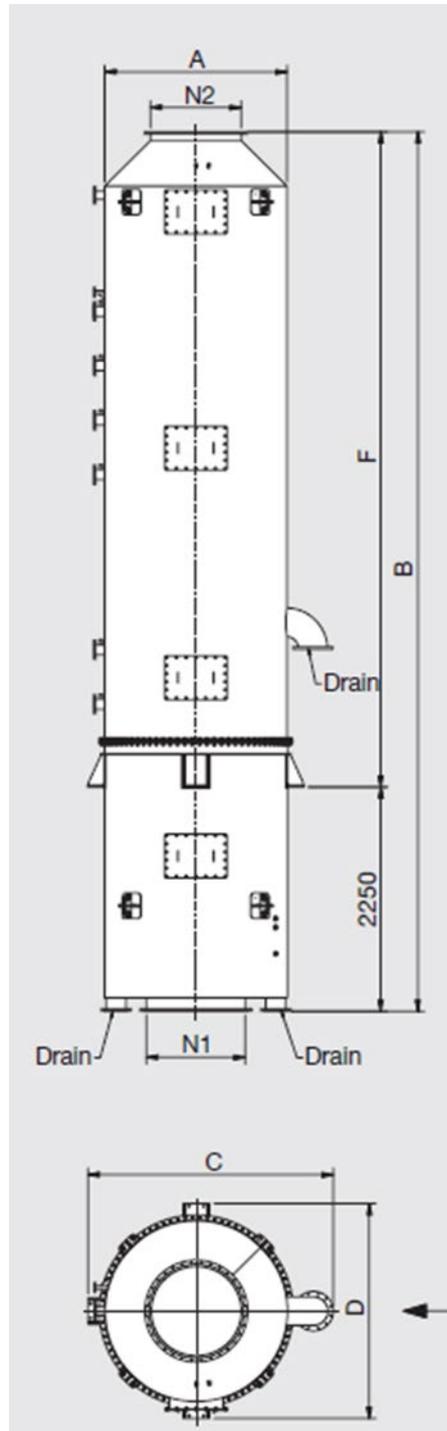
$$840 > volumen_liquido \geq 950 \text{ y } 76/100 * B \geq 2 * 5 + 2 * B/5 + 0,8 \left\{ \begin{array}{l} NT=2 \\ LTK=39 \\ DTK=5+distancia+0.8 \end{array} \right.$$

Sección 3. Anexo 3. Scrubbers.

Las siguiente instalación, dimensiones y capacidades de los scrubbers han sido asumidas y modelizadas para la optimización de los buques (Wartsilä, 2015).



Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal



Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

ANEXO 4. CAPÍTULO 6

Sección 1. Anexo 4. Dimensiones Auxiliares del Buque.

Velocidad del buque (VB)	19,49 Kn
Eslora pp (L)	77,6 m
Manga (B)	14,38 m
Puntal (D)	7,39 m
Calado (T)	5,66 m
Potencia Propulsora (PB)	7125,99 CV
Arqueo Bruto (GT)	2417,378 GT
Nº de TEUS (NC)	184 TEUS
Coeficiente de Bloque (CB)	0.565
Coeficiente de la Maestra (CM)	0.966
Coeficiente Prismático (CP)	0.584
Nº Contenedores sobre cubierta (NCSCp)	160 TEUS
Nº Contenedores Bajo cubierta (NCHOp)	37 TEUS
Eslora del tanque (ltk)	19,1 m
Díametro del tanque (dtt)	5,26 m
Eslora de Cámara de Máquinas (Lcc)	20,1 m
Eslora desde la perpendicular de Proa al Mamparo de colisión de Proa (Lmpp)	3,88 m
Manga del Doble Casco (BDCC)	1,44 m
Altura de doble fondo (HDF)	0,9 m
Nº de tanques GNL (NT)	1
Distancia mínima entre fondo y tanque GNL	0,96 m
VGas	33200000litros
VLíquido	53977,96 litros
Tanques	80,2 m ³
Nº de teus que puede llevar el buque encima de los tanques y debajo de cubierta (NCD2)	1
Eslora de Castillo (ET1)	4,88 m
Eslora de Toldilla (ET2)	5,58 m
Nº TEUS en Puntal en bodega (NCD)	2
Nº TEUS en Manga (NCB)	4
Nº TEUS en Eslora (NCL)	5
Tipo de Máquina Propulsora (TMM)	Dual Engine LNG
Nº de Motores Principales (MMP)	1
Nº de líneas de ejes (NLE)	1
Tipo de Propulsor (TP)	Hélice
Longitud TEU (DC _{1,1})	6,06 m
Anchura Contenedor (DC _{2,1})	2,44 m
Altura Contenedor (DC _{3,1})	4,5 m
Altura media de la brazola de escotilla (HES)	0,7 m
Brusca en la cubierta (BRU)	0,2 m
Nº de Froude (F _n)	0.36

Sección 2. Anexo 4. Room definition Carena Buque Óptimo. “Maxsurf stability”

NAME	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid Type	Boundary Surface	Aft (m)	Fore (m)	F.Port (m)	F.Stbd (m)	F.Top (m)	F.Bott. (m)	A.Port (m)	A.Stbd. (m)	A.Top (m)	A.Bott. (m)	Formed	Calibrate
GNL	Tank	100	100	1	Custom 1		24.466	41.165	-1.75	1.75	4.492	0.992	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
CCMM	Compartment	100	100			none	3.1	23.2	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Pique Pp	Compartment	100	100			none	-3.228	3.1	-8	8	7.4	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Pique Pr	Compartment	100	100			none	73.72	81.5	-5	5	9.8	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Tanque GNL	Compartment	100	100			none	23.2	42.4	-8	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores GNL	Compartment	100	100			none	23.2	42.4	-8	8	8.1	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores 1	Compartment	100	100			none	42.4	55.52	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores 2	Compartment	100	100			none	55.52	67.64	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Espacio HPr	Compartment	100	100			none	67.64	73.72	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoCCMM	Compartment	100	100			none	3.1	23.2	-8	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLE1	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	23.2	32.76	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLE1	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	26.2	32.76	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLE1	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	3.5	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB1	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	23.2	32.76	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLB1	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	26.2	32.76	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB1	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	-8	-3.5	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLE2	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	32.76	42.4	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLE2	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	32.76	42.4	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB2	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	32.76	42.4	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLB2	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	32.76	42.4	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1E3	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	42.4	55.52	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoBC1E3	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	42.4	48.96	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1E3	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	48.96	55.52	3.75	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1E3	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	48.96	55.52	4.95	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1B3	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	42.4	55.52	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoBC1B3	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	42.4	48.96	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1B3	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	48.96	55.52	-8	-3.75	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1B3	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	48.96	55.52	-8	-4.95	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E4	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	55.52	67.64	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoBC2E4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	55.52	61.58	1.28	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	61.58	67.64	1.28	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	55.52	61.58	2.49	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	61.58	67.64	1.28	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B4	Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	55.52	67.64	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoBC2B4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	55.52	61.58	-8	-1.28	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	61.58	67.64	-8	-1.28	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	55.52	61.58	-8	-2.49	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B4	Linked Tank	98	100	1.025	Sea Water	none	61.58	67.64	-8	-1.28	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2EB5	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	67.64	73.72	-8	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Agua Po. E	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	0.6	3.1	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Agua Po. B	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	0.6	3.1	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Agua Tec. E	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	3.1	4.8	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Agua Tec. B	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	3.1	4.8	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
MDO E	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.7	23.2	0	2.5	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
MDO B	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.7	23.2	-2.5	0	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
MDO Diario	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.7	23.2	-1.25	1.25	4.5	2.5	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Aceite E	Tank	100	100	0.92	Lube Oil	none	22.2	23.2	2.5	3.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Aceite B	Tank	100	100	0.92	Lube Oil	none	22.2	23.2	-3.5	-2.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Lodos	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	22.2	23.2	-0.5	0.5	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

NAME	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid Type	Boundary Surface	Aft (m)	Fore (m)	F.Port (m)	F.Stbd (m)	F.Top (m)	F.Bott. (m)	A.Port (m)	A.Stbd. (m)	A.Top (m)	A.Bott. (m)	Formed	Calibrate
Bodega Tanque GNL (GNL)	Linked Neg. Compart.	100	100				24.466	41.165	-1.75	1.75	4.492	0.992	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Tanque GNL (DFondoGNLE1[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	26.2	32.76	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Tanque GNL (DFondoGNLE1[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	23.2	26.2	3.5	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Tanque GNL (DFondoGNLB1[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	26.2	32.76	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Tanque GNL (DFondoGNLB1[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	23.2	26.2	-8	-3.5	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Tanque GNL (DFondoGNLE2[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	32.76	42.4	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Tanque GNL (DFondoGNLB2[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	32.76	42.4	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DFondoGNLE1[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	26.2	32.76	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DFondoGNLE1[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	23.2	26.2	3.5	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DFondoGNLB1[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	26.2	32.76	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DFondoGNLB1[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	23.2	26.2	-8	-3.5	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DFondoGNLE2[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	32.76	42.4	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DFondoGNLB2[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	32.76	42.4	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DFondoBC1E3[link#3])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	42.4	48.96	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DFondoBC1E3[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	48.96	55.52	3.75	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DFondoBC1E3[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	48.96	55.52	4.95	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DFondoBC1B3[link#3])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	42.4	48.96	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DFondoBC1B3[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	48.96	55.52	-8	-3.75	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DFondoBC1B3[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	48.96	55.52	-8	-4.95	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2E4[link#4])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	55.52	61.58	1.28	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2E4[link#3])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	61.58	67.64	1.28	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2E4[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	55.52	61.58	2.49	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2E4[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	61.58	67.64	1.28	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2B4[link#4])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	55.52	61.58	-8	-1.28	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2B4[link#3])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	61.58	67.64	-8	-1.28	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2B4[link#2])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	55.52	61.58	-8	-2.49	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 2 (DFondoBC2B4[link#1])	Linked Neg. Compart.	100	100			none	61.58	67.64	-8	-1.28	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (MDO E)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	21.7	23.2	0	2.5	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (MDO B)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	21.7	23.2	-2.5	0	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Aceite E)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	22.2	23.2	2.5	3.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Aceite B)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	22.2	23.2	-3.5	-2.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoCCMM (Lodos)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	22.2	23.2	-0.5	0.5	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Pique Pp (Agua Po. E)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	0.6	3.1	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Pique Pp (Agua Po. B)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	0.6	3.1	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Agua Tec. E)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	3.1	4.8	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Agua Tec. B)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	3.1	4.8	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (MDO Diario)	Linked Neg. Compart.	100	100			none	21.7	23.2	-1.25	1.25	4.5	2.5	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)

Sección 3. Anexo 4. Desglose del Peso en Rosca Método Matemático de Optimización.

PS1=	26,636.207 t
------	--------------

Peso Equipamiento =	110.473 t
Peso Timón =	3.395 t
Peso Escotilla =	120.858 t

Peso Cámara de Máquinas =	107.955 t
Peso Propulsores =	21.759 t
Peso Línea de Ejes =	23.507 t
Peso Máquina =	79.847 t

Peso del Acero (PS) =	892.313 t
Peso Equipo =	234.727 t
Peso Maquinaria=	233.068 t
Peso en Rosca (PR)=	1,360.108 t

Sección 5 Anexo 4 (Load case “Maxsurf stability”). Buque Óptimo

Loadcase - Salida Puerto 12.5 T Homo

Damage Case - Intact

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Carga (184 TEUs a 12.5 T)	1	2300.000	2300.000			40.950	0.000	11.380	0.000	User Specified
Peso Rosca	1	1360.180	1360.180			31.410	0.000	4.210	0.000	User Specified
Tripulacion	1	2.400	2.400			13.500	0.000	5.500	0.000	User Specified
Respetos	1	5.000	5.000			13.500	0.000	3.200	0.000	User Specified
Viveres	1	0.180	0.180			13.500	0.000	5.500	0.000	User Specified
GNL	98%	67.957	66.598	160.656	157.443	32.815	0.000	2.709	0.000	Maximum
DFondoGNLE1	0%	191.120	0.000	186.459	0.000	27.608	0.004	0.000	0.000	Maximum
DFondoGNLB1	0%	191.120	0.000	186.459	0.000	27.608	-0.004	0.000	0.000	Maximum
DFondoGNLE2	0%	177.344	0.000	173.018	0.000	35.109	0.001	0.000	0.000	Maximum
DFondoGNLB2	0%	177.344	0.000	173.018	0.000	35.109	-0.001	0.000	0.000	Maximum
DFondoBC1E3	0%	218.963	0.000	213.622	0.000	51.535	0.001	0.000	0.000	Maximum
DFondoBC1B3	0%	218.963	0.000	213.623	0.000	51.535	-0.001	0.000	0.000	Maximum
DFondoBC2E4	0%	262.737	0.000	256.329	0.000	58.983	0.001	0.000	0.000	Maximum
DFondoBC2B4	0%	262.737	0.000	256.329	0.000	58.983	-0.001	0.000	0.000	Maximum
DFondoBC2EB5	0%	4.995	0.000	4.874	0.000	68.056	0.000	0.000	0.000	Maximum
Agua Po. E	100%	3.532	3.532	3.532	3.532	1.701	5.958	7.042	0.000	Maximum
Agua Po. B	100%	3.532	3.532	3.532	3.532	1.701	-5.958	7.042	0.000	Maximum
Agua Tec. E	100%	3.396	3.396	3.396	3.396	4.059	6.014	6.864	0.000	Maximum
Agua Tec. B	100%	3.396	3.396	3.396	3.396	4.059	-6.014	6.864	0.000	Maximum
MDO E	100%	6.720	6.720	8.000	8.000	22.200	1.250	1.700	0.000	Maximum
MDO B	100%	6.720	6.720	8.000	8.000	22.200	-1.250	1.700	0.000	Maximum
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500	0.000	Maximum
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400	0.000	Maximum
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400	0.000	Maximum
Lodos	100%	0.749	0.749	0.892	0.892	22.700	0.000	0.454	0.000	Maximum
Total Loadcase			3770.544	1864.635	197.692	37.059	0.000	8.555	0.000	
FS correction								0.000		
VCG fluid								8.555		

Sección 6. Anexo 4. Room definition 1ª Alternativa de compartimentado. “Maxsurf stability”

NAME	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid Type	Boundary Surface	Aft (m)	Fore (m)	F.Port (m)	F.Stbd (m)	F.Top (m)	F.Bott. (m)	A.Port (m)	A.Stbd. (m)	A.Top (m)	A.Bott. (m)	Formed	Calibrate
GNL	Tank	100	100	0.423	GNL		24.466	41.165	-1.75	1.75	4.492	0.992	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Pique Pp	Compartment	100	100			none	-3.228	3.1	-8	8	7.4	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
CCMM	Compartment	100	100			none	3.1	23.2	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Doble Fonfo CCMM	Compartment	100	100			none	3.1	23.2	-8	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega GNL	Compartment	100	100			none	23.2	43.1	-8	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores GNL	Compartment	100	100			none	23.2	43.1	-8	8	8.1	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores 1	Compartment	100	100			none	43.1	56.22	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores 2	Compartment	100	100			none	56.22	69.34	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Pique Pr	Compartment	100	100			none	73.72	81.5	-5	5	9.8	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Local Hélice Pr	Compartment	100	100			none	69.34	73.72	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLE1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	29.76	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	3.25	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLE1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	4.15	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLE1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	29.76	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	-8	-3.25	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLB1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	-8	-4.15	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLB1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLE2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLE3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE3	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB3	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DFondoBC1B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DFondoBC1E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	3.75	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1E2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	4.95	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	-8	-3.75	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1B2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	-8	-4.95	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	1.28	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	2.5	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	-8	-1.28	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	-8	-2.5	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

NAME	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid Type	Boundary Surface	Aft (m)	Fore (m)	F.Port (m)	F.Stbd (m)	F.Top (m)	F.Bott. (m)	A.Port (m)	A.Stbd. (m)	A.Top (m)	A.Bott. (m)	Formed	Calibrate
DCascoBC2E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	0	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	1.28	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	-8	0	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	-8	-1.28	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoLHP	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	69.34	73.72	-8	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Po. E	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	0.1	3.1	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Po. B	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	0.1	3.1	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Tec. E	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	3.1	4.8	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Tec. B	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	3.1	4.8	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
MDO E	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.2	23.2	0	2.5	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
MDO B	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.2	23.2	-2.5	0	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
MDO Diario	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.7	23.2	-1.25	1.25	4.5	2.5	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Aceite E	Tank	100	100	0.92	Lube Oil	none	22.2	23.2	2.5	3.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Aceite B	Tank	100	100	0.92	Lube Oil	none	22.2	23.2	-3.5	-2.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Lodos	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	22.2	23.2	-0.5	0.5	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Bodega GNL (GNL)	Linked Neg. Com	100	100				24.466	41.165	-1.75	1.75	4.492	0.992	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLE1[link#3])	Linked Neg. Com	100	100			none	23.2	26.2	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLB1[link#3])	Linked Neg. Com	100	100			none	23.2	26.2	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE1)	Linked Neg. Com	100	100			none	23.2	26.2	3.25	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB1)	Linked Neg. Com	100	100			none	23.2	26.2	-8	-3.25	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLE1[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	26.2	29.76	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE1[link#2])	Linked Neg. Com	100	100			none	26.2	29.76	4.15	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLE2[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	29.76	36.32	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE2)	Linked Neg. Com	100	100			none	29.76	36.32	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB1[link#2])	Linked Neg. Com	100	100			none	26.2	29.76	-8	-4.15	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLB1[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	26.2	29.76	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB2)	Linked Neg. Com	100	100			none	29.76	36.32	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLB2[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	29.76	36.32	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE3)	Linked Neg. Com	100	100			none	36.32	43.1	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLE3[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	36.32	43.1	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB3)	Linked Neg. Com	100	100			none	36.32	43.1	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLB3[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	36.32	43.1	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DCascoBC1E1)	Linked Neg. Com	100	100			none	43.1	49.66	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DCascoBC1B1)	Linked Neg. Com	100	100			none	43.1	49.66	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DCascoBC1E2)	Linked Neg. Com	100	100			none	49.66	56.22	3.75	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DCascoBC1E2[link#1])	Linked Neg. Com	100	100			none	49.66	56.22	4.95	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores 1 (DCascoBC1B2)	Linked Neg. Com	100	100			none	49.66	56.22	-8	-3.75	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)

Sección 8 Anexo 4 (Load case “Maxsurf stability”). 1ª Alternativa de compartimentado

Loadcase - Salida Puerto 12.5 T Homo

Damage Case - Intact

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Pesos Fijos	1	1367.508	1367.508			31.299	0.000	5.506	0.000	
Subtotal			1367.508			31.299	0.000	5.506	0.000	
Prueba Contenedores	1	2300.000	2300.000			37.340	0.000	11.100	0.000	
Subtotal Contenedores			2300.000			37.340	0.000	11.100	0.000	
Viveres	1	0.180	0.180			5.500	0.000	13.500	0.000	User Specified
Subtotal Viveres			0.180			5.500	0.000	13.500	0.000	
GNL	98%	67.957	66.598	160.656	157.443	32.815	0.000	2.709	0.000	Maximum
Subtotal GNL	98%	67.957	66.598	160.656	157.443	32.815	0.000	2.709	0.000	
DFondoGNLE1	0%	24.251	0.000	23.659	0.000	26.524	0.004	0.000	0.000	Maximum
DCascoGNLE1	0%	122.067	0.000	119.090	0.000	26.471	4.596	0.900	0.000	Maximum
DFondoGNLB1	0%	24.251	0.000	23.659	0.000	26.524	-0.004	0.000	0.000	Maximum
DCascoGNLB1	0%	122.067	0.000	119.090	0.000	26.471	-4.596	0.900	0.000	Maximum
DFondoGNLE2	0%	30.183	0.000	29.447	0.000	32.204	0.002	0.000	0.000	Maximum
DCascoGNLE2	0%	104.609	0.000	102.057	0.000	33.130	5.388	0.900	0.000	Maximum
DFondoGNLB2	0%	30.183	0.000	29.447	0.000	32.204	-0.002	0.000	0.000	Maximum
DCascoGNLB2	0%	104.609	0.000	102.057	0.000	33.130	-5.388	0.900	0.000	Maximum
DFondoGNLE3	0%	31.644	0.000	30.873	0.000	38.294	0.001	0.000	0.000	Maximum
DCascoGNLE3	0%	106.947	0.000	104.339	0.000	39.644	5.398	0.900	0.000	Maximum
DFondoGNLB3	0%	31.644	0.000	30.873	0.000	38.294	-0.001	0.000	0.000	Maximum
DCascoGNLB3	0%	106.947	0.000	104.339	0.000	39.644	-5.398	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC1E1	0%	26.920	0.000	26.263	0.000	47.256	0.000	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC1E1	0%	84.616	0.000	82.552	0.000	46.038	5.423	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC1B1	0%	26.920	0.000	26.263	0.000	47.256	0.000	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC1B1	0%	84.616	0.000	82.552	0.000	46.038	-5.423	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC1E2	0%	20.800	0.000	20.292	0.000	53.270	0.001	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC1E2	0%	85.515	0.000	83.430	0.000	52.333	4.413	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC1B2	0%	20.800	0.000	20.292	0.000	53.270	-0.001	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC1B2	0%	85.516	0.000	83.430	0.000	52.333	-4.413	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC2E1	0%	12.732	0.000	12.422	0.000	58.740	0.001	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC2E1	0%	135.946	0.000	132.630	0.000	58.875	2.399	0.900	0.000	Maximum

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
DFondoBC2B1	0%	12.732	0.000	12.422	0.000	58.740	-0.001	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC2B1	0%	135.946	0.000	132.630	0.000	58.875	-2.399	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC2E2	0%	6.918	0.000	6.750	0.000	63.842	0.000	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC2E2	0%	127.782	0.000	124.665	0.000	65.233	0.936	0.900	0.000	Maximum
DFondoBC2B2	0%	6.918	0.000	6.750	0.000	63.842	0.000	0.000	0.000	Maximum
DCascoBC2B2	0%	127.782	0.000	124.665	0.000	65.233	-0.936	0.900	0.000	Maximum
DFondoLHPr	0%	3.001	0.000	2.928	0.000	69.484	0.000	0.000	0.000	Maximum
Subtotal Lastre	0%	1844.863	0.000	1799.866	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Agua Po. E	100%	3.532	3.532	3.532	3.532	1.701	5.958	7.042	0.000	Maximum
Agua Po. B	100%	3.532	3.532	3.532	3.532	1.701	-5.958	7.042	0.000	Maximum
Subtotal Agua Po.	100%	7.064	7.064	7.064	7.064	1.701	0.000	7.042	0.000	
Agua Tec. E	100%	3.176	3.176	3.176	3.176	4.003	6.013	6.869	0.000	Maximum
Agua Tec. B	100%	3.176	3.176	3.176	3.176	4.003	-6.013	6.869	0.000	Maximum
Subtotal Agua Tec.	100%	6.351	6.351	6.351	6.351	4.003	0.000	6.869	0.000	
MDO E	100%	6.720	6.720	8.000	8.000	22.200	1.250	1.700	0.000	Maximum
MDO B	100%	6.720	6.720	8.000	8.000	22.200	-1.250	1.700	0.000	Maximum
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500	0.000	Maximum
Subtotal MDO	100%	19.740	19.740	23.500	23.500	22.280	0.000	2.274	0.000	
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400	0.000	Maximum
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400	0.000	Maximum
Subtotal Aceite	100%	1.840	1.840	2.000	2.000	22.700	0.000	1.400	0.000	
Lodos	10%	0.749	0.075	0.892	0.089	22.701	0.000	0.052	0.070	Maximum
Subtotal Lodos	10%	0.749	0.075	0.892	0.089	22.701	0.000	0.052	0.070	
Total Loadcase			3769.356	2000.329	196.447	34.858	0.000	8.856	0.070	
FS correction								8.856	0.000	
VCG fluid								8.856		

Sección 9. Anexo 4. Room definition 2ª Alternativa de compartimentado. “Maxsurf stability”

NAME	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid Type	Boundary Surface	Aft (m)	Fore (m)	F.Port (m)	F.Stbd (m)	F.Top (m)	F.Bott. (m)	A.Port (m)	A.Stbd. (m)	A.Top (m)	A.Bott. (m)	Formed	Calibrate
GNL Babor	Tank	100	100	0.423	GNL	2511 c8b	24.501	28.5	-4.9	0	5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
GNL Estribor	Tank	100	100	0.423	GNL	d1d 2633	24.501	28.5	0	4.9	5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Pique Pp	Compartmen	100	100			none	-3.228	3.1	-8	8	7.4	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
CCMM	Compartmen	100	100			none	3.1	23.2	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Doble Fonfo CCMM	Compartmen	100	100			none	3.1	23.2	-8	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega GNL	Compartmen	100	100			none	23.2	43.1	-8	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores GNL	Compartmen	100	100			none	23.2	43.1	-8	8	8.1	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores 1	Compartmen	100	100			none	43.1	56.22	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Bodega Contenedores 2	Compartmen	100	100			none	56.22	69.34	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Pique Pr	Compartmen	100	100			none	73.72	81.5	-5	5	9.8	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
Local Hélice Pr	Compartmen	100	100			none	69.34	73.72	-8	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	No
DFondoGNLE1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	29.76	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	4.95	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLE1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	4.95	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLE1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	29.76	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	-8	-4.95	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	23.2	26.2	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLB1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	-8	-4.95	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DCascoGNLB1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	26.2	29.76	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLE2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	29.76	36.32	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLE3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLE3	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoGNLB3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB3	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoGNLB3	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	36.32	43.1	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	4.95	8	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DFondoBC1B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	43.1	49.66	-8	-4.95	7.4	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DFondoBC1E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	3.75	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1E2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	4.95	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC1B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	-8	-3.75	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC1B2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	49.66	56.22	-8	-4.95	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	1.28	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	2.5	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B1	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	-8	-1.28	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B1	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	56.22	62.28	-8	-2.5	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)

Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

NAME	Type	Intact Perm. %	Damaged Perm. %	Specific gravity	Fluid Type	Boundary Surface	Aft (m)	Fore (m)	F.Port (m)	F.Stbd (m)	F.Top (m)	F.Bott. (m)	A.Port (m)	A.Stbd. (m)	A.Top (m)	A.Bott. (m)	Formed	Calibrate
DFondoBC2E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	0	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	0	8	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2E2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	1.28	8	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoBC2B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	-8	0	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B2	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	-8	0	3.49	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
DCascoBC2B2	Linked Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	62.28	69.34	-8	-1.28	7.4	3.49	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
DFondoLHPr	Tank	100	100	1.025	Sea Water	none	69.34	73.72	-8	8	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Po. E	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	0.1	3.1	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Po. B	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	0.1	3.1	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Tec. E	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	3.1	4.8	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Agua Tec. B	Tank	100	100	1	Fresh Water	none	3.1	4.8	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
MDO E	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.2	23.2	0	2.5	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
MDO B	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.2	23.2	-2.5	0	2.5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
MDO Diario	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	21.7	23.2	-1.25	1.25	4.5	2.5	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Aceite E	Tank	100	100	0.92	Lube Oil	none	22.2	23.2	2.5	3.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Aceite B	Tank	100	100	0.92	Lube Oil	none	22.2	23.2	-3.5	-2.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Lodos	Tank	100	100	0.84	Diesel	none	22.2	23.2	-0.5	0.5	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	Yes
Bodega GNL (GNL Babor)	Linked Neg.	100	100		5e0 1bef	2511 c8b	24.501	28.5	-4.9	0	5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (GNL Estribor)	Linked Neg.	100	100		106f 778	d1d 2633	24.501	28.5	0	4.9	5	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Agua Tec. E)	Linked Neg.	100	100			none	3.1	4.8	5.2	8	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Agua Tec. B)	Linked Neg.	100	100			none	3.1	4.8	-8	-5.2	7.4	5.695	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (MDO Diario)	Linked Neg.	100	100			none	21.7	23.2	-1.25	1.25	4.5	2.5	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Aceite E)	Linked Neg.	100	100			none	22.2	23.2	2.5	3.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
CCMM (Aceite B)	Linked Neg.	100	100			none	22.2	23.2	-3.5	-2.5	1.9	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Doble Fonfo CCMM (Lodos)	Linked Neg.	100	100			none	22.2	23.2	-0.5	0.5	0.9	0	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE1)	Linked Neg.	100	100			none	23.2	26.2	4.95	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE1[link#2])	Linked Neg.	100	100			none	26.2	29.76	4.95	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB1)	Linked Neg.	100	100			none	23.2	26.2	-8	-4.95	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB1[link#2])	Linked Neg.	100	100			none	26.2	29.76	-8	-4.95	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE2)	Linked Neg.	100	100			none	29.76	36.32	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB2)	Linked Neg.	100	100			none	29.76	36.32	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLE3)	Linked Neg.	100	100			none	36.32	43.1	4.55	8	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega GNL (DCascoGNLB3)	Linked Neg.	100	100			none	36.32	43.1	-8	-4.55	5.3	0.9	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLE1[link#3])	Linked Neg.	100	100			none	23.2	26.2	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLE1[link#1])	Linked Neg.	100	100			none	26.2	29.76	4.95	8	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLB1[link#3])	Linked Neg.	100	100			none	23.2	26.2	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)
Bodega Contenedores GNL (DCascoGNLB1[link#1])	Linked Neg.	100	100			none	26.2	29.76	-8	-4.95	7.4	5.3	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Prismatic	Yes	(Linked)

Sección 11 Anexo 4 (Load case “Maxsurf stability”). 2ª Alternativa de compartimentado.**Loadcase - Salida Puerto 12.5 T Homo****Damage Case - Intact**

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
Pesos Fijos	1	1367.508	1367.508			31.299	0.000	4.223	0.000	
Subtotal			1367.508			31.299	0.000	4.223	0.000	
Viveres	1	0.180	0.180			5.500	0.000	13.500	0.000	User Specified
Subtotal Viveres			0.180			5.500	0.000	13.500	0.000	
Prueba Contenedores	1	2300.000	2300.000			37.280	0.000	10.220	0.000	
Subtotal Carga			2300.000			37.280	0.000	10.220	0.000	
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000	0.000	User Specified
GNL Babor	98%	20.989	20.569	49.619	48.626	26.500	-2.500	2.960	0.000	User Specified
GNL Estribor	98%	20.989	20.569	49.619	48.626	26.500	2.500	2.960	0.000	User Specified
Subtotal GNL			41.138			26.500	0.000	2.960	0.000	
DFondoGNLE1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	0.002	0.000	0.000	User Specified
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900	0.000	User Specified
DFondoGNLB1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	-0.002	0.000	0.000	User Specified
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900	0.000	User Specified
DFondoGNLE2	0%	29.396	0.000	28.679	0.000	32.557	0.002	0.000	0.000	User Specified
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900	0.000	User Specified
DFondoGNLB2	0%	29.396	0.000	28.679	0.000	32.557	-0.002	0.000	0.000	User Specified
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900	0.000	User Specified
DFondoGNLE3	0%	30.933	0.000	30.179	0.000	38.313	0.001	0.000	0.000	User Specified
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900	0.000	User Specified
DFondoGNLB3	0%	30.933	0.000	30.179	0.000	38.313	-0.001	0.000	0.000	User Specified
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC1E1	0%	26.149	0.000	25.511	0.000	47.012	0.000	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC1B1	0%	26.149	0.000	25.511	0.000	47.012	0.000	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC1E2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	0.001	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC1B2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	-0.001	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC2E1	0%	12.317	0.000	12.016	0.000	58.675	0.000	0.000	0.000	User Specified

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m^3	Total Volume m^3	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC2B1	0%	12.317	0.000	12.016	0.000	58.675	0.000	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC2E2	0%	6.809	0.000	6.643	0.000	63.691	0.000	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC2E2	0%	127.020	0.000	123.922	0.000	65.251	0.927	0.900	0.000	User Specified
DFondoBC2B2	0%	6.809	0.000	6.643	0.000	63.691	0.000	0.000	0.000	User Specified
DCascoBC2B2	0%	127.019	0.000	123.921	0.000	65.251	-0.927	0.900	0.000	User Specified
DFondoLHPPr	0%	3.039	0.000	2.965	0.000	69.485	0.000	0.001	0.000	User Specified
Subtotal Lastre	0%	1741.185	0.000	1698.717	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
Agua Po. E	100%	3.509	3.509	3.509	3.509	1.691	5.959	7.045	0.000	User Specified
Agua Po. B	100%	3.509	3.509	3.509	3.509	1.691	-5.959	7.045	0.000	User Specified
Subtotal Agua Po.	100%	7.018	7.018	7.018	7.018	1.691	0.000	7.045	0.000	
Agua Tec. E	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	6.011	6.872	0.000	User Specified
Agua Tec. B	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	-6.011	6.872	0.000	User Specified
Subtotal Agua Tec.	100%	6.288	6.288	6.288	6.288	4.007	0.000	6.872	0.000	
MDO E	100%	6.720	6.720	8.000	8.000	22.200	1.250	1.700	0.000	User Specified
MDO B	100%	6.720	6.720	8.000	8.000	22.200	-1.250	1.700	0.000	User Specified
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500	0.000	User Specified
Subtotal MDO	100%	19.740	19.740	23.500	23.500	22.280	0.000	2.274	0.000	
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400	0.000	User Specified
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400	0.000	User Specified
Subtotal Aceite	100%	1.840	1.840	2.000	2.000	22.700	0.000	1.400	0.000	
Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056	0.000	User Specified
Subtotal Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056	0.000	
Total Loadcase			3743.786	1837.648	136.147	34.766	0.000	7.892	0.000	
FS correction								0.000		
VCG fluid								7.892		

Sección 12 Anexo 4 (Load case, Condición de Lastre, Salida de Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Vlume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	0.000	0.000			88.816	0.000	6.600
Subtotal Carga			0.000			0.000	0.000	0.000
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	-2.500	3.000
GNL Estribor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	2.500	3.000
Subtotal GNL			41.977			26.500	0.000	3.000
DFondoGNLE1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	2.168	0.533
DCascoGNLE1	100%	84.916	84.916	82.845	82.845	26.558	5.973	4.488
DFondoGNLB1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	-2.168	0.533
DCascoGNLB1	100%	84.917	84.917	82.846	82.846	26.558	-5.973	4.488
DFondoGNLE2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	2.660	0.517
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	-2.660	0.517
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900
DFondoBC1E2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	0.001	0.000
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	-0.001	0.000
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	100%	133.431	133.431	130.177	130.177	59.030	3.738	4.301
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	100%	133.430	133.430	130.176	130.176	59.030	-3.738	4.301
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	100%	127.020	127.020	123.922	123.922	65.309	2.284	4.403
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	100%	127.019	127.019	123.921	123.921	65.309	-2.284	4.403
DFondoLHPr	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	54.66%	1741.185	951.649	1698.717	928.438	49.890	0.000	3.328
Agua Po. E	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	5.962	7.037
Agua Po. B	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	-5.962	7.037
Subtotal Agua Po.	100%	6.017	6.017	6.017	6.017	1.919	0.000	7.037
Agua Tec. E	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	6.011	6.872
Agua Tec. B	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	-6.011	6.872
Subtotal Agua Tec.	100%	6.288	6.288	6.288	6.288	4.007	0.000	6.872
MDO E	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	1.250	1.700
MDO B	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	-1.250	1.700
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500
Subtotal MDO	100%	16.380	16.380	19.500	19.500	22.450	0.000	2.392
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400

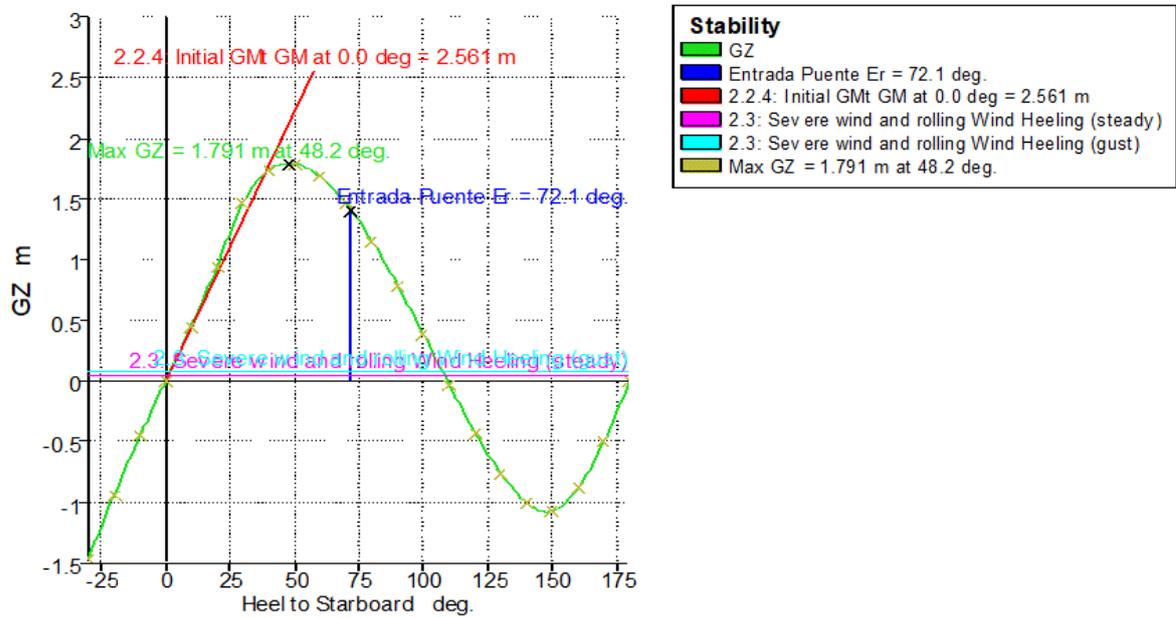
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Vlume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Subtotal Aceite	100%	1.840	1.840	2.000	2.000	22.700	0.000	1.400
Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Subtotal Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Total Loadcase			2581.026	1832.647	1061.569	37.761	0.000	3.879
FS correction								0.000
VCG fluid								3.879

Sección 13 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Lastre Salida Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
GZ m	-1.46	-0.947	-0.454	0	0.454	0.947	1.46	1.734	1.788	1.684	1.463	1.16	0.79	0.39	-0.03	-0.4	-0.8	-1	-1.07	-0.9	-0.5	0	
Area under GZ curve from zero heel m.deg	21.261	9.2309	2.2525	0	2.258	9.2097	21.342	37.537	55.294	72.77	88.59	102	112	117	119	117	111	102	91.5	81	74.45	71.89	
Displacement t	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	2581	###	2581	2581	
Draft at FPM	3.782	3.765	3.747	3.743	3.748	3.763	3.78	3.875	4.042	4.158	4.311	4.79	n/a	-2.48	-3.04	-3.2	-3.3	-3.23	-3.18	-3.2	-3.16	-3.14	
Draft at AP m	3.639	4.04	4.237	4.293	4.237	4.042	3.641	3.055	2.209	1.054	-1.02	-7.05	n/a	-17.1	-11	-9	-8	-7.38	-7.08	-7	-7.09	-7.14	
WL Length m	84.416	79.483	79.607	79.641	79.61	79.485	84.417	84.36	84.255	84.16	83.98	83.6	84.2	83.8	84.3	84.4	84.4	84.4	84.4	84.4	84	84.45	84.45
Beam max extents on WL m	13.879	14.795	14.53	14.359	14.53	14.795	13.879	12.216	11.578	10.95	10.33	9.29	9.79	9.3	9.14	9.32	9.98	11.2	12.6	15	14.6	14.39	
Wetted Area m²	1217.9	1166.6	1147.86	1141.5	1148	1166.6	1217.8	1269.3	1308.2	1330	1347	1351	1353	1367	1382	1396	1423	1461	1514	###	1641	1637	
Waterpl. Area m²	845.47	842.98	810.663	797.75	810.7	843.05	845.5	765.66	705.3	657.6	630.5	605	591	580	581	600	635	694	780	883	941	968.7	
Prismatic coeff. (Cp)	0.601	0.616	0.602	0.597	0.602	0.616	0.601	0.623	0.64	0.653	0.666	0.68	0.69	0.7	0.71	0.73	0.75	0.76	0.75	0.7	0.667	0.667	
Block coeff. (Cb)	0.38	0.413	0.475	0.517	0.475	0.413	0.38	0.408	0.416	0.433	0.457	0.52	0.47	0.46	0.45	0.44	0.39	0.34	0.3	0.3	0.289	0.305	
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.765	37.759	37.75	37.75	37.75	37.753	37.759	37.78	37.801	37.82	37.84	37.8	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	38	37.91	37.9
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	36.381	36.847	37.187	37.32	37.19	36.844	36.38	35.784	36.146	37.01	38	39.6	40.6	40.4	39.8	39.1	38	37	36	34	32.7	31.61	
Max deck inclination deg	30	20.001	10.0063	0.4057	10.01	20.001	30	40.002	50.006	60.01	70.01	80	90	100	110	120	130	140	150	160	169.6	177	
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.1058	0.2033	0.3617	0.4057	0.361	0.2061	-0.1028	-0.605	-1.3534	-2.29	-3.93	-8.67	n/a	-10.7	-5.88	-4.3	-3.5	-3.07	-2.87	-2.8	-2.9	-2.95	

Sección 14 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de lastre salida de Puerto)



Sección 15 Anexo 4 (Load case, Condición de Lastre, Llegada a Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	0.000	0.000			88.816	0.000	6.600
Subtotal Carga			0.000			0.000	0.000	0.000
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	-2.500	1.200
GNL Estribor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	2.500	1.200
Subtotal GNL			4.198			26.500	0.000	1.200
DFondoGNLE1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	2.168	0.533
DCascoGNLE1	100%	84.916	84.916	82.845	82.845	26.558	5.973	4.488
DFondoGNLB1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	-2.168	0.533
DCascoGNLB1	100%	84.917	84.917	82.846	82.846	26.558	-5.973	4.488
DFondoGNLE2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	2.660	0.517
DCascoGNLE2	100%	103.743	103.743	101.213	101.213	33.053	5.872	4.169
DFondoGNLB2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	-2.660	0.517
DCascoGNLB2	100%	103.743	103.743	101.213	101.213	33.053	-5.872	4.169
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900
DFondoBC1E2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	0.001	0.000
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	-0.001	0.000
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	100%	133.431	133.431	130.177	130.177	59.030	3.738	4.301
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	100%	133.430	133.430	130.176	130.176	59.030	-3.738	4.301
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	100%	127.020	127.020	123.922	123.922	65.309	2.284	4.403
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	100%	127.019	127.019	123.921	123.921	65.309	-2.284	4.403
DFondoLHPr	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	66.57%	1741.185	1159.136	1698.717	1130.864	46.876	0.000	3.478
Agua Po. E	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	5.505	6.593
Agua Po. B	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	-5.505	6.593
Subtotal Agua Po.	10%	6.017	0.602	6.017	0.602	2.272	0.000	6.593
Agua Tec. E	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	5.590	6.257
Agua Tec. B	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	-5.590	6.257
Subtotal Agua Tec.	10%	6.288	0.629	6.288	0.629	4.224	0.000	6.257
MDO E	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	1.250	0.980
MDO B	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	-1.250	0.980
MDO Diario	26%	6.300	1.638	7.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Subtotal MDO	10%	16.380	1.638	19.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Aceite E	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	3.000	0.950
Aceite B	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	-3.000	0.950

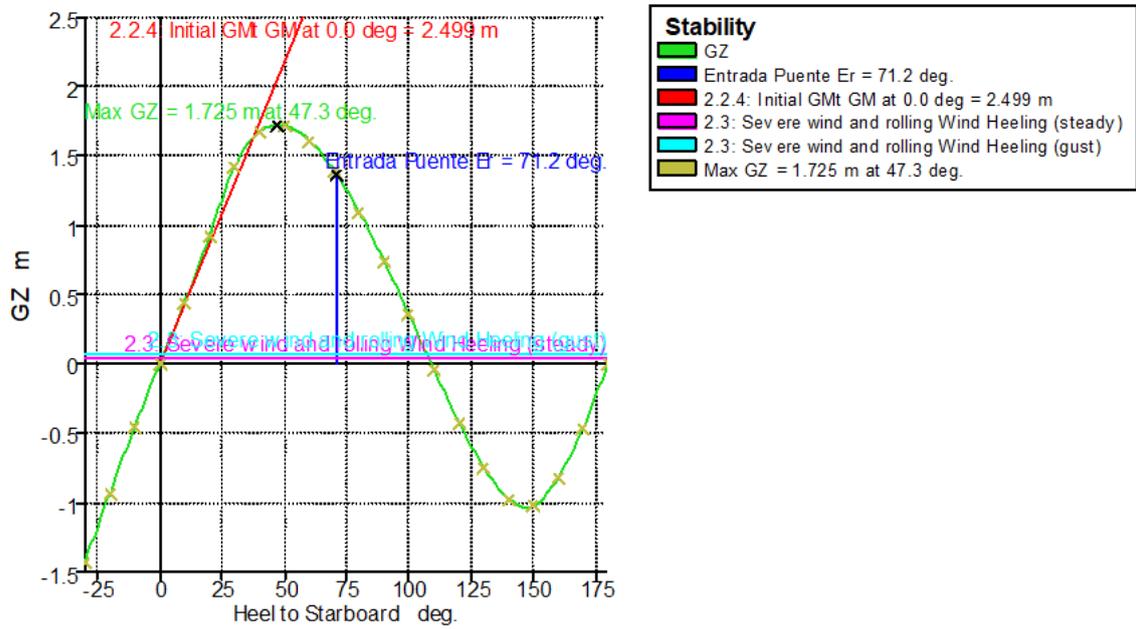
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Subtotal Aceite	10%	1.840	0.184	2.000	0.200	22.700	0.000	0.950
Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Subtotal Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Total Loadcase			2723.932	1832.647	1145.056	37.789	0.000	3.906
FS correction								0.000
VCG fluid								3.906

Sección 16 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Lastre llegada Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
GZ m	-1.422	-0.93	-0.4	0	0.44	0.928	1.422	1.68	1.721	1.61	1.4	1.1	0.75	0.36	-0	-0.42	-0.7	-0.97	-1	-0.82	-0.46	0
Area under GZ curve from zero heel m.deg	20.782	9.03	2.19	0	2.2	9.008	20.86	36.6	53.69	70.5	85.6	98.1	107	113	114	112	106	97.65	87.5	78.14	71.7	69.326
Displacement t	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724	2724
Draft at FP m	4.014	3.97	3.95	3.94	3.95	3.97	4.012	4.17	4.41	4.63	4.98	6.02	n/a	-1.3	-2.4	-2.78	-2.9	-2.93	-2.9	-2.93	-2.91	-2.889
Draft at AP m	3.794	4.18	4.39	4.445	4.39	4.187	3.796	3.24	2.466	1.43	-0.4	-5.6	n/a	-15.6	-10	-8.49	-7.6	-7.15	-6.9	-6.92	-7.01	-7.07
WL Length m	84.299	79.5	79.6	79.64	79.6	79.47	84.3	84.2	84	83.8	83.2	83.8	83.9	83.2	83.9	84.2	84.3	84.31	84.3	84.34	84.3	84.336
Beam max extents on WL m	13.683	14.9	14.6	14.37	14.6	14.89	13.68	12.2	11.39	10.8	10.4	9.46	9.57	9.55	9.41	9.63	10.1	11.33	12.9	14.98	14.6	14.387
Wetted Area m^2	1261.8	1199	1179	1173	1179	1199	1262	1316	1356	1378	1400	1403	1402	1418	1431	1445	1473	1507	1557	1634	1676	1666.3
Waterpl. Area m^2	841.63	855	820	806.5	820	854.9	841.7	765	702.5	655	630	607	591	584	586	607	641	704.2	793	886.7	940	962.89
Prismatic coeff. (Cp)	0.607	0.62	0.61	0.602	0.61	0.622	0.607	0.63	0.65	0.67	0.68	0.69	0.7	0.71	0.72	0.73	0.75	0.76	0.76	0.705	0.68	0.686
Block coeff. (Cb)	0.396	0.42	0.48	0.526	0.48	0.419	0.395	0.42	0.434	0.45	0.47	0.51	0.49	0.47	0.45	0.44	0.4	0.343	0.3	0.27	0.3	0.311
LCB from zero pt. (+ve fw d) m	37.792	37.8	37.8	37.78	37.8	37.78	37.79	37.8	37.83	37.8	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.9	37.93	37.9	37.93	37.9	37.932
LCF from zero pt. (+ve fw d) m	36.265	36.7	37	37.17	37	36.69	36.26	35.6	36.16	36.8	37.8	38.8	39.8	40	39.5	38.9	37.8	36.85	35.8	34.21	32.6	31.555
Max deck inclination deg	30	20	10	0.372	10	20	30	40	50.01	60	70	80	90	100	110	120	130	139.9	150	159.8	170	176.92
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.163	0.16	0.32	0.372	0.32	0.16	-0.16	-0.7	-1.44	-2.4	-4	-8.5	n/a	-10.4	-5.8	-4.21	-3.5	-3.11	-2.9	-2.94	-3.02	-3.084

Sección 17 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de lastre llegada a Puerto)



Sección 19 Anexo 4 (Load case, Condición de Máxima carga, Salida de Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	1967.000	1967.000			40.560	0.000	7.500
Subtotal Carga			1967.000			40.560	0.000	7.500
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	-2.500	3.000
GNL Estribor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	2.500	3.000
Subtotal GNL			41.977			26.500	0.000	3.000
DFondoGNLE1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	0.002	0.000
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900
DFondoGNLB1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	-0.002	0.000
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900
DFondoGNLE2	0%	29.396	0.000	28.679	0.000	32.557	0.002	0.000
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	0%	29.396	0.000	28.679	0.000	32.557	-0.002	0.000
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900
DFondoBC1E2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	1.929	0.547
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	-1.929	0.547
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	0%	127.020	0.000	123.922	0.000	65.251	0.927	0.900
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	0%	127.019	0.000	123.921	0.000	65.251	-0.927	0.900
DFondoLHPr	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	11.23%	1741.185	195.484	1698.717	190.716	48.820	0.000	0.538
Agua Po. E	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	5.962	7.037
Agua Po. B	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	-5.962	7.037
Subtotal Agua Po.	100%	6.017	6.017	6.017	6.017	1.919	0.000	7.037
Agua Tec. E	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	6.011	6.872
Agua Tec. B	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	-6.011	6.872
Subtotal Agua Tec.	100%	6.288	6.288	6.288	6.288	4.007	0.000	6.872
MDO E	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	1.250	1.700
MDO B	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	-1.250	1.700
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500
Subtotal MDO	100%	16.380	16.380	19.500	19.500	22.450	0.000	2.392
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400

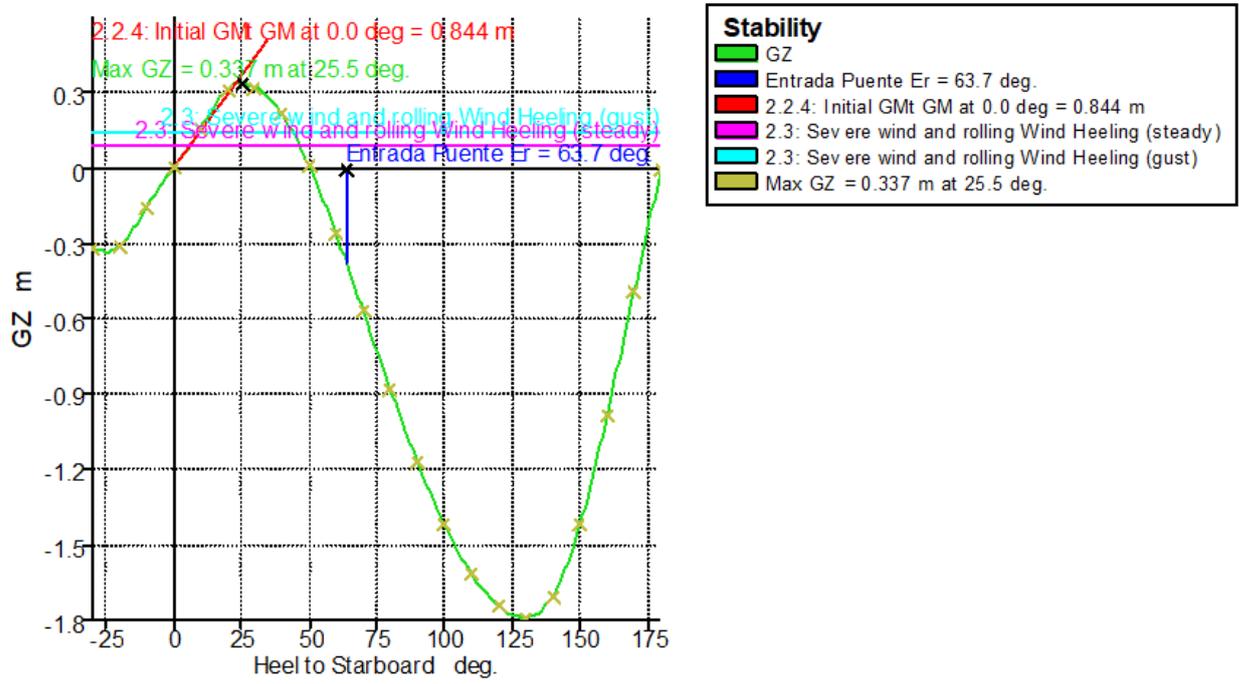
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Subtotal Aceite	100%	1.840	1.840	2.000	2.000	22.700	0.000	1.400
Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Subtotal Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Total Loadcase			3791.860	1832.647	323.846	36.739	0.000	5.723
FS correction								0.000
VCG fluid								5.723

Sección 20 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Máxima Salida Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
GZ m	-0.3	-0.3	-0.2	0	0.16	0.32	0.322	0.21	0.01	-0.3	-0.6	-0.88	-1.2	-1.42	-1.6	-1.74	-1.79	-1.7	-1.4	-1	-0.5	0	
Area under GZ curve from zero heel m.deg	6.45	3.17	0.75	0	0.75	3.17	6.476	9.24	10.4	9.21	5.06	-2.2	-12	-25.5	-41	-57.5	-75.3	-93	-109	-121	-128	-131	
Displacement t	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792	3792
Draft at FP m	5.29	5	4.9	4.86	4.9	5	5.289	5.79	6.41	7.32	9.05	14.1	n/a	6.02	1.09	-0.41	-1.07	-1.5	-1.6	-1.7	-1.6	-1.56	
Draft at AP m	5.42	5.62	5.85	5.94	5.85	5.62	5.418	5.25	5.23	5.31	5.59	6.56	n/a	-2.54	-3.7	-4.22	-4.62	-5	-5.3	-5.7	-6	-6.09	
WL Length m	82.8	83.4	83.6	83.7	83.6	83.4	82.85	81.4	80.9	82.9	84.2	83.6	82.4	80.3	77.6	81.2	82.4	83	83.3	83.3	83.2	83.17	
Beam max extents on WL m	13	14	14.6	14.4	14.6	14	12.97	11.4	10.1	9.11	8.84	9.12	9.56	9.83	9.91	10.1	10.4	12.2	14.2	14.8	14.5	14.36	
Wetted Area m ²	1593	1501	1441	1420	1441	1501	1593	1664	1707	1733	1751	1761	1765	1791	1793	1804	1820	1841	1870	1901	1911	1919	
Waterpl. Area m ²	784	878	929	904	929	878	783.7	706	640	592	564	553	555	567	592	624	672	751	840	880	878	859.5	
Prismatic coeff. (Cp)	0.65	0.62	0.61	0.6	0.61	0.62	0.654	0.69	0.72	0.71	0.71	0.73	0.74	0.77	0.8	0.77	0.76	0.77	0.78	0.76	0.75	0.746	
Block coeff. (Cb)	0.49	0.49	0.51	0.52	0.51	0.49	0.487	0.53	0.57	0.6	0.6	0.59	0.56	0.53	0.53	0.49	0.47	0.39	0.34	0.33	0.36	0.369	
LCB from zero pt. (+ve fw d) m	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.7	36.74	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.8	36.76
LCF from zero pt. (+ve fw d) m	34.4	34.8	33.9	34.4	33.9	34.8	34.38	35.3	35.8	35.9	35.7	35.3	34.9	34.7	35.2	35.5	35.2	34.7	34	33.1	32.6	33.04	
Max deck inclination deg	30	20	10	0.8	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	176.7	
Trim angle (+ve by stern) deg	0.09	0.46	0.7	0.8	0.7	0.46	0.096	-0.4	-0.87	-1.5	-2.5	-5.55	n/a	-6.29	-3.5	-2.81	-2.62	-2.6	-2.7	-2.9	-3.2	-3.34	

Sección 21 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de máxima carga salida de Puerto)



Sección 22 Anexo 4 (Load case, Condición de Máxima carga, Llegada a Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	1967.000	1967.000			40.560	0.000	7.500
Subtotal Carga			1967.000			40.560	0.000	7.500
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	-2.500	1.200
GNL Estribor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	2.500	1.200
Subtotal GNL			4.198			26.500	0.000	1.200
DFondoGNLE1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	0.002	0.000
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900
DFondoGNLB1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	-0.002	0.000
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900
DFondoGNLE2	0%	29.396	0.000	28.679	0.000	32.557	0.002	0.000
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	0%	29.396	0.000	28.679	0.000	32.557	-0.002	0.000
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900
DFondoBC1E2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	1.929	0.547
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	-1.929	0.547
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	0%	127.020	0.000	123.922	0.000	65.251	0.927	0.900
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	0%	127.019	0.000	123.921	0.000	65.251	-0.927	0.900
DFondoLHP	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	11.23%	1741.185	195.484	1698.717	190.716	48.820	0.000	0.538
Agua Po. E	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	5.505	6.593
Agua Po. B	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	-5.505	6.593
Subtotal Agua Po.	10%	6.017	0.602	6.017	0.602	2.272	0.000	6.593
Agua Tec. E	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	5.590	6.257
Agua Tec. B	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	-5.590	6.257
Subtotal Agua Tec.	10%	6.288	0.629	6.288	0.629	4.224	0.000	6.257
MDO E	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	1.250	0.980
MDO B	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	-1.250	0.980
MDO Diario	26%	6.300	1.638	7.500	1.950	22.450	0.000	2.760

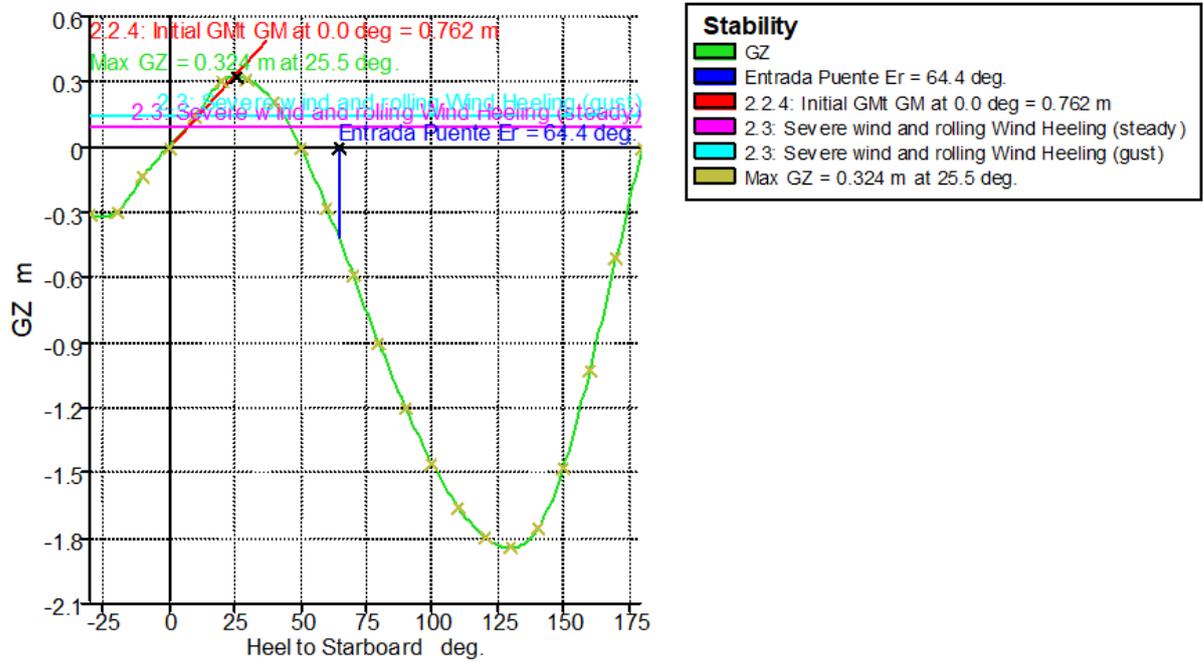
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Subtotal MDO	10%	16.380	1.638	19.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Aceite E	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	3.000	0.950
Aceite B	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	-3.000	0.950
Subtotal Aceite	10%	1.840	0.184	2.000	0.200	22.700	0.000	0.950
Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Subtotal Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Total Loadcase			3727.280	1832.647	204.908	37.004	0.000	5.759
FS correction								0.000
VCG fluid								5.759

Sección 23 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Máxima Llegada Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
GZ m	-0.31	-0.3	-0.1	0	0.14	0.3	0.31	0.21	-0	-0.28	-0.59	-0.91	-1.2	-1.46	-1.66	-1.79	-1.8	-1.8	-1.48	-1.03	-0.51	0	
Area under GZ curve from zero heel m.deg	6.077	2.93	0.66	0	0.67	2.93	6.1	8.75	9.84	8.488	4.147	-3.36	-13.9	-27.3	-42.9	-60.2	-79	-97	-113	-126	-133	-136	
Displacement t	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727	3727
Draft at FP m	5.323	5.03	4.93	4.9	4.93	5.03	5.32	5.83	6.46	7.394	9.147	14.29	n/a	6.194	1.18	-0.34	-1	-1.4	-1.62	-1.65	-1.59	-1.53	
Draft at AP m	5.225	5.45	5.69	5.78	5.7	5.45	5.23	5	4.9	4.859	4.906	5.209	n/a	-3.84	-4.32	-4.65	-4.9	-5.2	-5.52	-5.83	-6.11	-6.23	
WL Length m	82.76	83.4	82.5	82.9	82.5	83.4	82.8	81.3	81	82.96	84.26	83.52	82.32	80.22	77.6	81.1	82.3	82.9	83.2	83.27	83.2	83.14	
Beam max extents on WL m	13.13	13.9	14.6	14.4	14.6	13.9	13.1	11.5	10.1	9.149	9.064	9.331	9.656	9.745	9.88	10.1	10.4	12.1	14.1	14.85	14.5	14.36	
Wetted Area m²	1575	1481	1414	1401	1414	1481	1575	1644	1687	1714	1732	1743	1747	1768	1777	1786	1801	1822	1850	1887	1897	1902	
Waterpl. Area m²	787.4	882	909	891	910	882	787	712	644	595.6	567.8	556	556.9	566.3	588	620	668	746	841	880.5	884	873.4	
Prismatic coeff. (Cp)	0.653	0.62	0.61	0.61	0.61	0.62	0.65	0.7	0.72	0.713	0.712	0.726	0.742	0.766	0.8	0.77	0.77	0.78	0.77	0.756	0.75	0.746	
Block coeff. (Cb)	0.478	0.49	0.51	0.53	0.51	0.49	0.48	0.52	0.57	0.594	0.582	0.571	0.55	0.532	0.53	0.49	0.47	0.39	0.34	0.327	0.35	0.361	
LCB from zero pt. (+ve fw d) m	37.01	37	37	37	37	37	37	37	37	37.05	37.06	37.06	37.06	37.05	37	37	37	37	37	37.03	37	37.03	
LCF from zero pt. (+ve fw d) m	34.47	34.8	34.6	34.9	34.6	34.8	34.5	35.2	35.7	35.75	35.52	35.08	34.76	34.8	35.2	35.6	35.3	34.8	33.9	33.07	32.4	32.56	
Max deck inclination deg	30	20	10	0.65	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	159.8	169	176.5	
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.07	0.31	0.56	0.65	0.57	0.31	-0.1	-0.61	-1.2	-1.87	-3.13	-6.67	n/a	-7.37	-4.06	-3.18	-2.9	-2.8	-2.88	-3.08	-3.33	-3.47	

Sección 24 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de máxima carga llegada a Puerto)



Sección 26 Anexo 4 (Load case, Condición de carga homogénea, Salida de Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	920.000	920.000			37.280	0.000	10.220
Subtotal Carga			920.000			37.280	0.000	10.220
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	-2.500	3.000
GNL Estribor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	2.500	3.000
Subtotal GNL			41.977			26.500	0.000	3.000
DFondoGNLE1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	0.002	0.000
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900
DFondoGNLB1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	-0.002	0.000
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900
DFondoGNLE2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	2.660	0.517
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	-2.660	0.517
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	100%	82.711	82.711	80.693	80.693	46.305	5.932	4.453
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	100%	82.709	82.709	80.692	80.692	46.305	-5.932	4.453
DFondoBC1E2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	1.929	0.547
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	-1.929	0.547
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	100%	127.020	127.020	123.922	123.922	65.309	2.284	4.403
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	100%	127.019	127.019	123.921	123.921	65.309	-2.284	4.403
DFondoLHPr	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	38.69%	1741.185	673.735	1698.717	657.302	53.049	0.000	2.955
Agua Po. E	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	5.962	7.037
Agua Po. B	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	-5.962	7.037
Subtotal Agua Po.	100%	6.017	6.017	6.017	6.017	1.919	0.000	7.037
Agua Tec. E	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	6.011	6.872
Agua Tec. B	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	-6.011	6.872
Subtotal Agua Tec.	100%	6.288	6.288	6.288	6.288	4.007	0.000	6.872
MDO E	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	1.250	1.700
MDO B	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	-1.250	1.700
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500
Subtotal MDO	100%	16.380	16.380	19.500	19.500	22.450	0.000	2.392
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400

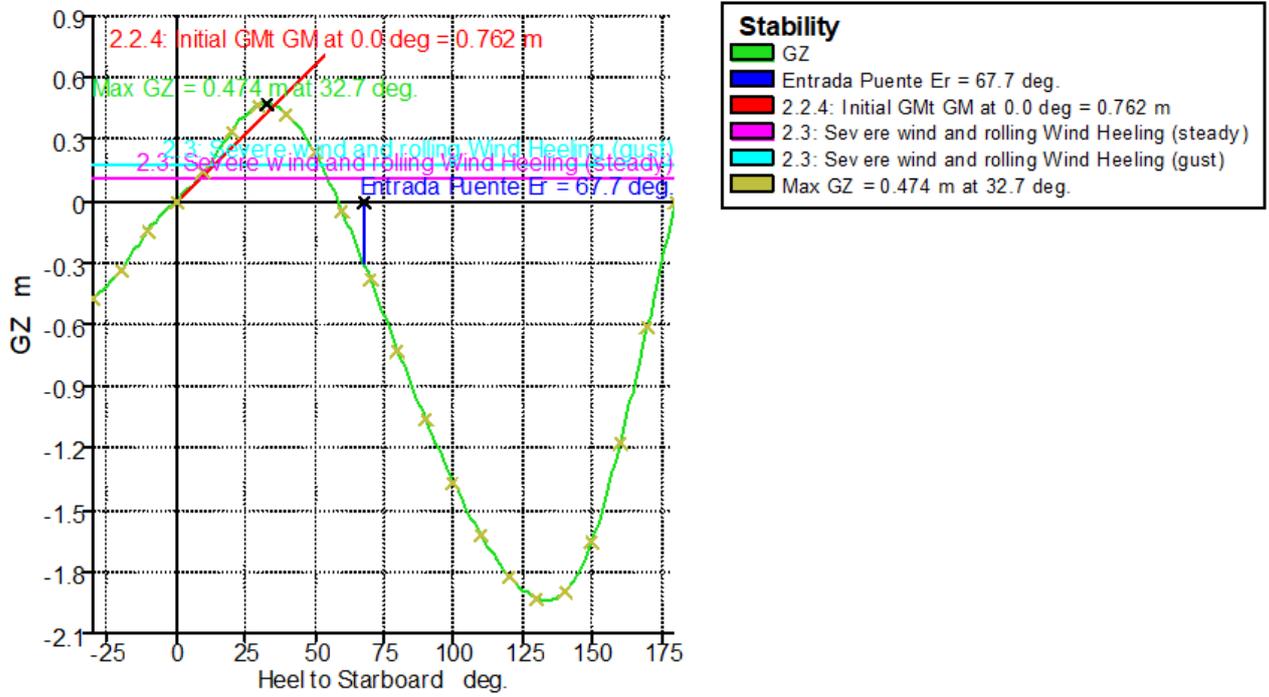
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Subtotal Aceite	100%	1.840	1.840	2.000	2.000	22.700	0.000	1.400
Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Subtotal Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Total Loadcase			3223.111	1832.647	790.433	37.239	0.000	5.658
FS correction								0.000
VCG fluid								5.658

Sección 27 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Homogenea Salida Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
GZ m	-0.47	-0.34	-0.14	0	0.14	0.34	0.47	0.424	0.24	-0	-0.38	-0.72	-1.1	-1.36	-1.6	-1.82	-1.93	-1.9	-1.7	-1.18	-0.61	0
Area under GZ curve from zero heel m.deg	7.14	3.066	0.667	0	0.67	3.05	7.19	11.79	15.2	16.2	14.07	8.55	-0.4	-12.5	-28	-44.8	-63.6	-82.9	-101	-115	-124	-127
Displacement t	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223	3223
Draft at FP m	4.58	4.425	4.36	4.337	4.36	4.42	4.57	4.925	5.33	5.85	6.776	9.442	n/a	1.66	-0.9	-1.75	-2.1	-2.27	-2.4	-2.37	-2.32	-2.3
Draft at AP m	4.56	4.892	5.131	5.208	5.13	4.89	4.57	4.149	3.72	3.2	2.38	0.187	n/a	-9.02	-7	-6.37	-6.14	-6.08	-6.1	-6.32	-6.53	-6.6
WL Length m	83.9	84.06	80.68	81	80.7	84.1	83.9	83.49	82.6	81.5	83.3	84.44	83.4	82	82.3	83.3	83.72	83.9	84	84.01	84	83.9
Beam max extents on WL m	14	15.11	14.59	14.38	14.6	15.1	14	11.92	10.5	10	9.901	9.864	9.52	9.76	9.99	10.3	10.26	11.8	13.8	15.09	14.6	14.4
Wetted Area m ²	1413	1324	1290	1282	1290	1324	1413	1480	1521	1549	1566	1573	1571	1581	1594	1612	1636	1664	1709	1764	1788	1779
Waterpl. Area m ²	829	909.6	861.1	845.7	861	910	829	749.8	677	631	603.7	591.7	591	597	603	623	660.4	734	836	892.7	919	928
Prismatic coeff. (Cp)	0.63	0.601	0.612	0.606	0.61	0.6	0.63	0.66	0.69	0.71	0.706	0.703	0.72	0.74	0.74	0.74	0.752	0.77	0.76	0.727	0.72	0.72
Block coeff. (Cb)	0.42	0.419	0.5	0.523	0.5	0.42	0.42	0.464	0.51	0.53	0.519	0.516	0.53	0.5	0.47	0.45	0.432	0.37	0.31	0.298	0.33	0.34
LCB from zero pt. (+ve fw d) m	37.2	37.22	37.21	37.21	37.2	37.2	37.2	37.26	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.3	37.29	37.3	37.3
LCF from zero pt. (+ve fw d) m	35.4	35.31	35.99	36.16	36	35.3	35.4	35.23	35.9	36.3	36.41	36.62	37.3	38.1	38	37.5	36.64	36	34.9	33.78	32.5	31.9
Max deck inclination deg	30	20	10.02	0.644	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	159.8	170	177
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.01	0.345	0.57	0.644	0.57	0.35	-0	-0.57	-1.19	-2	-3.24	-6.8	n/a	-7.83	-4.5	-3.41	-2.98	-2.81	-2.8	-2.92	-3.11	-3.2

Sección 28 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de carga homogénea Salida de Puerto)



Sección 29 Anexo 4 (Load case, Condición de carga homogénea, Llegada a Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	920.000	920.000			37.280	0.000	10.220
Subtotal Carga			920.000			37.280	0.000	10.220
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	-2.500	1.200
GNL Estribor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	2.500	1.200
Subtotal GNL			4.198			26.500	0.000	1.200
DFondoGNLE1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	0.002	0.000
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900
DFondoGNLB1	0%	23.335	0.000	22.765	0.000	26.748	-0.002	0.000
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900
DFondoGNLE2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	2.660	0.517
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	-2.660	0.517
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	100%	82.711	82.711	80.693	80.693	46.305	5.932	4.453
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	100%	82.709	82.709	80.692	80.692	46.305	-5.932	4.453
DFondoBC1E2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	1.929	0.547
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	100%	20.014	20.014	19.526	19.526	52.727	-1.929	0.547
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	100%	127.020	127.020	123.922	123.922	65.309	2.284	4.403
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	100%	127.019	127.019	123.921	123.921	65.309	-2.284	4.403
DFondoLHP	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	38.69%	1741.185	673.735	1698.717	657.302	53.049	0.000	2.955
Agua Po. E	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	5.505	6.593
Agua Po. B	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	-5.505	6.593
Subtotal Agua Po.	10%	6.017	0.602	6.017	0.602	2.272	0.000	6.593
Agua Tec. E	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	5.590	6.257
Agua Tec. B	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	-5.590	6.257
Subtotal Agua Tec.	10%	6.288	0.629	6.288	0.629	4.224	0.000	6.257
MDO E	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	1.250	0.980
MDO B	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	-1.250	0.980
MDO Diario	26%	6.300	1.638	7.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Subtotal MDO	10%	16.380	1.638	19.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Aceite E	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	3.000	0.950

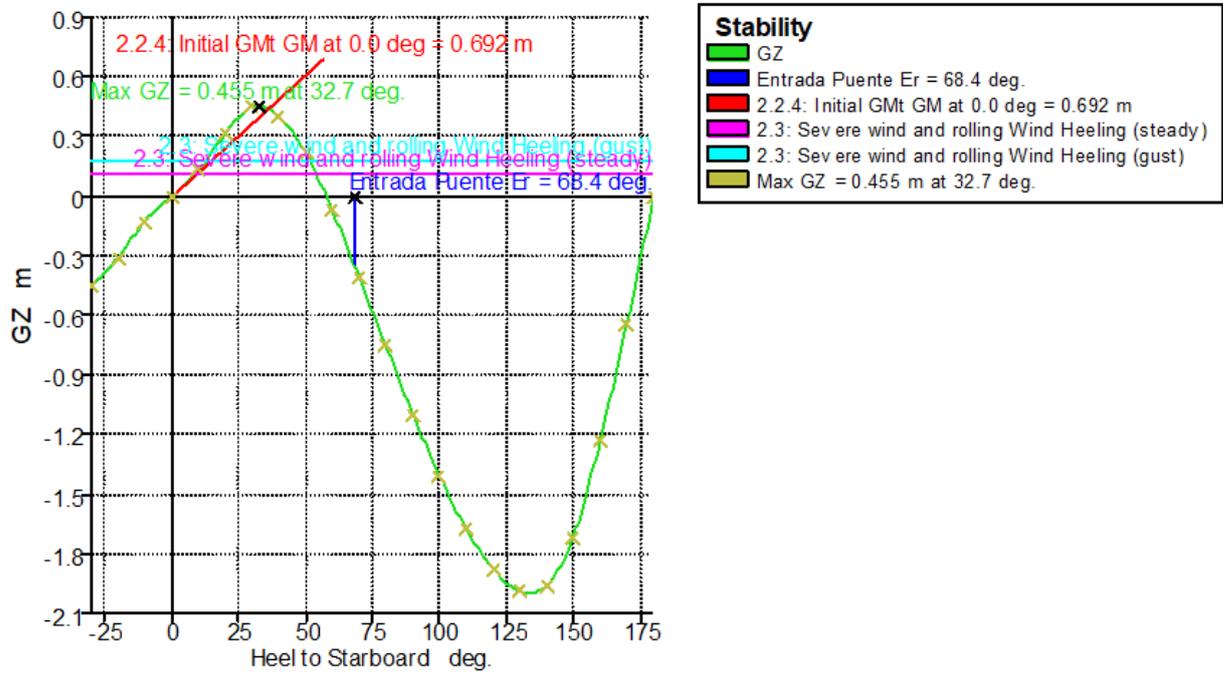
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Aceite B	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	-3.000	0.950
Subtotal Aceite	10%	1.840	0.184	2.000	0.200	22.700	0.000	0.950
Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Subtotal Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Total Loadcase			3158.531	1832.647	671.494	37.561	0.000	5.699
FS correction								0.000
VCG fluid								5.699

Sección 30 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Homogenea Llegada Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
GZ m	-0.45	-0.31	-0.13	0	0.13	0.31	0.45	0.4	0.22	-0.1	-0.4	-0.8	-1.1	-1.4	-1.67	-1.88	-2	-2	-1.71	-1.23	-0.64	0
Area under GZ curve from zero heel m.deg	6.65	2.81	0.609	0	0.61	2.8	6.71	11.1	14.3	15.1	12.8	6.98	-2.29	-15	-30.3	-48.1	-68	-87	-106	-121	-130	-133
Displacement t	3159	3159	3159	3159	3159	3158	3158	3159	3158	3158	3159	3159	3159	3159	3159	3159	3159	3159	3158	3159	3159	3159
Draft at FP m	4.619	4.48	4.421	4.41	4.42	4.47	4.61	4.96	5.38	5.91	6.86	9.6	n/a	1.85	-0.82	-1.67	-2	-2.2	-2.32	-2.34	-2.3	-2.25
Draft at AP m	4.362	4.71	4.939	5.01	4.94	4.72	4.37	3.92	3.41	2.77	1.74	-1.1	n/a	-10	-7.69	-6.84	-6.5	-6.3	-6.32	-6.48	-6.66	-6.76
WL Length m	83.86	84	80.17	80.3	80.2	84	83.9	83.4	82.5	81.6	83.3	84.4	83.32	81.9	82.2	83.2	83.7	83.8	83.95	84	83.97	83.94
Beam max extents on WL m	13.93	15.1	14.59	14.4	14.6	15.1	13.9	12	10.7	10.2	10	9.94	9.391	9.75	10	10.3	10.2	11.8	13.72	15.1	14.59	14.38
Wetted Area m^2	1395	1305	1276	1267	1276	1305	1395	1461	1501	1530	1547	1553	1553	1563	1579	1589	1618	1645	1694	1747	1774	1754
Waterpl. Area m^2	829.3	898	851.7	836	852	898	829	754	679	633	605	591	586.8	592	598	618	655	728	827.7	890	924	937.2
Prismatic coeff. (Cp)	0.626	0.6	0.616	0.61	0.62	0.6	0.63	0.66	0.69	0.71	0.71	0.7	0.718	0.74	0.74	0.75	0.76	0.77	0.763	0.73	0.721	0.722
Block coeff. (Cb)	0.416	0.42	0.501	0.54	0.5	0.42	0.42	0.46	0.5	0.51	0.51	0.51	0.532	0.49	0.46	0.44	0.42	0.36	0.31	0.29	0.32	0.332
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.57	37.6	37.54	37.5	37.5	37.5	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.64	37.6	37.6	37.6	37.6	37.6	37.61	37.6	37.6	37.6
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	35.5	35.7	36.28	36.4	36.3	35.7	35.5	35.1	35.8	36.2	36.4	36.6	37.42	38.2	38.2	37.7	36.8	36.1	35.01	33.8	32.37	31.62
Max deck inclination deg	30	20	10.01	0.45	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	149.9	160	169.5	176.7
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.19	0.18	0.382	0.45	0.38	0.18	-0.2	-0.8	-1.46	-2.3	-3.8	-7.9	n/a	-9	-5.06	-3.81	-3.3	-3	-2.95	-3.05	-3.22	-3.32

Sección 31 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de carga homogénea Llegada a Puerto)



Sección 33 Anexo 4 (Load case, Condición de carga número máximo de contenedores a 12.5 t, Salida de Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	1600.000	1600.000			39.510	0.000	8.220
Subtotal Carga			1600.000			39.510	0.000	8.220
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	-2.500	3.000
GNL Estribor	100%	20.989	20.989	49.619	49.619	26.500	2.500	3.000
Subtotal GNL			41.977			26.500	0.000	3.000
DFondoGNLE1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	2.168	0.533
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900
DFondoGNLB1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	-2.168	0.533
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900
DFondoGNLE2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	2.660	0.517
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	-2.660	0.517
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900
DFondoBC1E2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	0.001	0.000
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	-0.001	0.000
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	100%	127.020	127.020	123.922	123.922	65.309	2.284	4.403
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	100%	127.019	127.019	123.921	123.921	65.309	-2.284	4.403
DFondoLHP	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	29.57%	1741.185	514.955	1698.717	502.395	52.848	0.000	2.441
Agua Po. E	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	5.962	7.037
Agua Po. B	100%	3.008	3.008	3.008	3.008	1.919	-5.962	7.037
Subtotal Agua Po.	100%	6.017	6.017	6.017	6.017	1.919	0.000	7.037
Agua Tec. E	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	6.011	6.872
Agua Tec. B	100%	3.144	3.144	3.144	3.144	4.007	-6.011	6.872
Subtotal Agua Tec.	100%	6.288	6.288	6.288	6.288	4.007	0.000	6.872
MDO E	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	1.250	1.700
MDO B	100%	5.040	5.040	6.000	6.000	22.450	-1.250	1.700
MDO Diario	100%	6.300	6.300	7.500	7.500	22.450	0.000	3.500
Subtotal MDO	100%	16.380	16.380	19.500	19.500	22.450	0.000	2.392

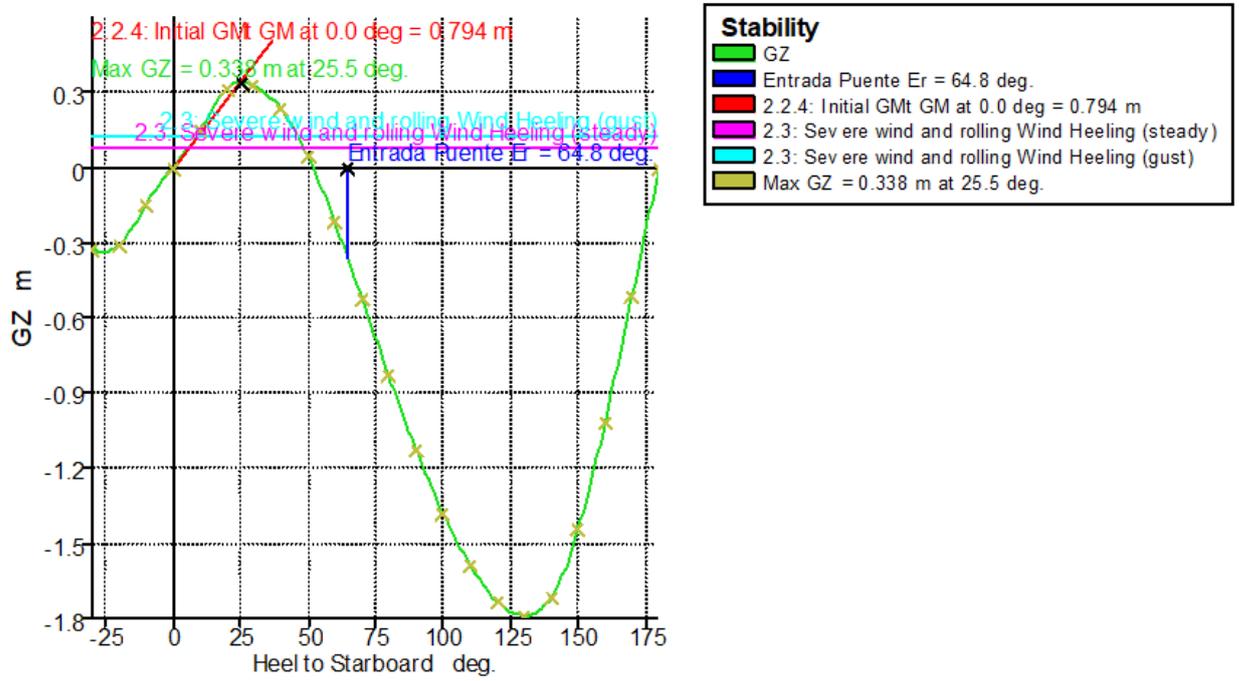
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Aceite E	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	3.000	1.400
Aceite B	100%	0.920	0.920	1.000	1.000	22.700	-3.000	1.400
Subtotal Aceite	100%	1.840	1.840	2.000	2.000	22.700	0.000	1.400
Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Subtotal Lodos	10%	0.746	0.075	0.888	0.089	22.702	0.000	0.056
Total Loadcase			3744.331	1832.647	635.526	37.501	0.000	5.676
FS correction								0.000
VCG fluid								5.676

Sección 34 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Número máximo de contenedores a 12.5t. Salida Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
GZ m	-0.3	-0.3	-0.1	0	0.15	0.31	0.33	0.24	0.05	-0.2	-0.52	-0.83	-1.1	-1.38	-1.59	-1.7	-1.8	-1.7	-1.4	-1.01	-0.51	0
Area under GZ curve from zero heel m.deg	6.36	3.06	0.69	0	0.69	3.05	6.37	9.24	10.7	9.89	6.18	-0.61	-10	-23	-37.8	-54	-72	-90	-106	-118	-126	-128
Displacement t	3744	3744	3745	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744	3744
Draft at FP m	5.63	5.3	5.2	5.18	5.2	5.3	5.63	6.19	6.92	8.03	10.13	16.29	n/a	8.239	2.184	0.3	-0.6	-1	-1.3	-1.36	-1.31	-1.25
Draft at AP m	5.02	5.27	5.51	5.59	5.51	5.27	5.02	4.76	4.58	4.43	4.249	3.892	n/a	-5.17	-4.99	-5.1	-5.3	-5.5	-5.7	-6.01	-6.27	-6.4
WL Length m	81.7	82.8	81	81.5	81	82.8	81.7	80.9	81.5	83.4	84.23	83.14	81.7	79.44	77.02	78.2	81.2	82.3	82.8	82.89	82.82	82.74
Beam max extents on WL m	13.1	13.9	14.6	14.4	14.6	13.9	13.1	11.5	10.1	9.32	9.24	9.464	9.78	9.649	9.498	9.57	10.4	12.1	14.2	14.84	14.55	14.36
Wetted Area m^2	1585	1488	1409	1400	1409	1488	1585	1653	1697	1722	1741	1751	1759	1783	1793	1802	1812	1832	1862	1892	1902	1901
Waterpl. Area m^2	781	875	896	880	896	875	781	710	642	592	563.3	550.5	552	555.1	572.9	605	658	737	832	873.5	883.3	881.5
Prismatic coeff. (Cp)	0.66	0.63	0.63	0.62	0.63	0.63	0.66	0.69	0.71	0.71	0.717	0.733	0.75	0.778	0.808	0.8	0.78	0.78	0.76	0.743	0.736	0.733
Block coeff. (Cb)	0.48	0.49	0.52	0.56	0.52	0.49	0.48	0.52	0.56	0.58	0.569	0.563	0.54	0.536	0.549	0.54	0.46	0.38	0.33	0.322	0.344	0.353
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.5	37.6	37.6	37.57	37.57	37.6	37.57	37.56	37.6	37.6	37.5	37.5	37.54	37.52	37.52
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	34.5	35	35.3	35.5	35.3	35	34.5	35	35.4	35.3	34.96	34.52	34.3	34.21	34.49	34.9	35	34.6	33.6	32.78	32.03	31.85
Max deck inclination deg	30	20	10	0.3	10	20	30	40	50	60	70.01	80	90	100	110	120	130	140	150	159.8	169.4	176.2
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.4	-0	0.22	0.3	0.22	-0	-0.4	-1.1	-1.7	-2.7	-4.33	-9.08	n/a	-9.81	-5.28	-4	-3.5	-3.3	-3.3	-3.43	-3.66	-3.8

Sección 35 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de carga número máximo de contenedores a 12.5t. Salida de Puerto)



Sección 36 Anexo 4 (Load case, Condición de carga número máximo de contenedores a 12.5 t, Llegada a Puerto)

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Pesos Fijos	1	1556.400	1556.400			31.112	0.000	4.231
Subtotal			1556.400			31.112	0.000	4.231
Viveres	1	0.400	0.400			5.500	0.000	13.500
Subtotal Viveres			0.400			5.500	0.000	13.500
Prueba Contenedores	1	1600.000	1600.000			39.510	0.000	8.220
Subtotal Carga			1600.000			39.510	0.000	8.220
	1	0.000	0.000			0.000	0.000	0.000
GNL Babor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	-2.500	1.200
GNL Estribor	10%	20.989	2.099	49.619	4.962	26.500	2.500	1.200
Subtotal GNL			4.198			26.500	0.000	1.200
DFondoGNLE1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	2.168	0.533
DCascoGNLE1	0%	84.916	0.000	82.845	0.000	27.721	5.277	0.900
DFondoGNLB1	100%	23.335	23.335	22.765	22.765	26.654	-2.168	0.533
DCascoGNLB1	0%	84.917	0.000	82.846	0.000	27.721	-5.277	0.900
DFondoGNLE2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	2.660	0.517
DCascoGNLE2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	5.354	0.900
DFondoGNLB2	100%	29.396	29.396	28.679	28.679	33.107	-2.660	0.517
DCascoGNLB2	0%	103.743	0.000	101.213	0.000	33.157	-5.354	0.900
DFondoGNLE3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	2.725	0.518
DCascoGNLE3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	5.369	0.900
DFondoGNLB3	100%	30.933	30.933	30.179	30.179	39.692	-2.725	0.518
DCascoGNLB3	0%	106.149	0.000	103.560	0.000	39.672	-5.369	0.900
DFondoBC1E1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	2.451	0.535
DCascoBC1E1	0%	82.711	0.000	80.693	0.000	46.008	5.382	0.900
DFondoBC1B1	100%	26.149	26.149	25.511	25.511	46.277	-2.451	0.535
DCascoBC1B1	0%	82.709	0.000	80.692	0.000	46.008	-5.382	0.900
DFondoBC1E2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	0.001	0.000
DCascoBC1E2	0%	82.154	0.000	80.150	0.000	52.181	4.378	0.900
DFondoBC1B2	0%	20.014	0.000	19.526	0.000	53.104	-0.001	0.000
DCascoBC1B2	0%	82.149	0.000	80.145	0.000	52.181	-4.378	0.900
DFondoBC2E1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	1.319	0.553
DCascoBC2E1	0%	133.431	0.000	130.177	0.000	58.856	2.365	0.900
DFondoBC2B1	100%	12.317	12.317	12.016	12.016	58.978	-1.319	0.553
DCascoBC2B1	0%	133.430	0.000	130.176	0.000	58.856	-2.365	0.900
DFondoBC2E2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	0.697	0.570
DCascoBC2E2	100%	127.020	127.020	123.922	123.922	65.309	2.284	4.403
DFondoBC2B2	100%	6.809	6.809	6.643	6.643	65.177	-0.697	0.570
DCascoBC2B2	100%	127.019	127.019	123.921	123.921	65.309	-2.284	4.403
DFondoLHPr	100%	3.039	3.039	2.965	2.965	71.311	0.000	0.596
Subtotal Lastre	29.57%	1741.185	514.955	1698.717	502.395	52.848	0.000	2.441
Agua Po. E	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	5.505	6.593
Agua Po. B	10%	3.008	0.301	3.008	0.301	2.272	-5.505	6.593
Subtotal Agua Po.	10%	6.017	0.602	6.017	0.602	2.272	0.000	6.593
Agua Tec. E	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	5.590	6.257
Agua Tec. B	10%	3.144	0.314	3.144	0.314	4.224	-5.590	6.257
Subtotal Agua Tec.	10%	6.288	0.629	6.288	0.629	4.224	0.000	6.257
MDO E	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	1.250	0.980
MDO B	0%	5.040	0.000	6.000	0.000	22.450	-1.250	0.980
MDO Diario	26%	6.300	1.638	7.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Subtotal MDO	10%	16.380	1.638	19.500	1.950	22.450	0.000	2.760
Aceite E	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	3.000	0.950

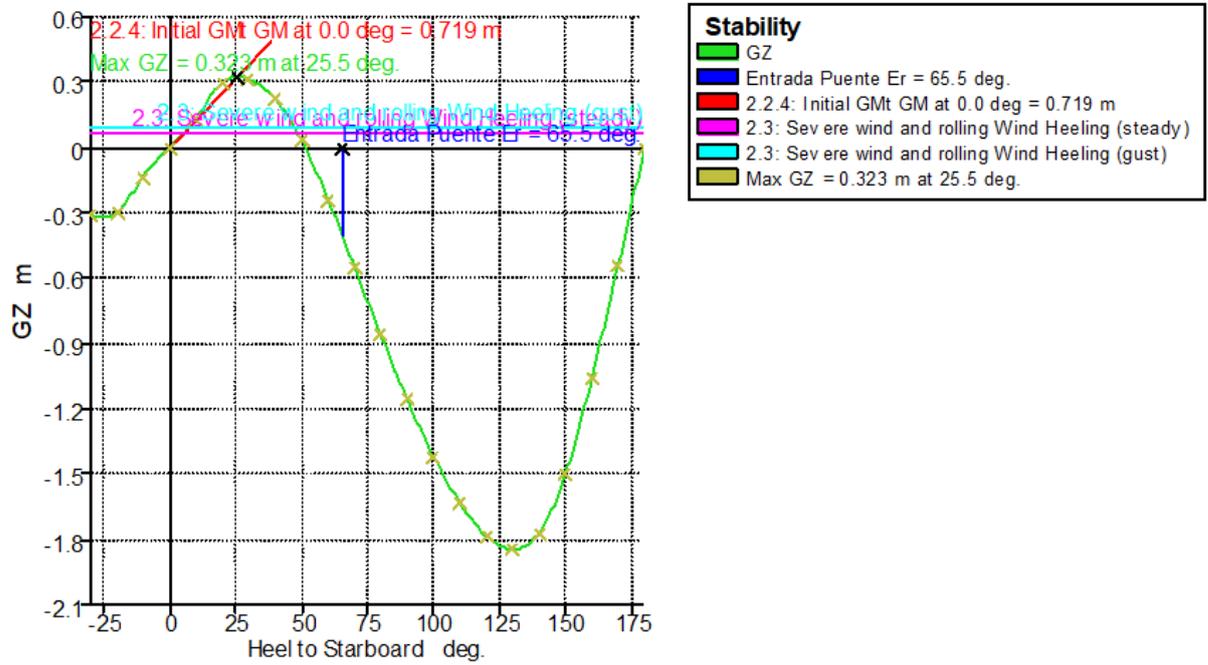
Definición de flotas óptimas para transporte intermodal desde el punto de vista de sostenibilidad medioambiental y competitividad operativa frente a la alternativa unimodal

Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m ³	Total Volume m ³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m
Aceite B	10%	0.920	0.092	1.000	0.100	22.700	-3.000	0.950
Subtotal Aceite	10%	1.840	0.184	2.000	0.200	22.700	0.000	0.950
Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Subtotal Lodos	100%	0.746	0.746	0.888	0.888	22.700	0.000	0.456
Total Loadcase			3679.751	1832.647	516.587	37.782	0.000	5.711
FS correction								0.000
VCG fluid								5.711

Sección 37 Anexo 4 (Datos de la estabilidad del buque a diferentes ángulos de escora para esta condición de carga: Número máximo de contenedores a 12.5t. Llegada Puerto)

Heel to Starboard deg	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
GZ m	-0.3	-0.3	-0.1	0	0.13	0.3	0.31	0.22	0.03	-0.2	-0.55	-0.86	-1.2	-1.42	-1.63	-1.8	-1.8	-1.8	-1.5	-1.06	-0.54	0	
Area under GZ curve from zero heel m.deg	5.99	2.84	0.63	0	0.63	2.84	6.01	8.76	10.1	9.13	5.23	-1.8	-12	-24.8	-40.1	-57	-75	-94	-110	-123	-131	-134	
Displacement t	3680	3680	3679	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3680	3679	3680	3680	3680	3680	
Draft at FP m	5.67	5.34	5.26	5.23	5.26	5.34	5.67	6.23	6.97	8.09	10.22	16.47	n/a	8.428	2.291	0.38	-0.5	-1	-1.3	-1.34	-1.28	-1.23	
Draft at AP m	4.83	5.1	5.33	5.4	5.33	5.1	4.83	4.52	4.26	3.98	3.581	2.569	n/a	-6.5	-5.66	-5.5	-5.6	-5.7	-5.9	-6.16	-6.41	-6.53	
WL Length m	81.7	82.7	80.2	80.6	80.2	82.7	81.7	80.9	81.6	83.5	84.19	83.11	81.7	79.38	76.98	77.7	81	82.3	82.7	82.85	82.78	82.71	
Beam max extents on WL m	13.3	13.9	14.6	14.4	14.6	13.9	13.3	11.6	10.2	9.53	9.447	9.606	9.77	9.529	9.291	9.54	10.3	12.1	14.1	14.88	14.55	14.37	
Wetted Area m^2	1566	1466	1392	1383	1392	1466	1566	1633	1675	1704	1724	1734	1740	1766	1774	1782	1795	1813	1844	1877	1889	1876	
Waterpl. Area m^2	784	876	885	869	885	876	784	715	645	596	566.4	552.2	551	552.7	569	600	653	732	830	873.6	888.4	893.6	
Prismatic coeff. (Cp)	0.66	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.66	0.69	0.71	0.71	0.718	0.734	0.75	0.779	0.81	0.81	0.79	0.78	0.75	0.736	0.729	0.726	
Block coeff. (Cb)	0.47	0.48	0.53	0.57	0.53	0.48	0.47	0.51	0.55	0.56	0.553	0.551	0.54	0.537	0.555	0.54	0.45	0.38	0.32	0.316	0.338	0.346	
LCB from zero pt. (+ve fw d) m	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.9	37.86	37.87	37.9	37.86	37.85	37.8	37.8	37.8	37.8	37.8	37.81	37.81	37.8
LCF from zero pt. (+ve fw d) m	34.6	35.2	35.7	35.8	35.7	35.2	34.6	35	35.3	35.2	34.83	34.45	34.3	34.32	34.63	34.9	35.1	34.7	33.7	32.77	31.88	31.47	
Max deck inclination deg	30	20	10	0.13	10	20	30	40	50	60	70.01	80	90	99.99	110	120	130	140	150	159.7	169.3	176.1	
Trim angle (+ve by stern) deg	-0.6	-0.2	0.05	0.13	0.05	-0.2	-0.6	-1.3	-2	-3	-4.89	-10.2	n/a	-10.9	-5.85	-4.3	-3.7	-3.5	-3.4	-3.56	-3.78	-3.91	

Sección 38 Anexo 4 (Gráfica GZ para la condición de carga número máximo de contenedores a 12.5t. Llegada a Puerto)



ANEXO 5. Capítulo 7

Sección 1. Anexo 5: Nomenclatura

Indices:

EE={1. e}: Kinds of engines involved. Medium speed four-stroke diesel engine with MGO (Tier III) and four-stroke dual-fuel engines (LNG plant).

K = {1, ..., k}: Ports for linear shipping line: Vigo, St.Nazaire, Las Palmas de Gran Canaria and Sta. Cruz de Tenerife. These ports articulate the lines: Vigo(Spain)-St. Nazaire(France); Las Palmas de Gran Canaria (Gran Canary island)-Huelva (Spain) and Las Palmas de Gran Canaria (Gran Canary island)- Sta. Cruz de Tenerife (Tenerife island).

Q = {1, ..., q}: Kind of vessel: feeder vessel and RO-PAX

U = {1, ..., u}: Kind of emission pollutants: NOx, SO2, PM2,5, PM10 and CO2;

V = {1, ..., v}: Classification of ports according to the population of their hinterlands: metropolitan zone (over 0.5 million inhabitants) and urban zone.

T = {1, ..., t}: Every year that is considered in the investment project for the CI retrofitting of vessels in their lifecycle. Variables:

Variables:

BT_q: Berthing Time (h). This time is the loading/unloading time. $\forall q \in Q$

CAPEX_q: Capital cost for CI retrofitting (€). $\forall q \in Q$

CEG_{qk}: Environmental costs of on-shore power use during berthing, for every kind of vessel and port (€); $\forall q \in Q \wedge \forall k \in K$

CEM_{qk}: Environmental costs of manouvering, for every kind of vessel and port (€); $\forall q \in Q \wedge \forall k \in K$

CIT: the yearly cost for the lag connection/disconnection time (€),

(CFF_q)_t; Net Cash flow (€); $\forall q \in Q \wedge \forall t \in T$

CT: Lag connection time (h).

ECB_{qk}: Environmental costs during berthing, for every kind of vessel and port (€); $\forall q \in Q \wedge \forall k \in K$.

ECC_q: Annual electricity costs for CI (€) ($\forall q \in Q$)

ECO_{Bq}: On-board supply of electricity, costs per year (€); $\forall q \in Q$

EFB_{uq}: Emission factors for every kind of vessel and pollutant during berthing. (kg/h) $\forall u \in U \wedge \forall q \in Q$

EFG_{uk} : Emission factors of the electricity grid for every kind of pollutant and port during berthing. (kg/kW.h) $\forall u \in U \wedge \forall k \in K$

EFM_{uq} : Emission factors for every kind of vessel and pollutant during manouvering. (kg/h) $\forall u \in U \wedge \forall q \in Q$

$IPBq$ The installed power-MCR-of the engines involved in every operational stage and for every kind of vessel ($IPBq$; $\forall q \in Q$)

$LFBq$ Load factor of the engines involved in the berthing stage (%) $\forall q \in Q$

$LFMq$ Load factor of the engines involved in the maneuvering stage (%) $\forall q \in Q$

MT : Manouvering Time (h). This variable collects the pilot and towing time, when necessary.

N : Number of annual trips by a shipping line.

Nb : Number of vessels that offer a particular SSS line.

PB_q : Required power to carry out the loading/unloading operations for every kind of vessel (kW). $\forall q \in Q$

UC_{ukv} : Unitary costs for every kind of pollutant and port (€/kg). $\forall u \in U \wedge \forall k \in K \wedge \forall v \in V$