

TESIS DOCTORAL

ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD SOCIOECONÓMICA Y  
MEDIOAMBIENTAL DEL SECTOR TRANSPORTE MARÍTIMO  
MUNDIAL EN BUQUES GASEROS

PhD THESIS

ANALYSIS OF SOCIO-ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL  
SUSTAINABILITY OF THE GLOBAL MARITIME TRANSPORT  
OF THE GAS CARRIERS SECTOR

AUTOR

CARLOS GONZÁLEZ GUTIÉRREZ

DIRECTORES

CARLOS ÁNGEL PÉREZ LABAJOS

BEATRIZ BLANCO ROJO

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Escuela de **Doctorado** de la Universidad de Cantabria

Santander 2022

## **Agradecimientos**

A mis directores de Tesis, D. Carlos Ángel Pérez Labajos (*in memoriam*), por haberme animado, motivado y por haber tenido la paciencia de enseñarme muchas y muy valiosas lecciones; y Dña. Beatriz Blanco Rojo por haber dado continuidad a este trabajo y haberme dado el empujón final que necesitaba. Imposible haber logrado nada sin vosotros.

A mi familia, mis padres y hermano por siempre animarme y ayudarme, iniciadores de mi personalidad curiosa. Sheila, por no dejarme nunca flojear, siempre con una palabra amable que me ha ayudado a llegar al final del camino. Y Luca, simplemente por mirarme y sonreír cuando las cosas no salían como yo esperaba.

Y, por último, a todas aquellas personas que me ha ayudado con datos y respondiendo a mis cuestiones y dudas, en especial a David y Santiago por vuestra generosidad compartiendo vuestros conocimientos conmigo.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

|   |            |
|---|------------|
| PARTE I. INTRODUCCIÓN GENERAL.....  | 17         |
| <b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>  | <b>19</b>  |
| 1.1. Antecedentes .....   | 19         |
| 1.2. Objetivo del Proyecto.....   | 24         |
| 1.3. Plan de Trabajo.....   | 25         |
| <b>2. ESTADO DEL ARTE.....</b>  | <b>27</b>  |
| 2.1. Análisis Cuantitativo .....  | 31         |
| 2.2. Análisis Cualitativo .....   | 42         |
| PARTE II. LA FLOTA MUNDIAL DE GASEROS.....  | 53         |
| <b>3. ANALISIS DEL MARCO POLÍTICO-LEGAL .....</b>                                     | <b>55</b>  |
| 3.1. Protocolo de Montreal .....  | 56         |
| 3.2. Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) .....     | 58         |
| 3.3. Protocolo de Kioto.....  | 59         |
| 3.4. Acuerdo Climático de París.....  | 61         |
| 3.5. Regulaciones de emisiones atmosféricas específicas del transporte marítimo ..... | 62         |
| <b>4. TRANSPORTE MARÍTIMO DE BUQUES GASEROS.....</b>                                  | <b>75</b>  |
| 4.1. Transporte marítimo de gases licuados del petróleo.....                          | 76         |
| 4.2. Transporte marítimo de gas natural licuado .....                                 | 82         |
| <b>5. ESTRUCTURA DE LA FLOTA DE GASEROS.....</b>                                      | <b>91</b>  |
| 5.1. Evolución de la flota de gaseros .....   | 93         |
| 5.2. Estructura de la flota según grupos de Bandera .....                             | 97         |
| 5.3. Estructura de la flota según grupos de eslora .....                              | 99         |
| 5.4. Estructura de la flota según grupos de peso muerto .....                         | 107        |
| 5.5. Estructura de la flota según grupos de capacidad de carga .....                  | 116        |
| 5.6. Estructura de la flota según grupos de arqueo bruto .....                        | 124        |
| 5.7. Estructura de la flota según grupos de potencia propulsora instalada.....        | 131        |
| 5.8. Estructura de la flota según grupos de edad.....                                 | 140        |
| 5.9. Estructura de la flota según tipo de sistema de propulsión .....                 | 149        |
| PARTE III. METODOLOGÍA Y DATOS.....   | 157        |
| <b>6. EMISIONES ATMOSFÉRICAS.....</b>   | <b>161</b> |
| 6.1. Método OMI I para cuantificar el consumo de la flota .....                       | 163        |
| 6.2. Método OMI II para cuantificar el consumo de la flota .....                      | 176        |
| 6.3. Consumo de aceite lubricante.....  | 215        |
| 6.4. Consumo de refrigerantes a bordo .....   | 217        |
| 6.5. Emisiones atmosféricas y contaminantes aéreos .....                              | 219        |
| 6.6. Incertidumbre asociada al cálculo emisiones atmosféricas .....                   | 226        |
| <b>7. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL .....</b>                                | <b>233</b> |
| 7.1. Huella de Carbono.....   | 236        |
| 7.2. Huella Ecológica .....   | 239        |

|  |   |            |
|--|---|------------|
| 7.3.   | Factores Ambientales, Sociales y de gestión (ESG).....  | 243        |
| 7.4.   | Indicadores de eficiencia energética dentro del sector marítimo .....                             | 245        |
| <b>8.</b>  | <b>SOSTENIBILIDAD SOCIOECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL.....</b>  | <b>251</b> |
| 8.1.   | Metodología Input-Output .....  | 251        |
| <b>PARTE IV. RESULTADOS .....</b>                                  |   | <b>269</b> |
| <b>9.</b>  | <b>CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LA FLOTA DE GASEROS .....</b>  | <b>271</b> |
| 9.1.   | Consumo de combustible de los motores principales .....   | 271        |
| 9.2.   | Consumo de combustible de los motores auxiliares .....  | 282        |
| 9.3.   | Consumo de combustible de las calderas auxiliares.....  | 292        |
| 9.4.   | Consumo de LNG en los GCU .....   | 303        |
| 9.5.   | Comparación de resultados OMI I vs. OMI II .....  | 303        |
| <b>10.</b>   | <b>EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE LA FLOTA DE GASEROS .....</b>  | <b>309</b> |
| 10.1.  | Emisiones de Gases de Efecto Invernadero .....  | 309        |
| 10.2.  | Emisiones de contaminantes aéreos .....   | 330        |
| <b>11.</b>   | <b>EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA FLOTA DE GASEROS.....</b>                         | <b>357</b> |
| 11.1.  | Huella de carbono de la flota de buques gaseros.....  | 357        |
| 11.2.  | Huella de ecológica de la flota de buques gaseros .....   | 363        |
| 11.3.  | Energía auxiliar y propulsora anual de la flota de gaseros .....                                  | 365        |
| 11.4.  | Mix de combustible de la flota de gaseros .....   | 375        |
| 11.5.  | Análisis de los indicadores energéticos de la flota de gaseros .....                              | 382        |
| <b>12.</b>   | <b>ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD SOCIOECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA FLOTA DE GASEROS .....</b> | <b>389</b> |
| 12.1.  | Coste total de la flota mundial de gaseros .....  | 389        |
| 12.2.  | Multiplicadores sobre la producción mundial .....   | 391        |
| 12.3.  | Multiplicadores sobre el valor añadido bruto .....  | 392        |
| 12.4.  | Multiplicadores sobre el empleo mundial .....   | 392        |
| 12.5.  | Multiplicadores sobre las emisiones atmosféricas mundiales .....                                  | 393        |
| 12.6.  | Efectos sobre la Producción mundial.....  | 394        |
| 12.7.  | Efectos sobre el Valor Añadido Bruto mundial .....  | 399        |
| 12.8.  | Efectos sobre el Empleo mundial.....  | 404        |
| 12.9.  | Efectos sobre las Emisiones Atmosféricas mundiales.....   | 409        |
| <b>EXTENSIONES. DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO .....</b> |   | <b>417</b> |
| <b>13.</b>   | <b>DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO .....</b>   | <b>419</b> |
| 13.1.  | Medidas tecnológicas .....  | 421        |
| 13.2.  | Medidas operativas .....  | 428        |
| 13.3.  | Medidas políticas o de mercado .....  | 431        |
| <b>CONCLUSIONES .....</b>  |   | <b>441</b> |
| <b>FUENTES CONSULTADAS .....</b>                                   |   | <b>447</b> |

# ÍNDICE DE TABLAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1 Revisiones más significativas del anexo VI de MARPOL .....                               | 33  |
| Tabla 2 Número de publicaciones totales por país. ....   | 42  |
| Tabla 3 Distribución de las Metodologías empleadas en los estudios por año de publicación. ....  | 50  |
| Tabla 4 Distribución de las Metodologías empleadas en los estudios por país. ....                | 51  |
| Tabla 5 Distribución de las Metodologías empleadas en los estudios por país (continuación). .... | 52  |
| Tabla 6 Límites de emisiones de NO <sub>x</sub> de acuerdo con la Regla 13 del MARPOL VI .....   | 65  |
| Tabla 7 Regla 14 anexo VI de MARPOL sobre el contenido de azufre en combustibles .....           | 68  |
| Tabla 8 Principales mercados marítimos de gases licuados del petróleo .....                      | 78  |
| Tabla 9 Requerimientos de barrera secundaria en tanques de carga.....                            | 81  |
| Tabla 10 Países englobados en grupos de banderas EU15 y RA .....                                 | 92  |
| Tabla 11 Países englobados en grupos de banderas RM y ROCDE .....                                | 93  |
| Tabla 12 Número de buques gaseros registrados por grupo de bandera.....                          | 97  |
| Tabla 13 TPM de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera .....                    | 98  |
| Tabla 14 Capacidad de carga de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera.....      | 98  |
| Tabla 15 GT de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera .....                     | 98  |
| Tabla 16 Potencia propulsora de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera .....    | 99  |
| Tabla 17 Número de buques LPG en cada grupo de esloras.....                                      | 100 |
| Tabla 18 TPM de los buques LPG en cada grupo de esloras. ....                                    | 101 |
| Tabla 19 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de esloras .....                     | 102 |
| Tabla 20 GT de los buques LPG en cada grupo de esloras .....                                     | 103 |
| Tabla 21 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de esloras. ....                    | 104 |
| Tabla 22 Número de buques LNG en cada grupo de esloras .....                                     | 104 |
| Tabla 23 TPM de los buques LNG en cada grupo de esloras.....                                     | 105 |
| Tabla 24 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de esloras.....                      | 106 |
| Tabla 25 GT de los buques LNG en cada grupo de esloras.....                                      | 106 |
| Tabla 26 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de esloras.....                     | 107 |
| Tabla 27 Número de buques LPG en cada grupo de peso muerto.....                                  | 108 |
| Tabla 28 TPM de los buques LPG en cada grupo de peso muerto .....                                | 109 |
| Tabla 29 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de peso muerto .....                 | 110 |
| Tabla 30 GT de los buques LPG en cada grupo de peso muerto .....                                 | 111 |
| Tabla 31 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de peso muerto .....                | 112 |
| Tabla 32 Número de buques LNG en cada grupo de peso muerto. ....                                 | 112 |
| Tabla 33 TPM de los buques LNG en cada grupo de peso muerto. ....                                | 113 |
| Tabla 34 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de peso muerto.....                  | 114 |
| Tabla 35 GT de los buques LNG en cada grupo de peso muerto. ....                                 | 115 |
| Tabla 36 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de peso muerto. ....                | 116 |
| Tabla 37 Número de buques LPG en cada grupo de capacidad de carga. ....                          | 117 |
| Tabla 38 TPM de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.....                          | 117 |
| Tabla 39 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga. ....          | 118 |
| Tabla 40 GT de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.....                           | 119 |
| Tabla 41 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.....          | 120 |
| Tabla 42 Número de buques LNG en cada grupo de capacidad de carga. ....                          | 121 |
| Tabla 43 TPM de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga. ....                         | 121 |
| Tabla 44 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga. ....          | 122 |
| Tabla 45 GT de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga. ....                          | 123 |
| Tabla 46 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga. ....         | 124 |
| Tabla 47 Número de buques LPG en cada grupo de arqueo bruto. ....                                | 125 |
| Tabla 48 TPM de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto. ....                               | 125 |
| Tabla 49 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto. ....                | 126 |
| Tabla 50 GT de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto. ....                                | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 51 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto.....                 | 128 |
| Tabla 52 Número de buques LNG en cada grupo de arqueo bruto.....                                  | 128 |
| Tabla 53 TPM de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto. ....                                | 129 |
| Tabla 54 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto. ....                 | 130 |
| Tabla 55 GT de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto. ....                                 | 131 |
| Tabla 56 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto. ....                | 131 |
| Tabla 57 Número de buques LPG en cada grupo de potencia instalada. ....                           | 132 |
| Tabla 58 TPM de los buques LPG en cada grupo de potencia propulsora.....                          | 133 |
| Tabla 59 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de potencia instalada.....            | 134 |
| Tabla 60 GT de los buques LPG en cada grupo de potencia instalada.....                            | 135 |
| Tabla 61 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de potencia instalada. ....          | 136 |
| Tabla 62 Número de buques LNG en cada grupo de potencia instalada.....                            | 136 |
| Tabla 63 TPM de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada.....                           | 138 |
| Tabla 64 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada.....            | 138 |
| Tabla 65 GT de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada.....                            | 139 |
| Tabla 66 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada. ....          | 140 |
| Tabla 67 Estructura de los buques gaseros por grupo de edades. ....                               | 140 |
| Tabla 68 Número de buques LPG en cada grupo de edades. ....                                       | 141 |
| Tabla 69 TPM de los buques LPG en cada grupo de edades.....                                       | 142 |
| Tabla 70 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de edades.....                        | 142 |
| Tabla 71 GT de los buques LPG en cada grupo de edades.....  | 143 |
| Tabla 72 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de edades. ....                      | 144 |
| Tabla 73 Número de buques LNG en cada grupo de edades.....  | 145 |
| Tabla 74 TPM de los buques LNG en cada grupo de edades. ....                                      | 146 |
| Tabla 75 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de edades.....                        | 147 |
| Tabla 76 GT de los buques LNG en cada grupo de edades.....  | 148 |
| Tabla 77 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de edades.....                       | 148 |
| Tabla 78 Número de buques LPG en cada tipo de motor.....  | 149 |
| Tabla 79 TPM de la flota de buques LPG en cada tipo de motor.....                                 | 150 |
| Tabla 80 Capacidad de carga de los buques LPG en cada tipo de motor.....                          | 150 |
| Tabla 81 GT de los buques LPG en cada tipo de motor.....  | 151 |
| Tabla 82 Potencia propulsora de los buques LPG en cada tipo de motor. ....                        | 151 |
| Tabla 83 Número de buques LNG en cada tipo de motor. ....   | 152 |
| Tabla 84 TPM de los buques LNG en cada tipo de motor.....   | 152 |
| Tabla 85 Capacidad de carga de los buques LNG en cada tipo de motor.....                          | 154 |
| Tabla 86 GT de los buques LNG en cada tipo de motor.....  | 154 |
| Tabla 87 Potencia propulsora de los buques LNG en cada tipo de motor.....                         | 155 |
| Tabla 88 Valores para el consumo específico base para motores diésel de dos tiempos.....          | 167 |
| Tabla 89 Número de motores auxiliares en operación.....   | 169 |
| Tabla 90 Consumo específico estimado para los motores auxiliares.....                             | 170 |
| Tabla 91 Datos operacional de los motores auxiliares en la flota de Gaseros.....                  | 170 |
| Tabla 92 Potencia de los motores auxiliares para la flota de gaseros para cada fase de viaje..... | 171 |
| Tabla 93 Potencia de la caldera auxiliar para la flota de gaseros para cada fase de viaje.....    | 172 |
| Tabla 94 Régimen de operación de los motores principales y motores auxiliares.....                | 173 |
| Tabla 95 Horas operacionales de la flota en diferentes fases operativas.....                      | 173 |
| Tabla 96 Tiempo anual navegando de los buques gaseros. ....                                       | 173 |
| Tabla 97 Consumo anual de combustible del sector marítimo, metodología “Top-Down”.....            | 175 |
| Tabla 98 Consumo anual de combustible del sector marítimo, metodología “Bottom-up”.....           | 175 |
| Tabla 99 Distribución del consumo total de combustible método bottom-up.....                      | 175 |
| Tabla 100 Consumo específico de combustible base para Motores Principales.....                    | 177 |
| Tabla 101 Poder Calorífico asumido por tipo de combustible.....                                   | 182 |
| Tabla 102 Consumo específico (g/kWh) estimado para los motores auxiliares. ....                   | 197 |
| Tabla 103 Distribución de la energía para buques LNG con sistemas de propulsión DFDE.....         | 199 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 104 Número de TG en operación, MCR y potencia eléctrica entregada por los TG. ....   | 203 |
| Tabla 105 Tiempo de operación y potencia desarrollada de la caldera auxiliar. ....   | 204 |
| Tabla 106 Consumo y tiempo operativo del GCU. ....   | 206 |
| Tabla 107 Horas operativas de los buques gaseros ....  | 209 |
| Tabla 108 Operación del motor principal, motores y caldera auxiliar por fase de viaje.....   | 210 |
| Tabla 109 Régimen de carga de los motores auxiliares para buques LPG (OMI II) .....  | 210 |
| Tabla 110 Sensores empleados a bordo de los buques .....   | 211 |
| Tabla 111 Expresiones lógicas para definir las fases de un viaje. ....   | 213 |
| Tabla 112 MCR empleado por el motor principal para la propulsión del buque en las distintas fases del viaje. ....                          | 213 |
| Tabla 113 Operativa de motores auxiliares en las distintas fases del viaje. ....   | 214 |
| Tabla 114 Energía auxiliar requerida por los buques gaseros.....   | 214 |
| Tabla 115 Distribución tiempo en navegación en los dos distintos modos considerados. ....  | 214 |
| Tabla 116 Distribución consumo de combustible en buques LNG según tipo de propulsión a bordo. ...  | 215 |
| Tabla 117 Distribución consumo de combustible de las calderas auxiliares en buques LNG según tipo de propulsión. ....                      | 215 |
| Tabla 118 Número Básico (BN) estimado para el aceite lubricante de cilindros según el contenido de azufre del combustible. ....            | 216 |
| Tabla 119 Factor ACC según el contenido de azufre del combustible Motores de dos tiempos diésel... 216                                     | 216 |
| Tabla 120 Factor de emisión de materia particulada (PM) causadas por el consumo de aceite lubricantes en los cilindros de los motores..... | 217 |
| Tabla 121 Cantidad de refrigerantes llevados a bordo y consumidos al año por los buques gaseros .....                                      | 218 |
| Tabla 122 Factores de emisión de CO <sub>2</sub> .....   | 221 |
| Tabla 123 Factores de emisión de CO .....  | 221 |
| Tabla 124 Factores de emisión CH <sub>4</sub> .....  | 222 |
| Tabla 125 Factores de emisión N <sub>2</sub> O .....   | 222 |
| Tabla 126 Factores de emisión de NO <sub>x</sub> .....   | 222 |
| Tabla 127 Niveles de emisiones de NO <sub>x</sub> (Tier) según año de construcción del motor .....   | 223 |
| Tabla 128 Factores de emisión SO <sub>x</sub> .....  | 223 |
| Tabla 129 Factores de emisione de SO <sub>2</sub> y de SO <sub>4</sub> .....   | 224 |
| Tabla 130 Factores de emisión de NMVOC.....  | 224 |
| Tabla 131 Factores de emisión de PM .....  | 224 |
| Tabla 132 Emisiones de BC según combustible y tipo de motor .....  | 226 |
| Tabla 133 Emisiones de BC para las calderas auxiliares según combustible.....  | 226 |
| Tabla 134 Factores de conversión de GEI a CO <sub>2</sub> equivalente. ....  | 238 |
| Tabla 135. Métricas empleadas en los informes EGS.....   | 245 |
| Tabla 136 Valores asumidos para el cálculo del EEOI .....  | 248 |
| Tabla 137 Impacto de los costes de la flota de gaseros sobre los sectores de la economía. ....   | 264 |
| Tabla 138 Consumo de combustible anual de los buques gaseros para cada tipo de combustible .....   | 271 |
| Tabla 139 Porcentaje de combustible consumido por los motores principales .....  | 271 |
| Tabla 140 Consumo de combustible anual de motores principales en los buques gaseros .....  | 271 |
| Tabla 141 Consumo anual de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de eslora.....                             | 272 |
| Tabla 142 Consumo de combustible en motores principales en buques LPG según grupos de peso muerto.....                                     | 273 |
| Tabla 143 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de capacidad de carga.....                       | 273 |
| Tabla 144 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de arqueo bruto. ....                            | 273 |
| Tabla 145 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de potencia propulsora instalada.....            | 274 |
| Tabla 146 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de edad. ....                                    | 275 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 147 Consumo de combustible de motores principales para buques LPG según tipo de motor principal. ....                         | 276 |
| Tabla 148 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupo de bandera de registro. ....               | 276 |
| Tabla 149 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupos de eslora. ....                           | 277 |
| Tabla 150 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupos de peso muerto. ....                      | 277 |
| Tabla 151 Consumo de combustible de motores principales para los buques LNG según grupos de capacidad de carga. ....                | 278 |
| Tabla 152 Consumo de combustible de motores principales para los buques LNG según grupos de arqueo bruto. ....                      | 279 |
| Tabla 153 Consumo de combustible de motores principales para los buques LNG según grupos de potencia propulsora instalada. ....     | 279 |
| Tabla 154 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupos de edad. ....                             | 279 |
| Tabla 155 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según tipo de motor principal. ....                    | 280 |
| Tabla 156 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupo de bandera de registro. ....               | 281 |
| Tabla 157 Porcentaje de combustible consumido por los motores auxiliares. ....  | 282 |
| Tabla 158 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para buques LPG según grupos de eslora. ....                            | 282 |
| Tabla 159 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de peso muerto. ....                   | 283 |
| Tabla 160 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de capacidad de carga. ....            | 283 |
| Tabla 161 Consumo de combustibles de los motore auxiliares para los buques LPG según grupos de arqueo bruto. ....                   | 283 |
| Tabla 162 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de potencia propulsora instalada. .... | 284 |
| Tabla 163 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de edad. ....                          | 286 |
| Tabla 164 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según tipo de motor principal. ....                 | 286 |
| Tabla 165 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupo de bandera de registro. ....            | 286 |
| Tabla 166 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LNG según grupos de eslora. ....                        | 287 |
| Tabla 167 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LNG según grupos de peso muerto. ....                   | 288 |
| Tabla 168 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LNG según grupos de capacidad de carga. ....            | 289 |
| Tabla 169 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupos de arqueo bruto. ....                      | 289 |
| Tabla 170 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupos de potencia propulsora. ....               | 289 |
| Tabla 171 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupos de edad. ....                              | 290 |
| Tabla 172 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según tipo de motor principal. ....                     | 291 |
| Tabla 173 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupo de bandera de registro. ....                | 292 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 174 Porcentaje de combustible consumido por las calderas auxiliares .....   | 292 |
| Tabla 175 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de eslora.....                        | 293 |
| Tabla 176 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de peso muerto.....                   | 294 |
| Tabla 177 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de capacidad de carga.....            | 294 |
| Tabla 178 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de arqueo bruto.....                  | 295 |
| Tabla 179 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de potencia propulsora instalada..... | 296 |
| Tabla 180 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de edad.....                          | 296 |
| Tabla 181 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según tipo de motor principal.....                 | 297 |
| Tabla 182 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupo de bandera de registro.....            | 297 |
| Tabla 183 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de eslora.....                        | 298 |
| Tabla 184 Consumo de combustibles de calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de peso muerto.....                       | 298 |
| Tabla 185 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de capacidad de carga.....            | 299 |
| Tabla 186 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de arqueo bruto.....                  | 300 |
| Tabla 187 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de potencia propulsora instalada..... | 301 |
| Tabla 188 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de edad.....                          | 301 |
| Tabla 189 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según tipo de motor principal.....                 | 301 |
| Tabla 190 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupo de bandera de registro.....            | 302 |
| Tabla 191 Porcentaje del LNG total consumido por buques LNG con GCU a bordo.....  | 303 |
| Tabla 192 Categorización de los 75 buques reales que sirven de referencia en la comparación de metodologías.....                    | 305 |
| Tabla 193 Resultados del coeficiente de Correlación de Pearson de las dos metodologías aplicadas ....                               | 306 |
| Tabla 194 Emisiones anuales de GEI totales de la flota de buques gaseros.....   | 310 |
| Tabla 195 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de bandera .....   | 311 |
| Tabla 196 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de bandera .....   | 311 |
| Tabla 197 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de esloras .....   | 313 |
| Tabla 198 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de esloras .....   | 313 |
| Tabla 199 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de peso muerto .....   | 314 |
| Tabla 200 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de peso muerto.....  | 315 |
| Tabla 201 Toneladas de GEI por tonelada de peso muerto para buques LPG.....   | 316 |
| Tabla 202 Toneladas de GEI por tonelada de peso muerto para buques LNG.....   | 316 |
| Tabla 203 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de capacidad de carga .....  | 317 |
| Tabla 204 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de capacidad de carga .....  | 318 |
| Tabla 205 Toneladas de GEI por m <sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LPG.....  | 318 |
| Tabla 206 Toneladas de GEI por m <sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LNG .....   | 318 |
| Tabla 207 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de arqueo bruto .....  | 319 |
| Tabla 208 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de arqueo bruto.....   | 320 |
| Tabla 209 Toneladas de GEI por tonelada de arqueo bruto para buques LPG .....   | 320 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 210 Toneladas de GEI por tonelada de arqueado bruto para buques LNG .....                                  | 321 |
| Tabla 211 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de potencia propulsora.....                             | 322 |
| Tabla 212 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de potencia propulsora .....                            | 323 |
| Tabla 213 Toneladas de GEI por kilovatio de potencia instalada para buques LPG .....                             | 323 |
| Tabla 214 Toneladas de GEI por kilovatio de potencia instalada para buques LNG.....                              | 324 |
| Tabla 215 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de edades.....  | 325 |
| Tabla 216 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de edades .....   | 326 |
| Tabla 217 Toneladas de GEI por TPM y grupo de edad para buques LPG y LNG a partir de la metodología OMI I .....  | 326 |
| Tabla 218 Toneladas de GEI por TPM y grupo de edad para buques LPG y LNG a partir de la metodología OMI II. .... | 327 |
| Tabla 219 Emisiones de GEI para los buques LNG por tipo de motor propulsor.....                                  | 328 |
| Tabla 220 Emisiones de GEI para los buques LPG por tipo de motor propulsor .....                                 | 329 |
| Tabla 221 Toneladas de GEI por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LPG .....      | 329 |
| Tabla 222 Toneladas de GEI por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LNG .....      | 329 |
| Tabla 223 Emisiones de contaminantes aéreos totales de la flota de buques gaseros.....                           | 330 |
| Tabla 224 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de bandera.....                | 331 |
| Tabla 225 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de bandera.....                            | 331 |
| Tabla 226 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de bandera ....                | 332 |
| Tabla 227 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de bandera .....                           | 332 |
| Tabla 228 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de eslora .....                | 333 |
| Tabla 229 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de eslora .....                            | 334 |
| Tabla 230 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de eslora.....                 | 334 |
| Tabla 231 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de eslora.....                             | 335 |
| Tabla 232 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de TPM.....                    | 336 |
| Tabla 233 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo TPM.....                                   | 336 |
| Tabla 234 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de TPM .....                   | 337 |
| Tabla 235 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo TPM .....                                  | 337 |
| Tabla 236 Toneladas de contaminantes aéreos por TPM para buques LPG.....   | 338 |
| Tabla 237 Toneladas de contaminantes aéreos por TPM para buques LNG .....  | 338 |
| Tabla 238 Emisiones de contaminantes aéreos para buques LPG según grupo de capacidad de carga .                  | 339 |
| Tabla 239 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de capacidad de carga ....                 | 340 |
| Tabla 240 Emisiones de contaminantes aéreos para buques LNG según grupo de capacidad de carga                    | 340 |
| Tabla 241 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de capacidad de carga ....                 | 341 |
| Tabla 242 Toneladas de contaminantes aéreos por m <sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LPG.....        | 341 |
| Tabla 243 Toneladas de contaminantes aéreos por m <sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LNG .....       | 342 |
| Tabla 244 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG por grupo GT.....                          | 343 |
| Tabla 245 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG por grupo GT.....                                      | 343 |
| Tabla 246 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG por grupo GT .....                         | 344 |
| Tabla 247 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG por grupo GT .....                                     | 344 |
| Tabla 248 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG por grupo GT.....                                      | 345 |
| Tabla 249 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG por grupo GT .....                                     | 345 |
| Tabla 250 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de potencia propulsora.....    | 346 |
| Tabla 251 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de potencia propulsora...                  | 347 |
| Tabla 252 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de potencia propulsora.....    | 347 |
| Tabla 253 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de propulsora .....                        | 348 |
| Tabla 254 Toneladas de contaminantes aéreos por kilovatio de potencia instalada para buques LPG..                | 348 |
| Tabla 255 Toneladas de contaminantes aéreos por kilovatio de potencia instalada para buques LNG .                | 349 |
| Tabla 256 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de edad .....                  | 350 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 257 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de edad.....  | 350 |
| Tabla 258 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de edad .....   | 351 |
| Tabla 259 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de edad .....   | 351 |
| Tabla 260 Toneladas de contaminantes aéreos por TPM y grupo de edad para buques LPG .....   | 352 |
| Tabla 261 Toneladas de contaminantes aéreos por toneladas de peso muerto y grupo de edad para buques LNG .....                          | 352 |
| Tabla 262 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según tipo de motor principal .....                               | 353 |
| Tabla 263 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de edad.....  | 353 |
| Tabla 264 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según tipo de motor principal .....                               | 354 |
| Tabla 265 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de edad .....   | 355 |
| Tabla 266 Toneladas de contaminante aéreo por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LPG .....              | 355 |
| Tabla 267 Toneladas de contaminante aéreo por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LNG .....              | 356 |
| Tabla 268 Resultados de la HC flota de gaseros flota en servicio en 2019. ....  | 358 |
| Tabla 269 Contribucion de cada GEI en la HC total de los buques gaseros .....   | 358 |
| Tabla 270 HC de la flota de gaseros según tipo de buque y año de construcción. ....   | 359 |
| Tabla 271 HC por tonelada de peso muerto para cada grupo de edad .....  | 360 |
| Tabla 272 HC de la flota de buques gaseros según su peso muerto. ....   | 360 |
| Tabla 273 HC de la flota de gaseros según tipo de buque y tipo motor. ....  | 361 |
| Tabla 274 HC por kilovatio de potencia propulsora para cada tipo de motor. ....   | 362 |
| Tabla 275 HC según grupo de bandera para la flota de buques gaseros. ....   | 362 |
| Tabla 276 HC por grupo de bandera para la flota de gaseros. ....  | 363 |
| Tabla 277 HE de superficie de bosques de la flota de gaseros en servicio 2019. ....   | 364 |
| Tabla 278 HE de superficie bio-productiva (SBP) global de la flota de gaseros en servicio 2019. ....                                    | 364 |
| Tabla 279 Potencia auxiliar y para la propulsión instalada y velocidad de diseño de la flota de buques LNG según grupos de tamaño. .... | 365 |
| Tabla 280 Potencia auxiliar y para la propulsión instalada y velocidad de diseño de la flota de buques LPG según grupos de tamaño.....  | 365 |
| Tabla 281 Energía auxiliar y propulsora de la flota de gaseros en el año 2019. ....   | 366 |
| Tabla 282 Energía auxiliar y para propulsión anual de la flota de buques LNG según grupos de tamaño. ....                               | 366 |
| Tabla 283 Energía auxiliar y para propulsión anual para buques LPG según grupos de TPM. ....  | 368 |
| Tabla 284 Energía auxiliar y para propulsión anual de buques LNG según su año de construcción.....                                      | 369 |
| Tabla 285 Energía auxiliar y propulsora anual de la flota de buques LPG según su año de construcción. ....                              | 370 |
| Tabla 286 Energía auxiliar y propulsora de la flota de buques LNG según el tipo de motor principal instalado.....                       | 371 |
| Tabla 287 Energía auxiliar y propulsora de la flota de buques LPG según el tipo motor principal .....                                   | 372 |
| Tabla 288 Energía auxiliar y propulsora para la flota de buques LNG según el grupo de bandera de registro. ....                         | 373 |
| Tabla 289 Energía auxiliar y propulsora para la flota de buques LPG según el grupo de bandera de registro. ....                         | 374 |
| Tabla 290 Distribución de combustible agregado para la flota de LNG. ....   | 375 |
| Tabla 291 Distribución de combustible para los buques LNG según su tamaño. ....   | 376 |
| Tabla 292 Distribución de combustible para los buques LNG según su año de construcción. ....  | 376 |
| Tabla 293 Distribución de combustible para los buques LNG según el tipo de motor principal instalado .....                              | 377 |
| Tabla 294 Distribución de combustible para los buques LNG según el grupo de bandera de registro. ...                                    | 378 |
| Tabla 295 EEOI promedio de la flota de buques LPG y LNG.....  | 383 |
| Tabla 296 EEOI para la flota de buques LNG según el peso muerto. ....   | 383 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 297 EEOI para la flota de buques LPG según el peso muerto. ....   | 384 |
| Tabla 298 EEOI para la flota de gaseros según el año de construcción. ....  | 384 |
| Tabla 299 EEOI para la flota de gaseros según el sistema de propulsión. ....  | 384 |
| Tabla 300 Valores AER para buques graneleros y quimiqueros. ....  | 385 |
| Tabla 301 AER para la flota de buques LNG según grupo de peso muerto. ....  | 386 |
| Tabla 302 AER para la flota de buques LPG según grupo de peso muerto. ....  | 386 |
| Tabla 303 AER para la flota de gaseros según su año de construcción. ....   | 387 |
| Tabla 304 AER para la flota de buques gaseros según el sistema de propulsión instalado a bordo. ....  | 387 |
| Tabla 305 Costes de la flota de gaseros en servicio en el año 2019. ....  | 390 |
| Tabla 306 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre la producción mundial. ....   | 391 |
| Tabla 307 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre el VAB mundial ...  | 392 |
| Tabla 308 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre el Empleo mundial .....   | 393 |
| Tabla 309 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre las emisiones de CO <sub>2</sub> mundiales .....  | 394 |
| Tabla 310 Multiplicadores totales de la flota de gaseros sobre los contaminantes CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O, SO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> , CO y NMVOC. .... | 394 |
| Tabla 311 Efectos totales de la flota de gaseros sobre la producción mundial .....  | 395 |
| Tabla 312 Efectos directos e indirectos sobre la producción de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI I .....  | 396 |
| Tabla 313 Efectos directos e indirectos sobre la producción de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI II .....   | 396 |
| Tabla 314 Efectos totales de la flota de gaseros sobre la producción mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI I .....  | 397 |
| Tabla 315 Efectos totales de la flota de gaseros sobre la producción mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI II. ....   | 397 |
| Tabla 316 Efectos directos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI I .....   | 398 |
| Tabla 317 Efectos directos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI II .....  | 398 |
| Tabla 318 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI I .....   | 399 |
| Tabla 319 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI II .....  | 399 |
| Tabla 320 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el VAB mundial. ....   | 400 |
| Tabla 321 Efectos directos e indirectos sobre el VAB de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI I .....   | 401 |
| Tabla 322 Efectos directos e indirectos sobre el VAB de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI II .....  | 401 |
| Tabla 323 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el VAB mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI I. ....   | 402 |
| Tabla 324 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el VAB mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI II. ....  | 402 |
| Tabla 325 Efectos directos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI I .....  | 403 |
| Tabla 326 Efectos directos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI II .....   | 403 |
| Tabla 327 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI I .....  | 404 |
| Tabla 328 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI II .....   | 404 |
| Tabla 329 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el empleo mundial. ....  | 405 |

|   |            |
|---|------------|
| Tabla 330 Efectos directos e indirectos sobre el empleo de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI I.....   | 405        |
| Tabla 331 Efectos directos e indirectos sobre el empleo de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI II.....  | 406        |
| Tabla 332 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el empleo mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI I.....   | 406        |
| Tabla 333 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el empleo mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI II.....  | 407        |
| Tabla 334 Efectos directos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI I.....  | 407        |
| Tabla 335 Efectos directos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI II.....   | 408        |
| Tabla 336 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI I.....  | 408        |
| Tabla 337 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI II.....   | 409        |
| Tabla 338 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O de la flota de gaseros. ....   | 410        |
| Tabla 339 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de SO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> y SO <sub>4</sub> de la flota de gaseros .....  | 410        |
| Tabla 340 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de NO <sub>x</sub> , CO y NMVOC de la flota de gaseros .....   | 411        |
| Tabla 341 Efectos totales sobre los contaminantes CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O, SO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> , CO y NMVOC, según tipo de buque gasero..... | 411        |
| Tabla 342 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CO <sub>2</sub> mundial por grupo de bandera de registro.....   | 412        |
| Tabla 343 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CH <sub>4</sub> mundial por grupo de bandera de registro.....   | 413        |
| Tabla 344 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de N <sub>2</sub> O mundial por grupo de bandera de registro.....  | 414        |
| <i>Tabla 345 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de SO<sub>x</sub> mundial por grupo de bandera de registro. ....</i>  | <i>414</i> |
| Tabla 346 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de NO <sub>x</sub> mundial por grupo de bandera de registro.....   | 415        |
| <i>Tabla 347 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CO mundial por grupo de bandera de registro. ....</i>  | <i>415</i> |
| Tabla 348 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de NMVOC mundial por grupo de bandera de registro.....   | 416        |
| Tabla 349 Factor reducción EEXI para buques Gaseros. ....   | 434        |

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

|  |     |
|--|-----|
| Gráfica 1 Número de publicaciones por año sobre tema “Regulaciones medioambientales” .....   | 32  |
| Gráfica 2 Número de publicaciones por año sobre el tema “Metodología” .....  | 34  |
| Gráfica 3 Número de publicaciones por año sobre el tema “Transporte marítimo de Gaseros” .....   | 35  |
| Gráfica 4 Número de publicaciones por año sobre el tema “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del transporte marítimo” .....   | 36  |
| Gráfica 5 Número de publicaciones agregadas las cuatro temáticas por año .....   | 37  |
| Gráfica 6 Número de publicaciones por país sobre el tema “Regulaciones Medioambientales”. .....  | 38  |
| Gráfica 7 Número de publicaciones por país sobre el tema “Metodología”. .....  | 39  |
| Gráfica 8 Número de publicaciones por país sobre el tema “Transporte Marítimo de Gaseros” .....  | 40  |
| Gráfica 9 Número de publicaciones por país sobre el tema “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo” .....  | 41  |
| Gráfica 10 Número de veces que se tratan cada uno de los subtemas dentro de la temática “Regulaciones Medioambientales” .....  | 44  |
| Gráfica 11 Número de veces que se tratan cada uno de los subtemas dentro de la temática “Metodología” .....  | 45  |
| Gráfica 12 Número de veces que se tratan cada uno de los subtemas dentro de la temática “Transporte Marítimo de Gaseros” .....   | 47  |
| Gráfica 13 Distribución de los subtemas dentro de la temática “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo” .....   | 48  |
| Gráfica 14 Metodologías empleadas en las publicaciones dentro de la temática “Regulaciones Medioambientales” y “Metodología” .....   | 49  |
| Gráfica 15 Metodologías empleadas en las publicaciones dentro de la temática “Transporte Marítimo de Gaseros” y “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo” ..... | 49  |
| Gráfica 16. Evolución de la flota de gaseros .....   | 94  |
| Gráfica 17. Evolución de nuevas construcciones de buques LNG y LPG .....   | 96  |
| Gráfica 18. Evolución de los barcos LNG y LPG en servicio y retirados .....  | 96  |
| Gráfica 19 Relación consumo específico y régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión .....   | 180 |
| Gráfica 20 Relación consumo específico y el régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión .....  | 180 |
| Gráfica 21 Relación consumo específico y régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta y baja presión, combinando ambas tecnologías .....            | 180 |
| Gráfica 22 Consumo específico de combustible piloto y el régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta y baja presión en modo gas. ....              | 181 |
| Gráfica 23 Relación consumo específico y el régimen de carga para motores duales de cuatro tiempos. Modo diésel y Modo gas .....   | 188 |
| Gráfica 24 Relación consumo específico de combustible piloto y el régimen de carga para motores duales de cuatro tiempos, en modo gas. ....  | 188 |
| Gráfica 25 Porcentaje de la potencia instalada empleada para propulsión en buques DFDE según el peso muerto .....  | 191 |
| Gráfica 26 Relación consumo específico de combustible para varios regímenes de carga para plantas de vapor, en modo gas y modo diésel .....  | 193 |
| Gráfica 27 Relación consumo específico de combustible para varios regímenes de carga para plantas de vapor ultra-steam, en modo gas y modo diésel. ....                                | 195 |
| Gráfica 28 Relación consumo específico de vapor varios regímenes de carga para turbo generadores. ....   | 200 |
| Gráfica 29 Relación consumo específico combustible varios regímenes de carga para turbo generadores. ....  | 201 |
| Gráfica 30 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de esloras para buques LPG .....  | 272 |

|  |     |
|--|-----|
| Gráfica 31 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de peso muerto para buques LPG. ....                      | 273 |
| Gráfica 32 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de capacidad de carga para buques LPG. ....               | 274 |
| Gráfica 33 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de arqueo bruto para buques LPG. ....                     | 274 |
| Gráfica 34 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LPG. ....  | 275 |
| Gráfica 35 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de edad para buques LPG. ....                             | 275 |
| Gráfica 36 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada tipo de motor principal para buques LPG. ....                 | 276 |
| Gráfica 37 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada grupo de bandera para buques LPG. ....                        | 276 |
| Gráfica 38 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de esloras para buques LNG. ....                          | 277 |
| Gráfica 39 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de TPM para buques LNG. ....                              | 278 |
| Gráfica 40 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de capacidad de carga para buques LNG. ....               | 278 |
| Gráfica 41 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de arqueo bruto para buques LNG. ....                     | 279 |
| Gráfica 42 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LNG. ....    | 280 |
| Gráfica 43 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada tipo de motor principal para buques LNG. ....                 | 280 |
| Gráfica 44 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada tipo de motor principal para buques LNG. ....                 | 281 |
| Gráfica 45 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada grupo de bandera para buques LNG. ....                        | 281 |
| Gráfica 46 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de esloras para buques LPG. ....                       | 283 |
| Gráfica 47 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LPG. ....                   | 284 |
| Gráfica 48 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LPG. ....            | 284 |
| Gráfica 49 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LPG. ....                  | 285 |
| Gráfica 50 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LPG. .... | 285 |
| Gráfica 51 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de edad para buques LPG. ....                          | 285 |
| Gráfica 52 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LPG. ....              | 286 |
| Gráfica 53 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares para cada grupo de bandera para buques LPG. ....                     | 287 |
| Gráfica 55 Porcentaje de consumo de los motores auxiliares de cada grupo de esloras para buques LNG. ....                                      | 288 |
| Gráfica 56 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LNG. ....                   | 288 |
| Gráfica 57 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LNG. ....                | 289 |

|   |     |
|---|-----|
| Gráfica 58 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LNG. ....                       | 290 |
| Gráfica 59 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LNG. ....      | 290 |
| Gráfica 60 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.....                    | 291 |
| Gráfica 61 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.....                    | 291 |
| Gráfica 62 Porcentaje de consumo de combustible para cada grupo de bandera para buques LNG. ...   | 292 |
| Gráfica 63 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de esloras para buques LPG. ....                       | 293 |
| Gráfica 64 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LPG. ....                   | 294 |
| Gráfica 65 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LPG. ....            | 295 |
| Gráfica 66 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LPG.....                   | 295 |
| Gráfica 67 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LPG. .... | 296 |
| Gráfica 68 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de edad para buques LPG. ....                          | 297 |
| Gráfica 69 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LPG. ....              | 297 |
| Gráfica 70 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada grupo de bandera para buques LPG.....                      | 298 |
| Gráfica 71 Porcentaje de consumo de combustible de calderas auxiliares de cada grupo de esloras para buques LNG.....                            | 299 |
| Gráfica 72 Porcentaje de consumo de las calderas auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LNG. ....                                  | 299 |
| Gráfica 73 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LNG. ....            | 300 |
| Gráfica 74 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LNG.....                   | 300 |
| Gráfica 75 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LNG.....                   | 301 |
| Gráfica 76 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.....               | 302 |
| Gráfica 77 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.....               | 302 |
| Gráfica 78 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada grupo de bandera para buques LNG. ....                     | 303 |
| Gráfica 79 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable consumo anual combustible residual.....                  | 306 |
| Gráfica 80 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable consumo anual combustible destilado .....                | 307 |
| Gráfica 81 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable consumo anual de LNG .....                               | 307 |
| Gráfica 82 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable de emisiones de CO <sub>2</sub> .....                    | 308 |
| Gráfica 83 Sistemas de propulsion a bordo de los buques gaseros.....  | 326 |
| Gráfica 84 Peso muerto promedio y potencia media del motor principal en buques gaseros. ....  | 361 |
| Gráfica 85 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LNG según grupo de peso muerto. ....                        | 367 |

|  |     |
|--|-----|
| Gráfica 86 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LPG según grupo de peso muerto. ....                       | 368 |
| Gráfica 87 Distribución de la energía auxiliar y propulsora para los buques LNG según grupo de edad. ....                                      | 369 |
| Gráfica 88 Distribución de la energía auxiliar y propulsora para los buques LPG según grupo de edad. ....                                      | 370 |
| Gráfica 89 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LNG según tipo de motor principal. ....                    | 372 |
| Gráfica 90 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LPG según tipo de motor principal. ....                    | 373 |
| Gráfica 91 Distribución de la energía auxiliar y propulsora para los buques gaseros según grupo de bandera. ....                               | 374 |
| Gráfica 92 Distribución de los tipos de sistemas de propulsión en la flota de buques LNG según grupo de edad. ....                             | 377 |
| Gráfica 93 Porcentaje de los distintos tipos de sistemas de propulsión instalado en los buques LNG según el grupo de bandera de registro. .... | 379 |
| Gráfica 94 Participación de cada tipo de combustible en el coste total de combustible. ....  | 390 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |     |
|---|-----|
| Figura 1 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Regulaciones Medioambientales" 27                               |     |
| Figura 2 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Metodología" .....  | 29  |
| Figura 3 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Transporte Marítimo (LNG-LPG)".                                 | 30  |
| Figura 4 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Sostenibilidad y Eficiencia del Transporte Marítimo" .....      | 30  |
| Figura 5 División de subtemas de la temática "Regulaciones Medioambientales" .....  | 43  |
| Figura 6 División de subtemas de la temática "Metodología" .....  | 45  |
| Figura 7 División de subtemas de la temática "Transporte Marítimo (LNG-LPG)" .....  | 46  |
| Figura 8 División de subtemas de la temática "Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo" .....                     | 47  |
| Figura 9 Diferencias entre las regulaciones MRV y IMO-DCS. ....   | 73  |
| Figura 10 Comparación del coste de transporte de gas natural por tuberías y por buques .....  | 83  |
| Figura 11 países exportadores - LNG exportado y cuota de mercado. ....  | 85  |
| Figura 12 países exportadores - LNG importado y cuota de mercado .....  | 85  |
| Figura 13 Distribución según el tipo de tanques de carga en buques LNG .....  | 87  |
| Figura 14 Tendencia en sistemas de propulsión de los buques LNG .....   | 89  |
| Figura 15 Relación del consumo de combustible y el régimen de carga del motor .....   | 167 |
| Figura 16 Operación de las calderas auxiliares y recuperadoras. ....  | 172 |
| Figura 17 Diagrama de bloques explicativo del proceso empleado para definir el perfil operacional a partir de datos operacionales ..... | 212 |
| Figura 18 Contaminantes incluidos en el Tercer Estudio de GEI de OMI. ....  | 220 |
| Figura 19 Ciclo del desarrollo sostenible del transporte marítimo. ....   | 236 |
| Figura 20 Esquema de una tabla input-output mundial (TIOM) .....  | 252 |
| Figura 21 Ejemplo de tabla de doble entrada. ....   | 265 |
| Figura 22 Día de sobregiro de la Tierra, evolución desde 1970 hasta 2020. ....  | 363 |
| Figura 23 Distribución de las áreas SECA alrededor del mundo, las actuales y futuras .....  | 380 |
| Figura 24 Rutas de importación y exportación de LNG .....   | 381 |
| Figura 25 Rutas marítimas de buques gaseros durante el 2012. ....   | 381 |
| Figura 26 Estrategia de OMI para descarbonizar el transporte marítimo. ....   | 420 |
| Figura 27 Modelo multiobjetivo genérico de diseño naval. ....   | 422 |
| Figura 28 Nivel competitivo de los buques pre y post EEDI. ....   | 433 |



# **PARTE I. INTRODUCCIÓN GENERAL**



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes

Actualmente, la contaminación atmosférica procedente de los buques es un tema objeto de preocupación y que empieza a generar numerosa normativa legal a nivel mundial, europeo y nacional; así como a desarrollar nuevos conceptos medioambientales, aceptados con carácter general.

Existe un marco legal que regula las emisiones atmosféricas de los buques: el Convenio MARPOL (*Marine Pollution*) 73/78. En su ANEXO VI establece unos límites para ciertos contaminantes atmosféricos tales como óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. Estos límites deben ser estrictamente cumplidos por todos los buques construidos a partir del año 2005. Además de estos límites definidos, el convenio de MARPOL delimita varias zonas alrededor del mundo donde los límites para las emisiones atmosféricas desde los buques son aún más estrictos, estas zonas se conocen como áreas de emisiones controladas (ECAs), además de requerir que los armadores u operadores de buques desarrollen planes de supervisión y mejora de la eficiencia energética de los buques (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP).

El convenio MARPOL consta de seis anexos, de los cuales nos referiremos al Anexo VI, como se ha mencionado anteriormente. Este se centra en la prevención de la contaminación aérea y en la eficiencia energética de los buques. Dicho Anexo entró en vigor el 19/05/2005. En este contexto, la Organización Marítima Internacional (OMI), obliga al uso de unas determinadas calidades de combustibles (contenidos de azufre) y unos diseños de las plantas propulsoras (mejorando las emisiones de óxidos de nitrógeno) que cumplan con los límites establecidos en el Anexo VI del MARPOL para las emisiones aéreas.

Las emisiones atmosféricas provenientes de los buques son originadas principalmente por los procesos de combustión a bordo. Estos procesos combustión generan unos gases de escape los cuales son emitidos a la atmosfera causando la contaminación aérea. Esta contaminación tiene repercusión local y global, de manera que su informe y supervisión de manera transparente es de un gran interés general.

Los contaminantes producidos se pueden clasificar en dos tipos. Los primeros de ellos son los conocidos como gases de efecto invernadero (GEI), causantes del calentamiento global, cuyo principal componente es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Los impactos medioambientales de dichos gases se pueden medir mediante la huella de carbono y/o la huella ecológica. Los otros tipos de contaminantes son conocidos como “contaminantes aéreos”, y causan un impacto localizado en la zona donde se emiten, y son los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno y partículas sólidas, principalmente.

De acuerdo con lo indicado, en el presente trabajo pretendemos analizar la sostenibilidad socioeconómica y medioambiental del sector transporte marítimo mundial en buques gaseros.

En tal sentido, además de la regulación medioambiental mencionada anteriormente, en esta tesis se va a calcular la huella de carbono la flota de gaseros a partir de las emisiones directas producidas por cada uno de los buques. La huella de carbono ayudara a cuantificar el impacto ambiental generado por la actividad de la flota.

Para la evaluación de la sostenibilidad del transporte marítimo que operan en el sector del transporte de gas, se determinará la huella ecológica como un indicador que analizará la superficie biológicamente productiva necesaria para absorber las emisiones generadas por la actividad. La huella ecológica es, por tanto, definida como “la superficie de tierra productiva o ecosistema acuático necesario para mantener el consumo de recursos y energía, así como para absorber los residuos producidos por una determinada población humana o economía, considerando la tecnología existente, independientemente de en qué parte del planeta está situada esa superficie”. La huella ecológica está reconocida internacionalmente como un indicador de sostenibilidad de la actividad sujeta a estudio.

El conocimiento de la eficiencia energética de los buques (N) que configuran una flota (F) en diferentes grupos (G) o niveles espaciales (naviera, país, región o a nivel global), permitiría determinar la participación de dichos buques en la huella de carbono y la huella ecológica, en los diferentes niveles de análisis indicado.

Por medio de la determinación de qué buques son más eficientes, será posible resaltar cuales son las operaciones y/o medios técnicos que las hacen más eficaces. Identificando estas medidas empleadas, éstas podrían ser extrapoladas a un nivel más general pudiendo colaborar con un transporte global más sostenible.

La determinación periódica de la huella de carbono y ecológica, permitirá conocer la evolución, positiva o negativa, de la flota en el desarrollo sostenible de su actividad.

Evaluando la huella de carbono de los buques sujetos a estudio, se hará al mismo tiempo, un inventario de emisiones. Este consistirá en la recopilación de información sobre la contaminación atmosférica producida por la explotación comercial de los buques durante un año en concreto. Se estimarán sus emisiones y se elaborará una base de datos con estos resultados, con la finalidad de tener un conocimiento exhaustivo del origen, cuantía y evolución temporal de las emisiones atmosféricas. De esta manera, los armadores podrían observar el rendimiento de los distintos medios tanto operacionales (*slow steaming, just in-time, virtual arrival, etc.*) como técnicos (EGR, SCR, modificaciones en los motores, etc.) ejecutados en los buques; y a su vez, tener una clara idea de la eficacia de las tecnologías aplicadas a bordo.

En dicho contexto, el proyecto de investigación que se presenta pretende analizar la sostenibilidad socioeconómica y medioambiental de la flota mundial de gaseros a través del análisis socioeconómico del sector (costes de explotación y empleo), de la eficiencia energética y de la huella ecológica y de carbono.

Atendiendo al marco legal internacional, ha habido diferentes convenciones y firma de tratados para el control de emisiones atmosféricas hasta llegar a la ejecución de una normativa puramente marítima (MARPOL). Algunos de estos tratados y convenios fueron:

- Convención de Viena para la Protección de la Capa de Ozono, de 1985
- "Protocolo de Montreal" relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono aprobado en Montreal el 16 de septiembre de 1987 y enmendado el 29 de junio de 1990
- Las disposiciones de la resolución 44/206 de la Asamblea General, de 22 de diciembre de 1989, relativa a los posibles efectos adversos del ascenso del nivel del mar sobre las islas y las zonas costeras, especialmente las zonas costeras bajas, y las disposiciones pertinentes de la resolución 44/172 de la Asamblea General, de 19 de diciembre de 1989, relativa a la ejecución del Plan de Acción para combatir la desertificación
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, aprobada en Nueva York el 9 de mayo de 1992.
- Protocolo de Kioto de la convección marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, 11 diciembre 1997.

Refiriéndonos estrictamente al ámbito marítimo, tal y como se ha mencionado anteriormente, el MARPOL es un acrónimo que hace referencia al convenio internacional para prevenir la contaminación de los buques, y a su vez, se encarga de la eficiencia energética de los buques. La conferencia internacional sobre contaminación del mar, 1973, convocada por la OMI y celebrada del 8 de octubre al 2 de noviembre de 1973, aprobó el convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques.

El texto del convenio se actualiza de forma periódica, introduciendo especificaciones más restrictivas que afectan a la construcción y al manejo de los buques creando un avance significativo en la preservación de los mares como así lo han demostrado numerosos estudios llevados a cabo desde su implantación.

El convenio también fue modificado por el protocolo de 1997, mediante el cual se aprobó un sexto anexo. Cabe observar que el comité de protección del medio marino (MEPC), en su 56º período de sesiones, decidió que, cuando se hiciera referencia al convenio y a sus anexos en conjunto, debería utilizarse el nombre "Convenio MARPOL" en vez de "MARPOL 73/78", ya que este último no incluye el anexo VI.

El convenio MARPOL contiene reglas aplicables a todas las fuentes posibles de contaminación que proviene de los barcos y es importante saber que sus prescripciones no son sólo aplicables a los buques mercantes, sino que muchas de ellas también obligan a la náutica de recreo, ya que su ámbito de aplicación se extiende hacia todo tipo de embarcaciones que operen en el medio marino.

A fecha de este trabajo, la más reciente normativa internacional fue adoptada en diciembre de 2015 en la Convención del Cambio Climático de París (COP 21). Reconociendo la necesidad

de una respuesta progresiva y eficaz a la amenaza apremiante del cambio climático, sobre la base de los mejores conocimientos científicos disponibles.

Por otro lado, el concepto de sostenibilidad de una actividad se puede decir que tiene su inicio en "La Conferencia de Naciones Unidas sobre medio ambiente humano" celebrada en Estocolmo 1972, creando el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP). A raíz de este acontecimiento, se comenzó a hacer hincapié en la necesidad de nuevos métodos para afrontar los problemas ambientales, reconociendo la necesidad de un nuevo modelo de desarrollo que tuviera en cuenta las cuestiones de sostenibilidad.

La problemática medioambiental tuvo un importante acontecimiento en la crisis económica de 1973. Se hizo tangible el problema de la sostenibilidad medioambiental y social a través de un incremento muy pronunciado del precio del petróleo, siendo este un recurso natural del cual depende en gran medida los países desarrollados. Este hecho influyó en que los organismos internacionales continuaran prestando cierta atención a la relación entre crecimiento económico y medio ambiente.

En 1983, la Organización de Naciones Unidas (UN) crea la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo (WCED por sus siglas en inglés), con la finalidad de establecer estrategias ambientales a largo plazo para conseguir un desarrollo económico racional en el año 2000 (Brundtland, 1987).

El trabajo de la WCED culmina en 1987 con la publicación de un informe final, el denominado "Informe Brundtland", en el que se adopta por primera vez una expresión, "*sustainable development*", que se convertirá en un paradigma en lo que se refiere al tratamiento de las cuestiones ambientales.

De acuerdo con todo lo indicado sobre contaminación y desarrollo económico sostenible, a efectos del presente trabajo, planteamos como sostenibilidad socioeconómica de la flota mundial de gaseros, el nivel de actividad de esta que permita conciliar los objetivos mundiales de producción con los de contaminación.

### **Estado Actual de los Conocimientos Científicos - Técnicos**

Actualmente el sistema MARPOL VI, está ampliamente establecido en el sector marítimo, aplicado y aceptado por las compañías navieras.

La utilización de combustibles más destilados con menor contenido de azufre, así como la utilización de nuevos combustibles tales como el gas natural licuado (LNG), etileno o metanol, empiezan a ser tomados en cuenta por los armadores para cumplir con los límites especificados por el MARPOL. Los límites establecidos por el MARPOL VI en cuanto a la calidad del combustible (referente al contenido de azufre en él) vienen especificados en la Regla 23 - Óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y partículas. Los límites de óxidos de nitrógeno son definidos en la regla 19.

Para la evaluación de la eficiencia energética de los buques existe el SEEMP y sus posteriores enmiendas, donde se establece que el informe de todos los consumos de combustibles en los buques se haga de manera periódica y transparente, siendo una práctica normal en las compañías navieras. Esto permite controlar y supervisar cómo están siendo operados buques con el objetivo de mantener la flota en unos niveles óptimos de eficiencia, atendiendo a términos de consumo de combustible, cantidad de mercancía transportada y distancia navegada, intentando que la flota desarrolle su actividad de manera eficiente y sostenible.

Esta recopilación de datos de consumos de los buques por parte de los armadores está siendo objeto de regulación y estudio a nivel global. Debido a ello, la OMI ha determinado que todos los buques cuyo tamaño sea de 5.000 GT y superior deberá reportar el consumo de combustible por viaje y anualmente.

En la misma línea, la Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y la Decisión no 406/2009/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativo al seguimiento, notificación y verificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el transporte marítimo; dice que los buques con un tamaño superior a 5.000 toneladas de arqueo bruto (GT) deberán informar del consumo total de combustible a bordo de los buques, diferenciando la cantidad de cada combustible usado, informando de la cantidad de carga transportada (toneladas, número de contenedores, coches, etc.) y distancia navegada por viaje. Esto queda reflejado gracias al indicador conocido como "Índice Operacional de Eficiencia Energética" (EEOI, por sus siglas en inglés). Con la Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo se deberá registrar e informar por parte de todos los buques que naveguen entre puertos europeos, que lleguen a un puerto europeo desde un puerto de fuera de la unión y de los barcos que salgan de un puerto europeo hacia un puerto de fuera de la Unión Europea. Esta legislación está vigente desde el 1 de enero de 2018. También es importante hacer mención de que países, tales como China e India, han aceptado usar una regulación nacional idéntica a "La Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo" aplicado a sus regiones. Es de esperar que esta medida se extienda de manera global en un futuro próximo.

Respecto a la percepción de la importancia de hacer un transporte sostenible, por un lado, se ha desarrollado cierta legislación sobre este tema, que en algunos casos se trata de legislación concreta en materia medioambiental, que requiere que las compañías informen sobre las cuestiones relacionadas con la sostenibilidad de sus actividades.

Otro tema importante es la necesidad de una mayor transparencia y compromiso por parte de las empresas con el medio ambiente, estos aspectos forman parte del valor de la empresa.

Debido a esto, son necesarios instrumentos que permitan mostrar los resultados en esta materia. Tal y como señalan el "*Global Reporting Initiative*" (Singhal et al., 2016) "la transparencia sobre la sostenibilidad de las actividades de las organizaciones interesa a las partes implicadas, incluyendo empresas, trabajadores, las ONG, inversores, y otros".

En este contexto, se buscan nuevas herramientas para gestionar los beneficios y riesgos y proteger las marcas, percatándose de que la responsabilidad social permite diferenciar a las compañías, lo que contribuye a que sean más productivas y competitivas (Carneiro Caneda, C., 2002): se considera que la gestión de la sostenibilidad desde una óptica proactiva tiene repercusiones directas y positivas en la competitividad del negocio (Schaltegger *et al.*, 2006).

## 1.2. Objetivo del Proyecto

El objetivo general de este trabajo de investigación es analizar los aspectos socioeconómicos y medioambientales de la flota mundial de buques gaseros.

Para lograr este objetivo general, se requiere de la realización de los siguientes objetivos específicos:

- 1) Analizar el estado de implantación y grado de cumplimiento de los acuerdos internacionales relativos a las emisiones atmosféricas de los buques mercantes.
- 2) Calcular el consumo de combustible y emisiones de los buques gaseros, durante la navegación, tiempo de espera, maniobra de atraque y durante la estancia del buque en puerto, de acuerdo con el método propuesto por OMI en el Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero.
- 3) Desarrollar un modelo propio para buques gaseros para el cálculo del consumo de combustible y emisiones que mejore la propuesta de OMI en el Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero, considerando por separado las particularidades de buques LNG y LPG.
- 4) Crear una base de datos con los consumos de combustibles de los buques LNG y LPG
- 5) Crear una base de datos con las emisiones atmosféricas y aéreas de los buques LNG y LPG
- 6) Evaluar los indicadores de eficiencia energética operacional de la flota de gaseros, de acuerdo con las regulaciones existentes
- 7) Analizar el impacto ambiental de la flota de LPG según su bandera de registro, tamaño, edad y tipo de motor por medio del análisis de la huella de carbono y de la huella ecológica.
- 8) Analizar el impacto ambiental de la flota de LNG según su bandera de registro, tamaño, edad y tipo de sistema de propulsión por medio del análisis de la huella de carbono y de la huella ecológica.
- 9) Analizar los impactos socioeconómicos y medioambientales de la flota de buques gaseros a partir de una metodología híbrida input-output.

### 1.3. Plan de Trabajo

El trabajo de investigación se desarrolla partiendo de un análisis cualitativo y cuantitativo del estado del arte actual sobre los temas que se tratan en esta tesis.

La segunda parte incluye un análisis del marco político-legal vigente a nivel global y también específico del transporte marítimo, desde la perspectiva de las emisiones atmosféricas. Además, se explica de manera generalizada el transporte marítimo de buques gaseros, las características más importantes del mercado de LNG y LPG, así como las particularidades más determinantes de los buques LNG y LPG.

En esta segunda parte se analiza de manera muy desagregada la estructura de la flota de buques gaseros según sean buques LNG o LPG, así como un estudio de la evolución de ambas flotas a lo largo de los años. El análisis de la estructura se hace por grupos de banderas, de edades, de esloras, de toneladas de peso muerto (TPM), toneladas de arqueo bruto (GT), capacidad de carga, de potencia propulsora instalada y según el tipo de sistema de propulsión instalado a bordo.

A continuación, en la tercera parte de la tesis, se explican las metodologías y los datos empleados en este trabajo de investigación. Los datos sobre las características constructivas de los buques han sido recopilados desde la base de datos de IHS Fairplay. También, se han realizado encuestas a compañías navieras para conseguir datos financieros que han sido empleados para obtener los costes operativos tanto de buques LNG como LPG; por otro lado, se ha recogido información de la base de datos Thetis de la Agencia de Seguridad Marítima Europea, los cuales han sido un punto de partida para saber cuáles son los índices de eficiencia energética reportados por los buques gaseros; datos técnicos sobre diseños de sistemas de propulsión y auxiliares han sido también recibidos por parte de los fabricantes a los que se han contactado (MAN B&W, Wartsila, Mitsubishi, entre otros) los cuales son vitales para el modelo desarrollado en esta tesis para el cálculo del consumo de combustible de los buques gaseros; y por último, se realizó un proyecto con varias navieras para la recopilación de datos de alta frecuencia de varios sensores instalados en buques LNG y LPG en servicio, siendo esenciales para establecer perfiles operacionales más precisos al manejar datos reales medidos por sensores a bordo.

En este tercer apartado, respecto a las metodologías, el primer paso ha sido el cálculo de los consumos de combustible, aceites lubricantes y refrigerantes para cada uno de los buques gaseros activos en 2019, de ahí, por medio de la aplicación de factores de emisión, se calculan las emisiones atmosféricas. El método elegido ha sido la metodología basada en la actividad (bottom-up) desarrollado principalmente por OMI en su Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero (en adelante se hará referencia a OMI I). Sin embargo, una vez que esta metodología fue estudiada y aplicada, se percibieron áreas en las que tal metodología podía ser mejorada por lo que en esta tesis se ha desarrollado una nueva metodología la cual mejora la propuesta por OMI, dando lugar a la metodología explicada en este trabajo de investigación

denominada OMI II. En OMI II se ha desarrollado un modelo específico para buques LNG y para buques LPG, considerando sus particularidades tecnológicas y operacionales, siendo un método más desagregado y exhaustivo que el propuesto por OMI I, aportando mejoras para el cálculo de combustible según el tipo de gasero, según tamaños y cubriendo todos los tipos de motores propulsores y de energía auxiliar instalados a bordo. Además, el método OMI II permite, al estar más desagregado, añadir un tipo de emisión que no estaba considerado en OMI I, el carbón negro, el cual tiene un potencial de calentamiento global significativo.

Una vez calculado los consumos de combustible aplicando el método de OMI I y OMI II, se comparan los resultados con datos reales medidos a bordo, y se observa que los valores calculados por OMI II son más próximos a la realidad.

En esta tercera parte, también se muestran las distintas metodologías aplicadas para calcular el aceite lubricante de cilindros en motores de combustión interna y refrigerantes a bordo, los cuales impactan en la cantidad de emisiones producidas por los buques. Además, se explican las metodologías para calcular la huella de carbono, huella ecológica, indicadores de eficiencia energética de los buques gaseros y cerrando esta parte, la metodología input-output híbrida para calcular el impacto socioeconómico y medioambiental de los buques gaseros.

La siguiente parte, la cuarta, muestra los resultados obtenidos al aplicar las diferentes metodologías, donde nos encontraremos los resultados anuales de los distintos combustibles empleados a bordo, emisiones atmosféricas, contaminantes aéreos, huella de carbono, huella ecológica, indicadores de eficiencia energética, impactos sobre la producción, valor añadido bruto, empleo y emisiones mundiales producidas por la actividad de la flota de buques gaseros.

Seguidamente se muestra una parte de extensiones, donde se expone el tema de la descarbonización del transporte marítimo abordando las medidas técnicas, operacionales y políticas que se están aplicando o que se aplicarán en un futuro.

Por últimos se detallan las conclusiones definidas en este trabajo de investigación y las fuentes consultadas.

## 2. ESTADO DEL ARTE

En este trabajo de investigación se ha realizado la revisión del estado del arte mediante un estudio de las publicaciones disponibles de artículos registrados en las diferentes bases de datos desde el año 2000 hasta el año 2020. Las bases de datos consultadas han sido Scopus y Web of Science (WoS).

Las búsquedas se han realizado a través de la utilización de una serie de palabras claves que son representativas de cada uno de los temas que conforman el presente trabajo de investigación. Los temas que componen este trabajo de investigación son:

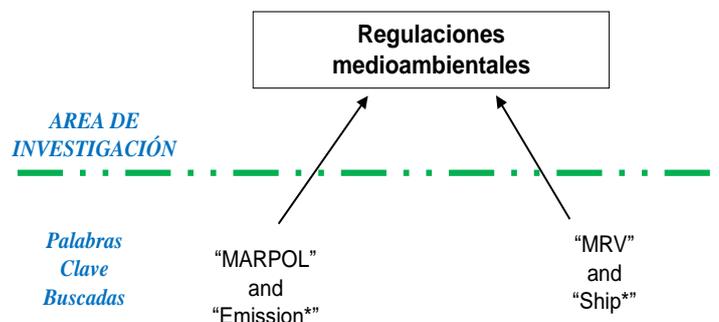
- Regulaciones medioambientales del sector marítimo sobre emisiones atmosféricas
- Metodología para el cálculo de emisiones atmosféricas, eficiencia y sostenibilidad del transporte marítimo
- Transporte marítimo del sector Gaseiros (buques LNG y LPG)
- Eficiencia Energética y Sostenibilidad del transporte marítimo

Una vez realizadas las consultas en WoS y en Scopus, los resultados para cada uno de los temas buscados han sido cruzados, creándose una base de datos conjunta para cada una de las temáticas tratadas. Para mantener la validez de los análisis que se realiza en esta revisión bibliográfica, las bases de datos son depuradas con el fin de eliminar artículos repetidos que invaliden un análisis preciso.

Por otra parte, se aplican dos filtros adicionales. Uno, el idioma en el que están escritos los artículos, sólo considerándose las publicaciones en inglés o en español. Y el segundo filtro es que sólo se consideran los artículos que traten del sector marítimo.

La primera búsqueda realizada ha sido sobre el estado del arte de las regulaciones medioambientales sobre emisiones atmosféricas en el sector marítimo.

Figura 1 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Regulaciones Medioambientales"



Fuente: Elaboración propia

Para realizar la búsqueda bibliográfica sobre el tema de *Regulaciones medioambientales*, se han hecho dos búsquedas de palabras clave como muestra la Figura 1.

La palabra clave “MARPOL” se ha elegido porque es el Convenio internacional para prevenir la contaminación de los buques, (MARPOL) es el principal convenio internacional que versa sobre la prevención de la contaminación del medio marino de los buques a causa de factores de funcionamiento o accidentales. MARPOL tiene seis anexos, sólo uno de ellos (el anexo VI) se encarga de las emisiones atmosféricas, es por ellos por lo que se buscó también como palabra clave “emission\*”, con el fin de acotar los resultados sólo a lo concerniente a la contaminación atmosférica. El anexo VI del MARPOL también engloba las medidas obligatorias para todos los armadores y operadores de buques para elevar la eficiencia energética en las operaciones de estos.

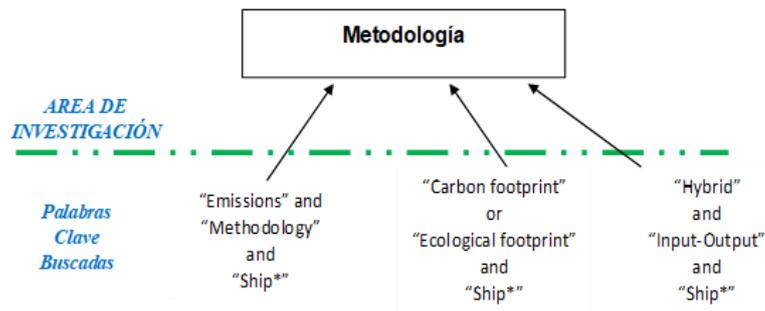
Sin embargo, los resultados obtenidos con estas palabras claves no incluyen las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que estas emisiones se mantienen desregularizadas. Aunque recientemente, este anexo ha sido revisado para que, a partir de 2019, se obligatorio para todos los buques con arqueo bruto superior a las 5.000 toneladas, a informar de las emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por los procesos de combustión a bordo. Esto se conoce como la normativa IMO-DCS (*IMO Data Collection System*).

Además de esta revisión del anexo VI del MARPOL, entró en vigor el reglamento 2015/757 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2015, sobre el seguimiento, la información y la verificación de las emisiones de dióxido de carbono del transporte marítimo, y por el que se modifica la Directiva 2009/16 / CE. Este reglamento es conocido como MRV (*Monitoring Reporting and Verification*) y a partir del 1 de enero de 2018, se comienza el primer año de monitorización y reporte emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques operando en aguas de los Estados Miembros de EU/EEA. Por ello se ha realizado una búsqueda con las palabras clave “MRV” and “Ship\*” con el objetivo de cubrir esta legislación marítima que tiene como objeto las emisiones de CO<sub>2</sub> y está actualmente vigente. Al cruzar ambas búsquedas que componen el análisis de las *Regulaciones medioambientales*, se obtiene un total de 161 artículos sobre el estado de las regulaciones medioambientales dentro del sector del transporte marítimo. Un total de 42 artículos han sido eliminados al cruzar las bases de datos de WoS y Scopus al ser artículos duplicados.

La segunda búsqueda que se realiza es sobre el estado del arte acerca de las metodologías que se van a considerar en la tesis. Esto lleva a la realización de tres búsquedas de palabras como se muestra en la Figura 2.

Un total de 425 artículos se han escaneado para completar el estado bibliográfico de la Metodología. Al cruzar las búsquedas realizadas en WoS y en Scopus, fueron eliminados 156 artículos que estaban repetidos en ambas bases de datos.

Figura 2 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Metodología"



Fuente: Elaboración propia

La primera tarea para llegar al objetivo principal de la tesis, así como a los objetivos específicos, es el cálculo de las emisiones atmosféricas de la flota de gaseros, por lo tanto, la primera búsqueda realizada ha ido enfocada a conocer las metodologías existentes aplicadas en el ámbito marítimo, para el cálculo de las emisiones de los buques, con este fin se han combinado en la primera búsqueda las palabras clave "emissions", "methodology" y "ship\*".

Es importante mencionar que esta búsqueda da resultados que son muy heterogéneos y en bastantes casos, los artículos obtenidos como resultado de la utilización de estas palabras clave, son estudios no enfocados al cálculo de emisiones, sino que se refieren a métodos o soluciones que pueden afectar positiva o negativamente a la emisión de contaminantes a la atmósfera, pero al tener incluida la palabra "emissions" en el tema y como palabras clave en el artículo, WoS y Scopus los muestran como resultados.

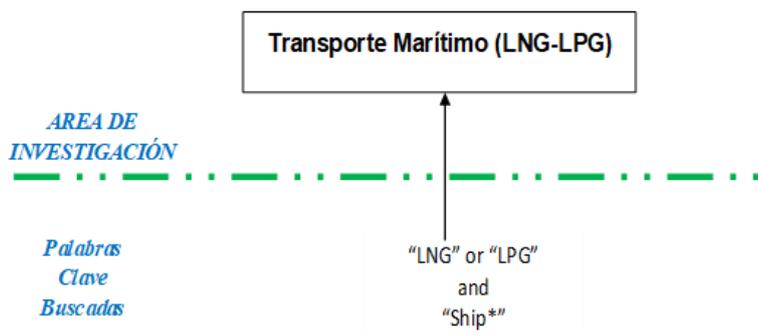
También hay que mencionar que se encontraron trabajos de investigación donde se aplicase la metodología basada en el análisis macroeconómico a partir de tablas input-output para definir el impacto socioeconómico y medioambiental del transporte marítimo.

Las siguientes dos búsquedas de palabras claves son específicas sobre la eficiencia y sostenibilidad de la actividad de la flota de buques a través de la huella de carbono y ecológica de la flota, esto se consigue utilizando las palabras clave "carbon footprint", "ecological footprint" y combinando las palabras clave "hybrid" e "input-output", todos los resultados restringidos a aquellos artículos que traten sobre buques o transporte marítimo.

La búsqueda de palabras clave para analizar el estado bibliográfico sobre el transporte marítimo de LNG y LPG dio como resultado 1298 artículos que han sido analizados. Las palabras clave empleadas en esta búsqueda fueron las que se muestran en la Figura 3.

Al cruzar las búsquedas sobre este tema, realizadas en WoS y en Scopus, se encuentran 263 artículos repetidos, que, por lo tanto, han sido eliminados.

Figura 3 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Transporte Marítimo (LNG-LPG)".



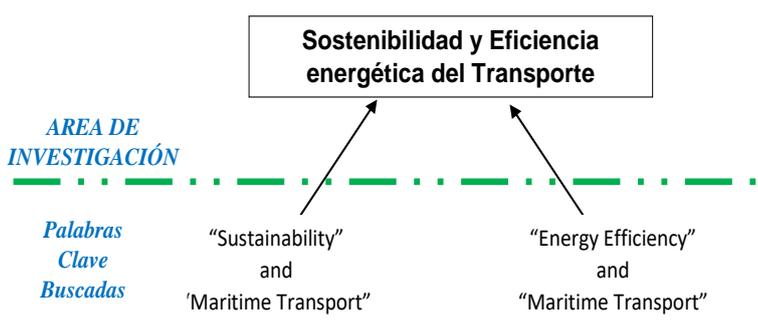
Fuente: Elaboración propia

En esta tesis, nos centramos en el segmento específico del transporte marítimo de los gaseros. El concepto de "Gasero" engloba a todo buque capaz de transportar gases licuados a granel ya sea gas natural licuado (LNG) o gases licuados derivados del petróleo (LPG).

Con esta búsqueda se ha conseguido tener la visión global de lo que está siendo investigado por la comunidad científica acerca de este tipo de buques desde varios enfoques, tales como el diseño estructural y de sistemas de carga para los buques gaseros, aspectos económicos, técnicos y operacionales de esta flota, así como su eficiencia y sostenibilidad dentro del conjunto del sector transporte marítimo.

Por último, se ha realizado un análisis bibliográfico para conocer el estado del arte sobre la sostenibilidad y la eficiencia energética del transporte marítimo. Dos búsquedas de palabras clave se han realizado para esto: "Sustainability" y "Energy Efficiency", acotándolo sólo al sector del transporte marítimo usando la palabra "Maritime Transport" en las dos búsquedas.

Figura 4 Palabras clave utilizadas para analizar el estado del arte de "Sostenibilidad y Eficiencia energética del Transporte Marítimo"



Fuente: Elaboración propia

Un total de 142 artículos han sido analizados aplicando las palabras clave mostradas en la Figura 4. Al cruzar las búsquedas, 34 artículos se repiten, por lo que estos artículos repetidos son eliminados de la base de datos.

Para las cuatro búsquedas realizadas en esta revisión bibliográfica, se han escaneado un total de 2026 artículos, habiendo 56 artículos repetidos al cruzar las diferentes búsquedas. Estos

artículos repetidos son contados sólo una vez en el análisis cuantitativo que se va a realizar, manteniendo la validez del análisis cuantitativo que se realizará más adelante.

Una vez realizadas las búsquedas en la base de datos y su posterior filtrado para evitar artículos repetidos, se procede a la creación de un registro de todos los artículos, con los siguientes campos:

- Título del artículo.
- Año de publicación.
- Revista donde se publica.
- Autor.
- País.
- Metodología del estudio.
- Temática que se trata en el artículo

Todos los datos obtenidos permiten hacer una revisión bibliográfica del estado del arte con dos connotaciones diferentes, por un lado, se hará una revisión cuantitativa relacionando el número de publicaciones por año de publicaciones, así como el país donde se realizó el trabajo. Y, por otro lado, una revisión cualitativa centrado en la metodología de los estudios y en la temática de estos.

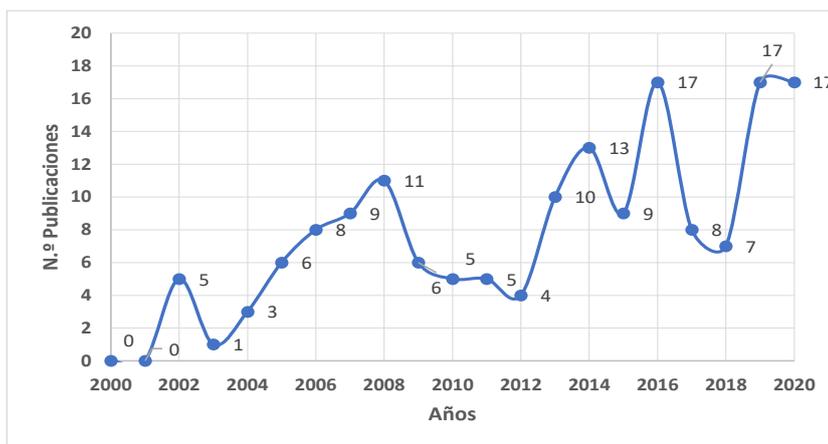
## **2.1. Análisis Cuantitativo**

El primer dato cuantitativo analizado, se refiere al número de publicaciones de cada uno de los temas por año de publicación. Un segundo análisis cuantitativo se realiza mostrando la distribución de los artículos por países para cada una de las temáticas tratadas en este trabajo de investigación.

Como se ha explicado anteriormente, para el análisis de cada uno de los cuatro temas que conforman este trabajo, se han buscado una serie de palabras clave representativas, consiguiendo realizar una exhaustiva bibliografía de cada uno de los cuatro temas que son parte de esta tesis.

La primera búsqueda de palabras clave que se ha realizado ha sido sobre el tema de las “Regulaciones medioambientales”, centrada en las emisiones atmosféricas del transporte marítimo.

Gráfica 1 Número de publicaciones por año sobre tema "Regulaciones medioambientales"



Fuente: Elaboración propia

Tradicionalmente, el transporte marítimo ha sido un sector desregularizado en cuanto al control de emisiones atmosféricas. Sin embargo, en los últimos años, la preocupación sobre este tema ha aumentado a nivel internacional y se han puesto medios y esfuerzos para desarrollar una serie de medidas que ayuden a regularizar y por lo tanto mitigar el impacto medioambiental de la actividad.

Esto se hace principalmente a través del Convenio Internacional para prevenir la contaminación de los buques (MARPOL 73/78), que consta de seis anexos. Cada uno de estos anexos regula un área de la polución causada por los buques, legislando desde la prevención de contaminación por hidrocarburos (Anexo I) hasta las reglas para prevenir la contaminación atmosférica ocasionada por los buques (Anexo VI).

En este trabajo de investigación nos hemos centrado únicamente en las regulaciones de existentes en la temática de emisiones atmosféricas (anexo VI).

Desde que se realizó el anexo VI del MARPOL en 2005 y sus posteriores enmiendas, se produce un aumento en el número de publicaciones relativas a "regulaciones medioambientales" de las emisiones atmosféricas. Algunas de las enmiendas realizadas en el anexo VI del MARPOL se mencionan en la Tabla 1.

Se observa que a partir del año 2005 comienza a producirse un incremento en la cantidad de publicaciones sobre las emisiones atmosféricas en el contexto del transporte marítimo, coincidiendo con la entrada en vigor del Anexo VI del MARPOL (año 2005) y con el aumento de normativas y legislaciones aprobadas tanto por la OMI (MARPOL VI) como por el Parlamento Europeo (la Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo, del 29 de abril de 2015), alcanzándose la mayor producción de artículos bajo esta temática en 2016, 2019 y 2020 con 17 publicaciones cada uno de estos años.

También es remarcable que la escasez de publicaciones antes de 2005 (sólo 9 de 161 publicaciones encontradas), poniendo de manifiesto la falta de interés en legislar las emisiones

atmosféricas del transporte marítimo siendo, hasta no hace mucho tiempo, un sector de transporte desregularizado en materia de emisiones atmosféricas, especialmente en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Tabla 1 Revisiones más significativas del anexo VI de MARPOL

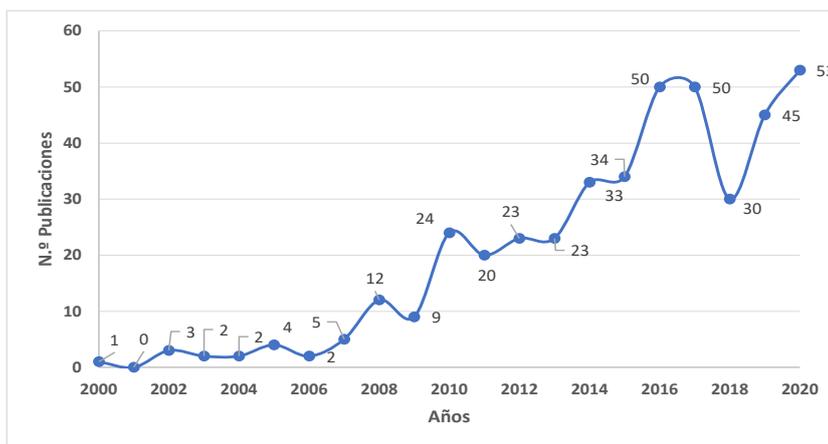
| Resolución   | Título   | Entrada en vigor     |
|--------------|--|----------------------|
| MEPC.176(58) | Enmiendas al Anexo del Protocolo de 1977 para enmendar el Convenio internacional para prevenir la contaminación por los buques, 1973, modificado por el Protocolo de 1978 relativo   | 1 de julio 2010      |
| MEPC.190(60) | Zona de control de las emisiones de Norteamérica   | 1 de agosto de 2011  |
| MEPC.194(61) | Modelo revisado del suplemento del Certificado Internacional de Prevención de la Contaminación Atmosférica (IAPP)  | 1 de febrero de 2012 |
| MEPC.202(62) | Enmiendas a las reglas 13 y 14 y al apéndice VII del Anexo VI revisado del convenio MARPOL   | 1 de enero de 2013   |
| MEPC.203(62) | Inclusión de reglas sobre la eficiencia energética de los buques en el Anexo VI del Convenio MARPOL  | 1 de enero de 2013   |
| MEPC.217(63) | Enmiendas al Anexo VI del convenio MARPOL y al código técnico sobre los NO <sub>x</sub> , 2008   | 1 de agosto de 2013  |
| MEPC.258(67) | Enmiendas a las reglas 2 y 13 y al Suplemento del Certificado IAPP   | 1 de marzo de 2016   |
| MEPC.278(70) | Inclusión del sistema para la colección de consumos de combustible y sus emisiones de CO <sub>2</sub> asociadas como parte del anexo VI de MARPOL  | 1 de enero de 2019   |
| MEPC.280(70) | Limites contenidos de azufre de los combustibles marinos   | 1 de enero de 2019   |
| MEPC.286(71) | Enmienda al MARPOL anexo VI (se designan nuevas zonas de control de emisiones de NO <sub>x</sub> en el mar Báltico y en el mar del Norte para el Nivel III de control. Se detalla la información se incluirá en la nota de entrega de combustible) | 1 de enero 2019      |
| MEPC.291(71) | Aspectos adicionales en el código técnico de NO <sub>x</sub> de 2008 respecto a los requisitos particulares relacionados con los motores Diesel con sistemas reducción catalítica selectiva (SCR)  | 1 de enero 2018      |

Fuente: Elaboración propia

La siguiente área de investigación en la cual se ha analizado el estado del arte ha sido sobre la *Metodología* seleccionada en la tesis para el análisis de la eficiencia y sostenibilidad del transporte marítimo. Tres búsquedas componen el tema “Metodología”:

- Metodología para calcular las emisiones atmosféricas
- Metodología para calcular la huella de carbono y ecológica
- Metodología híbrido input-output aplicada al sector marítimo

Gráfica 2 Número de publicaciones por año sobre el tema "Metodología"



Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 2 muestra que hay un mayor crecimiento en la producción de artículos bajo esta temática a partir de 2010. La evolución en cuanto al número de artículos publicados para este tema va en paralelo con la producción científica que se ve en la Gráfica 1, sobre Regulaciones medioambientales.

El máximo valor de artículos agrupados en la temática de Metodología se alcanza en el año 2020 con 53 artículos. También se observa la escasa producción de artículos sobre este tema antes del año 2010, habiendo sólo 40 publicaciones de 425 encontradas (9%).

La siguiente búsqueda temática que se ha realizado ha sido sobre la literatura disponible sobre el transporte marítimo de buques gaseros.

Aunque como se ha mencionado anteriormente, el periodo analizado ha sido desde el año 2000 hasta el 2020. A modo experimental, se hizo una búsqueda adicional para este tema sin limitar el periodo de tiempo, con el fin de ver si había más literatura disponible, en especial sobre los buques LPG debido al escaso número de publicaciones encontradas. Se confirmó con esta búsqueda adicional que este medio transporte no ha tenido una producción científica muy significativa hasta comienzos del siglo XXI. Es por ello por lo que hasta el año 2000, cruzando los resultados de WoS y Scopus, sólo se obtienen al aplicar las palabras clave "LNG" and / or "LPG" and "Ship\*" 174 artículos de un total de 1470 artículos sin restricciones de tiempo, es decir sólo un 12% del total de artículos sobre transporte marítimo de gaseros salieron antes del 2000.

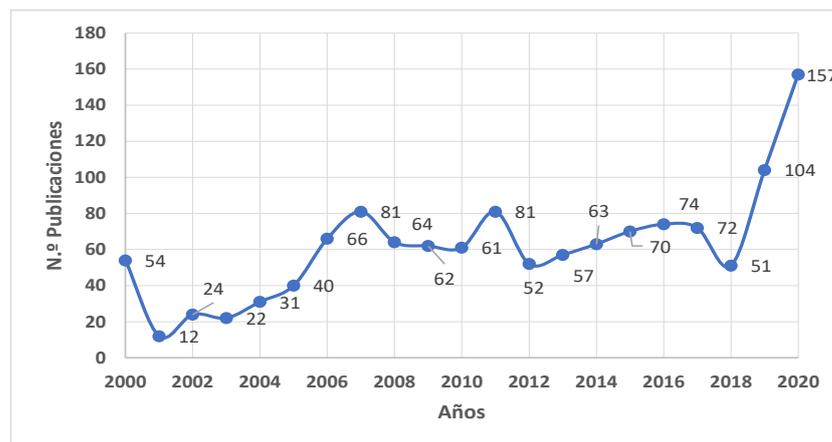
Es interesante este hecho, ya que el primer buque que se diseñó y entró en servicio para el transporte a granel de gases licuados data del año 1931 para el transporte de Gas Licuado del Petróleo (buque "Agnita") y de 1959 para el transporte de Gas Natural Licuado (buque "Methane Pioneer") (Gray, 2004), Como se puede ver, los buques LNG y LPG fueron conceptos que empezaron a emplearse en la primera mitad del siglo XX.

Sin embargo, no es hasta 1977 cuando se empiezan a producir artículos científicos sobre gaseros (fecha del primer artículo que recoge WoS aplicando las palabras clave "LNG" and/or

“LPG” and “Ship\*”). Esto, quizás, esté relacionado con el hecho de que el transporte de gases licuados a granel no era un mercado demasiado importante hasta finales del siglo XX comparado con otros segmentos del transporte marítimo tales como el transporte de graneles sólidos y crudo. También, una posible explicación a la escasez de publicaciones científicas sobre estos dos tipos de barcos hasta 1977 cuando aparecen los primeros artículos, es que la comunidad científica no vio de interés este tipo de transporte marítimo hasta que comenzaron a ocurrir los primeros incidentes y accidentes. Esto ya sucedió en el sector marítimo anteriormente cuando el SOLAS (acrónimo inglés de “Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida en el Mar”) fue adoptado en 1914 como respuesta al hundimiento del Titanic. En las décadas de los 60 y 70 se registran los primeros incidentes de buques gaseros. Un buque del tipo LPG, llamado “Mundogas Oslo” fue el primer accidente registrado en el año 1966, mientras que el primer gran accidente registrado de un buque LNG le ocurrió al buque “LNG Libra” en 1979 (Cabioch, F et al., 2009)

Centrándonos en el periodo temporal definido para el análisis del estado del arte, se puede ver en la Gráfica 13, el número de publicaciones por año de esta temática.

Gráfica 3 Número de publicaciones por año sobre el tema “Transporte marítimo de Gaseros”



Fuente: Elaboración propia

La mayor parte de las publicaciones encontradas en esta búsqueda tratan sobre buques metaneros o sobre el uso de LNG como combustible (1239 artículos), mientras que sólo 104 artículos tratan sobre buques LPG o sobre el uso de LPG como combustible. La importancia del mercado de LNG mediante su transporte por medio de los buques metaneros está en continuo crecimiento desde la década de los 70, siendo desde mediados de la década de los 90 donde la preocupación por las emisiones atmosféricas a nivel global creció, especialmente con la adopción del Protocolo de Kioto en 1997, que puso de manifiesto la necesidad de encontrar combustibles menos contaminantes y tecnologías que redujesen la huella de la actividad humana en el medio ambiente.

Los países empiezan a ver la necesidad de cambiar sus modelos energéticos, los cuales se basaban principalmente en combustibles como el carbón y el petróleo, con el fin de descarbonizar

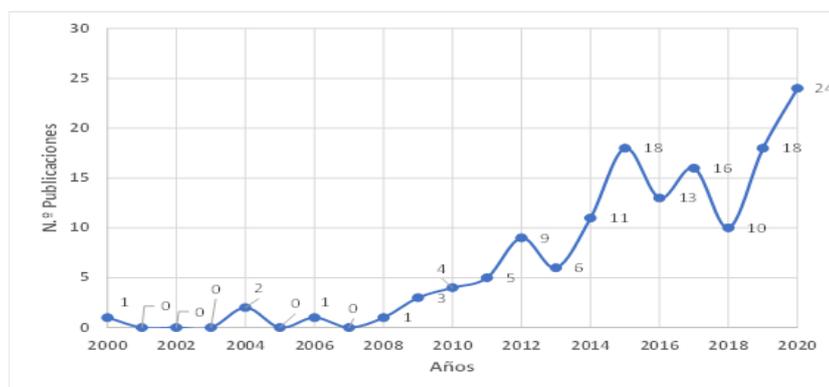
las actividades industriales, y no sólo esto, sino también, mejorar la calidad del aire en las regiones que soportan el peso industrial de los países. A este respecto, la opción de usar como combustible el LNG empieza a ser considerada como una alternativa adecuada, dado su menor emisión de CO<sub>2</sub> y prácticamente nula emisión de contaminantes dañinos para la salud humana, tales como NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y PM. Esto queda reflejado en la demanda global de LNG, que mantiene una creciente tendencia año tras año, alzándose como un campo más atractivo para los investigadores con el fin de mejorar el conocimiento existente de este sector, teniendo un gran crecimiento en producción artículos científicos desde 2005 hasta la actualidad, produciéndose el 86% de las publicaciones encontradas. Para esta búsqueda, la máxima producción de artículos científicos se alcanza en 2020 con 157 artículos sobre buques gaseros.

La cuarta y última búsqueda de palabras claves que se ha realizado fue con el objetivo de conocer la bibliografía sobre *Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo*.

Dos búsquedas componen el área de investigación “Sostenibilidad y Eficiencia energética del transporte marítimo”:

- Eficiencia Energética del transporte marítimo
- Sostenibilidad del transporte marítimo

Gráfica 4 Número de publicaciones por año sobre el tema “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del transporte marítimo”.



Fuente: Elaboración propia

A raíz de la aparición de nuevas regulaciones tales como la Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo o como el MARPOL VI y sus posteriores enmiendas, se pone de manifiesto la necesidad de realizar un transporte más eficiente y sostenible. Esto es principalmente por tres motivos que se mencionan a continuación:

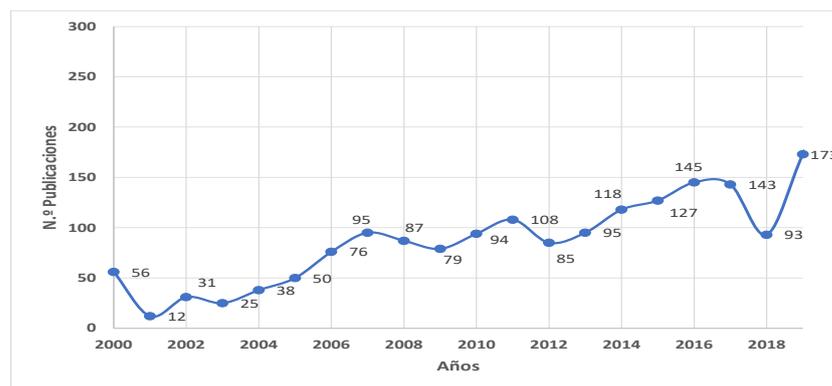
- **Motivos legales:** cumplir con las regulaciones vigentes y así evitar sanciones
- **Motivos económicos:** Conseguir un transporte más eficiente que permita incrementar los beneficios de las partes involucradas en el transporte marítimo

- **Motivos sociales / medioambientales:** gran parte del transporte marítimo se desarrolla cerca de las costas de los países, por lo que las emisiones de los buques tienen un impacto directo sobre la salud de los ciudadanos por lo que debe ser controlado y en la mayor parte posible, minimizado su efecto sobre la salud de los habitantes.

El crecimiento en cuanto al número de publicaciones científicas respecto a la eficiencia energética y la sostenibilidad del transporte marítimo se aprecia a partir del año 2008, ya que, con anterioridad a este año, sólo 4 publicaciones fueron encontradas. Este aumento en el número de publicaciones se acentúa a partir del 2012 coincidiendo con las enmiendas del MARPOL VI durante el “*Marine Environment Protection Committee*” (MEPC 62) de 2011, donde fueron adoptadas las enmiendas de las reglas 13 (Óxidos de nitrógeno) y 14 (Óxidos de azufre y materia particulada) del MARPOL VI, incluyendo también reglas sobre eficiencia energética de los buques y, añadiendo enmiendas al código técnico sobre las emisiones de NO<sub>x</sub>. Estas enmiendas hacen que la búsqueda de nuevas soluciones tanto a nivel de diseño, alternativas tecnológicas y optimización operacional sean necesarias con el fin de estar dentro del marco legal que dispone MARPOL. Siendo el año 2020 cuando salieron mayor número de publicaciones, con 24 artículos.

Agregando las cuatro búsquedas realizadas, contabilizando sólo una vez aquellos artículos que se hayan obtenido como resultado en más de una búsqueda, se observa que el mayor número de artículos son publicados en el año 2020, con 173 publicaciones, observándose una tendencia creciente desde 2004, con excepción de una caída en el número de publicaciones producido en el año 2018.

Gráfica 5 Número de publicaciones agregadas las cuatro temáticas por año.

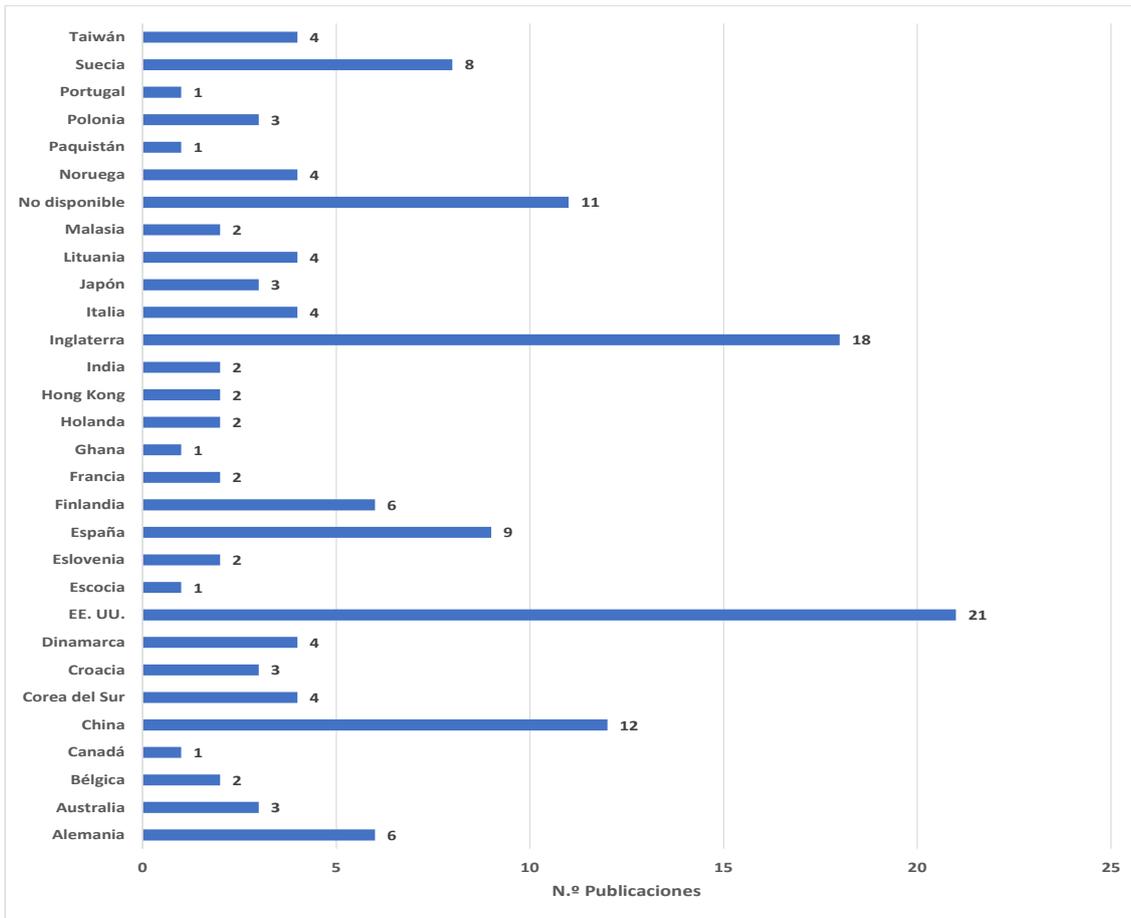


Fuente: Elaboración propia

Para concluir con el análisis cuantitativo, se han analizado el número de publicaciones por país, con el fin de ver qué país está siendo más prolífico en la producción científica de cada uno de los cuatro temas tratados. Hay dos denominaciones que deben ser aclaradas. “Varios”, se considera aquellos estudios donde los autores son de más de un país. “No disponible”, donde no está detallado quien es el autor/es.

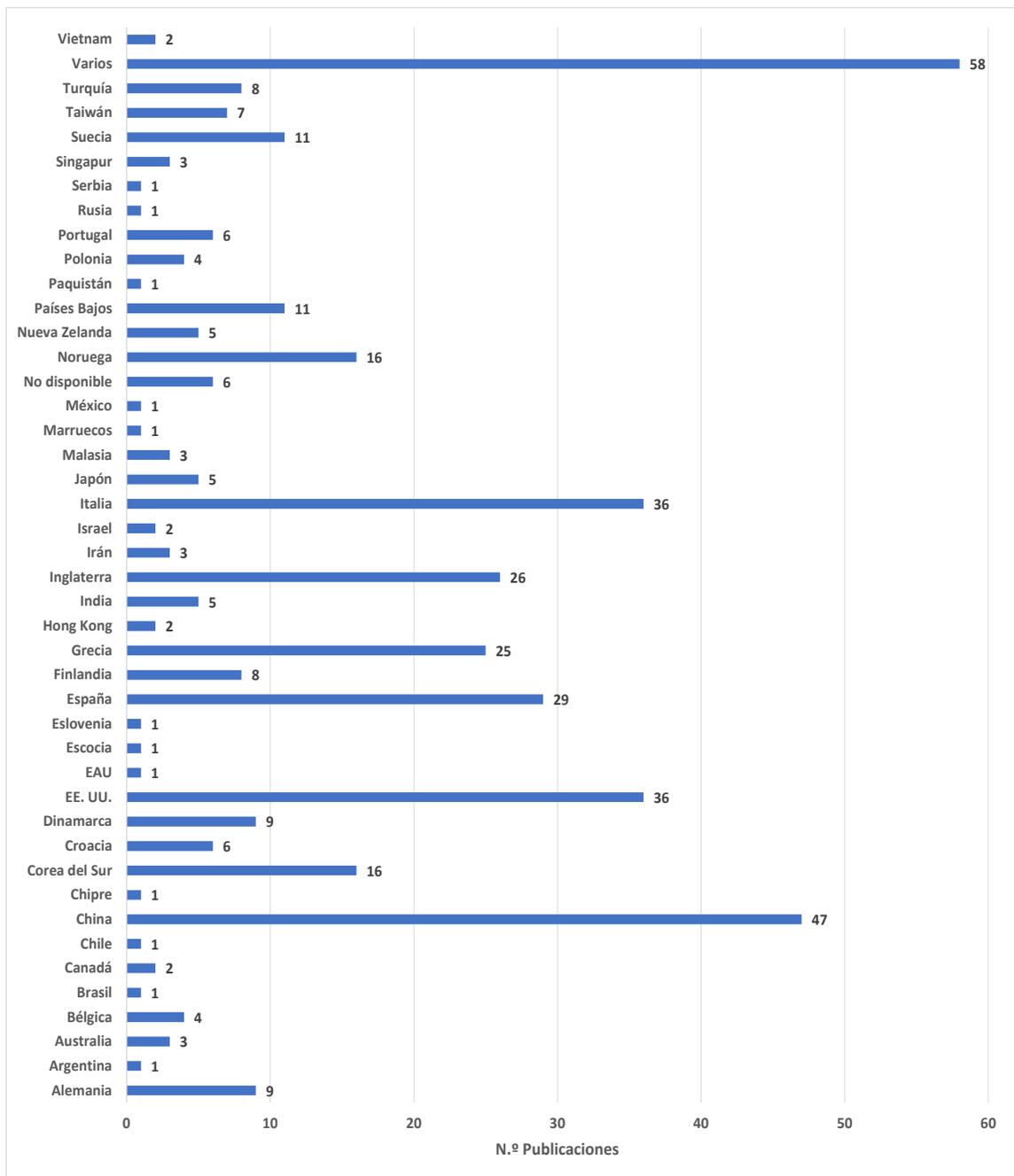
Estados Unidos es el país más prolífico en publicaciones científicas dentro del tema de “Regulaciones Medioambientales”, “Varios” en el tema “Metodología”, “No disponible” es la mayor productora de publicaciones científicas dentro del tema “Transporte Marítimo de Gaseros”, aunque si consideramos sólo aquellos artículos donde la autoría es conocida, el mayor productor de publicaciones bajo esta temática es Estados Unidos. Finalmente, para el tema de “Eficiencia Energética y Sostenibilidad de Transporte Marítimo”, es España y “Varios” son los que producen el mayor número de publicaciones, tal y como muestran las gráficas 6, 7, 8 y 9.

Gráfica 6 Número de publicaciones por país sobre el tema “Regulaciones Medioambientales”.



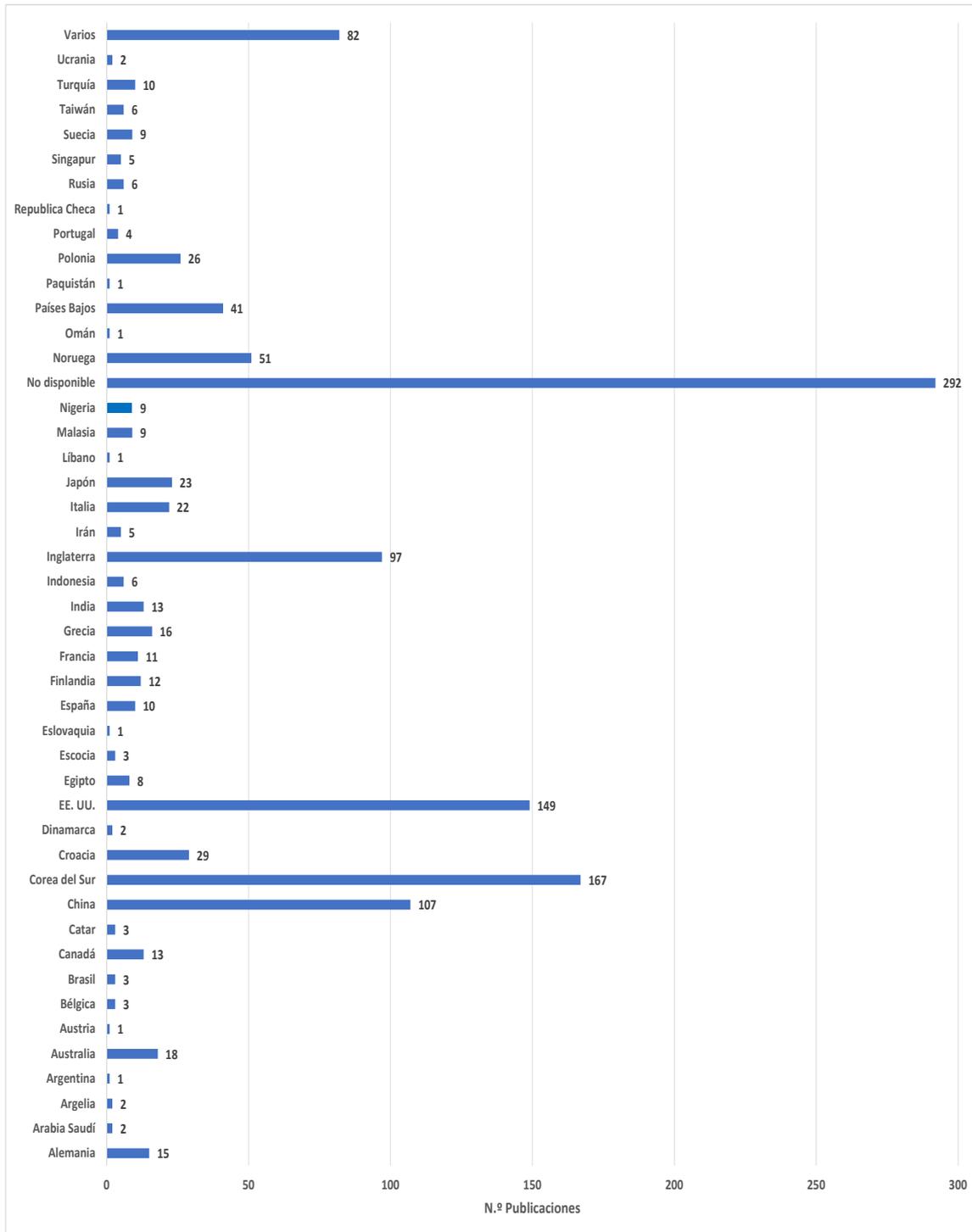
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7 Número de publicaciones por país sobre el tema "Metodología".



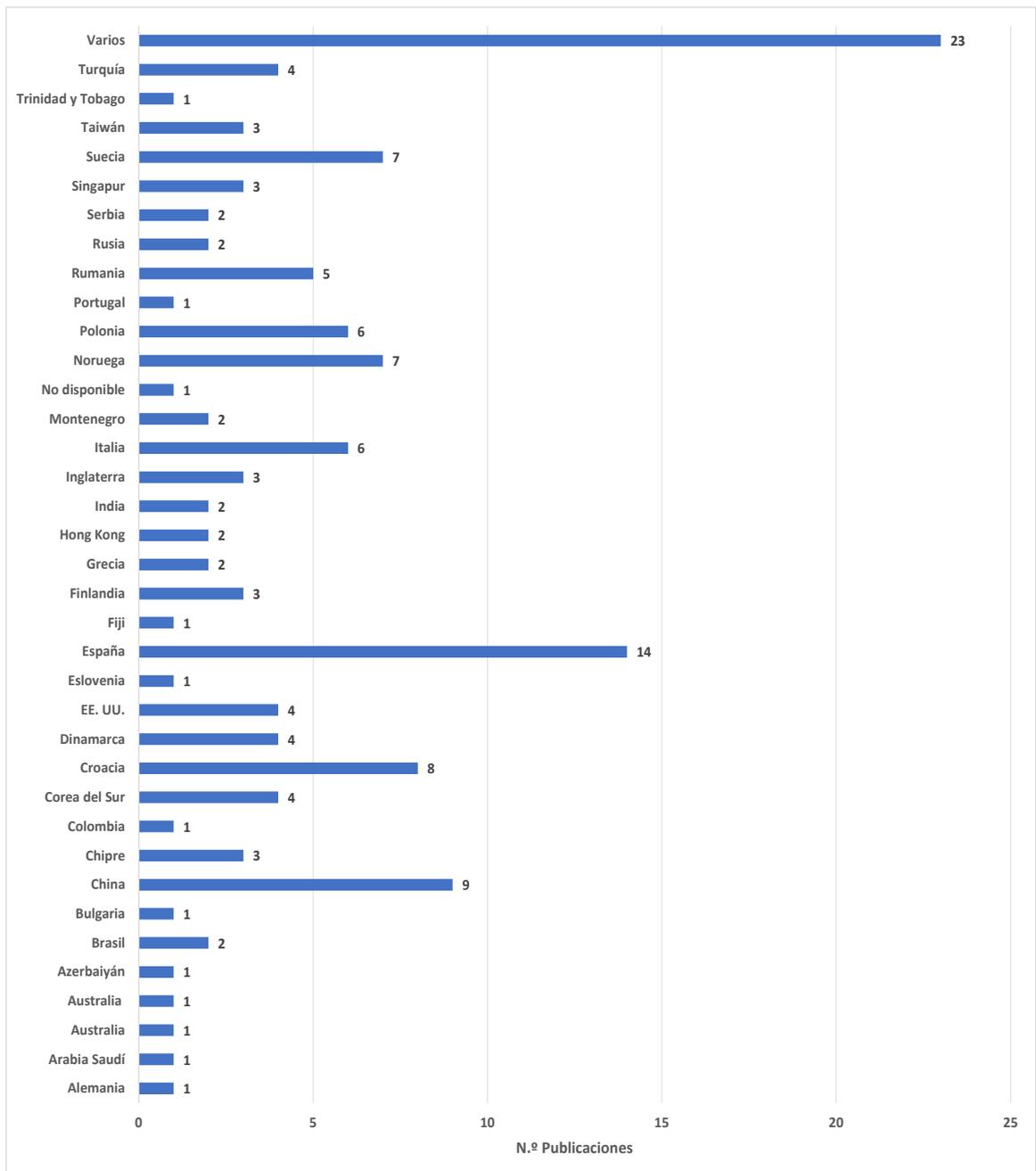
Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8 Número de publicaciones por país sobre el tema "Transporte Marítimo de Gaseros"



Fuente: Elaboración propia

Gráfica 9 Número de publicaciones por país sobre el tema "Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo"



Fuente: Elaboración propia

Una vez cuantificado por separado cada una de las búsquedas, se presenta los resultados globales una vez se han unido cada uno de los temas escaneados.

Tabla 2 Número de publicaciones totales por país.

| <i>País</i> | <i>N.º Publicaciones</i> | <i>País</i> | <i>N.º Publicaciones</i> | <i>País</i>  | <i>N.º Publicaciones</i> |
|-------------|--------------------------|-------------|--------------------------|--------------|--------------------------|
| Alemania    | 29                       | Escocia     | 5                        | Montenegro   | 2                        |
| A.S.        | 3                        | Eslovaquia  | 1                        | Nigeria      | 9                        |
| Argelia     | 2                        | Eslovenia   | 3                        | ND           | 307                      |
| Argentina   | 2                        | España      | 56                       | Noruega      | 76                       |
| Australia   | 26                       | Fiji        | 1                        | NZ           | 5                        |
| Austria     | 1                        | Finlandia   | 29                       | Omán         | 1                        |
| Azerbaiyán  | 1                        | Francia     | 13                       | Países Bajos | 54                       |
| Bélgica     | 8                        | Ghana       | 1                        | Paquistán    | 3                        |
| Brasil      | 6                        | Grecia      | 41                       | Polonia      | 38                       |
| Bulgaria    | 1                        | HK          | 6                        | Portugal     | 12                       |
| Canadá      | 16                       | India       | 22                       | RC           | 1                        |
| Catar       | 3                        | Indonesia   | 5                        | Rumania      | 5                        |
| Chile       | 1                        | Inglaterra  | 140                      | Rusia        | 9                        |
| China       | 171                      | Irán        | 8                        | Serbia       | 2                        |
| Chipre      | 4                        | Israel      | 2                        | Singapur     | 11                       |
| Colombia    | 1                        | Italia      | 62                       | Suecia       | 31                       |
| CS          | 188                      | Japón       | 31                       | Taiwán       | 19                       |
| Croacia     | 44                       | Líbano      | 1                        | TT           | 1                        |
| Dinamarca   | 16                       | Lituania    | 4                        | Turquía      | 26                       |
| EE. UU.     | 205                      | Malasia     | 14                       | Ucrania      | 2                        |
| Egipto      | 8                        | Marruecos   | 1                        | Varios       | 168                      |
| EAU         | 1                        | México      | 1                        | Vietnam      | 4                        |

Fuente: Elaboración propia

**A.S.:** Arabia Saudí, **CS:** Corea del Sur, **RC:** Republica Checa, **HK:** Hong Kong, **TT:** Trinidad y Tobago, **EAU:** Emiratos Árabes Unidos, **EE. UU.:** Estados Unidos de Norteamérica, **ND:** No Disponible, **NZ:** Nueva Zelanda

## 2.2. Análisis Cualitativo

Una vez realizado el análisis cuantitativo del estado del arte, se ha realizado un análisis cualitativo. Por lo tanto, para establecer un análisis cualitativo sobre las publicaciones registradas en WoS a partir de las palabras clave empleadas, se han definido la metodología empleada y el contenido de cada uno de los artículos escaneados.

Los distintos métodos contemplados en este trabajo son:

**Estudio empírico.** - Son aquellas investigaciones basadas en la experimentación o la observación (evidencias).

**Estudio Teórico.** - También conocido como Marco Teórico, se define como el conjunto de ideas, procedimientos y teorías que sirven a un investigador para llevar a término su actividad, a partir de las cuales se investiga una disciplina determinada.

**Encuesta.** - Conjunto de preguntas tipificadas dirigidas a una muestra representativa de grupos sociales, para averiguar estados de opinión o conocer otras cuestiones que les afectan.

**Proyecto.** - Se han definido así las publicaciones que describen la ejecución de una obra completa. En este caso y puesto que nos encontramos en el ámbito de las ingenierías navales, marinas y/o marítimas, son aquellas publicaciones que hacen mención del desarrollo de nuevos sistemas a bordo (sistemas de propulsión, sistemas de carga, etc.) así como programas que se hayan realizado obteniéndose de ello herramientas útiles para este trabajo de investigación,

como por ejemplo desarrollo de tecnologías para la medición directa de emisiones atmosféricas causadas por los buques.

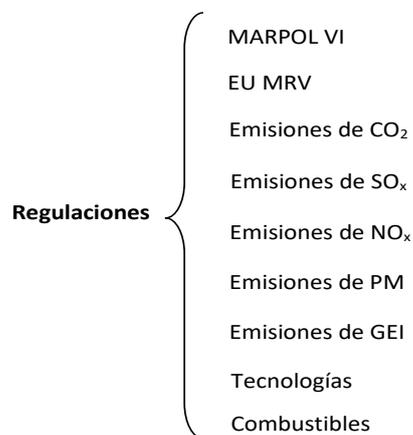
**Action research.** - Se define como el método científico y el conocimiento adquirido basado en la observación cuidadosa y la medición de la realidad objetiva que existe "allá afuera", tal y como describe John W. Creswell en su libro "Research Design". Este método se basa en medidas cuantitativas y se destacan las relaciones entre las variables. La teoría puede y debe ser generada a través de la práctica.

**Comercial.** - Un sexto tipo se incluye en este análisis para aquellos artículos encontrados, que son puramente comerciales. Entendiéndose esto como los artículos donde se trata la aplicación de medidas o tecnologías concretas, promocionando al fabricante en cuestión, sin ningún rigor científico, manteniéndose pues, en un marco de promoción comercial.

Por otro lado, la búsqueda bibliografía de este trabajo arroja resultados muy heterogéneos, por lo que ha sido necesario que dentro de cada una de las cuatro temáticas que se han definido, se hayan establecido una división conceptual en base a una serie de subtemas que se tratan en cada publicación.

Hay que decir que muchos de los artículos que se han estudiado engloban varias temáticas a la vez ya que tratan varios subtemas a la vez.

Figura 5 División de subtemas de la temática "Regulaciones Medioambientales"

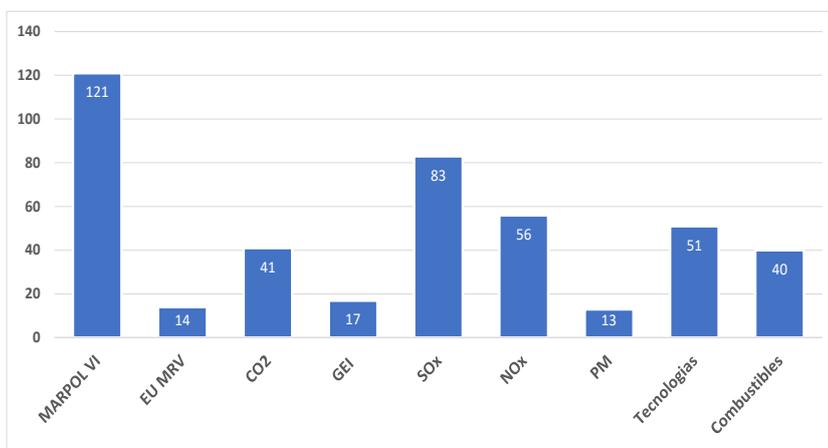


Fuente: Elaboración propia

Los subtemas en los que ha sido dividido la temática de Regulaciones medioambientales incluyen las dos principales regulaciones vigentes en temas de emisiones atmosféricas del transporte marítimo, estos son el Anexo VI del MARPOL y la regulación para el monitoreo, reporte y verificación de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques que operan en aguas de los estados miembros de la Unión Europea, conocida como EU MRV.

Al analizar las publicaciones resultantes, fue necesario incluir otros subtemas que eran recurrentes en muchos artículos, siendo estos los relativos a las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, PM y Gases de Efecto Invernadero (GEI). Además, bastantes artículos tratan sobre las regulaciones vigentes y futuras desde un punto técnico (nuevas tecnologías tales como los scrubbers, sistemas alternativos de generación de electricidad a bordo, etc.) así como de la posibilidad de emplear combustibles alternativos para cumplir con las regulaciones medioambientales, por lo que se incluyeron estos subtemas relativos a combustibles y tecnologías.

Gráfica 10 Número de veces que se tratan cada uno de los subtemas dentro de la temática “Regulaciones Medioambientales”



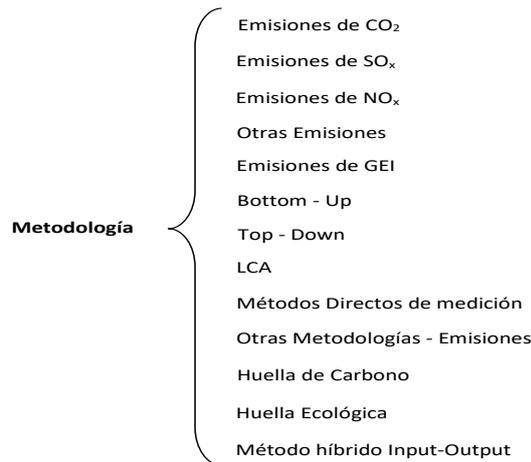
Fuente: Elaboración propia

En los 161 artículos analizados, el subtema predominante es el MARPOL VI apareciendo en 121 de las publicaciones (75% de las publicaciones), siendo las emisiones de SO<sub>x</sub> el segundo subtema más repetido siendo tratado en 83 publicaciones (52% de los artículos), tal y como se ve en la Gráfica 10.

El siguiente tema que se ha analizado, siguiendo el mismo orden que en el análisis cuantitativo es la *Metodología*. Como muestra la Figura 6, se han hecho trece subtemas para conocer los trabajos de investigación sobre el cálculo de emisiones, cálculo de la huella de carbono y ecológica y sobre la metodología híbrida Input-Output en el sector marítimo.

La gran mayoría de subtemas son relativos a metodologías para el cálculo de emisiones atmosféricas. A este respecto, predominan los artículos que emplean las metodologías Bottom-up, Top-down, Life Cycle Assessment (LCA) y mediciones directas de las emisiones a través de dispositivos tecnológicos (sensores, satélites, etc.). Otras metodologías son mencionadas para calcular las emisiones atmosféricas tales como modelos predictivos, etc. Todas ellas agrupadas bajo el subtema “Otras metodologías – Emisiones”.

Figura 6 División de subtemas de la temática “Metodología”

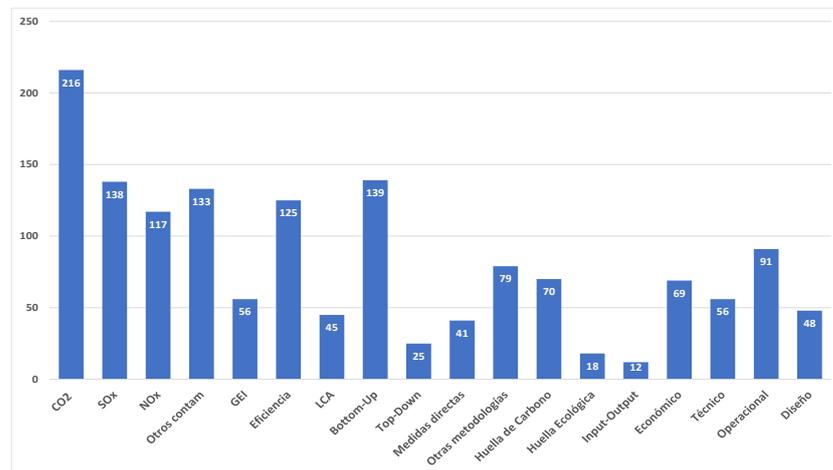


Fuente: Elaboración propia

Las otras tres metodologías que se van a emplear en el trabajo de investigación son las necesarias para el cálculo de la huella de carbono, ecológica y modelo híbrido Input-Output, cada una de estas con un subtema específico.

Los otros subtemas que componen esta búsqueda son clasificados según la emisión/es que se analizan en los estudios, siendo estas las emisiones de CO<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, emisiones de GEI y Otras emisiones (PM, VOC, emisiones de carbón negro/BC, etc).

Gráfica 11 Número de veces que se tratan cada uno de los subtemas dentro de la temática “Metodología”



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a metodologías para el cálculo de emisiones, aquellos estudios que tratan sobre el cálculo o estimación de las emisiones de CO<sub>2</sub> son los que aparece en un mayor número de publicaciones, concretamente un 216 de los artículos (51%) tratan de este tema.

Los contaminantes agrupados bajo el título “SO<sub>x</sub>” (óxidos de azufre) y bajo “otros contaminantes” hacen referencia a contaminantes tales como PM, VOC, BC y otros aerosoles y

compuestos que son emitidos a la atmosfera a través de los gases de escape; con 138 y 133 publicaciones respectivamente son los siguientes contaminantes más analizados. Sobre las metodologías empleadas en las publicaciones, 139 artículos emplean la metodología bottom-up o basados en la actividad.

Las otras tres metodologías que se analizan en este trabajo para el cálculo de la huella de carbono, huella ecológica y método híbrido Input-Output aparecen en un 70, 18 y 12 publicaciones respectivamente (16,5%, 4% y 3%).

En cuanto la temática de “Transporte Marítimo (LNG-LPG)”, se han incluido 9 subtemas como muestra la Figura 7.

Figura 7 División de subtemas de la temática “Transporte Marítimo (LNG-LPG)”



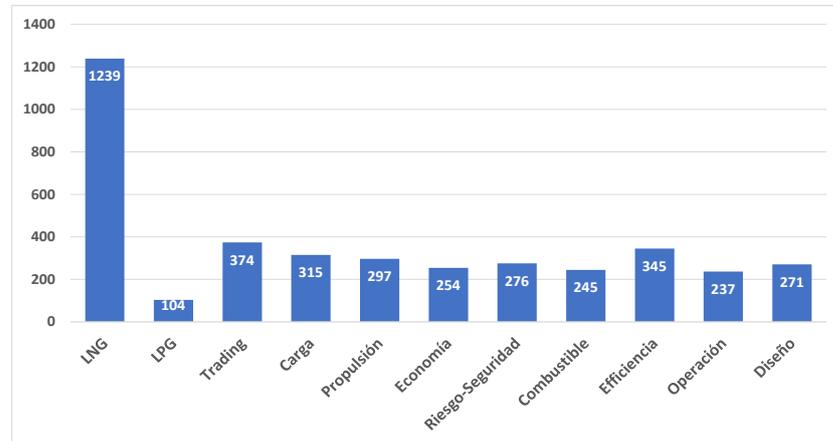
Fuente: Elaboración propia

Los dos primeros subtemas son obvios ya que son los dos tipos de buques objeto de análisis de este trabajo de investigación. Sin embargo, muchos resultados que se obtiene al buscar por “LNG” o “LPG” no son relativos a los tipos de buque sino al uso de estos como combustible, por lo tanto, un subtema de “combustibles” ha sido añadido. Los demás subtemas tratan sobre el trading de estos buques, temas económicos del mercado de LNG y LPG, la eficiencia energética de estos buques, así como su operación. Luego desde un punto de vista más técnico, nos encontramos con subtemas específicos sobre el diseño y construcción de estos buques englobados bajo el subtema “Diseño”, particularidades del diseño y operación de los sistemas de carga de los buques, sobre los sistemas de propulsión, y dado la complejidad operativa de este segmento del transporte marítimo, es bastante recurrente el subtema de seguridad y riesgos, principalmente asociados a las operaciones y requerimientos especiales de la carga transportada. Por último, todos los temas sobre maniobras, manejo de cargas, terminales portuarias, así como plantas productoras o receptoras de carga, se agrupan bajo el subtema “Operaciones”.

La Gráfica 12 muestra que la inmensa mayoría de los artículos tratan sobre el tipo de buque LNG o “Metanero” o el combustible LNG (1.239 publicaciones, 95% del total), mientras que en sólo 104 de los artículos (8%) se habla sobre los buques LPG o el uso de LPG como combustible.

Los siguientes subtemas que más se tratan son los relativos a las actividades de trading y a temas de eficiencia (sobre todo al uso de combustible LNG como alternativa para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones atmosféricas), con 374 y 345 publicaciones respetivamente.

Gráfica 12 Número de veces que se tratan cada uno de los subtemas dentro de la temática “Transporte Marítimo de Gaseros”



Fuente: Elaboración propia

La cuarta y última temática que de la que se ha realizado una revisión bibliografía ha sido “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo”. En esta búsqueda se han incluido siete subtemas tal y como muestra la Figura 8.

Figura 8 División de subtemas de la temática “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo”



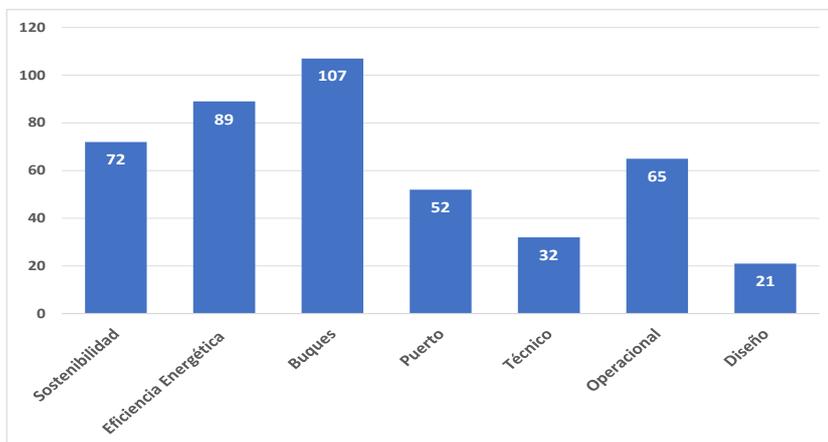
Fuente: Elaboración propia

Los subtemas de Sostenibilidad y Eficiencia Energética son las palabras claves buscadas y, por lo tanto, los subtemas que más aparecen en los resultados obtenidos.

Se ha procedido después a la división en cinco subtemas adicionales ya que se una parte de los artículos tratan sobre la sostenibilidad y eficiencia energética del transporte marítimo (agrupados en el subtema *Buques*) en sí mismo y otra gran cantidad lo enfocan a las operaciones portuarias (recogidos bajo el subtema *Puertos*). Los restantes tres subtemas son relativos a

aspectos *Técnicos*, *Operacionales* y de *Diseño* que se han investigado y que tienen efecto sobre la sostenibilidad y/o eficiencia energética del transporte marítimo y el sistema portuario.

Gráfica 13 Distribución de los subtemas dentro de la temática “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo”



Fuente: Elaboración propia

La mayoría de las publicaciones tratan sobre los “*buques*” y eficiencia energética, apareciendo en 107 y 89 publicaciones respectivamente (75% y 63% de los artículos); mientras que en 72 publicaciones se trata el tema de la sostenibilidad del transporte marítimo.

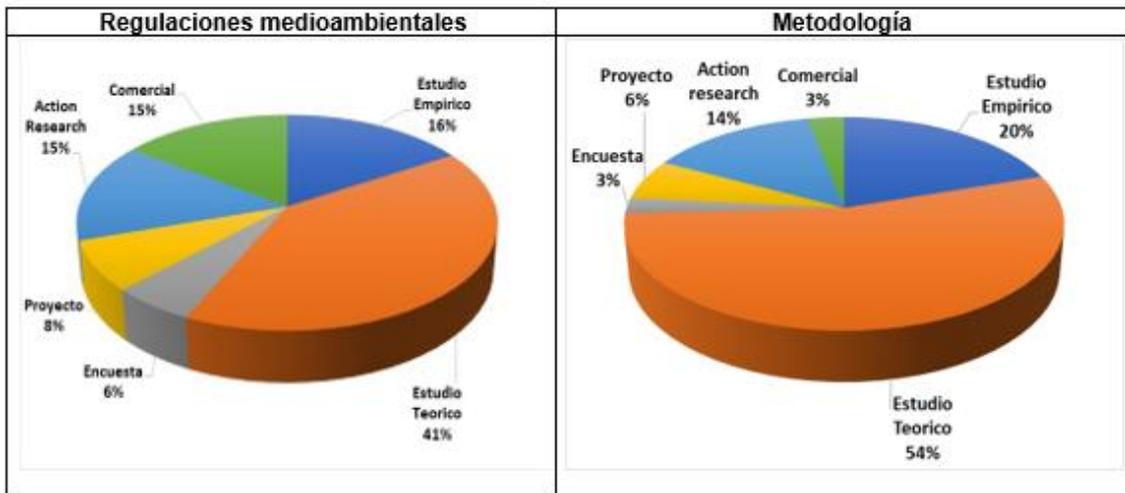
El subtema *Diseño* es el que aparece en el menor número de artículos siendo tratado en 21 de las publicaciones, lo que pone en manifiesto que la comunidad científica se ha centrado principalmente en aspectos operacionales (65 publicaciones) como medidas para la mejora de la eficiencia y sostenibilidad del transporte marítimo.

Prosiguiendo con el análisis cualitativo de la bibliografía analizada, se muestran los resultados de las distintas metodologías empleadas en cada publicación. A continuación, se presentan los resultados para cada uno de los cuatro temas analizados.

La mayoría de las publicaciones dentro de la temática “Regulaciones medioambientales” son estudios teóricos con un 41% seguido por los estudios empíricos con un 16%, es decir un 57% de las publicaciones son *Estudios*, tal y como muestra la Gráfica 14. Para la temática “Metodología” la distribución metodológica se muestra también la Gráfica 14.

Tal y como ocurrió en el anterior bloque temático, en este tema también la mayor parte de la producción científica son estudios teóricos con un 54% de las publicaciones. Sumando el 20% de estudios empíricos obtenemos que el 74% de las publicaciones sobre metodologías son *Estudios*, seguidos de lejos por los *Action Research* con un 14% de las publicaciones.

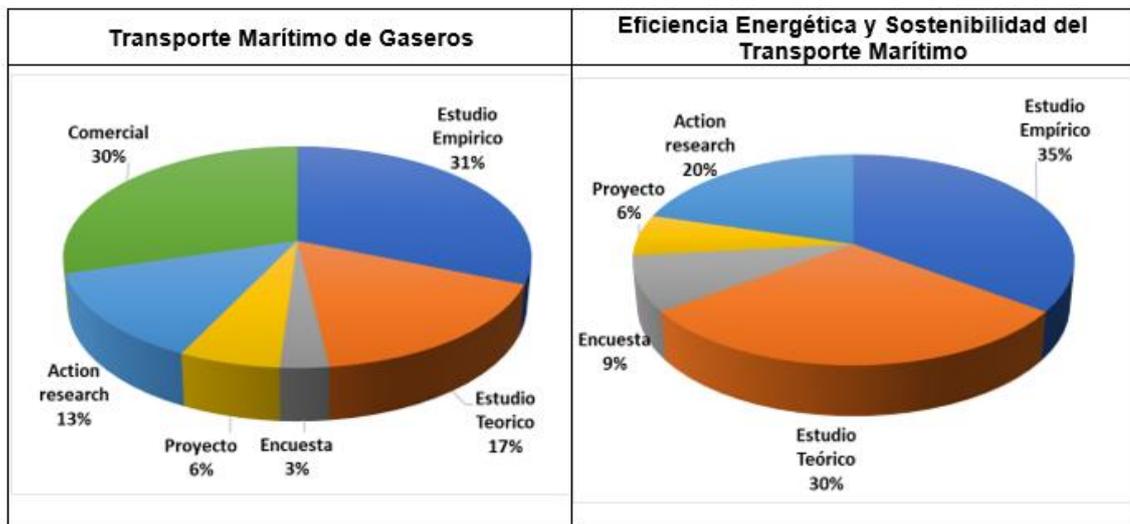
Gráfica 14 Metodologías empleadas en las publicaciones dentro de la temática “Regulaciones Medioambientales” y “Metodología”



Fuente: Elaboración propia

El tercer y cuarto tema sobre transporte marítimo de buques gaseros y eficiencia energética y sostenibilidad del transporte marítimo, se obtiene la distribución metodológica que se muestra en la Gráfica 15.

Gráfica 15 Metodologías empleadas en las publicaciones dentro de la temática “Transporte Marítimo de Gaseros” y “Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo”.



Fuente: Elaboración propia

La Gráfica 15 muestra que la metodología más empleada en los artículos revisados dentro de la temática del transporte marítimo de buques gaseros son los estudios empíricos en un 31% de los artículos, seguido muy de cerca por artículos comerciales (30%). En este caso, los estudios teóricos ocupan el tercer lugar apareciendo en un 17% de las publicaciones.

La cuarta temática analizada, Eficiencia Energética y Sostenibilidad del Transporte Marítimo, tiene las distintas metodologías distribuidas como muestra la Gráfica 15.

La distribución de las metodologías empleadas indica que los estudios empíricos y los estudios teóricos son los más empleados con un 35% y un 30% respectivamente. Hay que resaltar que esta es la única temática que no recoge ningún resultado para publicaciones comerciales.

Realizando el análisis cualitativo de manera global, los resultados se muestran en las tablas 3, 4 y 5.

Tabla 3 Distribución de las Metodologías empleadas en los estudios por año de publicación.

| <b>Año</b>   | <b>Estudio Empírico</b> | <b>Estudio Teórico</b> | <b>Encuestas</b> | <b>Proyectos</b> | <b>Action-Research</b> | <b>Comerciales</b> |
|--------------|-------------------------|------------------------|------------------|------------------|------------------------|--------------------|
| 2000         | 12                      | 1                      | 0                | 0                | 1                      | 42                 |
| 2001         | 3                       | 1                      | 3                | 1                | 1                      | 3                  |
| 2002         | 5                       | 8                      | 0                | 3                | 1                      | 14                 |
| 2003         | 4                       | 2                      | 0                | 0                | 2                      | 17                 |
| 2004         | 6                       | 6                      | 3                | 1                | 4                      | 18                 |
| 2005         | 14                      | 5                      | 0                | 4                | 6                      | 21                 |
| 2006         | 19                      | 4                      | 3                | 8                | 2                      | 40                 |
| 2007         | 24                      | 12                     | 3                | 7                | 8                      | 41                 |
| 2008         | 20                      | 17                     | 8                | 5                | 6                      | 32                 |
| 2009         | 25                      | 10                     | 3                | 10               | 13                     | 18                 |
| 2010         | 25                      | 18                     | 3                | 9                | 8                      | 31                 |
| 2011         | 32                      | 28                     | 2                | 10               | 5                      | 30                 |
| 2012         | 28                      | 23                     | 0                | 5                | 10                     | 19                 |
| 2013         | 23                      | 35                     | 1                | 4                | 10                     | 21                 |
| 2014         | 41                      | 28                     | 3                | 13               | 15                     | 18                 |
| 2015         | 40                      | 47                     | 5                | 8                | 10                     | 17                 |
| 2016         | 47                      | 55                     | 8                | 12               | 13                     | 11                 |
| 2017         | 51                      | 51                     | 4                | 4                | 27                     | 6                  |
| 2018         | 39                      | 31                     | 3                | 5                | 9                      | 6                  |
| 2019         | 39                      | 58                     | 7                | 8                | 54                     | 7                  |
| 2020         | 53                      | 95                     | 9                | 7                | 73                     | 3                  |
| <b>Total</b> | <b>550</b>              | <b>535</b>             | <b>68</b>        | <b>124</b>       | <b>278</b>             | <b>415</b>         |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4 Distribución de las Metodologías empleadas en los estudios por país.

| País       | Estudio Empírico | Estudio Teórico | Encuestas | Proyectos | Action-Research | Comerciales |
|------------|------------------|-----------------|-----------|-----------|-----------------|-------------|
| Alemania   | 4                | 13              | 3         | 1         | 5               | 3           |
| A.S.       | 1                | 1               | 0         | 0         | 0               | 1           |
| Argelia    | 0                | 1               | 0         | 0         | 1               | 0           |
| Argentina  | 0                | 0               | 0         | 1         | 0               | 1           |
| Australia  | 6                | 9               | 2         | 1         | 5               | 3           |
| Austria    | 1                | 0               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Azerbaiyán | 0                | 0               | 0         | 0         | 1               | 0           |
| Bélgica    | 0                | 5               | 1         | 2         | 0               | 0           |
| Brasil     | 2                | 2               | 1         | 0         | 1               | 0           |
| Bulgaria   | 0                | 1               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Canadá     | 6                | 3               | 0         | 1         | 4               | 2           |
| Catar      | 0                | 3               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Chile      | 0                | 0               | 0         | 0         | 1               | 0           |
| China      | 51               | 69              | 1         | 10        | 34              | 7           |
| Chipre     | 2                | 2               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Colombia   | 1                | 0               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| C.S.       | 61               | 56              | 4         | 15        | 49              | 3           |
| Croacia    | 21               | 11              | 1         | 3         | 8               | 0           |
| Dinamarca  | 3                | 8               | 0         | 1         | 4               | 0           |
| EE. UU.    | 61               | 42              | 10        | 23        | 25              | 44          |
| Egipto     | 5                | 0               | 0         | 1         | 2               | 0           |
| EAU        | 0                | 1               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Escocia    | 2                | 2               | 0         | 1         | 0               | 0           |
| Eslovaquia | 1                | 0               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Eslovenia  | 1                | 1               | 0         | 0         | 1               | 0           |
| España     | 23               | 16              | 2         | 11        | 4               | 0           |
| Fiji       | 0                | 0               | 0         | 0         | 1               | 0           |
| Finlandia  | 8                | 8               | 2         | 3         | 4               | 4           |
| Francia    | 1                | 4               | 1         | 2         | 3               | 2           |
| Ghana      | 0                | 1               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Grecia     | 11               | 19              | 0         | 2         | 8               | 1           |
| Hong Kong  | 2                | 2               | 0         | 1         | 1               | 0           |
| India      | 10               | 4               | 1         | 1         | 6               | 0           |
| Indonesia  | 1                | 1               | 0         | 0         | 2               | 1           |
| Inglaterra | 35               | 31              | 9         | 7         | 10              | 49          |
| Irán       | 2                | 3               | 0         | 0         | 3               | 0           |
| Israel     | 0                | 2               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Italia     | 19               | 24              | 2         | 6         | 11              | 0           |
| Japón      | 12               | 7               | 0         | 1         | 9               | 2           |
| Líbano     | 0                | 1               | 0         | 0         | 0               | 0           |
| Lituania   | 1                | 1               | 0         | 2         | 0               | 0           |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Distribución de las Metodologías empleadas en los estudios por país (continuación).

| País         | Estudio Empírico | Estudio Teórico | Encuestas | Proyectos  | Action-Research | Comerciales |
|--------------|------------------|-----------------|-----------|------------|-----------------|-------------|
| Malasia      | 6                | 6               | 0         | 0          | 1               | 1           |
| Marruecos    | 0                | 1               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| México       | 0                | 1               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Montenegro   | 1                | 1               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Nigeria      | 3                | 6               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| ND           | 25               | 4               | 4         | 8          | 7               | 257         |
| Noruega      | 33               | 26              | 2         | 3          | 7               | 5           |
| N.Z.         | 2                | 3               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Omán         | 1                | 0               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| P.B.         | 12               | 7               | 1         | 3          | 6               | 25          |
| Paquistán    | 1                | 2               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Polonia      | 18               | 12              | 1         | 1          | 5               | 1           |
| Portugal     | 6                | 4               | 1         | 0          | 1               | 0           |
| R.C.         | 0                | 0               | 0         | 0          | 1               | 0           |
| Rumania      | 0                | 1               | 0         | 2          | 2               | 0           |
| Rusia        | 2                | 4               | 0         | 1          | 2               | 0           |
| Serbia       | 1                | 1               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Singapur     | 4                | 7               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Suecia       | 8                | 9               | 3         | 3          | 6               | 2           |
| Taiwán       | 10               | 6               | 2         | 0          | 1               | 0           |
| TT           | 0                | 1               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Turquía      | 9                | 9               | 2         | 0          | 6               | 0           |
| Ucrania      | 1                | 1               | 0         | 0          | 0               | 0           |
| Varios       | 52               | 67              | 12        | 7          | 29              | 1           |
| Vietnam      | 1                | 2               | 0         | 0          | 1               | 0           |
| <b>Total</b> | <b>550</b>       | <b>535</b>      | <b>68</b> | <b>124</b> | <b>278</b>      | <b>415</b>  |

Fuente: Elaboración propia

**A.S.:** Arabia Saudí, **T. T.** Trinidad y Tobago, **R.C.:** Republica Checa, **EUA:** Emiratos Árabes Unidos, **P.B:** Países Bajos.  
**N.Z.:** Nueva Zelanda, **ND:** No disponible, **C.S.** Corea del Sur

# **PARTE II. LA FLOTA MUNDIAL DE GASEROS**



### 3. ANALISIS DEL MARCO POLÍTICO-LEGAL

Las emisiones provenientes de la flota mundial de buques son responsables entre el 2 y 3% de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (GEI) mundiales (Trodden *et al.*, 2015; Yubing Shi, 2016; International Maritime Organization, 2018), aproximadamente la misma cantidad de emisiones de GEI que produce Alemania. El porcentaje de las emisiones de gases de efecto invernadero que causan el cambio climático provenientes de la flota de buques a nivel mundial no son causadas directamente por ningún país de manera individual y, por lo tanto, están fuera de lo que el Acuerdo de París sobre el cambio climático.

El porcentaje de emisiones de GEI globales producido por el transporte marítimo, podría triplicarse para 2050 si no se toman medidas para abatirlas y aumentar la eficiencia operacional de este sector. Tras el Acuerdo Climático de París, la Organización Marítima Internacional (OMI) acordó en 2018 una Estrategia Inicial de Gases de Efecto Invernadero donde se detallan una serie de medidas para mitigar las emisiones (International Transport Forum, 2018).

Analizar el efecto de las emisiones atmosféricas producidas por los buques y su impacto en el cambio climático es bastante complejo. Como ejemplo se puede observar que, las emisiones de GEI, como el CO<sub>2</sub>, causan el calentamiento climático a largo plazo, sin embargo, las emisiones de óxido de azufre (SO<sub>x</sub>) y emisiones de material particulado (PM) causan enfriamiento atmosférico a través de los efectos causados por las nubes de aerosoles que estos contaminantes forman (Butt *et al.*, 2016), mientras que los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) aumentan los niveles de ozono (O<sub>3</sub>) y reducen el metano (CH<sub>4</sub>), que conduce al calentamiento y enfriamiento, respectivamente. La única forma de comparar y ponderar las emisiones de diferentes gases, que tienen diferentes vidas atmosféricas y efectos en el clima, es mediante el uso de las llamadas métricas de cambio climático. Esto está en línea con el último informe del Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (con las siglas en Inglés, IPCC) de las Naciones Unidas (Kontovas, 2020).

Se sabe que el cambio climático es un problema global y que, por lo tanto, se requieren respuestas globales. Las emisiones de GEI han atraído en los últimos tiempos una creciente atención de la comunidad internacional. Uno de los esfuerzos mundiales cruciales para abordar el cambio climático es el establecimiento de un régimen internacional de cambio climático, que comprende reglas, normas, principios y procedimientos aplicables a una variedad de actividades. Entre ellos, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) con el Protocolo de Kioto han servido de telón de fondo para los esfuerzos posteriores que han promovido un marco legal internacional cuyo objeto principal es combatir el cambio climático.

Sin embargo, existe una notoria deficiencia dentro del régimen internacional de cambio climático y es que el transporte marítimo internacional está exento de responsabilidades y no está contemplado en el Protocolo de Kioto, a pesar de que la contribución de las emisiones de GEI del transporte marítimo internacional es significativo y ha ido en aumento a lo largo de los años (Bows *et al.*, 2007; Shi, 2014).

Hasta la fecha, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y la Organización Marítima Internacional (OMI) son los encargados de regular las emisiones atmosféricas causadas por el transporte marítimo (Y Shi, 2016).

Hasta la fecha, se han discutido tres categorías de medidas dentro de la OMI para intentar reducir las emisiones de GEI de los buques: medidas técnicas, medidas operativas y medidas basadas en el mercado (MBM) (Y Shi, 2016; Tanaka *et al.*, 2019). Las tres medidas tienen seguidores y detractores en el mundo marítimo (Kosmas *et al.*, 2017). Las medidas técnicas llevan asociados, generalmente, grandes costes de implementación lo que hace que muchos operadores y armadores las desechen por este factor (Rehmatulla *et al.*, 2015). Las medidas operacionales, tienen un menor coste de implementación aunque también, una mayor incertidumbre respecto a su grado de implementación dado que estas dependerán, entre otras, de las decisiones de los operadores de los buques basados en la situación de mercado (Cariou, 2011). Las MBM están asociadas a regulaciones y acuerdos internacionales generalmente, y tienen intrínsecamente asociadas un problema dada la naturaleza del transporte marítimo, y las diferencia según las regulaciones sean locales, nacionales o globales (Gritsenko, 2017). También hay países que se oponen a este tipo de medidas ya que pueden influir negativamente en su desarrollo económico (Rahim *et al.*, 2016; Y Shi, 2016). Lo que sí parece claro es que la adopción de MBMs acelera el proceso de tomas de decisiones por parte de los operadores para reducir las emisiones atmosféricas de los buques (Sys *et al.*, 2014).

En las siguientes subsecciones se analiza de manera general las regulaciones más relevantes sobre emisiones atmosféricas a nivel global y las que son específicas del transporte marítimo.

### **3.1. Protocolo de Montreal**

El objetivo principal del Protocolo de Montreal es la protección de la capa de ozono mediante la toma de medidas para controlar la producción total mundial y el consumo de sustancias que agotan la capa de ozono, con el objetivo final de eliminarlas.

Hay un gran número de productos químicos de uso común que han resultado ser extremadamente dañinos para la capa de ozono. En este sentido, uno de los más perjudiciales para la capa de ozono son los halocarbonos, que son compuestos químicos en los que uno o más átomos de carbono están unidos a uno o más átomos de halógenos (flúor, cloro, bromo o yodo). Los halocarbonos que contienen bromo por lo general tienen mucho mayor potencial de agotamiento del ozono (PAO) que aquellos que contienen cloro. Los productos químicos sintéticos que producen la mayor parte del cloro y bromo con efectos reduccionistas del ozono son el bromuro de metilo, el metilcloroformo, el tetracloruro de carbono y las familias de productos químicos conocidos como los halones, los clorofluorocarbonos (CFC) y los hidroclorofluorocarbónoses (HCFC).

La confirmación científica del agotamiento de la capa de ozono impulsó a la comunidad internacional a establecer un mecanismo de cooperación para tomar medidas para proteger la capa de ozono. Esto se formalizó en el Convenio de Viena para la protección de la capa de ozono, que fue aprobado y firmado por 28 países, el 22 de marzo de 1985. En septiembre de 1987, esto condujo a la redacción del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono.

El Protocolo de Montreal es un acuerdo ambiental internacional que logró la ratificación universal para proteger la capa de ozono de la tierra, con la meta de eliminar el uso de sustancias que agotan la capa de ozono (SAO). Un agotamiento de la capa de ozono causaría un aumento del riesgo de que altos niveles de radiación ultravioleta penetren en la tierra, lo que daría lugar a una mayor incidencia de cáncer de piel y problemas oculares, afectaría los sistemas inmunológicos y tendría efectos negativos en las cuencas hidrográficas, las tierras agrícolas y los bosques. Desde su adopción en 1987 y a partir de finales de 2014, se ha eliminado con éxito más del 98% de las SAO registradas, lo que ha ayudado a revertir los daños a la capa de ozono. Un beneficio colateral del Protocolo de Montreal muy importante es también que durante el período 1989-2013, se han reducido las emisiones acumuladas de CO<sub>2</sub> en 135.000 millones de toneladas (UNPD, 2019).

El Protocolo de Montreal exige el control de casi 100 sustancias químicas en varias categorías. Para cada grupo o anexo de sustancias químicas, el Tratado establece un calendario para la eliminación gradual de la producción y el consumo de esas sustancias, con el objetivo de eventualmente eliminarlas por completo.

Hay algunas excepciones para usos esenciales cuando no se encuentren sustitutos aceptables, por ejemplo, en los inhaladores comúnmente utilizados para tratar el asma y otros problemas respiratorios o sistemas de supresión de incendios de halón utilizados en los submarinos y aviones.

En 1994, la Asamblea General de Naciones Unidas proclamó el 16 de septiembre Día internacional de la preservación de la capa de ozono, en conmemoración de la fecha de la firma, en 1987, del Protocolo de Montreal sobre sustancias que agotan la capa de ozono (ONU, 1995). El calendario de eliminación de los HCFC se creó en 1992 para los países desarrollados y países en vías de desarrollo, habiendo como meta la eliminación de estas sustancias completamente en 2030 en los países desarrollados y en 2040 en los países en desarrollo.

El 16 de septiembre de 2009, la Convención de Viena y el Protocolo de Montreal se convirtieron en los primeros tratados de la historia de las Naciones Unidas en lograr la ratificación universal.

## 3.2. Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)

La CMNUCC entró en vigor el 21 de marzo de 1994. Actualmente, casi todos los países del Mundo son miembros de esta Convención. 197 países han ratificado la Convención y se denominan Partes en la Convención.

Prevenir la influencia antropogénica dañina con el medioambiente es el objetivo de la CMNUCC (UNFCCC, 2019).

La CMNUCC siguió una línea de acción esencial de uno de los tratados ambientales multilaterales más exitosos de la historia (el Protocolo de Montreal): obligó a los Estados miembros a actuar en aras de la seguridad humana incluso ante la incertidumbre científica.

El objetivo final de la Convención es estabilizar las concentraciones de GEI "a un nivel que evite la interferencia peligrosa antropogénica (inducida por humanos) con el sistema climático". Afirma que "dicho nivel debe lograrse dentro de un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, para asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y para permitir que el desarrollo económico avance de manera sostenible" (Naciones Unidas, 1992). Esto se quiere conseguir poniendo una presión extra a los países industrializados, ya que son ellos los responsables de la mayoría de las emisiones de GEI. Se llaman países del Anexo I y pertenecen a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Incluyen 12 países con "economías en transición" de Europa Central y del Este. Se esperaba que los países del Anexo I para el año 2000 redujeran las emisiones a los niveles de 1990. Muchos de ellos han tomado medidas firmes para hacerlo, y algunos ya lo han logrado.

Como se detalla en las bases del CMNUCC, las naciones industrializadas acuerdan, en virtud de la Convención, apoyar las actividades relacionadas con la lucha contra el cambio climático en los países en desarrollo mediante el apoyo financiero para la acción sobre el cambio climático, más allá de cualquier asistencia financiera que ya brinden a estos países. Se ha establecido un sistema de subvenciones y préstamos a través de la Convención y es administrado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial. Los países industrializados también aceptan compartir tecnología con naciones menos avanzadas.

Algunos de los puntos más relevantes del CMNUCC son:

- Los países industrializados tienen que informar periódicamente sobre sus políticas y medidas sobre el cambio climático, incluidas las cuestiones regidas por el Protocolo de Kioto (para los países que lo han ratificado). Para más información sobre el Protocolo de Kioto ver capítulo 3.3.
- Se debe presentar un inventario anual de las emisiones de GEI, incluidos los datos de su año base (1990) y todos los años posteriores.

- Los países en desarrollo informan en términos más generales sobre sus acciones, tanto para abordar el cambio climático como para adaptarse a sus impactos, pero con menos frecuencia que las Partes del anexo I, y sus informes dependen de que obtengan fondos para la preparación de los informes, particularmente en el caso de los países menos avanzados industrial y económicamente.

### 3.3. Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto fue adoptado inicialmente el 11 de diciembre de 1997, por 37 países, conocidos como los países del Anexo B del protocolo de Kioto, que representaban al mundo industrializado en la década de 1990, entrando en vigor el 16 de febrero de 2005. Estos países se comprometieron a reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, Hidrofluorocarbonos, Perfluorocarbono y Hexafluoruro de azufre) en un 95% en promedio durante el período comprendido entre 2008 y 2012 en comparación con los niveles de 1990 (Holtsmark et al., 2002) al aceptar los objetivos de emisiones individuales que debían cumplirse a finales de 2012, sin embargo, este protocolo ha sido criticado desde el principio, habiendo algunos países tales como Estados Unidos que aseguraron que no iban a poder cumplir con dicho protocolo (Almer y Winkler, 2017).

Sin embargo, a pesar de las críticas hacia este protocolo, existe cierto respaldo por la literatura empírica sobre la efectividad de este Protocolo, donde de manera frecuente se encuentran que los países con objetivos vinculantes de reducción de emisiones bajo el Protocolo de Kioto tienen emisiones de CO<sub>2</sub> más bajas de lo que hubieran tenido en ausencia de estos objetivos. De hecho, estiman un efecto de reducción de CO<sub>2</sub> promedio estadísticamente significativo de 7 a 10% (Aichele y Felbermayr, 2012; Grunewald y Martinez-Zarzoso, 2016).

De manera resumida, el Protocolo de Kioto operacionaliza la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático al comprometer a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de GEI de acuerdo con los objetivos individuales acordados. La Convención misma sólo pide a esos países que adopten políticas y medidas sobre mitigación de las emisiones atmosféricas y que informen periódicamente sobre el estado y los avances.

El Protocolo de Kioto engloba los siguientes sectores:

- Energía
  - Quema de combustibles fósiles
  - Industrias de energía.
  - Industria manufacturera y construcción.
  - Transporte.
  - Otros sectores.

- Emisiones fugitivas de combustibles
  - Combustibles sólidos.
  - Petróleo y gas natural.
  - Otros.
- Procesos industriales
  - Productos minerales.
  - Industria química.
  - Producción de metales.
  - Otra producción.
  - Producción de halocarbonos y hexafluoruro de azufre.
  - Consumo de halocarbonos y hexafluoruro de azufre.
  - Otros.
- Utilización de disolventes y otros productos
- Agricultura
  - Fermentación entérica.
  - Aprovechamiento del estiércol.
  - Cultivo del arroz.
  - Suelos agrícolas.
  - Quema prescrita de sabanas.
  - Quema en el campo de residuos agrícolas.
  - Otros

Analizando los sectores contemplados en el Protocolo de Kioto se puede observar que la mayor parte de las emisiones del transporte marítimo internacional no están reguladas. A diferencia de las emisiones del transporte marítimo doméstico, incluidas en el protocolo de Kioto y que representan menos del 0,6% de las totales del sector marítimo, las emisiones del transporte marítimo internacional no se asignan a los inventarios nacionales de emisiones, por lo tanto quedan excluidas del Protocolo de Kioto (Heitmann et al., 2011).

### 3.4. Acuerdo Climático de París

El Acuerdo o Protocolo de París pide a cada país que diseñe y comunique sus acciones climáticas conocidas posteriores a 2020, así como sus contribuciones determinadas a nivel nacional.

El objetivo central del Acuerdo de París es reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático por medio de mantener el aumento de la temperatura mundial en este siglo por debajo de los 2 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar aún más el aumento de la temperatura a 1,5 grados centígrados. Además, el Acuerdo tiene por objeto fortalecer la capacidad de los países para hacer frente a los efectos del cambio climático. Para alcanzar estos ambiciosos objetivos, se establecerán flujos financieros adecuados, un nuevo marco tecnológico y un marco mejorado de creación de capacidad, y se apoyará así la acción de los países en desarrollo y de los países más vulnerables, en consonancia con sus propios objetivos nacionales. El Acuerdo también prevé una mayor transparencia y el apoyo a través de un marco de transparencia más sólido (UNFCC, 2015).

El Acuerdo de París exige a todas las *Partes* que hagan todo lo que esté en su mano por medio de contribuciones determinadas a nivel nacional y que redoblen sus esfuerzos en los próximos años. Esto incluye la obligación de que todas las Partes informen periódicamente sobre sus emisiones y sobre sus esfuerzos para mitigarlas. También habrá un inventario mundial cada cinco años para evaluar el progreso colectivo hacia el logro del propósito del acuerdo, y para informar sobre nuevas medidas individuales de las Partes.

El Acuerdo de París quedó abierto a la firma el 22 de abril de 2016 en la sede de las Naciones Unidas en Nueva York. Entró en vigor el 4 de noviembre de 2016 y a fecha de abril de 2020, 189 países de los 197 que son miembros del CMNUCC han ratificado el acuerdo.

En conjunto, estas medidas climáticas determinan si el mundo alcanza los objetivos a largo plazo del Acuerdo de París, y si alcanza cuanto antes el punto máximo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial, y si, además, emprende a partir de entonces reducciones rápidas de conformidad con la mejor soluciones técnicas y científicas disponibles, con el fin de lograr un equilibrio entre las emisiones de las fuentes antropogénicas y la absorción antropogénica por los sumideros de GEI en la segunda mitad del siglo XXI.

Se entiende que alcanzar el punto máximo de las emisiones de GEI llevará más tiempo a las Partes que son países en desarrollo, y que las reducciones de las emisiones se realizan sobre la base de la equidad y en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza, que son prioridades de desarrollo fundamentales para muchos países en desarrollo.

Cada plan climático refleja la ambición del país de reducir las emisiones, teniendo en cuenta sus circunstancias y capacidades nacionales.

Como también ha pasado en el Protocolo de Kioto, el Acuerdo de París no menciona el transporte marítimo internacional y, considerando que el transporte marítimo internacional es una

actividad global, los países no han incluido el sector en sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional que forman la columna vertebral del Acuerdo de París.

### **3.5. Regulaciones de emisiones atmosféricas específicas del transporte marítimo**

Las emisiones causadas por el transporte marítimo se han mantenido fuera de cualquier regulación hasta hace relativamente poco tiempo (Gallagher, 2005; Harrould-Kolieb, 2008), esto se hace más incomprensible aun viendo las emisiones reportadas por OMI donde las emisiones de CO<sub>2</sub> contribuyen son alrededor del 3% del total de las emisiones globales en 2012, y para otros compuestos como el SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> contribuyen al 12 y 13% de las emisiones globales respectivamente (Sheng *et al.*, 2017).

OMI ha estado desarrollando y aplicando un nuevo marco legislativo destinado a lograr un transporte marítimo mundial más sostenible, ecológico y regulado. Hasta 1990, el área principal de trabajo de la OMI consistía en prevenir y controlar la contaminación por derrames de petróleo, productos químicos, aguas residuales y basura. La mayoría de las regulaciones sobre estos puntos entraron en vigor en 2001. Desde entonces, su trabajo regulatorio se ha ampliado para incluir medidas para la prevención de la contaminación de la atmósfera y del aire. Las medidas técnicas y operativas relacionadas con la eficiencia energética y el medio ambiente marino adoptadas por la OMI se recogen como reglamentos en varios anexos de MARPOL 73/78 (Abadie *et al.*, 2017).

En este capítulo, se van a tratar las principales regulaciones en vigor para el ámbito marítimo acerca de las emisiones atmosféricas, estas son:

- Anexo VI del Convenio MARPOL
- Regulación Europea para la monitorización, reporte y verificación de las emisiones de CO<sub>2</sub>
- Regulación de la OMI para reportar las emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel mundial

#### **3.5.1. Anexo VI del Convenio MARPOL**

El punto de partida de este convenio se puede establecer a mediados de la década de 1980, a través del Comité de protección del medio marino (MEPC), el cual estudió la calidad del combustible marino y su impacto en las emisiones atmosféricas.

En 1988, Noruega presentó un informe sobre la magnitud del problema de las emisiones causadas por el transporte marítimo, haciendo que el MEPC acordara incluir la cuestión de la contaminación atmosférica en su programa de trabajo. Además de este informe presentado por Noruega, la Segunda Conferencia Internacional sobre la Protección del Mar del Norte, celebrada en noviembre de 1987, emitió una declaración en la que los ministros de los Estados del Mar del

Norte acordaron emprender acciones en el seno de los organismos pertinentes, como la OMI, "con el objeto de mejorar las normas de calidad de los combustibles residuales y apoyar activamente las tareas destinadas a reducir la contaminación marítima y atmosférica" (OMI, 2020).

En la reunión del MEPC celebrado en marzo de 1989, varios países presentaron ponencias sobre la calidad del combustible y su influencia en la contaminación atmosférica y se acordó estudiar los aspectos de la prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, así como la calidad del combustible marítimo, como parte del programa de trabajo a largo plazo del Comité que se inició en marzo de 1990.

En 1990 Noruega presentó varios puntos a considerar por el MEPC, en las que ofrecía una visión general de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques, los más relevantes fueron:

- Las emisiones de dióxido de azufre de los buques se estimaron entre 4,5 y 6,5 millones de toneladas por año, casi un 4% de las emisiones mundiales de azufre. Las emisiones en mar abierto se propagan y sus efectos son moderados, aunque en ciertas rutas ocasionan problemas ambientales, en particular en el Canal de la Mancha, el Mar de la China Meridional y el Estrecho de Malaca.
- Las emisiones de óxido de nitrógeno de los buques se estimaron en unos 5 millones de toneladas por año, casi el 7% del total mundial. Las emisiones de óxido de nitrógeno causan o agravan los problemas regionales, entre ellos el de la lluvia ácida y los problemas de salud de los habitantes de las zonas portuarias.

En 1997 fue la primera vez que el protocolo MARPOL incluía el nuevo Anexo VI, el cual entró finalmente en vigor el 19 de mayo de 2005. En el Anexo VI se establecen límites para las emisiones de óxido de azufre y óxido de nitrógeno procedentes de los buques y se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono.

El Anexo VI contiene disposiciones que permiten establecer zonas de control de las emisiones de SO<sub>x</sub> en las que el control de las emisiones de azufre es utilizar cualquier otro método técnico que limite las emisiones de SO<sub>x</sub>.

En el Anexo VI se prohíben las emisiones deliberadas de sustancias que agotan la capa de ozono, lo cual incluye a los halones y los clorofluorocarbonos (CFC). Además, se prohíben en todos los buques nuevas instalaciones que contengan sustancias que agotan la capa de ozono.

Asimismo, en el Anexo VI se establecen límites máximos para las emisiones de óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) de los motores diésel según su potencia nominal y su año de fabricación.

Por último, en el Anexo también se prohíbe la incineración a bordo de productos tales como los materiales de embalaje contaminados y los difeniles policlorados (PCB).

A continuación, se escriben brevemente las reglas del Anexo VI más relevantes.

### **3.5.1.1. Regla 12: Sustancias que agotan la capa de ozono**

Las sustancias que agotan la capa de ozono son los clorofluorocarbonos y los halones utilizados en los sistemas de refrigeración en buques antiguos y en los sistemas de lucha de contra incendios respectivamente. Las sustancias que agotan la capa de ozono también se pueden encontrar en los componentes de espumas de aislamiento. Los hidroclorofluorocarbónos se introdujeron como un reemplazo intermedio para los clorofluorocarbonos, pero aún se los clasifica como agentes que agotan la capa de ozono. En el marco de un mecanismo a escala mundial, se están eliminando gradualmente la producción y el uso de todos estos materiales en virtud de las disposiciones del Protocolo de Montreal.

Los controles que se prevén en esta regla no se aplican al equipo permanentemente sellado que no tenga conexiones de carga ni componentes desmontables; ello comprende habitualmente otros elementos, entre ellos, refrigeradores, acondicionadores de aire y refrigeradores de agua pequeños y de tipo doméstico.

No se permite la instalación de sistemas que contengan clorofluorocarbonos o halones en los buques construidos a partir del 19 de mayo de 2005 y tampoco se permite ninguna nueva instalación de tales sistemas a partir de esa fecha en los buques existentes. Del mismo modo, no se permite la instalación de sistemas o equipos que contengan hidroclorofluorocarbonos en los buques construidos a partir del 1 de enero de 2020 y tampoco se permite ninguna nueva instalación de tales sistemas a partir de esa fecha en los buques existentes.

Se permite que los sistemas existentes sigan en funcionamiento y que puedan recargarse cuando sea necesario. Sin embargo, se prohíbe la descarga deliberada a la atmósfera de sustancias que agotan la capa de ozono. Al poner en funcionamiento o desmantelar sistemas o equipos que contengan sustancias que agotan la capa de ozono se deberán recoger adecuadamente los gases de una manera controlada y, si no se los utilizan nuevamente a bordo, deberán descargarse en instalaciones de recepción adecuadas para su almacenamiento o para su eliminación. Todo equipo o material que ya no se utilice y que contenga sustancias que agotan la capa de ozono deberá ser desinstalado y enviado a tierra para su desmantelamiento y eliminación adecuada. Esto también resulta aplicable cuando los buques van al desguace.

Por otra parte, respecto de los buques que dispongan de sistemas o equipos que contengan sustancias que agotan la capa de ozono y que deben disponer de un Certificado IAPP (Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica), se deberá llevar un libro registro de estos productos que agotan la capa de ozono, en el que se registrarán todas las operaciones de suministro, recarga, reparación, descarga y eliminación de tales sustancias.

### **3.5.1.2. Regla 13: Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

El control de las emisiones de NO<sub>x</sub> de los motores diésel se lleva a cabo mediante el cumplimiento de las prescripciones de reconocimiento y certificación que conducen a la expedición del Certificado internacional de prevención de la contaminación atmosférica para

motores (EIAPP) y a la posterior demostración de cumplimiento durante el servicio, de acuerdo con las prescripciones obligatorias, a saber, reglas 13.8 y 5.3.2 respectivamente, del Código Técnico sobre NO<sub>x</sub> 2008 (resolución MEPC.177(58), enmendado por la resolución MEPC.251.(66)).

Las prescripciones sobre el control de las emisiones de NO<sub>x</sub> establecidas en el Anexo VI se aplican a los motores diésel marinos instalados con potencias de salida superior a 130 kW, excluyendo los utilizados exclusivamente para casos de emergencia, independientemente del arqueo del buque en el que se instalen estos motores. Las definiciones de 'instalado' y 'motor diésel marino' figuran en las reglas 2.12 y 2.14 respectivamente. Se aplican diferentes niveles de control según la fecha de construcción del buque, término definido en la regla 2.19, así como, en la regla 2.2, y según un determinado nivel, cuyo valor límite máximo se determina a partir del régimen nominal del motor:

*Tabla 6 Límites de emisiones de NO<sub>x</sub> de acuerdo con la Regla 13 del MARPOL VI*

| Nivel | Fecha de Construcción del buque | Valor Límite de emisión ponderada total del ciclo (g/kWh) |                      |        |
|-------|---------------------------------|---|----------------------|--------|
|       |                                 | n= régimen nominal del motor (rpm)                        |                      |        |
|       |                                 | n<130   | n= 130 - 1999        | n≥2000 |
| I     | 1 enero 2000                    | 17,0  | $45 \cdot n^{-0,2}$  | 9,8    |
| II    | 1 enero 2011                    | 14,4  | $44 \cdot n^{-0,23}$ | 7,7    |
| III   | 1 enero 2016                    | 3,4   | $9 \cdot n^{-0,2}$   | 2,0    |

Los controles de nivel III sólo se aplican a buques específicos mientras navegan en las zonas de control de las emisiones (ECA) establecidas para limitar las emisiones de NO<sub>x</sub>; fuera de dichas zonas se aplican controles de nivel II. En conformidad con lo prescrito en la regla 13.5.2, no sería necesario que en determinados buques pequeños se instalen motores de nivel III. Sin embargo, todo motor diésel marino que se instale en un buque construido a partir del 1 de enero de 2016 y que navegue en zonas ECA de Norteamérica y del mar Caribe de los Estados Unidos deberá cumplir lo dispuesto en las normas de nivel III sobre las emisiones de NO<sub>x</sub>.

El valor de las emisiones de un motor diésel se determinará de acuerdo con el Código Técnico sobre los NO<sub>x</sub> de 2008, en el caso del de los límites del nivel II y del nivel III. La mayoría de los motores del nivel I han sido certificados de conformidad con la versión anterior del Código Técnico sobre los NO<sub>x</sub>, de 1997, que según la circular MEPC.1/Circ.679, (2009), podrá seguir utilizándose en algunos casos hasta el 1 de enero de 2011. Los certificados expedidos de conformidad con el Código Técnico sobre los NO<sub>x</sub> de 1997 seguirían siendo válidos durante la vida útil de este tipo de motores.

En el caso de los motores que pertenecen a una clase o grupo de motores, es el motor de referencia el que en realidad se somete al ensayo de emisiones; este es el motor que tiene la combinación del régimen (potencia y velocidad) y los elementos, ajustes y valores críticos de funcionamiento del motor en relación con las emisiones de NO<sub>x</sub>, que se traducen en el valor de emisión de los NO<sub>x</sub> más elevado o, si se ha de certificarse más de un ciclo de ensayo, los valores

que, para que sean aceptables, no deben ser superiores al valor límite del nivel aplicable. Por consiguiente, los motores posteriores de la serie, y los motores emparentados, se construirán posteriormente sobre la base de un régimen, componentes, ajustes y valores de funcionamiento que se sitúen dentro de los límites establecidos para la respectiva familia o grupo de motores. En general, toda certificación de motores nuevos que conduce a la expedición de un Certificado EIAPP se lleva a cabo en las instalaciones del constructor del motor donde se realiza el reconocimiento necesario para la certificación previa.

De igual modo, un motor diésel que tiene un Certificado EIAPP se aprueba, por parte del Estado de abanderamiento del buque en el que se va a instalar, o en nombre de este (puesto que casi todas las labores de certificación de motores han sido delegadas a las organizaciones reconocidas), con arreglo a un nivel establecido para uno o más ciclos de ensayo de funcionamiento, respecto de un régimen determinado o de una gama de regímenes, y con los elementos, ajustes y valores críticos de funcionamiento del motor y definidos en relación con los NO<sub>x</sub>, que, en su caso, incluyen diversas opciones. Toda modificación de estos aspectos ha de ser debidamente aprobada y documentada.

Por cada motor diésel certificado respecto de los NO<sub>x</sub> debe llevarse a bordo un expediente técnico aprobado, en virtud de la regla 2.3.4. del Código Técnico sobre los NO<sub>x</sub> de 2008 (BOE, 2014), por el que se establece que el motor ha sido aprobado y se prevé el régimen de reconocimiento aplicable junto con la documentación aprobada correspondiente a cualquier modificación realizada.

Un documento fundamental del procedimiento de verificación de los parámetros es el registro de los parámetros del motor, establecido en virtud de la regla 6.2.2.8 del Código Técnico sobre los NO<sub>x</sub> de 2008 (Organización Marítima Internacional, 2008), que se llevará para registrar todas las sustituciones y los cambios en elementos, ajustes y valores críticos de funcionamiento del motor en relación con los NO<sub>x</sub>.

Además, cabe mencionar el caso en el que un motor diésel es objeto de una "transformación importante", según lo dispuesto en la regla 13.2. De las tres vías que se establecen, la "modificación apreciable" y el aumento de capacidad, según sus respectivas definiciones, supondrán cambios en un motor ya instalado y en tales circunstancias, el nivel correspondiente es el que resulta aplicable a la fecha de construcción del buque en el que está instalado el motor, excepto, en el caso de los buques construidos antes del 1 de enero de 2000, si se aplica el nivel I. En la tercera vía, vale decir, en caso de sustitución de un motor, de la instalación un motor no idéntico, o de la instalación de un motor adicional, entonces se aplica el nivel adecuado para la fecha de instalación, aunque, a reserva de aceptación por la Administración con arreglo a las directrices, en algunas circunstancias, se permitiría su sustitución por un motor idéntico de nivel II, en lugar de un motor certificado en virtud del nivel III, según lo dispuesto en la regla 13.2.2. En el caso de la sustitución por un motor idéntico, resultará aplicable el nivel adecuado para la fecha de construcción de buque.

En el Anexo VI también se ha introducido la posibilidad de expedir una certificación en retrospectiva para demostrar que los motores se ajustan a los límites aplicables de emisión de NO<sub>x</sub>, según lo dispuesto en la regla 13.7, en el caso de los motores diésel con una potencia de salida superior a 5.000 kW y una cilindrada igual o superior a 90 litros instalados en buques construidos entre el 1 de enero de 1990 y el 31 de diciembre de 1999. Por lo tanto, esta situación, por lo general, afectará sólo a los motores principales instalados en tales buques, puesto que los criterios basados en una cilindrada de 90 litros representan, por ejemplo, en los proyectos actuales de motores de velocidad media, motores con un diámetro igual o superior a 460 mm. Así, respecto de estos motores, si una Parte, que no necesariamente debe ser el Estado de abanderamiento del buque, ha certificado un "método aprobado", que se traduce en un valor de emisiones inferior al nivel I correspondiente y ha notificado tal certificación a la OMI, entonces, ese método aprobado se aplicará a más tardar en el primer proceso de renovación que se realice, como mínimo, 12 meses después de la notificación a la OMI. Sin embargo, si el propietario de un buque puede demostrar que el método aprobado no está disponible comercialmente en ese momento, entonces ese método aprobado se instalará en el buque a más tardar en el primer reconocimiento anual subsiguiente que corresponda realizar después de que el método aprobado esté disponible comercialmente.

### **3.5.1.3. Regla 14: Óxidos de Azufre (SO<sub>x</sub>)**

Los controles de las emisiones de SO<sub>x</sub> y de materia particulada se aplican a todo proceso de combustión de combustibles fósiles, instalados a bordo y, por tanto, incluyen tanto a los motores principales como a los auxiliares, así como a elementos tales como calderas, incineradores, generadores de gas inerte, etc. Estos controles se dividen entre los que se aplican en las zonas ECA establecidas para limitar las emisiones de SO<sub>x</sub> y de materia particulada y los controles que se aplican fuera de esas zonas y que se consiguen poner en práctica principalmente mediante la limitación del contenido máximo de azufre del combustible consumido a bordo. Estos límites de contenido de azufre en el combustible (expresados en% masa/masa, es decir, en peso) han ido siendo más restrictivos a lo largo de los años como se muestra en la Tabla 7.

Las zonas ECA establecidas a fecha de este trabajo de investigación son las siguientes:

- Zona del mar Báltico – definida en el Anexo I del Convenio MARPOL (solamente para los SO<sub>x</sub>).
- Zona del Mar del Norte –definida en el Anexo V del Convenio MARPOL (solamente para los SO<sub>x</sub>).
- Zona de Norteamérica (que entró en vigor el 1 de agosto de 2012) – definida en el apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM).
- Zona del mar Caribe de los Estados Unidos (que entró en vigor el 1 de enero de 2014) – definida en el Apéndice VII del Anexo VI del Convenio MARPOL (SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> y PM).

Tabla 7 Regla 14 anexo VI de MARPOL sobre el contenido de azufre en combustibles

| Límite de contenido de Azufre fuera de zonas ECA | Límite de contenido de Azufre en zonas ECA |
|--|--|
| 4,5% antes del 1 enero 2012                      | 1,5% antes del 1 de julio 2010             |
| 3,5% a partir del 1 enero 2012                   | 1,5% a partir del 1 de julio 2010          |
| 0,5% a partir del 1 de enero 2020                | 0,1% a partir del 1 de enero 2015          |

La mayoría de los buques que navegan tanto fuera como dentro de estas ECA utilizarán distintos combustibles a bordo para así cumplir los límites de azufre. En estos casos, antes de entrar en una ECA, se deberá haber cambiado totalmente el tipo de combustible para así utilizar el adecuado que cumpla con los límites de la ECA en cuestión, al tiempo que se deberá haber aplicado a bordo un procedimiento por escrito que muestre cómo se realiza este cambio. Del mismo modo, la operación de cambio de combustible no comenzará hasta después de haber salido de la ECA. Al realizar cada operación de cambio se registrarán las cantidades de combustibles a bordo, así como la fecha, la hora y la situación del buque, ya sea al finalizar el cambio de combustible antes de entrar o después de salir de una ECA. Estos datos se anotarán en el libro de registro prescrito por el Estado de abanderamiento, y a falta de toda prescripción específica a este respecto, las anotaciones se podrán hacer, por ejemplo, en el libro registro de hidrocarburos del buque que se dispone en el Anexo I.

El primer nivel de control y seguimiento de esta regla 14 del anexo VI de MARPOL comienza con el control e informe del contenido real de azufre del combustible disponible a bordo. Este valor debe ser declarado por el proveedor de combustible en la nota de entrega de combustible y, por lo tanto, esta información, junto con otros aspectos relacionados, se vincula directamente con las prescripciones de calidad del combustible.

En consecuencia, en esta regla se establecen los valores límite y los medios para cumplirlos. Sin embargo, existen otros medios por los que se podrían alcanzar niveles equivalentes de control de emisiones de SO<sub>x</sub> y de materia particulada, tanto fuera como dentro de una ECA. Estos pueden dividirse en métodos denominados primarios (en el que se evita la formación del contaminante, por ejemplo, usando combustible LNG) o secundarios (en el que se forma el contaminante, pero posteriormente se elimina en cierto grado antes de que se emita a la atmósfera a través de los gases de escape, por ejemplo, mediante la instalación de sistemas de lavado de gases de escape o *scrubbers*). Se permite la aplicación de estos métodos, a expensas de ser autorizados por la Administración. A la hora de aprobar estos equivalentes la Administración de que se trate deberá tener en cuenta las directrices pertinentes. En la actualidad, no existen directrices respecto de ninguno de los métodos primarios (que podrían comprender, por ejemplo, el uso de una mezcla, realizada a bordo del buque, de combustibles líquidos o mixtos (gas/líquido). Respecto de los métodos de control secundarios, se han adoptado directrices (International Maritime Organization, 2015) sobre los *scrubbers*, haciendo un lavado de los gases de escape antes de su emisión a la atmósfera, y al usar tales mecanismos no habría ninguna restricción respecto del contenido de azufre del combustible transportado distinta de la establecida por la certificación del sistema.

#### **3.5.1.4. Regla 15: Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)**

Esta regla sólo se aplica a los buques tanque. No obstante, se aplicará también a los gaseros cuando los sistemas de carga y descarga sean de un tipo que permita la retención sin riesgos a bordo de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) que no contengan metano o el retorno sin riesgo de éstos a la tierra.

En esta regla se abordan dos aspectos del control de COV. Respecto del primer aspecto, el control de los COV emitidos a la atmósfera cuando se trata de determinados puertos o terminales se lleva a cabo mediante la observancia de la obligación de emplear sistemas de control de las emisiones de vapores. Cuando así se requiere, los medios de soporte de a bordo y en tierra han de ser conformes con lo dispuesto en la circular MSC/Circ.585: "Normas para los sistemas de control de la emisión de vapores". Una Parte podrá optar por aplicar tales controles sólo en determinados puertos o terminales que se encuentren bajo su jurisdicción y sólo a buques tanque de determinado tamaño o a ciertos tipos de buques de carga. Cuando se exijan dichos controles en determinados puertos o terminales, los buques tanque que no estén equipados con los sistemas de control correspondientes podrán ser aceptados por un periodo de hasta 3 años contado a partir de la fecha de su implantación. Si una Parte impone la obligación de contar con sistemas de control de las emisiones de vapores, notificará a la OMI dicha prescripción y la fecha a partir de la cual se la implantará. Toda Parte que establezca normas sobre las emisiones de COV en relación con buques tanque presentará una notificación a la OMI.

Respecto del segundo aspecto de la presente regla, se establece que todo buque tanque que transporte petróleo crudo dispondrá a bordo de un plan de gestión de los VOC, aprobado y específico para cada buque, que deberá implantarse de manera eficaz, como mínimo, en relación con las cuestiones enumeradas en la regla. Cabe señalar, que mediante la resolución MEPC.185(59) se proporcionan directrices para la elaboración de estos planes, y que mediante la circular MEPC.1/Circ.680 se suministra información técnica conexas sobre los sistemas y el funcionamiento de tales dispositivos.

#### **3.5.1.5. Regla 16: Procesos de incineración a bordo**

Los requisitos de incineración a bordo se dividen en dos secciones. Las Regulaciones 16.1 - 16.4 cubren la incineración a bordo en general y, por lo tanto, es potencialmente aplicable a todos los barcos, mientras que las reglas 16.6 - 16.9 son específicas sólo para incineradores instalados en barcos construidos a partir del 1 de enero de 2000 o para unidades instaladas en barcos existentes en esa fecha o después.

La Regulación 16.1 requiere que la incineración sólo se realice en equipos diseñados para ese propósito, mientras que la Regulación 16.2 prohíbe la incineración de ciertos materiales y, por lo tanto, puede verse como complementaria a los requisitos del Anexo V de MARPOL con respecto al procesamiento de basura generada por el barco. La incineración a bordo de cloruros de polivinilo (PVC) está prohibida por la regla 16.3, excepto en los incineradores a bordo para

los que se han emitido certificados de aprobación de tipo IMO de acuerdo con MEPC.59 (33), MEPC.76 (40) o MPEC.244 (66). La Regulación 16.4 reconoce que, si bien la incineración de lodos de depuradora generados por buques y aceite de lodos podría realizarse alternativamente en plantas de energía principales o auxiliares o calderas, no debe realizarse dentro de puertos, bahías o estuarios.

La Regulación 16.6 generalmente requiere que los incineradores instalados en buques construidos a partir del 1 de enero de 2000 o unidades instaladas en buques existentes en esa fecha o después de esa fecha sean de *Tipo Aprobado* de acuerdo con la resolución MEPC.76 (40), según lo modificado por la resolución MEPC. 93 (45) o *MEPC.244 (66) - Especificación estándar para incineradores a bordo*. Para estos incineradores, los manuales de operación deben mantenerse a bordo, regla 16.7, y se debe proporcionar capacitación sobre su correcto funcionamiento, regla 16.8. La Regulación 16.9 requiere que la operación sea tal que se alcancen las temperaturas establecidas para asegurar una incineración completa.

### **3.5.1.6. Regla 18: Disponibilidad y calidad del combustible**

Esta regla no se aplica directamente a los buques, sino es aplicable a los proveedores de combustible y a la supervisión que ejercen sobre estos las autoridades competentes, junto con otros aspectos normativos.

En esta regla contiene medidas conexas respecto de buques específicos (aquellos que están obligados a contar con Certificados IAPP) en relación con la retención a bordo de las notas de entrega de combustible por un período no inferior a 3 años contados desde la entrega, y con la retención de las muestras representativas de los combustibles en el buque (lo que, por ende, no necesariamente implica que deben estar a bordo, si bien siempre deben conservarse en un lugar de fácil acceso, en caso de que las autoridades competentes así lo exijan), hasta que el combustible se haya consumido en gran parte, y en cualquier caso, por un período no inferior a 12 meses contados desde la fecha de entrega. Estas prescripciones se aplican independientemente de si se cumple o no lo establecido en las prescripciones de la regla 14 - sobre SO<sub>x</sub> y control de las emisiones de la materia particulada.

Las directrices relativas al muestreo del combustible para determinar el cumplimiento de lo dispuesto en el Anexo VI del Convenio MARPOL se han actualizado para así tener en cuenta el Anexo VI revisado mediante la resolución MEPC.182 (59). Las autoridades locales tienen el poder de ajustar las directrices del Anexo VI según sea necesario a la hora de tomar muestras de combustibles, por ejemplo, el lugar donde se extrae la muestra.

Así y todo, es necesario que la supervisión del buque se aplique tanto respecto de las notas de entrega de combustible como de la muestra representativa del mismo. De conformidad con las directrices revisadas sobre la supervisión por el Estado rector del puerto en virtud del Anexo VI revisado del Convenio MARPOL, resolución MEPC.181(59), párrafos 2.1.1.12 y 2.1.5, si la nota de entrega de combustible no contiene la información que figura en el apéndice V del Anexo

VI o la muestra representativa no ha sido extraída, marcada o sellada de acuerdo con las directrices pertinentes, dicha situación que ha de ser debidamente documentada y notificada a la Administración del Estado de abanderamiento del buque con copia a las autoridades de los puertos de toma de combustible y al proveedor de combustible, debiéndose conservarse otro ejemplar a bordo junto con la documentación comercial correspondiente.

En este sentido, se debe aceptar que ciertos puertos donde se realiza la toma de la muestra de combustible están en países que no son Parte del Anexo VI y, por tanto, al margen de consideraciones comerciales, estos no están directamente obligados a cumplir las diversas prescripciones establecidas en la regla 18. Por lo tanto, es habitual que los propietarios de buques, al hacer operaciones de repostaje de combustible, incluyan, algunas cláusulas en las que se estipulan que el proceso de suministro de combustible ha de realizarse conforme a lo dispuesto en las prescripciones del Anexo VI y que dicho combustible deberá tener un determinado contenido máximo de azufre dentro de los límites aplicables.

### **3.5.1.7. SEEMP II**

El MEPC 67, celebrado en octubre de 2014, acordó, en principio, elaborar un sistema de recopilación de datos sobre el consumo de combustible de los buques. Se incluyeron los sistemas apropiados para la recopilación de datos en los buques, las funciones de los Estados de abanderamiento en relación con la recopilación de datos y el establecimiento de una base de datos centralizada por la Organización Marítima Internacional.

El MEPC 68, celebrado en mayo de 2015, acordó que la elaboración de un sistema de recopilación de datos para los buques debería avanzar y ajustarse a un planteamiento de tres etapas: la recopilación de los datos, el análisis de los datos y finalmente la adopción de decisiones sobre otras posibles medidas necesarias.

Durante MEPC 70, en octubre de 2016, se adoptó la resolución MEPC.278(70), en la cual se establecen prescripciones de carácter obligatorio del Anexo VI del Convenio MARPOL para que los buques recopilen y notifiquen sus datos de consumo de combustible correspondientes al año anterior (por ejemplo, en 2021, se deberán presentar los datos de consumos de combustible del año 2020). Esta resolución (MEPC. 278(70), 2018) fue adoptada como enmienda al Capítulo 4 del Anexo VI de MARPOL, agregando una nueva Regulación, la 22A, que define ciertas pautas sobre la Recopilación y notificación de datos de consumo de combustible de buques y nuevos apéndices que cubren la Información que debe ser enviada a la base de datos de consumo de combustibles de la OMI. Estas modificaciones entraron en vigor el 1 de marzo de 2018. Esta regulación implica que:

- Los buques de 5.000 GT y superiores deben presentar informes anuales sobre el consumo de combustible, la distancia navegada y las horas en operación a su Administración, de acuerdo con la Metodología establecida en la Parte II del Plan de Monitoreo de Eficiencia Energética de Buques (SEEMP).

- Las Directrices de 2012 para el desarrollo de un SEEMP se han revisado en consecuencia y se adoptaron nuevas Directrices de 2016 en el MEPC (Resolución MEPC.282 (70)).
- Los datos agregados se notificarán al Estado del pabellón del buque después del final de cada año natural, que deberá verificar que los datos se hayan comunicado de acuerdo con los requisitos antes de emitir una Declaración de cumplimiento al buque.
- Las administraciones enviarán datos agregados a la OMI para su publicación anónima.

A más tardar el 31 de diciembre del año que será sujeto de reporte, el Plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP) incluirá una descripción de la metodología que se utilizará para recopilar los datos y los procesos que se utilizarán para notificar los datos a la Administración del buque, este plan se conoce como SEEMP II.

La base de datos de la OMI sobre el consumo de combustible de los buques ha sido lanzada como un nuevo módulo del Sistema Mundial Integrado de Información la (GISIS). De esta forma, los Estados Miembros pueden acceder a la base de datos (OMI - Circular no. 3827, 2018).

Para conseguir una implantación uniforme y efectiva de las reglas, el MEPC ha elaborado los siguientes documentos.

- Resolución MEPC.282(70): Directrices de 2016 para la elaboración de un plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP) (MEPC.282(70), 2016).
- Resolución MEPC.292(71): Directrices de 2017 para la verificación de los datos sobre el consumo de combustible de los buques por la Administración (MEPC.292(17), 2017).
- MEPC.1/Circ.871: Circular MEPC sobre la presentación al sistema de recopilación de datos de la OMI de los datos sobre el consumo de combustible en un buque que no tenga derecho a enarbolar el pabellón de una parte en el Anexo VI del Convenio MARPOL (MEPC.1/Circ.871, 2017).
- MEPC.1/Circ.876: Ejemplo de modelo para la confirmación del cumplimiento de conformidad con la regla 5.4.5 del Anexo VI del Convenio MARPOL (MEPC.1/Circ.876, 2018).

Una consecuencia de este sistema de recopilación de combustible quemado a bordo de los buques, la OMI, y, de manera similar a lo propuesto por la Comisión Europea sobre la monitorización, reporte y verificación de emisiones de CO<sub>2</sub>, (ver 3.5.2) donde además de recopilar y reportar los datos de consumo de combustible, también se reportan y se analizan las emisiones de CO<sub>2</sub>. La Figura 9 muestra las diferencias entre la regulación MRV europea y la regulación de OMI.

Figura 9 Diferencias entre las regulaciones MRV y IMO-DCS.

|                                | EU MRV   | IMO DCS   |
|--------------------------------|--|---|
| <b>Entry into force</b>        | 1 <sup>st</sup> July 2015  | 1 <sup>st</sup> March 2018  |
| <b>Scope</b>                   | Ships above 5'000 GT<br>Voyages to / from EEA ports of call  | Ships 5'000 GT or above<br>International voyages  |
| <b>First monitoring period</b> | 2018   | 2019  |
| <b>Procedures</b>              | Monitoring Plan (37 sections)  | Data Collection Plan (SEEMP Part II) (9 sections)   |
| <b>Compliance (procedures)</b> | Assessment Report (no need to be on-board)   | Confirmation of Compliance (must be on-board)   |
| <b>Reporting</b>               | Fuel consumption (port / sea)<br>Carbon emissions<br>Transport work (actual cargo carried)<br>Distance sailed<br>Time at sea excluding anchorage | Total fuel consumption<br>Distance travelled<br>Hours underway<br>Design deadweight used as proxy |
| <b>Verification</b>            | Independent accredited verifiers   | Flag administrations or Authorized Organizations  |
| <b>Compliance (reporting)</b>  | Document of Compliance (June 2019)   | Statement of Compliance (May 2020)  |
| <b>Publication</b>             | Distinctive public database  | Anonymous public database   |

Fuente: Verifavia Shipping, (2020)

### 3.5.2. Reglamento (UE) 2015/757 del Parlamento Europeo

El Parlamento Europeo, a raíz de la desregulación del transporte marítimo en cuanto a emisiones atmosféricas (Parlamento Europeo, 2009; Parlamento Europeo, 2015) decidió actuar al respecto sobre aquellos buques que operen en aguas europeas. El transporte marítimo internacional era el único medio de transporte no incluido en el compromiso de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero contraído por la Unión Europea, haciéndose notorio en el hecho de que las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo internacional de la Unión aumentaron un 48% entre 1990 y 2007.

La Resolución del Parlamento Europeo, de 5 de febrero de 2014, sobre un marco para las políticas de clima y energía en 2030, pedía a la Comisión y a los Estados miembros que establecieran un objetivo vinculante de la Unión para 2030 consistente en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40%, como mínimo, en comparación con los niveles de 1990. El Parlamento Europeo señalaba asimismo que todos los sectores económicos deberían contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero si la Unión desea participar de forma equitativa en los esfuerzos mundiales.

En sus conclusiones del 23 y 24 de octubre de 2014, el Consejo Europeo refrendó el objetivo, vinculante para la Unión Europea, de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la Unión por lo menos en un 40% para 2030 con respecto a los valores de 1990. Además, el Consejo Europeo afirmó la importancia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y los riesgos relacionados con la dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte, e invitó a la Comisión a que siga estudiando instrumentos y medidas que permitan plantear desde una perspectiva global y tecnológicamente neutra la promoción de la reducción de las emisiones y la eficiencia energética en el transporte.

Debido al desconocimiento de la cantidad precisa de CO<sub>2</sub> y otras emisiones de gases de efecto invernadero del transporte marítimo relacionado con el espacio de las aguas de la UE, principalmente debido a la falta de monitoreo y notificación de tales emisiones, se llegó a la conclusión de que un sistema robusto para el monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte marítimo es un requisito previo para cualquier medida regulatoria o establecimiento de cualquier estándar de eficiencia, ya sea que se aplique a nivel de la UE o globalmente.

Además, un sistema MRV robusto debería contribuir a la eliminación de las barreras del mercado, en particular relacionadas con la falta de información sobre la eficiencia del buque. Con base en los resultados de la evaluación de impacto, se espera que al introducir MRV, las reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero de hasta un 2% en comparación con las operaciones habituales y pudiéndose lograr una reducción agregada de los costos netos de hasta 1.200 millones de euros para 2030 (Comisión Europea, 2013).

Al introducir MRV como primer paso, se puede dedicar más tiempo a la discusión y la toma de decisiones sobre los objetivos de reducción de emisiones, las medidas basadas en el mercado y los estándares de eficiencia para lograr estas reducciones a un costo mínimo. Esto es particularmente relevante para las discusiones a nivel mundial en la OMI.

Dada la clara preferencia de la Comisión por las medidas tomadas a nivel mundial, el MRV de la UE debería servir como ejemplo para la implementación de un MRV global con el objetivo de acelerar los debates internacionales. En este contexto, se realizarán presentaciones relevantes a la OMI cuando apropiado. Una vez que se decide un sistema global, el Reglamento propuesto debe modificarse para alinear el MRV de la UE con el sistema global.

De manera resumida, el objetivo principal de este Reglamento MRV es establecer un sistema europeo de MRV para las emisiones de CO<sub>2</sub> de los buques como primer paso de un enfoque por etapas para reducir estas emisiones. El enfoque está diseñado para hacer uso de los datos ya existentes a bordo de los barcos en toda su extensión.

Las características del sistema MRV propuesto son:

- Centrarse en el CO<sub>2</sub> como GEI predominante emitido por los barcos y en otra información relevante para el clima, como la información de eficiencia para abordar las barreras del mercado para la adopción de medidas de mitigación rentables y para alinear MRV con la discusión de la OMI sobre estándares de eficiencia para barcos existentes
- Calcular las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> en función del consumo de combustible y el tipo de combustible y la eficiencia energética utilizando los datos disponibles de los libros de registro, los informes diarios y las notas de entrega del búnker.

Los datos reportados por los buques, sujetos a esta regulación, son públicos y se pueden encontrar en la página web de la European Maritime Safety Agency (EMSA) (EMSA, 2018).

## 4. TRANSPORTE MARÍTIMO DE BUQUES GASEROS

Los buques gaseros conforman un subgrupo dentro del grupo de Buques tanque. Los barcos gaseros son buques tanque especializados, que a su vez se dividen en dos grandes grupos, los buques tanque que transportan productos licuados del petróleo, conocidos por sus siglas en inglés buques LPG, y en buques que transportan gas natural licuado, conocido como metaneros o buques LNG.

Los buques gaseros transportan la carga bien bajo presión, bajo moderada presión y baja temperatura, o bien a muy bajas temperaturas (criogénicas) (McGeorge, 1995).

El gas natural licuado (LNG) es actualmente una de las opciones preferidas como fuente energética por muchas industrias debido al hecho de que este hidrocarburo produce emisiones insignificantes de NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>, además de una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> de alrededor del 20% en comparación con combustible residuales (Calderón *et al.*, 2016). Estas características hacen que el gas natural sea un alternativa importante en el mix energético global ya que aporta flexibilidad a la hora de equilibrar las redes eléctricas que tengan conectadas o que dependan de energías renovables, así como también es una alternativa más limpia a combustibles derivados del petróleo para el sector transporte (Economides *et al.*, 2009; Aguilera, 2014; Kuang, 2018). Con estas ventajas, existen pronósticos de demanda de LNG que proyectan un aumento estimado del 40% en los próximos 20 años (IEA, 2018).

En la actualidad, el comercio mundial de LNG ha experimentado un aumento constante durante los últimos años (International Gas Union, 2019). Esto ha sido impulsado, en gran medida, por la creciente preocupación ambiental, precios muy competitivos del gas natural en comparación con otros combustibles, bajo costo de producción de LNG y la aparición de un mayor número de mercados emergentes (Varahrami *et al.*, 2018), siendo Australia, Estados Unidos, Nigeria, Malasia, Catar y Trinidad y Tobago los mayores proveedores de LNG a nivel mundial (Zhang *et al.*, 2018).

Como consecuencia de la predicción de crecimiento del comercio mundial de gas natural, se espera que la flota de buques LNG que forma parte de la cadena de suministro del gas natural, crezca significativamente en las próximas décadas (Shaton *et al.*, 2019). Esto hará que la flota de buques LNG se convierta en un segmento significativo y relevante del transporte marítimo (UNCTAD, 2018). A finales de 2018, la flota de buques LNG constaba de 525 barcos con una provisión de 128 nuevas construcciones proyectadas a partir de enero de 2020 (International Gas Union, 2019; Information Handling Services Markit, 2020). La flota de buques LNG es única en cuanto a la diversidad de sistemas de propulsión disponibles, que van desde turbinas de vapor convencionales que proporcionan potencia propulsora y auxiliar a bordo, hasta modernos motores de combustible duales de dos tiempos con inyección de gas (Chang *et al.*, 2008; Lin, Yu and Guan, 2014; Ekanem *et al.*, 2015; González Gutiérrez *et al.*, 2020).

El otro gran grupo dentro del transporte marítimo de gaseros son los buques que transportan gases licuados del petróleo (LPG). El LPG es un conjunto de productos resultantes de los procesos de extracción de gas natural y de crudo, y, por lo tanto, es lógico asumir que la oferta disponible de LPG dependerá de los niveles de producción de crudo y del gas natural. El mercado del LPG se mueve según la estrategia de “*supply push*” en vez de por la estrategia “*demand pull*”, es decir la producción y transporte se regula en base a la demanda anticipada de los clientes (Adland et al., 2008).

El LPG es una opción que está siendo considerada con el fin de asegurar que se satisface la demanda energética y además, es una alternativa como combustible para el transporte ya que es menos contaminante que otros combustibles fósiles que son empleados a nivel global (Baranzini et al., 1996; Johnson, 2003; Raslavičius et al., 2014; Synák et al., 2019a).

Como se ha mencionado anteriormente, el mercado de LPG depende del mercado del gas natural y del crudo y, teniendo en cuenta la previsión que existe sobre un plausible aumento del mercado del gas natural es de esperar que, en consecuencia, el mercado de LPG aumente, siendo necesario una expansión de la flota existente de buques LPG. 109 nuevos buques LPG están proyectados a partir de enero de 2020 (Information Handling Services Markit, 2020).

A diferencia de los buques LNG en cuanto a sistemas de propulsión, los buques LPG son más convencionales a este respecto, dominando como sistema de propulsión los motores diésel de dos o cuatro tiempos al menos, a fecha de este trabajo de investigación, aunque bien es cierto que ya existen proyectos donde sistemas de propulsión alternativos y combustibles alternativos son empleados en buques LPG (MAN B&W, 2016; Nikolaou, 2017), y algún buque LPG de la flota existente está preparado para emplear motores duales de dos tiempos con inyección de LNG, aunque no se tiene constancia de que estén siendo operados con este tipo de combustible.

En las siguientes secciones se tratará de manera breve el mercado marítimo de LPG y LNG, las características técnicas y estructurales más representativas de los buques y, por último, se analiza la estructura de la flota mundial de buques gaseros.

## **4.1. Transporte marítimo de gases licuados del petróleo**

En un principio, el uso y en consecuencia el transporte de gases licuados del petróleo (LPG) no fue una opción considerada dada su complejidad a la hora de realizar el transporte, este hecho hizo que el LPG originado en los procesos de extracción y refino de petróleo fuese desechado, quemándolo en antorchas industriales.

La producción moderna de LPG se remonta a principios de 1900 con la Rockgas Production Co., que vendían el LPG en botellas o cilindros para uso residencial. En estos contenedores había una combinación de propano y butano similar a la de hoy en día, aunque en la actualidad, el gas en dichos contenedores es mucho más limpio y refinado que a principio del siglo XX.

Con los avances técnicos de los materiales y la adquisición de más conocimientos sobre la utilidad de estos gases, la demanda de LPG aumentó y surgió la necesidad del movimiento masivo y más distancia del origen de estos gases.

El primer buque especialmente diseñado para el transporte de LPG fue el *Agnita*, de fabricación británica, entregado en 1931. Sin embargo, el primer barco que transportó LPG a granel fue el *NATALIE O WARREN*, que comenzó a operar en 1947 en una ruta regular de Houston a Nueva York, y era propiedad del armador noruego Øyvind Lorentzen.

Los productos más importantes del LPG y por lo tanto más empleados comercialmente son el etileno, butano y propano, que se conocen como compuestos alquenos (hidrocarburos insaturados con doble enlace de carbono en su molécula).

Para el transporte de cualquier mercancía, es necesario saber su composición con el fin de realizar un diseño apropiado de los tanques de carga, y también, para saber cómo operar con dicha carga. El LPG se licua para el transporte en buques y luego se vuelve a transformar a estado gaseoso para su uso como combustible para calefacción, para motores o como materia prima en las industrias petroquímica. El volumen en estado líquido del LPG se reduce de 2.300 a 13.500 veces comparado con su estado gaseoso (Nolan, 2019).

El vapor de los gases de LPG es un anestésico y asfixiante en altas concentraciones por lo que su manipulación debe hacerse con las mayores medidas de seguridad. El LPG es incoloro, inodoro, no corrosivo y no tóxico. Tiene una baja viscosidad y, por lo tanto, es más probable que se pueda detectar más rápidamente cualquier fuga que si lo comparamos con otros productos derivados del petróleo. En el caso de una fuga, esta tiende a extenderse en la superficie, acompañando la fuga de una niebla visible de vapor de agua condensado, aunque la mezcla de vapor inflamable se extiende más allá del área visible (Nolan, 2019).

En cuanto a los motores de mercado del LPG, los niveles de producción de la industria petroquímica, niveles de urbanización en países tanto emergentes como los ya establecidos, así como el precio competitivo del LPG en comparación con otras alternativas energéticas, son los principales motores de mercado de este producto (Abudu et al., 2020).

El LPG se transporta generalmente desde el lugar de producción hasta el lugar de distribución a través de tuberías, a granel por medio buques LPG o por transporte intermodal empleando ISO contenedores.

Para el transporte a largas distancia de estos productos (también para el gas natural), existe una amplia literatura que analiza las diferencias, ventajas y desventajas sobre las alternativas de emplear gaseoductos o buques especializados para su transporte, por citar algunos ejemplos de estudios sobre estas alternativas de transporte de gases, se pueden encontrar los trabajos de Richardson et al., (1996); Ahmadian Behrooz, (2016); Gao et al., (2011); Kjærstad et al., (2016); Pambour et al., (2016); Roussanaly et al., (2014); Vianello et al., (2016) o Yoo et al., (2013). La comparación entre métodos de transporte no es objeto de estudio de este trabajo de investigación.

El transporte de LPG por buques se caracteriza por continuas transacciones comerciales debido a la economía del arbitraje que domina en este sector. Por el lado de la demanda, existen tres tipos de fletadores:

- Usuarios finales que normalmente firman contratos a largo plazo con productores de LPG para asegurar una cantidad fija de volumen para su propio consumo.
- Empresas energéticas con instalaciones *upstream* que producen LPG, pudiendo venderlo en contratos a largo plazo a compradores fijos, o comercializarlos en mercados spot según las condiciones del mercado.
- Intermediarios (*traders*), que no tienen activos y simplemente se benefician de mover la carga entre diferentes ubicaciones geográficas.

Aparte del primer tipo de fletador, los otros dos tipos de fletadores pueden elegir el destino según la situación del mercado.

El mercado marítimo de LPG no ha atraído demasiado interés de la comunidad científica, por lo que no ha sido objeto de una gran atención académica tal y como pone de manifiesto los trabajos de Adland et al., (2008) y Engelen et al., (2011), a pesar de ser un mercado en alza por su importancia como combustible, materia prima y alternativa energética (Peng et al., 2020).

Tabla 8 Principales mercados marítimos de gases licuados del petróleo

| Tipo de Gas    | Punto de ebullición (°C) | Densidad específica | Mercado Primario                   |
|----------------|--------------------------|---------------------|------------------------------------|
| LPG            |                          |                     |                                    |
| Propano        | -42,3                    | 0,58                | Materia prima y calefacción        |
| Etano          | -88,6                    | 0,55                | Materia prima y calefacción        |
| Butano         | -0,5                     | 0,60                | Materia prima y calefacción        |
| Gases químicos |                          |                     |                                    |
| Amoníaco       | -33,4                    | 0,68                | Fertilizantes                      |
| Olefinas       |                          |                     |                                    |
| Etileno        | -103,9                   | 0,57                | Materia prima en procesos químicos |
| Propileno      | -47,0                    | 0,61                | Materia prima                      |
| Butadieno      | -5,0                     | 0,65                | Materia prima                      |
| VCM            | -13,8                    | 0,97                | Materia prima                      |

Fuente: Stopford, (2009)

Como combustible, el LPG está ganando importancia en el sector del transporte dada la menor cantidad de emisiones nocivas para la atmosfera en comparación con otros combustibles empleados (Johnson, 2003; Raslavičius et al., 2014; Synák et al., 2019b). Cuando el LPG se utiliza como materia prima en la industria petroquímica, el precio es importante porque los desequilibrios de la oferta y la demanda en esta industria provocan diferencias de precios entre regiones y, además del hecho que el LPG se encuentra en competición con otras materias primas como por ejemplo, la nafta (Stopford, 2009).

En cuanto a los principales países participantes en el mercado del LPG, el noreste de Asia (Japón, China y Corea del Sur) es la región importadora de LPG más grande del mundo, seguida de Europa occidental y los Estados Unidos. Tradicionalmente, el Medio Oriente ha sido el área principal de exportación de LPG, sin embargo, los desarrollos recientes en los mercados de productos petrolíferos en América del Norte comienzan a cambiar esta dinámica. Después del descubrimiento del gas de esquisto, EE.UU. se ha convertido en una región exportadora de LPG cada vez más importante, incrementando las exportaciones de LPG de 9 millones de toneladas en 2013 a casi 24 millones de toneladas en 2016, siendo Asia y Europa los principales receptores de estos cargamentos (The World LPG Association, 2017; Bai et al., 2019).

El mercado marítimo de gas (LNG y LPG) ha sido durante el año 2019 el segmento del transporte marítimo que más incremento experimentó (UNCTAD, 2019), aunque la mayoría de este incremento se produjo por el crecimiento del mercado de gas natural licuado.

#### **4.1.1. Buques LPG: características técnicas de la flota**

Los buques LPG son buques tanque diseñados para el transporte de gases licuados del petróleo a granel. Los buques LPG pueden transportar otros gases como el amoníaco, el propileno y el cloruro de vinilo. Los distintos tipos de productos que pueden transportar estos buques influyen en la construcción de los buques, y sobre manera, en los sistemas de carga instalados. Prácticamente todos los barcos LPG pueden transportar los productos más significativos tales como el propano, butano, amoníaco, propileno, etileno y compuestos de vinilo.

Teniendo en cuenta la temperatura y la presión necesarias para transportar los distintos productos licuados del petróleo, los buques LPG se pueden dividir en tres categorías: presurizados, semi-refrigerados y completamente refrigerados (Babicz, 2015). Los buques LPG de pequeño tamaño (menos de 6.000 m<sup>3</sup> de capacidad de carga) suelen ser presurizados. El diseño semi-refrigerado se usa para los espacios de carga de alrededor de menos de 10.000 m<sup>3</sup>, y la técnica completamente refrigerada está destinada a los espacios de carga entre 10.000 m<sup>3</sup> y 100.000 m<sup>3</sup>.

Los buques LPG completamente refrigerados normalmente tienen tanques de carga de tipo prismáticos y suelen transportar cargas de LPG y algunas cargas químicas. La carga en los barcos se transporta a presión ambiente y en condiciones totalmente refrigeradas. Los buques están equipados con una planta de licuefacción que es capaz de mantener la temperatura de la carga en los límites requeridos.

Los buques LPG semi-refrigerados se conocen comúnmente como barcos semi-presurizados y generalmente están contruidos con tanques cilíndricos horizontales o bilobulados capaces de soportar presiones de hasta 10 bar. Los buques están equipados con una planta de licuefacción capaz de mantener la temperatura y la presión de la carga. Estos buques generalmente se emplean en mercados *tramp*.

Existe un subgrupo dentro de estos buques semi-refrigerados y son los buques que transportan etileno, transportando este producto a  $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Estos buques se encuentran entre los más sofisticados de la flota en cuanto a su construcción y están diseñados para transportar cargas con múltiples composiciones a la vez, y cuentan con una planta de licuefacción independiente para evitar el cruce o contaminación entre los distintos tanques de carga.

Los buques LPG totalmente presurizados operan en comercios costeros. Tienen tanques cilíndricos horizontales que son capaces de soportar presiones internas de 20 bar y son capaces de transportar cargas como propano a temperatura ambiente. Debido a los requisitos de construcción de los sistemas de contención de carga, estos buques tienen un tamaño restringido siendo los de menor tamaño de la flota de LPG.

Dado que la densidad de la carga que transportan estos buques varía de 0,5 a 0,9 kg/l, tienen bajos calados y mayores francobordos.

La mayoría de los buques LPG son construidos con doble casco al ser una característica de seguridad requerida y, para aquellos buques que no tienen esta característica, debe de haber una distancia mínima entre los tanques de carga y el casco. La disposición estructural a proa y a popa es similar a la de otros buques tanque. La sección de carga está enmarcada transversal o longitudinalmente, dependiendo principalmente del tamaño de los tanques, y la zona interior del casco tiene una serie de consideraciones estructurales especiales debido a los diseños de los tanques de carga. Todos los buques LPG tienen espacios libres alrededor de los tanques de carga que son monitoreados para detectar fugas de gas y en muchos barcos estos espacios también se mantienen con una atmósfera inerte. Las cargas de gas en estado líquido se transportan bajo presión positiva para que no pueda entrar aire en los tanques y crear una mezcla inflamable (Germanischer Lloyd, 2012).

El agua de lastre no puede transportarse en los tanques de carga, por lo que emplean los espacios de doble casco, doble fondo, tanque de achique para controlar el lastre del buque (Eyres et al., 2012).

Los buques LPG tienen instaladas plantas de licuefacción o subenfriamiento. Estas plantas reciben el gas evaporado proveniente de los tanques debido a cualquier ingreso de calor, lo licua y lo devuelve a los tanques de carga.

Respecto a los tanques de carga, hay dos familias principalmente, los tanques integrales y los tanques independientes.

Los tanques integrales generalmente son empleados en buque LPG donde la carga se debe transportar en condiciones de presión cercanas a la atmosférica, por ejemplo, el butano. Esto se debe a que, con este tipo de tanque de carga, no requiere especiales consideraciones que mitiguen la expansión o contracción de la estructura del tanque.

Los tanques de carga independientes son estructuras auto soportadas y no son parte estructural del casco de los barcos. Este tipo de tanque de carga se subdivide en tipos A, B y C (Senjanović et al., 2006).

Los tanques tipo 'A' están contruidos principalmente por superficies planas. La presión de diseño máxima permitida del tanque en el espacio de vapor para este tipo de sistema es de 0,7 bar; esto significa que las cargas deben transportarse en condiciones totalmente refrigeradas a la presión atmosférica o cerca de ella (normalmente por debajo de 0,25 bar, presión manométrica).

El material utilizado para los tanques tipo 'A' no es resistente a la propagación de grietas. Por lo tanto, para garantizar la seguridad, en el improbable caso de fuga del tanque de carga, se requiere un sistema de contención secundario. Este sistema de contención secundaria se conoce como barrera secundaria y es una característica de todos los buques tanque con tanques Tipo 'A' capaces de transportar cargas por debajo de -10 ° C (CCNR/OCIMF, 2010).

Para buques LPG completamente refrigerados (que no transportarán cargas por debajo de -55°C), la barrera secundaria debe ser una barrera completa capaz de contener todo el volumen del tanque en un ángulo definido del talón y puede formar parte del casco del buque tanque, siendo este el diseño más empleado. En este caso, el casco del buque debe ser construido de acero especial capaz de soportar bajas temperaturas. La alternativa es construir una barrera secundaria separada alrededor de cada tanque de carga. El espacio entre el tanque de carga (a veces denominado barrera primaria) y la barrera secundaria se conoce como espacio de retención.

El Código IGC estipula que una barrera secundaria debe poder contener las fugas del tanque durante un período de 15 días (International Maritime Organization, 1986).

*Tabla 9 Requerimientos de barrera secundaria en tanques de carga.*

| Tipo de tanque | Temperatura de la carga a presión atmosférica |   |   |
|----------------|---|---|---|
|                | -10° C y superior                             | Entre -10 y -55° C                          | Por debajo de -55 ° C                   |
| Integral       | No requerimientos de barrera secundaria       | El casco puede actuar de barrera secundaria | No permitido normalmente                |
| Membrana       | No requerimientos de barrera secundaria       | El casco puede actuar de barrera secundaria | Requerida barrera secundaria            |
| Semi-membrana  | No requerimientos de barrera secundaria       | El casco puede actuar de barrera secundaria | Requerida barrera secundaria            |
| Tipo A         | No requerimientos de barrera secundaria       | El casco puede actuar de barrera secundaria | Requerida barrera secundaria            |
| Tipo B         | No requerimientos de barrera secundaria       | El casco puede actuar de barrera secundaria | Requerida barrera secundaria parcial    |
| Tipo C         | No requerimientos de barrera secundaria       | El casco puede actuar de barrera secundaria | No requerimientos de barrera secundaria |

Fuente: Eyres et al., (2012)

Cuando se transportan cargas inflamables, estos espacios deben llenarse con gas inerte para evitar que se cree una atmósfera inflamable en caso de fuga desde la barrera primaria.

Los tanques tipo 'B' pueden construirse de superficies planas o pueden ser de tipo esférico. Este tipo de tanque es sometido a un análisis de estrés de materiales más severo que los tanques de tipo A, teniendo un especial énfasis en el estudio de la fatiga del material y en la propagación

de grietas debido a las bajas temperaturas a las que se encuentra la carga en el interior de los tanques. Este tipo de tanque de carga rara vez se encuentra en buques LPG (Senjanović *et al.*, 2006; Hiroshi *et al.*, 2013), siendo más representativo en buques LNG, por lo que será detallado en la sección de buques LNG.

Los tanques tipo 'C' son normalmente recipientes a presión esféricos o cilíndricos que tienen presiones de diseño superiores a 4 bar de presión manométrica. Los recipientes cilíndricos pueden estar montados vertical u horizontalmente. Este tipo de sistema de contención siempre se utiliza en buques gaseiros semi-presurizados o totalmente presurizados. En el caso de buques semi-presurizados, también se puede usar para el transporte totalmente refrigerado, siempre que se usen aceros apropiados a baja temperatura en la construcción de los tanques. Los tanques tipo 'C' están diseñados y construidos de acuerdo con los códigos convencionales de recipientes a presión. Las tensiones estructurales del material de construcción se mantienen bajas. Por consiguiente, no se requiere una barrera secundaria para los tanques Tipo 'C' y el espacio de retención puede llenarse con gas inerte o aire seco y para los buques tanque completamente presurizados se puede permitir el aire normal (Senjanović *et al.*, 2006; CCNR/OCIMF, 2010).

En el caso de buques totalmente presurizados, donde la carga se transporta a temperatura ambiente, los tanques pueden diseñarse para una presión máxima de trabajo de aproximadamente 18 bar de presión manométrica. Para buques semi-presurizados, los tanques de carga y el equipo asociado están diseñados para una presión de trabajo de aproximadamente 5 a 7 bar y un vacío de 0,3 bar (relativo a la presión manométrica en ambos casos).

Normalmente, el acero de los tanques de carga para buques semi-presurizados son capaces de soportar temperaturas de transporte de -48°C para para LPG o -104°C para etileno.

Respecto a los sistemas de propulsión, a fecha de enero de 2020, la flota de LPG consistía mayoritariamente de motores diésel de dos y cuatro tiempos como sistema de propulsión, habiendo cuatro buques preparados para usar LNG como combustible y tres buques con motores duales empleando etileno y otros 4 buques con motores duales listos para emplear LPG como combustible, en otras palabras, el 0,5% de la flota de buques LPG tiene motores duales y el 99,5% restante está compuesto por motores diésel de dos y cuatro tiempos (Information Handling Services Markit, 2020).

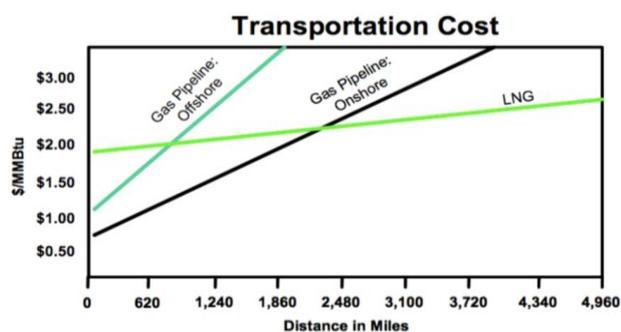
## 4.2. Transporte marítimo de gas natural licuado

Los antecedentes del mercado de gas natural licuado (LNG) se remontan al año 1959, cuando se realizó el primer transporte de LNG por el buque *Methane Pioneer*, transportando la primera carga de LNG de Estados Unidos al Reino Unido (D. Kim *et al.*, 2019a). A partir de este exitoso hito, distintos países comenzaron a desarrollar proyectos comerciales de transporte de LNG a gran escala. En 1964, el Reino Unido comenzó a importar LNG desde Argelia. En 1969, Estados Unidos exportó LNG desde Alaska a Japón por primera vez. En ese momento, el negocio de

LNG comenzó a despegar globalmente con distintos países y regiones importadores como Japón, Europa, Corea del Sur, China entre otros (Paltsev, 2015).

El transporte de gas natural de manera masiva se realiza a través de gaseoductos o mediante buques especializados, al igual que ocurre con el transporte de LPG. Aunque el transporte a través de gaseoductos ha decaído en los últimos años (GIILNG, 2020), aun cuenta con dos tercios del mercado del transporte del gas natural (Paltsev, 2015). Esto se debe a que los países importadores están cada vez más alejados de los lugares de producción, haciendo más eficiente, desde un punto de vista económico (ver Figura 10), el transporte de gas natural en su estado líquido a través de buques a medida que la distancia de transporte aumenta (Ankur, 2018).

Figura 10 Comparación del coste de transporte de gas natural por tuberías y por buques



Fuente: Ankur, (2018)

El mercado de LNG durante el año 2019 creció un 13% (IGU, 2020), siendo el 34% del LNG movido en el mercado spot y el 66% en el mercado por contratos de fletamento de media y larga duración (con una media de 13,9 años de duración en el año 2019) (GIILNG, 2020).

En la actualidad, la importancia del gas natural en el mix energético mundial es notoria, como queda reflejado en el hecho de que en Europa, el 23% de la energía sea suministrada por el gas natural, y cubriendo el 70% de esta demanda con las importaciones de gas natural hechas por buques LNG (European Commission, 2020).

El gas natural es una fuente de energía fósil que se formó en las profundidades de la superficie terrestre. El gas natural contiene muchos compuestos diferentes. El componente más grande del gas natural es el metano (CH<sub>4</sub>). El gas natural también contiene cantidades más pequeñas de otros compuestos como el propano y el butano, por ejemplo, y gases no hidrocarbonados, como el dióxido de carbono y el vapor de agua. El gas natural se emplea principalmente como combustible.

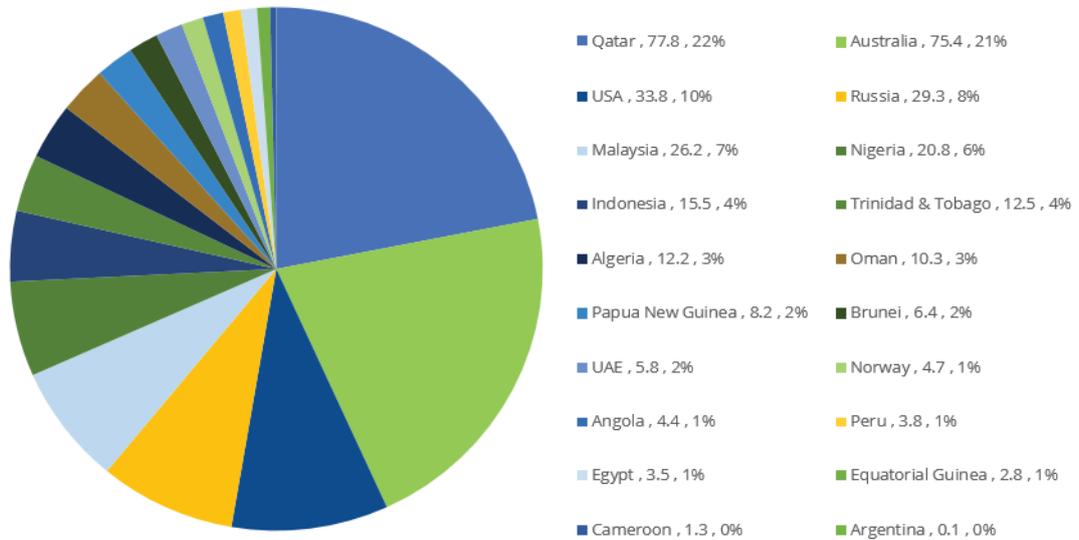
El LNG es un líquido transparente, incoloro y no tóxico que se forma cuando el gas natural se enfría a -162°C. El proceso de enfriamiento reduce el volumen del gas 600 veces, lo que hace que sea más fácil y seguro almacenarlo y transportarlo de esta manera. En su estado líquido, el LNG no es inflamable.

La cadena de suministro del LNG se puede resumir en el lugar de extracción, donde se obtiene gas natural, que es enviado a través de una red de tuberías a una planta de licuefacción (normalmente cercana al lugar de extracción), donde se enfría hasta su condensación, convirtiéndose en LNG. Este LNG se exporta mediante buques LNG hacia el país importador. Cuando el LNG llega a su destino, se convierte nuevamente en gas en las plantas de regasificación. Luego se transporta hacia los hogares, empresas e industrias donde se quema para generar calor o producir energía eléctrica. El LNG en la actualidad, también está siendo una alternativa como combustible para un transporte más económico y menos contaminante.

Como se muestra en el informe anual del Grupo internacional de importadores de gas natural licuado (GIILNG), el comercio mundial de LNG aumentó más en 2019 que en años anteriores, llegando a 354,73 millones de toneladas (MMt), un aumento de 40,93 MMt desde finales de 2018. Esto constituye un aumento del 13%, siendo el sexto año de crecimiento consecutivo. La mayoría del crecimiento adicional en 2019 provenían de los mercados de exportación existentes: Estados Unidos (+13,1 MMt), Australia (+8,7 MMt) y Rusia (+11 MMt). Qatar logró mantener su posición como el mayor exportador del mundo (77,8 MMt), seguido de cerca por Australia (75,4 MMt). Estados Unidos (33,8 MMt) superó a Malasia (26,2 MMt) como el tercer exportador más grande. Rusia es ahora el cuarto mayor exportador de LNG (29,3 MMt). La región Asia-Pacífico continuó su tendencia de crecimiento como la mayor región de exportación (131,7 MMt).

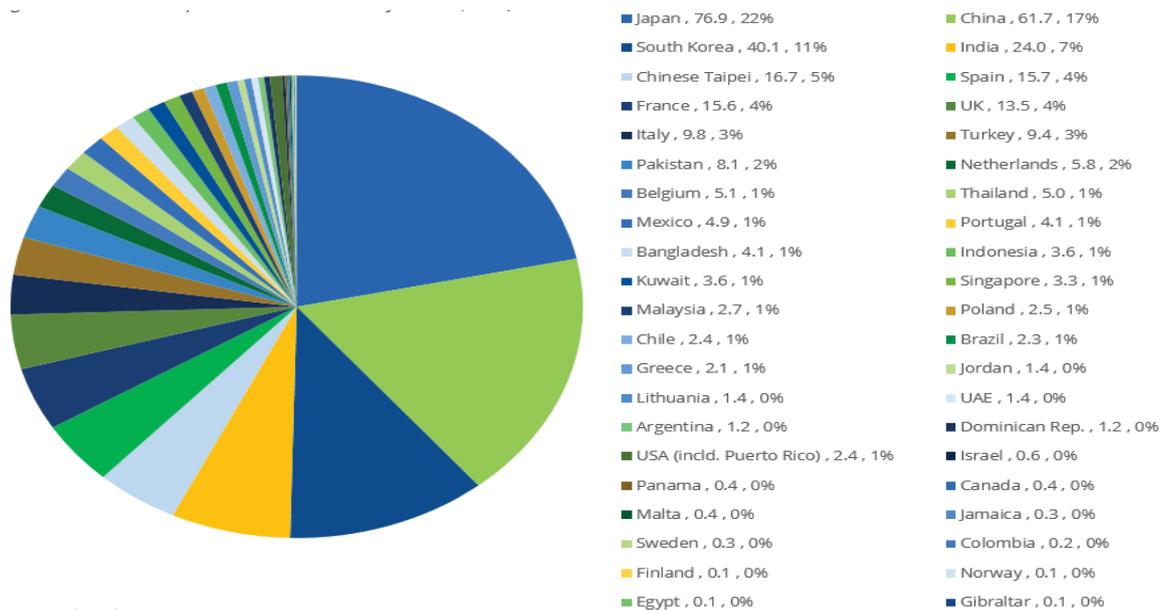
Sólo el mercado de tres países experimentó una caída en los niveles de exportación en comparación con 2018: Indonesia experimentó la mayor caída en la exportación (-2,7 MMt), seguida de Guinea Ecuatorial (-0,65 MMt) y Noruega (-0,45 MMt). No aparecieron nuevos países importadores en 2019 comprado con 2018, sin embargo, los nuevos países importadores más noveles aumentaron aún más las importaciones en 2019, como Bangladesh, Pakistán, Polonia y Panamá. Los mayores aumentos en las importaciones se observaron en Europa, con el Reino Unido, Francia, España, los Países Bajos, Italia y Bélgica representando la mayoría de las importaciones adicionales (+32 MMt). Los mercados de Asia y Asia-Pacífico que contribuyeron al comercio mundial fueron China, India y Malasia. Las regiones importadoras más grandes, al igual que en 2018, fueron Asia-Pacífico (131,7 MMt) y Asia (114,5 MMt).

Figura 11 países exportadores - LNG exportado y cuota de mercado.



Fuente: GIILNG, (2020)

Figura 12 países exportadores - LNG importado y cuota de mercado



Fuente: GIILNG, (2020)

El crecimiento del mercado de LNG se hace también visible en que de toda la flota de buques LNG existentes en 2019, solamente dos buques estaban fuera de servicio o desocupados (GIILNG, 2020).

### 4.2.1. Buques LNG: Características técnicas de la flota

En este capítulo se va a explicar brevemente las características técnicas de los buques LNG.

Lo primero que hay que mencionar que, dentro de esta clase de buques gaseros, existen dos tipos de buques cuya operación es totalmente distinta. Por un lado, los buques convencionales de LNG o metaneros, que transportan el LNG de una planta licuefacción a una planta de regasificación. Y, por otro lado, los buques denominados FSRU (*Floating Storage Regasification Units*), los cuales, si bien es cierto que están diseñados para navegar, desempeñan una función distinta a nivel operativo, y es que estos buques hacen las funciones de una planta de regasificación flotante, recibiendo el LNG de otros buques convencionales, calentando el LNG y convirtiéndolo en gas natural, para después enviarlo a tierra a través de una red de distribución de tuberías.

Los buques LNG son barcos muy avanzados tecnológicamente, diseñados teniendo en cuenta como factor esencial, la seguridad y el uso de materiales y diseños especiales para manejar sin ningún riesgo el LNG transportado a temperatura criogénica. Están diseñados y construidos mediante el estricto cumplimiento de los requisitos exigidos por la Organización Marítima Internacional (OMI) y otras organizaciones (sociedades de clasificación).

El estricto control estructural (esfuerzo y fatiga) durante el diseño de estos buques es crítico. Las restricciones en las terminales del calado y puntal conducen al aumento en la eslora y manga de los grandes buques de LNG. En consecuencia, los niveles de tensión en la estructura del buque son mayores (Zalar et. al, 2006).

Los buques LNG se pueden dividir según sus tanques de carga en independientes (autosostenidos) o de membrana, siendo los de tipo de membrana los más empleados, estando instalados en el 77% de la flota mientras que los independientes se encuentran en el 23% (IGU, 2020). Los tanques de carga están expuestos a tensiones en el material debido a que la carga se transporta en condiciones criogénicas (-162°C) y debido a las operaciones de carga y descarga. Además, los tanques de carga operan continuamente bajo cargas de presión dinámicas debido a los movimientos de los fluidos en el interior, llamado *sloshing*, causados por la presión hidráulica y las olas producidas en el fluido dentro de los tanques. Para evitar daños a las membranas causados por la combinación de movimientos de sloshing y el aumento de presión interna, las membranas se corrugan y las corrugaciones se forman a través de un proceso de estampado (Shim et al., 2020).

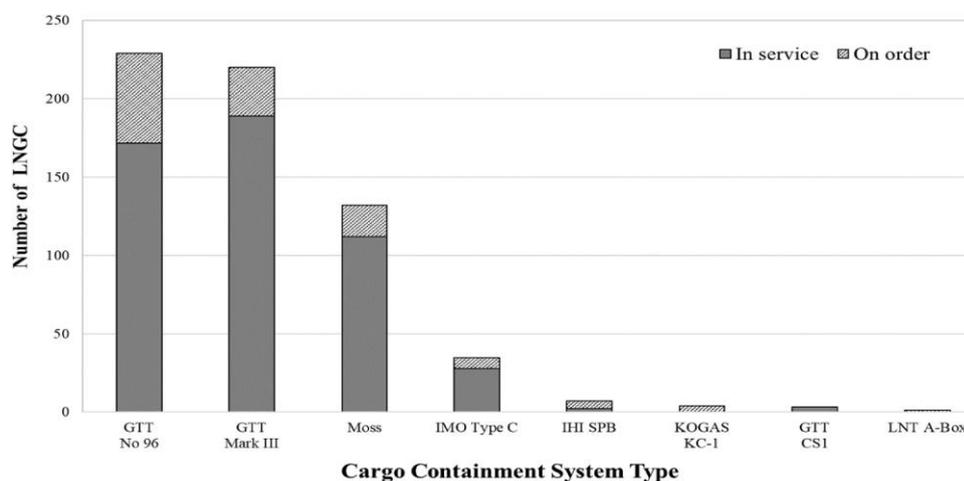
Los tanques de membrana en los buques LNG son esféricos (también conocidos como tipo Moss) o prismáticos. Los buques con tanques del tipo Moss, disponen de varias esferas (de 3 a 5) en el casco de barco, que siendo este casi rectangular deja una gran cantidad de espacio no utilizado para la carga. Para una utilización eficiente del volumen interno del casco del barco, los buques LNG emplean mayoritariamente tanques de tipo membrana con tanques prismáticos, los cuales hacen un uso más eficiente del espacio (Zhang, 2015). Por otro lado, a diferencia de la geometría de tanque esférica, el tanque prismático no tiene la misma resistencia a la rotura.

El problema del *sloshing*, es un factor esencial y se convierte en una preocupación importante para el diseño de tanques de tipo membrana, una de las situaciones más peligrosas es cuando se producen *sloshing* simultáneamente en todos los tanques, lo que pone en peligro la estabilidad para los buques, siendo uno de los factores más peligroso cuando el movimiento del líquido entra en fase de resonancia (Zhang, 2015).

Como se ve en la Figura 13, la gran mayoría de buques LNG tienen tanques de membrana, siendo la opción mayoritaria los GTT NO96 y GTT Mark III (prismáticos) y los esféricos (Moss) (Park, 2019).

A finales de 2019, la flota de buques metaneros en servicio estaba formada por 522 buques (Information Handling Services Markit, 2020), con una gran variedad en sistemas de propulsión, tamaños, capacidad y tipos de tanques de carga (International Gas Union, 2019).

Figura 13 Distribución según el tipo de tanques de carga en buques LNG



Fuente: Park, (2019)

Tradicionalmente, el sistema de propulsión en la flota de LNG ha estado dominado por plantas de vapor, desde los años 60 (D. Kim *et al.*, 2019b). Sin embargo, el cambio en los patrones comerciales de contratos tradicionales a largo plazo a un contrato a corto plazo o en el mercado spot, requiere un mayor nivel de flexibilidad en los destinos del barco y, en consecuencia, diseños más optimizados, lo que hace primordial una mejora en la eficiencia energética con el fin de reducir el consumo de combustible, siendo este uno de los mayores contribuidores a los costes operacionales. Desde 2016, el cambio en los contratos comerciales es visible al observar el volumen significativamente mayor de LNG comercializado en el mercado spot o contratos de corta duración (contratos de hasta dos años de duración). La cuota en el mercado de LNG en mercado spot en 2018 alcanzó el 31%, aproximadamente un 50% más que en 2008 (International Gas Union, 2019).

Aunque las plantas de vapor ofrecen algunas ventajas, como son los bajos costos de mantenimiento y un diseño más simple (especialmente en la gestión del gas evaporado de los

tanques, conocido como *Boil-Off Gas*, BOG), también tienen otras desventajas, especialmente la baja eficiencia térmica y los costos de transporte de carga más altos resultantes al mayor consumo de combustible, haciendo necesario el desarrollo de nuevos sistemas de propulsión. Esto también está respaldado por el desarrollo de tanques de carga más eficientes, que proporcionan flujos de BOG más bajos que los tipos de tanques de carga instalados anteriormente en buques LNG con plantas de vapor, generándose de manera natural un cantidad insuficiente de BOG para desarrollar la energía requerida para la propulsión, haciéndose necesario suplementarlo con la generación de BOG forzado (forzando la evaporación de carga a través de vaporizadores) o combustibles líquidos, esto motivó la aparición de una nueva alternativa para la propulsión del buque, dando lugar a la propulsión diésel - eléctrica (Ekanem et al., 2015; Fernández *et al.*, 2017). La importancia de este sistema de propulsión en la flota de LNG se observa en la cantidad de buques con este sistema de propulsión, en 2018, instalado en 176 buques (Information Handling Services Markit, 2018), representando aproximadamente el 32% del total de la flota de LNG.

La necesidad de sistemas de propulsión más eficientes térmicamente en los buques LNG hizo que en 2001 se ordenara el primer buque LNG con sistema de propulsión diésel - eléctrico, convirtiéndose en el reemplazo de la propulsión tradicional de las plantas de vapor.

El sistema de propulsión diésel - eléctrico también tiene otras ventajas en comparación con las plantas de vapor tradicionales, como la reducción del espacio requerido para la planta de energía, ganando espacio para el transporte de carga; también es más sencillo y rápida la parada y puesta en marcha de la planta propulsora, y además, este sistema de propulsión diésel - eléctrico aumenta los grados de redundancia con cuatro (cinco o hasta seis) motores principales y dos hélices en la mayoría de los buques LNG con sistema de propulsión diésel - eléctrico.

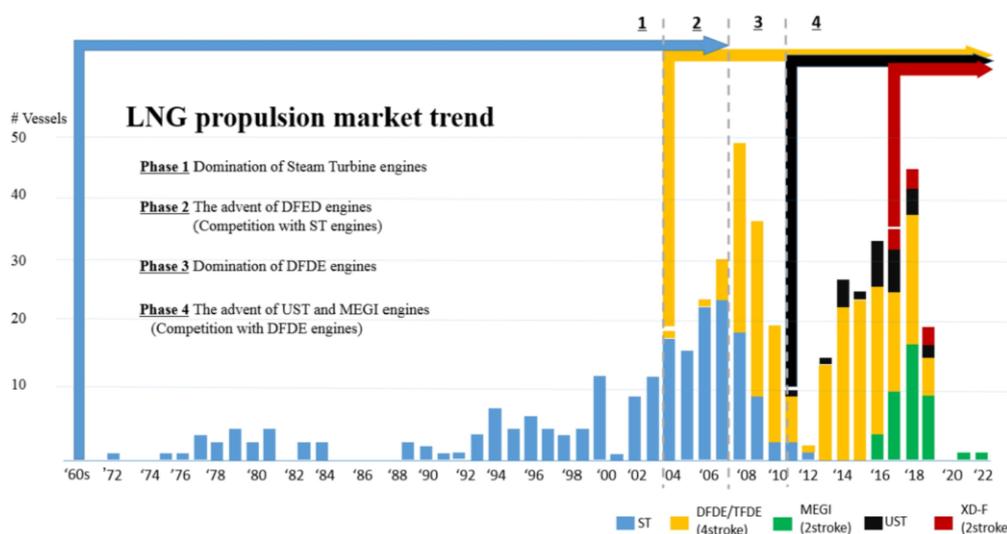
Además, los motores duales de cuatro tiempos que conforman este sistema diésel - eléctrico son muy flexibles en cuanto al combustible, pueden usar combustible residual, combustible destilado y BOG. Existe una extensa literatura sobre el funcionamiento y el rendimiento de los motores duales de cuatro tiempos y el sistema de propulsión diésel - eléctrico, como se puede observar en los trabajos de investigación de Bora et al., (2014); Cameretti et al., (2016); Di Blasio et al., (2017); Li et al., (2016); Lounici et al., (2014); Mousavi et al., (2016); Mustafi et al., (2013); Wang et al., (2016); Yang et al., (2015) entre otros. El sistema de propulsión diésel - eléctrico también es la principal alternativa para los sistemas de propulsión en los buques especiales de LNG que actúan como Unidades de Regasificación Flotante (FSRU), habiendo en octubre de 2019, cuarenta FSRU están en funcionamiento, seis de ellos no tienen información disponible sobre el sistema de propulsión principal o sistemas auxiliares, 13 barcos tienen plantas de vapor y los 21 FSRU restantes tienen sistema de propulsión diésel - eléctrico a bordo (Information Handling Services Markit, 2018). Los FSRU se han convertido en una solución atractiva para aquellas ubicaciones remotas o aisladas, o con una demanda puntual de LNG, y esto se debe a eficiencia económica, confiabilidad y flexibilidad (Giranza et al., 2018; International Gas Union, 2019; Jovanović *et al.*, 2019).

Existe otra variedad de propulsión diésel – eléctrica en buques LNG por medio de hélices azimutales. En concreto, existe una serie de buques LNG designados para un proyecto en concreto conocido como proyecto “Yamal”, cuyo sistema de propulsión es a través de tres hélices azimutales, dirigidas por motores eléctricos, lo cuales son energizados por 6 motores duales de 4 tiempos (Gierusz, 2015; Schach y Madlener, 2018; Strantzali *et al.*, 2019).

Entre medias de esta implementación del sistema diésel – eléctrico como alternativa a las plantas de vapor, apareció otro sistema de propulsión distinto para buques LNG. Este sistema de propulsión consiste motores diésel de dos tiempos, incluyendo la instalación de una planta de licuefacción para manejar la carga evaporada (Chang *et al.*, 2008; Ekanem *et al.*, 2015; Tu *et al.*, 2019), licuándola de nuevo y reenviándola a los tanques de carga.

Los últimos desarrollos en sistemas propulsión en buques LNG vienen dados por la aparición de motores duales de dos tiempos, con inyección de gas a alta y baja presión. Estos buques, además del sistema de propulsión por medio de estos motores, tienen instalados 4 motores auxiliares de cuatros tiempos también con inyección de gas. Además, algunos de estos buques están equipados con plantas de subenfriamiento o plantas de licuefacción para (en conjunción con las unidades de combustión de gas) para gestionar el LNG evaporado de los tanques de carga (Fernández *et al.*, 2017; Eleftherios y Chariklia, 2020). Esta opción de sistema de propulsión parece ser la alternativa dominante en la actualidad y en el futuro próximo (Huan, T. y Hongjun, F., 2019).

Figura 14 Tendencia en sistemas de propulsión de los buques LNG



Fuente: Tu *et al.*, (2019)

En la Figura 14, se ven las cuatro fases que corresponden con una dominancia de uno u otro tipo de propulsión (Jeong *et al.*, 2019). La primera fase desde los años 60 hasta principio del siglo XXI donde el sistema de propulsión dominador sin ninguna duda fue las plantas de vapor (turbinas). En la segunda fase, se ve el comienzo de los sistemas diésel – eléctricos como una

alternativa a las turbinas de vapor. La fase 3 confirma el dominio de los sistemas diésel – eléctrico como opción preferida. Y la fase 4, muestra la aparición de un nuevo diseño de plantas de vapor (Ultra Steam Plant) y la aparición de motores duales de dos tiempos, siendo estas dos nuevas alternativas la competencia con los sistemas diésel – eléctricos.

En lo que respecta a la gestión de la carga de LNG, el aislamiento de los tanques de carga no es perfecto, por lo que el LNG dentro de los tanques se calienta por el calor transferido desde los alrededores, haciendo que una parte de la carga en estado líquido pase a fase gaseosa, lo que resulta en un continuo proceso de evaporación del LNG (Krikkis, 2018). Este proceso de vaporización en los tanques de carga aumenta la presión interna de los tanques, siendo necesario controlarla para que se mantenga dentro de unos límites de seguridad, siendo necesario que ese LNG que se convierte en gas (BOG) sea evacuado de los tanques. El BOG en buques con plantas de vapor, se quema en las calderas y en los buques con sistemas sistema de propulsión diésel – eléctrico o con motores de dos tiempos duales, se puede emplear como combustible para propulsión, generación de energía eléctrica o si hay un exceso que no se puede emplear para generar energía, se elimina enviándolo a la Unidad de Combustión de Gas (GCU), habiendo una tercera alternativa, normalmente empleada en buques con motores diésel de dos tiempos, y es enviar el BOG a una planta de licuefacción instalada a bordo, donde se recibe el BOG, se enfría y se comprime, retornándolo de nuevo a los tanques de carga en estado líquido (Dimopoulos y Frangopoulos, 2008; Adom, Islam y Ji, 2010; Sinha et al., 2012; Zakaria *et al.*, 2012; Zakaria *et al.*, 2013).

## 5. ESTRUCTURA DE LA FLOTA DE GASEROS

En este capítulo se va a analizar la estructura de la flota de gaseros en servicio a fecha de enero del año 2020, empleado los datos obtenidos de la base de datos de *IHS Fairplay*.

La flota de gaseros, como se ha mencionado anteriormente, se divide en dos tipos de buques principalmente, los buques LPG y los buques LNG.

En enero del 2020, se contabilizaron 2.004 buques gaseros en servicio de acuerdo con los datos de *IHS Fairplay*. Habiendo 522 buques LNG y 1.482 buques LPG en servicio.

En las siguientes subsecciones se muestra la evolución de la flota de gaseros a lo largo de los años, la entrada a servicio y también el retiro de buques y, por último, se analiza la estructura técnica de la flota de gaseros, a través de la evaluación de 8 grupos o estructuras, como se muestra a continuación:

- Estructura según el grupo de bandera
- Estructura según grupos de capacidad de carga
- Estructura según grupos de eslora
- Estructura según grupos de potencia instalada
- Estructura según grupos de peso muerto
- Estructura según grupos de edad
- Estructura según grupos de arqueo bruto
- Estructura según sistema de propulsión instalado

De manera breve, a continuación, se detalla el significado de cada una de las estructuras que se emplean en este capítulo:

- Eslora: el dato que se emplea en este trabajo de investigación es la eslora total, siendo esta la distancia longitudinal y paralela a la línea de agua, en metros, desde la proa hasta la popa del buque
- Peso muerto: es el peso real en toneladas que un buque puede transportar cuando está cargado hasta el calado máximo admisible, incluyendo combustible, agua dulce, suministros, captura y tripulación.
- Arqueo bruto: es el volumen total de todos los espacios cerrados del buque, expresado en toneladas Moorson, que equivalen a 100 pies cúbicos o 2,83 metros cúbicos. Se conoce también como Tonelaje de Registro Bruto.
- Capacidad de carga: es el volumen máximo disponibles en los tanques de carga del buque, indicando la capacidad de transporte máxima que tiene el buque.

- **Potencia instalada:** es la potencia máxima instalada que es entregada a la hélice para la propulsión del buque.
- **Edad:** son los años transcurridos desde la construcción y entrega del buque hasta el año 2020.
- **Sistema de propulsión instalado:** hace referencia a los distintos sistemas de propulsión instalados a bordo de los buques gaseros, siendo estos motores diésel de dos y cuatro tiempos, motores duales de dos tiempos, sistemas diésel - eléctricos, y turbinas de vapor (plantas de vapor).

Los grupos de estructuras se ha realizado de acuerdo con las estructuras que se encuentran en estudios e informes sobre este tema.

Por otro lado, para analizar la estructura de la flota mundial de gaseros, se emplean como variables las banderas de registro, agrupándolas en grupos de banderas. Los grupos de banderas de registro empleadas en este análisis son:

- **EU15:** perteneciente a la Europa de los 15 países hasta 2004
- **RA:** banderas de registro abierto
- **RM:** resto de banderas que no están en ninguna de las anteriores agrupaciones
- **ROCDE:** países de la OCDE que no están dentro del grupo de EU15

Los países que pertenecen a cada grupo de bandera de la flota de buques gaseros en servicio en enero de 2020 se detallan en las tablas 10 y 11.

*Tabla 10 Países englobados en grupos de banderas EU15 y RA*

| <b>EU15</b>                              |  |
|--|--|
| Alemania                                 | Francia (Registro francés internacional) |
| Bélgica                                  | Gran Bretaña                             |
| Dinamarca                                | Grecia                                   |
| Dinamarca (Registro danés internacional) | Italia                                   |
| España                                   | Luxemburgo                               |
| España (Registro especial Canario)       | Países Bajos                             |
| Francia                                  | Portugal (Registro especial Madeira)     |
| <b>RA</b>                                |  |
| Antigua y Barbuda                        | Liberia                                  |
| Bahamas                                  | Libia                                    |
| Belice                                   | Malta                                    |
| Bermuda                                  | Islas Marshall                           |
| Comoras                                  | Mongolia                                 |
| Chipre                                   | Panamá                                   |
| Islas Feroe                              | Sri Lanka                                |
| Gibraltar                                | San Vicente y las granadinas             |

Tabla 11 Países englobados en grupos de banderas RM y ROCDE

| RM            |  |
|---------------|--|
| Arabia Saudí  | Isla de Man                              |
| Argelia       | Kuwait                                   |
| Argentina     | Malasia                                  |
| Bahréin       | Nigeria                                  |
| Bangladesh    | Noruega (Registro noruego internacional) |
| Brasil        | Perú                                     |
| Brunéi        | Sierra Leona                             |
| Bulgaria      | Singapur                                 |
| Camerún       | San Cristóbal y Nieves                   |
| Catar         | Tailandia                                |
| China,        | Taipéi chino                             |
| Filipinas     | Tuvalu                                   |
| Hong Kong     | Ucrania                                  |
| India         | Venezuela                                |
| Indonesia     | Vietnam                                  |
| Irán          |  |
| ROCDE         |  |
| Australia     | México                                   |
| Japón         | Noruega                                  |
| Corea del Sur | Turquía                                  |

## 5.1. Evolución de la flota de gaseros

De la base de datos de IHS Fairplay se ha obtenido la flota total de buques gaseros, desde 1939 hasta enero de 2020.

De esta base de datos, se ha obtenido, entre otros datos, el estado de cada buque en enero de 2020 y la fecha de retirada de servicio de los barcos. Los campos disponibles son:

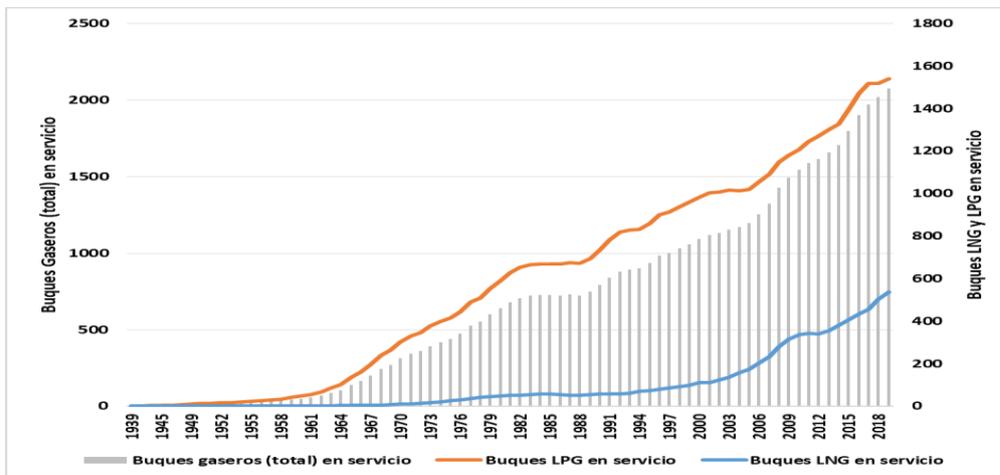
- Broken Up (Desguazado)
- In Service / Commission (En servicio)
- Continue Existence in doubt (En duda su existencia)
- Total Loss (pérdida total)
- Converting / Rebuilding (reconvertido)
- Keel Laid (quilla puesta)
- Laid-up (temporalmente fuera de servicio)
- Launched (botado)
- No Longer meet the IHS criteria (no cumple con los criterios de IHS)
- On Order / Not commenced (Proyectado / Construcción no comenzada)

- Hulked (preparado para desguace)
- Scuttled (Desechado)
- Cancelled before construction (Cancelado antes de su construcción)
- To be broken up (Para desguace)
- In casualty or repair (Accidentado o en reparación)
- Under construction (En construcción)

Un total de 2.810 buques gaseros han sido construidos desde 1939 hasta enero 2020. Otros 93 buques gaseros fueron proyectados, pero nunca llegaron a entrar en servicios, ya fuese porque fueron cancelados o porque fueron desguazados o reconvertidos a otro tipo de buques antes de ser terminados.

En enero de 2020 había en servicio 2.004 buques gaseros. Además, la existencia de 45 buques gaseros estaba en duda según la base de datos consultada de IHS Fairplay. 22 buques gaseros están en estado “Laid-Off” o fuera de servicio. Otros 5 buques gaseros tenían el estado de “No Longer meet the IHS criteria”. 6 buques estaban en proceso de reconversión, es decir, había en total 2.082 buques gaseros aptos para entrar en operación.

Gráfica 16. Evolución de la flota de gaseros



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 16 se observa la evolución total de la flota de gaseros (LNG y LPG agregados) representado como barras, y donde el número total de buques viene expresado en el eje “Y” de la izquierda.

Es importante aclarar también, que la Gráfica 16 considera en servicio todo buque que ha sido construido y no ha sido oficialmente retirado, es por esto por lo que, a fecha de enero de 2020, el total de buques LNG en activo es 538 y el total de buques LPG en activo es 1.538 en vez de 522 y 1.482 respectivamente (buques en servicio completamente operativos a fecha de enero de 2020).

Hasta mediados de la década de los 60, el número de buques LPG es muy reducido, pero a partir del año 1965 se puede observar un incremento en el número de buques LPG en servicio con un crecimiento continuo hasta comienzos de la década de los 80, donde se puede ver un aplanamiento de la curva del crecimiento, este aplanamiento se puede asociar a la crisis del petróleo y energética que comenzó en la década de los 70, ya que el mercado del transporte de LPG es influenciado mayoritariamente por la producción de petróleo y por la demanda energética mundial. En los siguientes años, se pueden observar otros dos estancamientos en el crecimiento de los buques LPG, uno en los comienzos de la década de los 90, la cual se puede explicar por la crisis del petróleo causada por la guerra del Golfo, y la otra a principio del siglo XXI, donde se produjo la crisis del petróleo de principios de la década del 2000 hasta el año 2008 (Preserve y Stevenson, 2018). Posteriormente hasta enero de 2020, se mantiene un crecimiento de la flota LPG estable.

La serie de datos representada con la línea amarilla representa el desarrollo de la flota de buques LNG. Hasta principios del siglo XXI, la cantidad de buques LNG en servicio en el año 2000 era de 117 buques mientras que, en enero de 2020, la cantidad de buques LNG en servicio era 544, un crecimiento de casi 5 veces más en 20 años. Como se mencionó en el capítulo 4.2 de esta tesis, el comercio mundial de LNG ha experimentado un aumento constante durante los últimos años (International Gas Union, 2019). Esto ha sido impulsado, en gran medida, por la creciente preocupación ambiental, precios muy competitivos del gas natural, bajo costo de producción de LNG y la aparición de un mayor número de mercados emergentes (Varahrami y Haghighat, 2018).

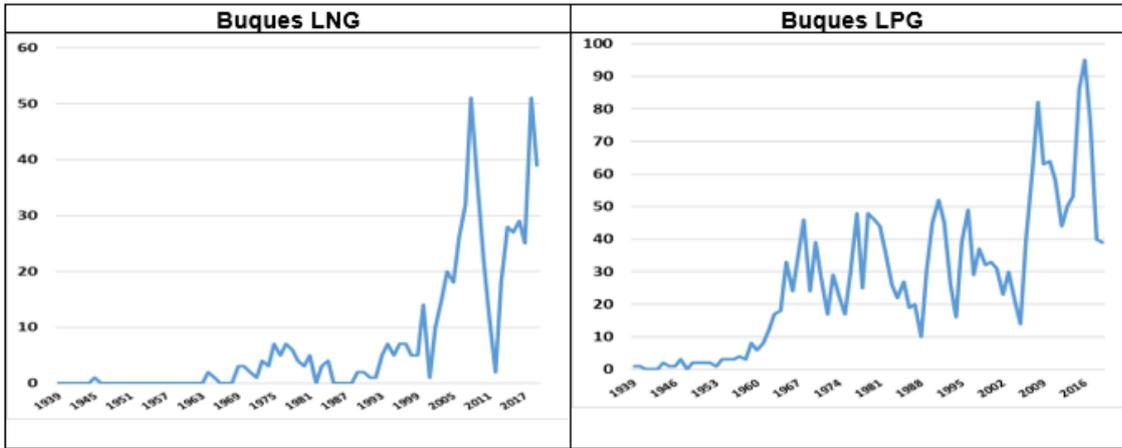
El aumento de la flota de LNG es continuo desde el año 2000, con un breve aplanamiento en la tendencia entre 2008 y 2013, coincidiendo con dos eventos de gran magnitud como fueron el pico de producción de gas natural y cambio en la política energética de Estados Unidos (Schmitt, G.J., 2006; Wiser, R. et al, 2005), además de la crisis económica mundial que se inició en 2008 con la quiebra de *Lehman Brothers* desencadenando una crisis económica mundial.

### **5.1.1. Evolución de entrada de nuevos buques gaseros en servicio**

En la base de datos se dispone de un campo con el año de entrada en servicio de cada buque. Se emplea esta fecha como indicador de cuando el buque es entregado desde el astillero al armador como una nueva construcción y comienza a desarrollar la actividad comercial para la que ha sido construido.

En la Gráfica 17 se observa los nuevos barcos LNG que entraron en servicio cada año. La evolución muestra el incremento en la puesta en operación de nuevos buques, produciéndose un incremento notable a partir del inicio del siglo XXI, siendo los dos mayores picos en 2008 y 2018 con 51 nuevos buques LNG entrando en servicio.

Gráfica 17. Evolución de nuevas construcciones de buques LNG y LPG



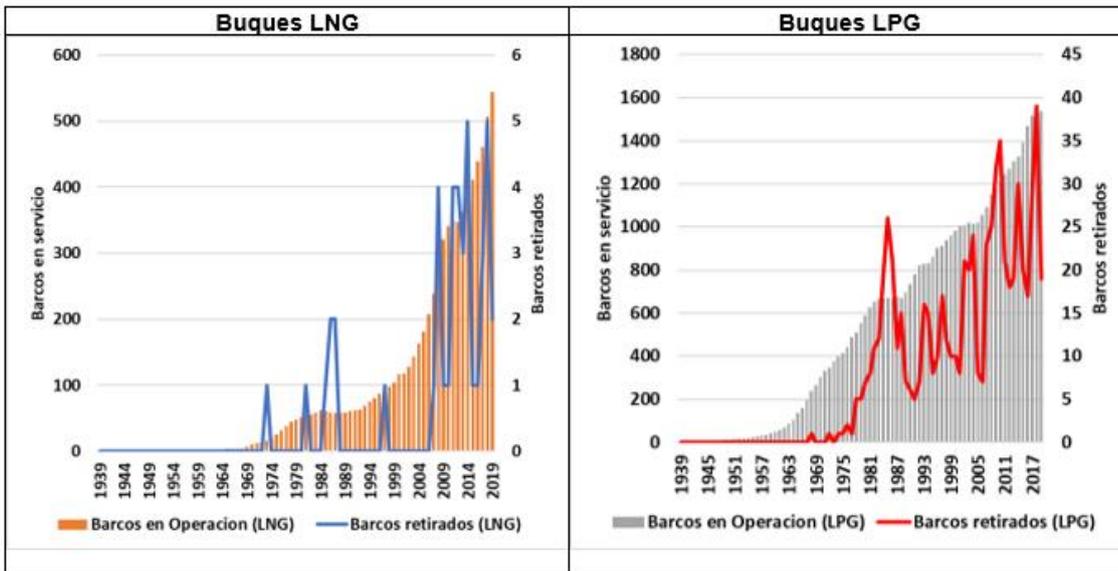
Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 17 también se observa los nuevos buques LPG en servicio comienza a ser relevante en la década de los 60. En esa misma gráfica se puede observar un segundo repunte hacia el año 2007, alcanzando el máximo número de nuevos buques LPG en servicio en el año 2017 con 95 nuevos buques.

### 5.1.2. Evolución de los buques gaseros en servicio y retirados

De la base de datos de *IHS Fairplay* se obtienen la fecha de retirada de los buques, implicando que estos buques fueron retirados para su desguace.

Gráfica 18. Evolución de los barcos LNG y LPG en servicio y retirados



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 18 se muestra la flota de buques LNG en activo representado como barras para cada año hasta enero de 2020, y donde el número total de buques en servicio viene expresado en el eje “Y” de la izquierda. En el eje “Y” de la derecha se muestran los buques LNG retirados, representado la serie de datos con una línea de color azul.

En 1973 fue el primer año en que se retiró un buque LNG, fue el buque *Aristotle* (IMO 5233573). 8 buques LNG fueron retirados antes del siglo XXI, mientras que desde el año 2007, 35 buques LNG fueron retirados, dando un total de 43 buques retirados desde la aparición del primer buque LNG, siendo los años 2014 y 2018 los años donde más buques LNG fueron retirados de servicio. Como se ve en secciones y capítulos posteriores en esta tesis, es de esperar que la aparición de nuevas regulaciones precipite el retiro de manera más rápida de un mayor número de buques LNG o haya reconversiones de los buques LNG más antiguos y menos eficientes a otro tipo de buque.

En la Gráfica 18 se observa la flota de buques LPG en activo representado como barras para cada año hasta enero de 2020, y donde el número total de buques en servicio viene expresado en el eje “Y” de la izquierda. En el eje “Y” de la derecha se muestran los buques LPG retirados, representado la serie de datos con una línea de color rojo.

El primer buque LPG retirado es en el año 1968, cuyo nombre era *Petrobras Sul* (IMO 5276355). A enero de 2020, un total de 685 buques LPG fueron retirados de servicio, siendo en 2018 el año donde más buques fueron retirados de servicio con un total de 44 buques.

## 5.2. Estructura de la flota según grupos de Bandera

Como se ha explicado en el capítulo 5, se han realizado cuatro grupos de banderas para analizar la flota mundial de gaseros.

Analizando la estructura de la flota de gaseros según el grupo de bandera, la distribución resultante para cada grupo de bandera se ve en la Tabla 12. En la flota de buques LPG, la mayoría de la flota esta abanderada en banderas del grupo RM, mientras que el grupo EU15 es el grupo con menor número de buques.

Para la flota de buques LNG, la mayoría de sus barcos están abanderados en el grupo RA, y siendo las banderas de ROCDE las que menor número de buques LNG tienen registrado.

Tabla 12 Número de buques gaseros registrados por grupo de bandera

| Flota | EU15 | RA  | RM  | ROCDE |
|-------|------|-----|-----|-------|
| LPG   | 119  | 563 | 602 | 198   |
| (%)   | 8%   | 38% | 41% | 13%   |
| LNG   | 59   | 311 | 103 | 49    |
| (%)   | 11%  | 60% | 20% | 9%    |
| Total | 178  | 874 | 705 | 247   |
| (%)   | 9%   | 44% | 35% | 12%   |

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a las toneladas de peso muerto (Tabla 13), los buques gaseros en servicio en enero de 2020 tienen un total de 70 millones de toneladas de peso muerto registrado. El grupo de banderas RA es el grupo que cuenta con más toneladas de peso muerto. La menor cantidad de toneladas de peso muerto se encuentran en el grupo de banderas ROCDE.

Analizando la capacidad de carga (Tabla 14), La flota de gaseros tiene disponible en enero de 2020, una capacidad de volumen de carga de 114,8 millones de metros cúbicos (Mm<sup>3</sup>), teniendo 34,6 y 80,1 millones de Mm<sup>3</sup> para los buques LPG y LNG respectivamente. El grupo de banderas RA es el grupo que cuenta con una mayor cantidad de volumen de carga. La menor cantidad de capacidad de carga se encuentran en el grupo de banderas ROCDE.

En cuanto al arqueo bruto (Tabla 15), La flota de gaseros tiene registrado en enero de 2020, 79,2 millones de toneladas de arqueo bruto (GT), teniendo 21,3 y 56,5 millones de GT para los buques LPG y LNG respectivamente. El grupo de banderas RA es el grupo que cuenta con más toneladas de GT. La menor cantidad de toneladas GT están en el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 13 TPM de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera

| Flota | EU15      | RA         | RM         | ROCDE     |
|-------|-----------|------------|------------|-----------|
| LPG   | 1.793.454 | 13.538.983 | 10.028.371 | 480.072   |
| (%)   | 7%        | 52%        | 39%        | 2%        |
| LNG   | 5.054.557 | 27.576.687 | 8.348.796  | 3.181.163 |
| (%)   | 11,5%     | 62,5%      | 19%        | 7%        |
| Total | 6.848.011 | 41.115.670 | 18.377.167 | 3.661.235 |
| (%)   | 10%       | 59%        | 26%        | 5%        |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 14 Capacidad de carga de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera.

| Flota | EU15       | RA         | RM         | ROCDE     |
|-------|------------|------------|------------|-----------|
| LPG   | 2.086.359  | 18.386.306 | 13.576.110 | 611.598   |
| (%)   | 6%         | 53%        | 39%        | 2%        |
| LNG   | 9.003.437  | 50.439.248 | 14.810.104 | 5.854.450 |
| (%)   | 11%        | 63%        | 19%        | 7%        |
| Total | 11.089.796 | 68.825.554 | 28.386.214 | 6.466.048 |
| (%)   | 9.7%       | 60%        | 24.7%      | 5.6%      |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: metros cúbicos

Tabla 15 GT de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera

| Flota | EU15      | RA         | RM         | ROCDE     |
|-------|-----------|------------|------------|-----------|
| LPG   | 1.575.880 | 11.880.099 | 8.806.921  | 424.008   |
| (%)   | 7%        | 52%        | 39%        | 2%        |
| LNG   | 6.012.399 | 35.364.815 | 10.438.295 | 4.717.702 |
| (%)   | 11%       | 63%        | 18%        | 8%        |
| Total | 7.588.279 | 47.244.914 | 19.245.216 | 5.141.710 |
| (%)   | 10%       | 60%        | 24%        | 6%        |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 16 muestra que la potencia instalada en la flota de gaseros. Los buques gaseros analizados, tiene instalada a bordo una potencia total propulsora de 24,7 GW, teniendo 8,6 y

16,1 GW para los buques LPG y LNG respectivamente), o lo que es lo mismo, 89 Tera julios de energía disponible para la propulsión, 30,9 tJ y 58,1 tJ para buques LPG y LNG respectivamente.

El grupo de banderas RA es el grupo que cuenta con la mayor potencia propulsora instalada. La menor potencia propulsora instalada se encuentra en el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 16 Potencia propulsora de la flota mundial de buques gaseros por grupo de bandera

| Flota | EU15      | RA         | RM        | ROCDE     |
|-------|-----------|------------|-----------|-----------|
| LPG   | 679.476   | 4.210.735  | 3.312.925 | 373.084   |
| (%)   | 8%        | 49%        | 39%       | 4%        |
| LNG   | 1.879.216 | 10.100.426 | 3.030.177 | 1.125.776 |
| (%)   | 11.6%     | 62.6%      | 18.8%     | 7%        |
| Total | 2.558.692 | 14.311.161 | 6.343.102 | 1.498.860 |
| (%)   | 10%       | 58%        | 26%       | 6%        |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: kilovatios

### 5.3. Estructura de la flota según grupos de eslora

Como se ha detallado anteriormente, el análisis de la estructura de la flota de gaseros se hace por grupos de familias o estructuras (esloras, peso muerto, capacidad de carga, arqueo bruto, potencia propulsora instalada, grupos de edad y tipo de sistema de propulsión a bordo) y como variables, se emplean las banderas de registro de cada buque.

Los buques LNG y los buques LPG tienen entre sí diferencias que hacen que ambas flotas tengan características distintas (distintas esloras, tamaños, potencia instaladas y tipos de propulsión instalados a bordo), por lo tanto, los análisis estructurales se harán para cada una de las flotas por separado.

#### 5.3.1. Estructura por grupos de eslora para la flota de buques LPG

Se han realizado 5 grupos de esloras para estructurar la flota de buques LPG. Los grupos corresponden a buques LPG más pequeños que generalmente se emplean para transporte de cabotaje (buques con esloras inferiores a 80 metros) hasta los buques más grandes (con esloras superiores o iguales a 200 metros) que hacen exclusivamente transporte transoceánico, conocido como *Very Large Gas Carriers (VLGC)*.

En la Tabla 17 se observa que los buques LPG con esloras entre 80 y 100 metros es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LPG se encuentra en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros. Los buques bajo el grupo EU15, la mayoría de los buques se encuentran en los grupos de esloras entre 80 y 100 metros, 100 y 150 metros y 150 metros y 200 metros, teniendo el menor número de buques en los grupos de esloras de menos de 80 metros y superiores a 200 metros.

Para los buques bajo el grupo RA, la mayoría de los buques se encuentran en los grupos de esloras superiores a 200 metros, teniendo el menor número de buques en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

En los buques bajo el grupo RM, la mayoría de los buques se encuentran en los grupos de esloras entre 80 y 100 metros, teniendo el menor número de buques en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de los buques se encuentran en los grupos de esloras de menos de 80 metros, teniendo el menor número de buques en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

*Tabla 17 Número de buques LPG en cada grupo de esloras*

| <b>Grupos de Eslo<br/>(L)</b> | <b>N.º BUQUES<br/>TOTAL</b> | <b>EU15</b> | <b>RA</b> | <b>RM</b> | <b>ROCDE</b> |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------|-----------|--------------|
| L < 80 m                      | 310                         | 5           | 16        | 136       | 153          |
| 80 m ≤ L < 100 m              | 333                         | 32          | 119       | 147       | 35           |
| 100 m ≤ L < 150 m             | 299                         | 39          | 134       | 119       | 7            |
| 150 m ≤ L < 200 m             | 234                         | 38          | 122       | 74        | 0            |
| L ≥ 200 m                     | 306                         | 5           | 172       | 126       | 3            |

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las TPM para cada grupo de esloras de la flota de buques LPG (*Tabla 18*), los buques de mayor eslora son los que más TPM aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría las TPM se encuentran en los grupos de esloras entre 150 y 200 metros, teniendo el menor TPM en buques del grupo de esloras de menos de 80 metros.

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo la menor cantidad de TPM en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo la menor cantidad de TPM en el grupo de esloras menores a 80 metros.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en los grupos de esloras de menos de 80 metros y de más de 200 metros, teniendo la menor cantidad de TPM en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la *Tabla 18*. El buque LPG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de eslora superior a 200 metros bajo el grupo de banderas RM. Y, el buque LPG con menor TPM por buque está en el grupo de eslora inferior a 80 metros bajo el grupo de banderas RM.

Tabla 18 TPM de los buques LPG en cada grupo de esloras.

| Grupos de Eslora (L)      | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|---------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                           | Total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                           | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| L < 80 m                  | 0,333                                     | 1,3        | 0,009        | 0,5        | 0,026         | 0,2        | 0,136         | 1,4        | 0,163        | 34,0       |
| 80 m ≤ L < 100 m          | 1,212                                     | 4,7        | 0,113        | 6,3        | 0,492         | 3,6        | 0,494         | 4,9        | 0,114        | 23,8       |
| 100 m ≤ L < 150 m         | 2,393                                     | 9,3        | 0,383        | 21,3       | 1,044         | 7,7        | 0,923         | 9,2        | 0,043        | 9,0        |
| 150 m ≤ L < 200 m         | 5,555                                     | 21,5       | 1,043        | 58,1       | 2,815         | 20,8       | 1,698         | 16,9       | 0            | 0          |
| L ≥ 200 m                 | 16,347                                    | 63,3       | 0,247        | 13,8       | 9,163         | 67,7       | 6,778         | 67,6       | 0,159        | 33,2       |
| <b>Total</b>              | <b>25,840</b>                             | <b>100</b> | <b>1,795</b> | <b>100</b> | <b>13,540</b> | <b>100</b> | <b>10,029</b> | <b>100</b> | <b>0,479</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t) |   |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| L < 80 m                  | 1.077                                     |            | 1.706        |            | 1.602         |            | 1.002         |            | 1.068        |            |
| 80 m ≤ L < 100 m          | 3.640                                     |            | 3.517        |            | 4.130         |            | 3.359         |            | 3.265        |            |
| 100 m ≤ L < 150 m         | 8.002                                     |            | 9.815        |            | 7.788         |            | 7.758         |            | 6.157        |            |
| 150 m ≤ L < 200 m         | 23.740                                    |            | 27.441       |            | 23.073        |            | 22.940        |            | 0            |            |
| L ≥ 200 m                 | 53.422                                    |            | 49.370       |            | 53.275        |            | 53.791        |            | 53.088       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la capacidad de carga (CC) para cada grupo de esloras de la flota de buques LPG (Tabla 19), los buques de mayor eslora son los que más CC aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de CC se encuentra en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques en el grupo EU15, la mayor CC se encuentra en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros, y la menor CC en buques dentro del grupo de esloras de menos de 80 metros.

En los buques bajo el grupo RA, la mayor CC se encuentra en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo la menor CC en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayor CC se encuentra en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo la menor CC en el grupo de esloras menores a 80 metros.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor CC se encuentra en los grupos de esloras de más de 200 metros seguido por el grupo de esloras de menos de 80 metros, teniendo la menor CC en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 19. El buque LPG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de esloras superior a 200 metros bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor CC por buque se encuentra en el grupo de eslora inferior a 80 metros bajo el grupo de banderas RM.

Tabla 19 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de esloras

| Grupos de Eslora (L)                    | Valores totales de la flota de buques LPG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | Total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| L < 80 m                                | 0,411                                     | 1,2        | 0,008               | 0,4        | 0,025               | 0,1        | 0,168               | 1,2        | 0,209               | 34,2       |
| 80 m ≤ L < 100 m                        | 1,213                                     | 3,5        | 0,112               | 5,4        | 0,473               | 2,6        | 0,513               | 3,8        | 0,116               | 19,0       |
| 100 m ≤ L < 150 m                       | 2,301                                     | 6,6        | 0,337               | 16,2       | 0,982               | 5,3        | 0,936               | 6,9        | 0,047               | 7,7        |
| 150 m ≤ L < 200 m                       | 6,507                                     | 18,8       | 1,268               | 60,8       | 3,284               | 17,9       | 1,955               | 14,4       | 0                   | 0          |
| L ≥ 200 m                               | 24,228                                    | 69,9       | 0,361               | 17,3       | 13,623              | 74,1       | 10,005              | 73,7       | 0,240               | 39,2       |
| <b>Total</b>                            | <b>34.660</b>                             | <b>100</b> | <b>2,086</b>        | <b>100</b> | <b>18.387</b>       | <b>100</b> | <b>13,577</b>       | <b>100</b> | <b>0.612</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (m <sup>3</sup> ) |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| L < 80 m                                | 1.325                                     |            | 1.653               |            | 1.560               |            | 1.237               |            | 1.368               |            |
| 80 m ≤ L < 100 m                        | 3.643                                     |            | 3.497               |            | 3.972               |            | 3.487               |            | 3.307               |            |
| 100 m ≤ L < 150 m                       | 7.696                                     |            | 8.640               |            | 7.327               |            | 7.861               |            | 6.686               |            |
| 150 m ≤ L < 200 m                       | 27.808                                    |            | 33.367              |            | 26.921              |            | 26.416              |            | 0                   |            |
| L ≥ 200 m                               | 79.178                                    |            | 72.253              |            | 79.201              |            | 79.404              |            | 79.924              |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = Millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Analizando las toneladas de arqueo bruto (GT) para cada grupo de esloras de la flota de buques LPG (Tabla 20), los buques de mayor eslora son los que más GT aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de TPM está en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo EU15, el mayor GT se encuentra en los grupos de esloras entre 150 y 200 metros, teniendo el menor GT en buques en el grupo de esloras menor a 80 metros.

En los buques bajo el grupo RA, el mayor tonelaje GT se encuentra en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo el menor GT en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo RM, el mayor GT está en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo el menor tonelaje GT en el grupo de esloras menores a 80 metros.

En los buques bajo el grupo ROCDE, el mayor GT se encuentra en los grupos de esloras de más de 200 metros seguido por el grupo de esloras de menos de 80 metros, teniendo el menor GT en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 20. El buque LPG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de esloras superior a 200 metros bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de eslora inferior a 80 metros bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 20 GT de los buques LPG en cada grupo de esloras

| Grupos de Eslora (L) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|----------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                      | Total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                      | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| L < 80 m             | 0,294                                     | 1,3        | 0,008        | 0,5        | 0,024         | 0,2        | 0,129        | 1,5        | 0,134        | 31,6       |
| 80 m ≤ L < 100 m     | 1,164                                     | 5,1        | 0,113        | 7,2        | 0,446         | 3,8        | 0,494        | 5,6        | 0,110        | 25,9       |
| 100 m ≤ L < 150 m    | 2,134                                     | 9,4        | 0,336        | 21,3       | 0,914         | 7,7        | 0,844        | 9,6        | 0,039        | 9,2        |
| 150 m ≤ L < 200 m    | 4,857                                     | 21,4       | 0,906        | 57,5       | 2,472         | 20,8       | 1,479        | 16,8       | 0            | 0          |
| L ≥ 200 m            | 14,237                                    | 62,8       | 0,213        | 13,5       | 8,023         | 67,5       | 5,86         | 66,5       | 0,141        | 33,3       |
| <b>Total</b>         | <b>22,686</b>                             | <b>100</b> | <b>1,576</b> | <b>100</b> | <b>11,900</b> | <b>100</b> | <b>8,806</b> | <b>100</b> | <b>0,424</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (t) |        |  |        |  |        |        |        |
|---------------------------|--------|--|--------|--|--------|--------|--------|
| L < 80 m                  | 950    |  | 1.532  |  | 1.500  | 949    | 874    |
| 80 m ≤ L < 100 m          | 3.496  |  | 3.538  |  | 3.751  | 3.361  | 3.155  |
| 100 m ≤ L < 150 m         | 7.137  |  | 8.614  |  | 6.824  | 7.096  | 5.592  |
| 150 m ≤ L < 200 m         | 20.757 |  | 23.841 |  | 20.262 | 19.989 | 0      |
| L ≥ 200 m                 | 46.527 |  | 42.620 |  | 46.647 | 46.510 | 46.907 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la potencia propulsora instalada para cada grupo de esloras de la flota de buques LPG (Tabla 21), los buques de mayor eslora son los que más potencia propulsora instalada aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de potencia propulsora instalada se encuentran en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayor potencia propulsora instalada se encuentra en los grupos de esloras entre 150 y 200 metros, teniendo la menor potencia propulsora instalada en buques dentro del grupo de esloras de menos de 80 metros.

En los buques bajo el grupo RA, la mayor potencia propulsora instalada se encuentra en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo la menor potencia propulsora instalada en el grupo de esloras de menos de 80 metros.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayor potencia propulsora instalada se encuentra en el grupo de esloras superiores a 200 metros, teniendo la menor potencia propulsora instalada en el grupo de esloras menores a 80 metros.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor potencia propulsora instalada se encuentra en los grupos de esloras de menos de 80 metros, teniendo la menor potencia propulsora instalada en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

Los valores medio de potencia propulsora instalada por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 21. El buque LPG con mayor potencia propulsora instalada por buque se encuentra en el grupo de esloras superior a 200 metros bajo el grupo de banderas RM. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora instalada por buque se encuentra en el grupo de eslora inferior a 80 metros bajo el grupo de banderas RM.

Tabla 21 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de esloras.

| Grupos de Eslora (L)       | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|----------------------------|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                            | Total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                            | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| L < 80 m                   | 0,408                                     | 4,8        | 0,010        | 1,5        | 0,026        | 0,6        | 0,159        | 4,8        | 0,213        | 57,0       |
| 80 m ≤ L < 100 m           | 0,864                                     | 10,1       | 0,075        | 11,0       | 0,332        | 7,9        | 0,364        | 11,0       | 0,093        | 24,9       |
| 100 m ≤ L < 150 m          | 1,380                                     | 16,1       | 0,210        | 30,9       | 0,606        | 14,4       | 0,535        | 16,2       | 0,029        | 7,8        |
| 150 m ≤ L < 200 m          | 2,005                                     | 23,4       | 0,327        | 48,1       | 1,05         | 24,9       | 0,629        | 19,0       | 0            | 0          |
| L ≥ 200 m                  | 3,920                                     | 45,7       | 0,058        | 8,5        | 2,198        | 52,2       | 1,625        | 49,1       | 0,039        | 10,4       |
| <b>Total</b>               | <b>8,577</b>                              | <b>100</b> | <b>0,680</b> | <b>100</b> | <b>4.212</b> | <b>100</b> | <b>3,312</b> | <b>100</b> | <b>0,374</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (kW) |   |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
| L < 80 m                   | 1.315                                     |            | 1.891        |            | 1.639        |            | 1.171        |            | 1.390        |            |
| 80 m ≤ L < 100 m           | 2.594                                     |            | 2.336        |            | 2.789        |            | 2.479        |            | 2.651        |            |
| 100 m ≤ L < 150 m          | 4.615                                     |            | 5.386        |            | 4.518        |            | 4.498        |            | 4.158        |            |
| 150 m ≤ L < 200 m          | 8.569                                     |            | 8.604        |            | 8.604        |            | 8.494        |            | 0            |            |
| L ≥ 200 m                  | 12.809                                    |            | 11.648       |            | 12.776       |            | 12.900       |            | 12.820       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

### 5.3.2. Estructura por grupos de eslora para la flota de buques LNG

Se han realizado 4 grupos de esloras para estructurar la flota de buques LNG. Los grupos corresponden a buques LNG más pequeños que generalmente con esloras inferiores a 250 metros, hasta los buques más grandes, con esloras superiores o iguales a 290 metros. La primera observación que se puede hacer con el análisis de la estructura de esloras es la diferencia de las flotas de buques LPG y LNG, habiendo sólo 26 buques LNG con esloras inferiores a 250 metros (5% de la flota de buques LNG), y en la flota de LPG, únicamente 306 buques tienen esloras iguales o superiores a 200 metros (21% de la flota de buques LPG).

En la Tabla 22 se observa que los buques LNG con esloras superiores a 290 metros es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LNG se encuentra en el grupo de esloras inferiores a 250 metros.

Para todos los grupos de banderas, el mayor número de buques se encuentran en los grupos de esloras superiores a 290 metros, teniendo el menor número de buques en los grupos de esloras de menos de 250 metros y entre 250 y 270 metros.

Tabla 22 Número de buques LNG en cada grupo de esloras

| Grupos de Eslora (L) | N.º BUQUES |      |     |    |       |
|----------------------|------------|------|-----|----|-------|
|                      | TOTAL      | EU15 | RA  | RM | ROCDE |
| L < 250 m            | 26         | 3    | 8   | 8  | 7     |
| 250 m ≤ L < 270 m    | 48         | 3    | 17  | 15 | 13    |
| 270 m ≤ L < 290 m    | 198        | 20   | 137 | 28 | 13    |
| L ≥ 290 m            | 250        | 33   | 149 | 52 | 16    |

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las TPM para cada grupo de esloras de la flota de buques LNG (Tabla 23), los buques de mayor eslora son los que más TPM aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de esloras de menos de 250 metros.

Para los todos los grupos de bandera, la mayor cantidad de TPM se encuentran en los grupos de esloras superior a 290 metros, teniendo la menor cantidad TPM en buques del grupo de esloras de menos de 250 metros.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 23. El buque LNG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de eslora superior a 290 metros bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de eslora inferior a 250 metros bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 23 TPM de los buques LNG en cada grupo de esloras

| Grupos de Eslora (L)      | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                           | Total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                           | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| L < 250 m                 | 0.461                                     | 1.0        | 0.056        | 1.1        | 0.229         | 0.8        | 0.163        | 2.0        | 0.013        | 0.4        |
| 250 m ≤ L < 270 m         | 3.582                                     | 8.1        | 0.236        | 4.6        | 1.288         | 4.7        | 1.141        | 13.7       | 0.916        | 28.8       |
| 270 m ≤ L < 290 m         | 16.345                                    | 37.0       | 1.698        | 33.4       | 11.249        | 40.8       | 2.412        | 28.9       | 1.016        | 31.9       |
| L ≥ 290 m                 | 23.77                                     | 53.8       | 3.092        | 60.8       | 14.81         | 53.7       | 4.632        | 55.5       | 1.236        | 38.9       |
| <b>Total</b>              | <b>44.158</b>                             | <b>100</b> | <b>5.082</b> | <b>100</b> | <b>27.576</b> | <b>100</b> | <b>8.348</b> | <b>100</b> | <b>3.181</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t) |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| L < 250 m                 | 17.731                                    |            | 18.756       |            | 28.638        |            | 20.392       |            | 1.787        |            |
| 250 m ≤ L < 270 m         | 74.629                                    |            | 78.784       |            | 75.773        |            | 76.088       |            | 70.490       |            |
| 270 m ≤ L < 290 m         | 82.563                                    |            | 83.490       |            | 82.110        |            | 86.157       |            | 78.167       |            |
| L ≥ 290 m                 | 95.082                                    |            | 93.701       |            | 99.398        |            | 89.076       |            | 77.257       |            |

Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la capacidad de carga (CC) para cada grupo de esloras de la flota de buques LNG (Tabla 24), los buques de mayor eslora son los que mayor CC aportan al total de la flota de LNG. La menor CC se encuentran en el grupo de esloras de menos de 250 metros.

Para los todos los grupos de banderas, la mayor CC está en los grupos de esloras superior a 290 metros, teniendo la menor CC en buques del grupo de esloras de menos de 250 metros.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 24. El buque LNG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de eslora superior a 290 metros bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor CC por buque está en el grupo de eslora inferior a 250 metros bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 24 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de esloras

| Grupos de Eslora (L) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|----------------------|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|                      | Total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|                      | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| L < 250 m            | 0.81                                      | 1.0        | 0.106               | 1.2        | 0.409               | 0.8        | 0.278               | 1.9        | 0.017               | 0.3        |
| 250 m ≤ L < 270 m    | 6.35                                      | 7.9        | 0.411               | 4.6        | 2.295               | 4.6        | 1.986               | 13.4       | 1.659               | 28.3       |
| 270 m ≤ L < 290 m    | 29.471                                    | 36.8       | 2.933               | 32.6       | 20.438              | 40.5       | 4.246               | 28.7       | 1.855               | 31.7       |
| L ≥ 290 m            | 43.476                                    | 54.3       | 5.553               | 61.7       | 27.297              | 54.1       | 8.3                 | 56.0       | 2.324               | 39.7       |
| <b>Total</b>         | <b>80.107</b>                             | <b>100</b> | <b>9.003</b>        | <b>100</b> | <b>50.439</b>       | <b>100</b> | <b>14.810</b>       | <b>100</b> | <b>5.855</b>        | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> ) |         |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| L < 250 m                               | 31.159  | 35.365  | 51.179  | 34.702  | 2.429   |
| 250 m ≤ L < 270 m                       | 132.298 | 136.967 | 135.000 | 132.390 | 127.583 |
| 270 m ≤ L < 290 m                       | 148.845 | 146.657 | 149.179 | 151.642 | 142.668 |
| L ≥ 290 m                               | 173.902 | 168.282 | 183.203 | 159.628 | 145.262 |

Unidades: "Mm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Analizando el arqueo bruto (GT) para cada grupo de esloras de la flota de buques LNG (Tabla 25), los buques de mayor eslora son los que mayor GT aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de esloras de menos de 250 metros.

Para los todos los grupos de banderas, la mayor cantidad de GT se encuentra en los grupos de esloras superior a 290 metros, teniendo la menor cantidad de GT en buques del grupo de esloras de menos de 250 metros.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 25. El buque LNG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de eslora superior a 290 metros bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de eslora inferior a 250 metros bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 25 GT de los buques LNG en cada grupo de esloras.

| Grupos de Eslora (L) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|----------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                      | Total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                      | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| L < 250 m            | 0.638                                     | 1.1        | 0.079        | 1.3        | 0.322         | 0.9        | 0.216         | 2.1        | 0.021        | 0.4        |
| 250 m ≤ L < 270 m    | 4.575                                     | 8.1        | 0.283        | 4.7        | 1.606         | 4.5        | 1.358         | 13.0       | 1.317        | 27.9       |
| 270 m ≤ L < 290 m    | 20.897                                    | 37.0       | 1.957        | 32.5       | 14.515        | 41.0       | 2.919         | 28.0       | 1.507        | 31.9       |
| L ≥ 290 m            | 30.424                                    | 53.8       | 3.694        | 61.4       | 18.922        | 53.5       | 5.936         | 56.9       | 1.872        | 39.7       |
| <b>Total</b>         | <b>56.534</b>                             | <b>100</b> | <b>6.013</b> | <b>100</b> | <b>35.365</b> | <b>100</b> | <b>10.429</b> | <b>100</b> | <b>4.717</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (t) |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L < 250 m                 | 24.522  | 26.175  | 40.220  | 27.022  | 3.014   |
| 250 m ≤ L < 270 m         | 95.310  | 94.477  | 94.486  | 91.189  | 101.333 |
| 270 m ≤ L < 290 m         | 105.542 | 97.840  | 105.946 | 104.240 | 115.933 |
| L ≥ 290 m                 | 121.694 | 111.929 | 126.994 | 114.145 | 117.009 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la potencia propulsora para cada grupo de esloras de la flota de buques LNG (Tabla 26), los buques de mayor eslora son los que mayor potencia propulsora aportan al total de la flota de LNG. La menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de esloras de menos de 250 metros.

Para los todos los grupos de banderas, la mayor potencia propulsora se encuentra en los grupos de esloras superior a 290 metros, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de esloras de menos de 250 metros.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de eslora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 26. El buque LNG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de eslora superior a 290 metros bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de eslora inferior a 250 metros bajo el grupo de banderas ROCDE.

*Tabla 26 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de esloras*

| Grupos de Eslora (L) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|----------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                      | Total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                      | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| L < 250 m            | 0.219                                     | 1.4        | 0.037        | 2.0        | 0.093         | 0.9        | 0.072        | 2.4        | 0.016        | 1.4        |
| 250 m ≤ L < 270 m    | 1.22                                      | 7.6        | 0.077        | 4.1        | 0.463         | 4.6        | 0.403        | 13.3       | 0.277        | 24.6       |
| 270 m ≤ L < 290 m    | 6.211                                     | 38.5       | 0.638        | 34.0       | 4.308         | 42.6       | 0.908        | 30.0       | 0.358        | 31.8       |
| L ≥ 290 m            | 8.485                                     | 52.6       | 1.126        | 60.0       | 5.237         | 51.8       | 1.648        | 54.4       | 0.475        | 42.2       |
| <b>Total</b>         | <b>16.135</b>                             | <b>100</b> | <b>1.878</b> | <b>100</b> | <b>10.101</b> | <b>100</b> | <b>3.031</b> | <b>100</b> | <b>1.126</b> | <b>100</b> |

| Grupos de Eslora (L) | Valores por buque LNG (kW) |        |        |        |        |
|----------------------|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
|                      | Total                      | EU15   | RA     | RM     | ROCDE  |
| L < 250 m            | 8.422                      | 12.533 | 11.605 | 9.042  | 2.313  |
| 250 m ≤ L < 270 m    | 25.421                     | 25.725 | 27.257 | 26.841 | 21.312 |
| 270 m ≤ L < 290 m    | 31.370                     | 31.903 | 31.442 | 32.413 | 27.542 |
| L ≥ 290 m            | 33.941                     | 34.133 | 35.145 | 31.686 | 29.655 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

## 5.4. Estructura de la flota según grupos de peso muerto

La estructura de la flota de gaseros también se realiza separando la flota de buques LPG y LNG dado que existe una diferencia notable en los tamaños de cada uno de los tipos de gaseros, por lo tanto, los grupos de las toneladas de peso muerto son distintos.

### 5.4.1. Estructura por grupos de toneladas de peso muerto para la flota de buques LPG

Se han realizado 4 grupos de peso muerto para estructurar la flota de buques LPG. Los grupos corresponden a buques LPG más pequeños que generalmente se emplean para transporte de cabotaje (buques con menos de 5.000 toneladas de peso muerto) hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, buques superiores o iguales a las 50.000 toneladas de peso muerto.

En la Tabla 27 se observa que los buques LPG con TPM inferior a 5.000 toneladas es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LPG se encuentra en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo EU15 y RA, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas. Para los grupos de bandera RM y ROCDE, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de TPM inferior a 5.000 toneladas.

En cuanto al menor número de buques, para el grupo EU15 se encuentra en el grupo de TPM superior a 50.000 toneladas. Para los grupos de bandera RA y RM, el menor número de buques se encuentra en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas, mientras que para el grupo de ROCDE, el menor número de buques está en el grupo de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas.

Tabla 27 Número de buques LPG en cada grupo de peso muerto

| Grupos de Toneladas de Peso muerto (TPM) | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM  | ROCDE |
|--|------------------|------|-----|-----|-------|
| TPM < 5.000                              | 650              | 40   | 130 | 290 | 190   |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                     | 235              | 21   | 112 | 97  | 5     |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                    | 348              | 55   | 189 | 103 | 1     |
| TPM ≥ 50.000                             | 249              | 3    | 132 | 112 | 2     |

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las TPM para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LPG (Tabla 28), los buques dentro del grupo de TPM superior a 50.000 toneladas son los que más TPM aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría las TPM se encuentran en los grupos de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas, teniendo el menor TPM en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo el menor TPM en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo el menor TPM en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en los grupos de TPM de menos de 5.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de TPM en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de TPM y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 28. El buque LPG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de TPM superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con

menor TPM por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior a 5.000 toneladas bajo el grupo de banderas RM.

Tabla 28 TPM de los buques LPG en cada grupo de peso muerto

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|   | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| TPM < 5.000                                 | 1,542                                     | 6,0        | 0,129        | 7,2        | 0,482         | 3,6        | 0,645         | 6,4        | 0,286        | 59,6       |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                        | 1,663                                     | 6,4        | 0,156        | 8,7        | 0,757         | 5,6        | 0,715         | 7,1        | 0,035        | 7,3        |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                       | 9,024                                     | 34,9       | 1,347        | 75,1       | 5,078         | 37,5       | 2,548         | 25,4       | 0,050        | 10,4       |
| TPM ≥ 50.000                                | 13,611                                    | 52,7       | 0,161        | 9,0        | 7,222         | 53,3       | 6,119         | 61,0       | 0,109        | 22,7       |
| <b>Total</b>                                | <b>25,840</b>                             | <b>100</b> | <b>1,793</b> | <b>100</b> | <b>13,539</b> | <b>100</b> | <b>10,027</b> | <b>100</b> | <b>0,480</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t)                   |   |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| TPM < 5.000                                 | 2.372                                     |            | 3.233        |            | 3.705         |            | 2.223         |            | 1.506        |            |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                        | 7.078                                     |            | 7.421        |            | 6.763         |            | 7.375         |            | 6.941        |            |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                       | 25.932                                    |            | 24.495       |            | 26.869        |            | 24.746        |            | 49.999       |            |
| TPM ≥ 50.000                                | 54.664                                    |            | 53.686       |            | 54.710        |            | 54.637        |            | 54.633       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la capacidad de carga (CC) para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LPG (Tabla 29), los buques dentro del grupo de TPM superior a 50.000 toneladas son los que más CC aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de CC se encuentran en los grupos de TPM de menos de 5.000 toneladas y en el grupo de entre 5.000 y 10.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría de la CC se encuentran en los grupos de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas, teniendo el menor CC en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría de la CC se encuentran en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo la menor CC en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayoría de la CC se encuentran en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo la menor CC en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de la CC se encuentra en el grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas, teniendo la menor CC en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de TPM y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 29. El buque LPG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de TPM superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor CC por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior a 5.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 29 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de peso muerto

| Grupos de Toneladas de Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|--|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|  | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|  | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| TPM < 5.000                              | 1.643                                     | 4.7        | 0.131               | 6.3        | 0.475               | 2.6        | 0.705               | 5.2        | 0.333               | 54.5       |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                     | 1.664                                     | 4.8        | 0.143               | 6.9        | 0.74                | 4.0        | 0.742               | 5.5        | 0.039               | 6.4        |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                    | 11.165                                    | 32.2       | 1.569               | 75.2       | 6.448               | 35.1       | 3.071               | 22.6       | 0.077               | 12.6       |
| TPM ≥ 50.000                             | 20.188                                    | 58.2       | 0.243               | 11.6       | 10.724              | 58.3       | 9.059               | 66.7       | 0.162               | 26.5       |
| <b>Total</b>                             | <b>34.660</b>                             | <b>100</b> | <b>2.086</b>        | <b>100</b> | <b>18.387</b>       | <b>100</b> | <b>13.577</b>       | <b>100</b> | <b>0.611</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (m <sup>3</sup> )  |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| TPM < 5.000                              | 2.528                                     |            | 3.271               |            | 3.651               |            | 2.432               |            | 1.750               |            |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                     | 7.081                                     |            | 6.826               |            | 6.606               |            | 7.647               |            | 7.848               |            |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                    | 32.083                                    |            | 28.526              |            | 34.117              |            | 29.813              |            | 77.340              |            |
| TPM ≥ 50.000                             | 81.076                                    |            | 81.080              |            | 81.241              |            | 80.880              |            | 81.217              |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Respecto a las toneladas de arqueo bruto (GT) para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LPG (Tabla 30), los buques dentro del grupo de TPM superior a 50.000 toneladas son los que más GT aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de GT se encuentran en los grupos de TPM de menos de 5.000 toneladas y entre 5.000 y 10.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría las GT se encuentran en los grupos de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas, teniendo el menor GT en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría de GT se encuentran en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo la menor cantidad GT en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayoría las GT se encuentran en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de GT en buques dentro de los grupos de TPM de menos de 5.000 toneladas y entre 5.000 y 10.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las GT se encuentran en los grupos de TPM de menos de 5.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de TPM y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 30. El buque LPG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de TPM superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior a 5.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 30 GT de los buques LPG en cada grupo de peso muerto

| Grupos de Toneladas de Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|--|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|  | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|  | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| TPM < 5.000                              | 1.482                                     | 6.5        | 0.13         | 8.3        | 0.449         | 3.8        | 0.65         | 7.4        | 0.252        | 59.4       |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                     | 1.476                                     | 6.5        | 0.137        | 8.7        | 0.659         | 5.5        | 0.648        | 7.4        | 0.031        | 7.3        |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                    | 7.884                                     | 34.8       | 1.167        | 74.1       | 4.458         | 37.5       | 2.213        | 25.1       | 0.046        | 10.8       |
| TPM ≥ 50.000                             | 11.845                                    | 52.2       | 0.141        | 9.0        | 6.313         | 53.1       | 5.296        | 60.1       | 0.095        | 22.4       |
| <b>Total</b>                             | <b>22.687</b>                             | <b>100</b> | <b>1.575</b> | <b>100</b> | <b>11.879</b> | <b>100</b> | <b>8.807</b> | <b>100</b> | <b>0.424</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t)                |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| TPM < 5.000                              | 2.280                                     |            | 3.257        |            | 3.456         |            | 2.241        |            | 1.327        |            |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                     | 6.281                                     |            | 6.548        |            | 5.887         |            | 6.681        |            | 6.238        |            |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                    | 22.655                                    |            | 21.212       |            | 23.588        |            | 21.486       |            | 45.988       |            |
| TPM ≥ 50.000                             | 47.571                                    |            | 47.131       |            | 47.827        |            | 47.284       |            | 47.366       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la potencia propulsora para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LPG (Tabla 31), los buques dentro del grupo de TPM superior a 50.000 toneladas son los que más potencia propulsora aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de potencia propulsora se encuentran en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de TPM superior a 50.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría la potencia propulsora se encuentran en los grupos de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas y en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo el menor TPM en buques del grupo de TPM de menos de 5.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo RM, la mayoría de la potencia propulsora se encuentra en el grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de la potencia propulsora se encuentra en los grupos de TPM de menos de 5.000 toneladas, teniendo la menor potencia propulsora en el grupo de TPM entre 10.000 y 50.000 toneladas.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de TPM y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 31. El buque LPG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de TPM superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas RM. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior a 5.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 31 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de peso muerto

| Grupos de Toneladas de Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|--|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|  | total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|  | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| TPM < 5.000                              | 1.284                                     | 15.0       | 0.091        | 13.4       | 0.347        | 8.2        | 0.536        | 16.2       | 0.311        | 83.4       |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                     | 1.012                                     | 11.8       | 0.105        | 15.4       | 0.456        | 10.8       | 0.428        | 12.9       | 0.024        | 6.4        |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                    | 3.031                                     | 35.3       | 0.445        | 65.4       | 1.688        | 40.1       | 0.886        | 26.7       | 0.012        | 3.2        |
| TPM ≥ 50.000                             | 3.248                                     | 37.9       | 0.039        | 5.7        | 1.72         | 40.8       | 1.463        | 44.2       | 0.026        | 7.0        |
| <b>Total</b>                             | <b>8.575</b>                              | <b>100</b> | <b>0.680</b> | <b>100</b> | <b>4.211</b> | <b>100</b> | <b>3.313</b> | <b>100</b> | <b>0.373</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (kW) |        |  |        |  |        |        |        |
|----------------------------|--------|--|--------|--|--------|--------|--------|
| TPM < 5.000                | 1.976  |  | 2.270  |  | 2.666  | 1.849  | 1.635  |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000       | 4.307  |  | 4.979  |  | 4.070  | 4.411  | 4.794  |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000      | 8.711  |  | 8.097  |  | 8.931  | 8.599  | 12.360 |
| TPM ≥ 50.000               | 13.046 |  | 12.933 |  | 13.033 | 13.063 | 13.050 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

#### 5.4.2. Estructura por grupos de toneladas de peso muerto para la flota de buques LNG

Se han realizado 4 grupos de peso muerto para estructurar la flota de buques LNG, yendo desde buques con pesos muertos inferiores a las 75.000 toneladas hasta los buques LNG más grandes con pesos muertos iguales o superiores a las 100.000 toneladas, los cuales solo están registrados en banderas de registro abierto.

La distribución en cuanto al número de buques LNG por cada grupo de peso muerto se observa en la *Tabla 32*. La gran mayoría de la flota de buques LNG se encuentran entre 75.000 y 100.000 toneladas de peso muerto. El grupo de TPM superior a 100.000 toneladas es el que menor número de buques tiene.

Los 45 buques LNG con igual o mayor de 100.000 toneladas de peso muerto corresponden a los buques LNG denominados *Q-flex* y *Q-max* para realizar el transporte de LNG del proyecto de *Qatargas*, todos ellos fueron construidos entre los años 2007 y 2010. En ese grupo, los 45 buques están registrados en banderas de registro abierto.

Excepto en el grupo de toneladas de peso muerto más bajo, en todos los demás grupos de toneladas de peso muerto, la gran mayoría de buques LNG están registrados en grupos de banderas RA. La mayoría de los buques más pequeños están registrados en el grupo ROCDE.

Tabla 32 Número de buques LNG en cada grupo de peso muerto.

| Grupos de Toneladas de Peso muerto (TPM) | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM | ROCDE |
|--|------------------|------|-----|----|-------|
| TPM < 75.000                             | 83               | 3    | 29  | 19 | 32    |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                    | 191              | 17   | 129 | 36 | 9     |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                   | 203              | 39   | 108 | 48 | 8     |
| TPM ≥ 100.000                            | 45               | 0    | 45  | 0  | 0     |

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las TPM para cada grupo de peso muerto para buques LNG (Tabla 33), los buques en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 son los que más TPM aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de TPM está en el grupo de TPM de menos de 75.000 toneladas.

Los grupos de bandera EU15 y RM, tienen la mayor cantidad de TPM en el grupo entre 85.000 y 100.000 toneladas de TPM. En el grupo de banderas RA, la mayoría de TPM está en el grupo 75.000 y 85.000 toneladas, seguido por el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas; y en el grupo ROCDE, la mayoría de TPM está en el grupo de menos de 75.000 toneladas.

En cuanto a la menor cantidad de TPM para los grupos de banderas EU15, RM y ROCDE, este se encuentra en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas. Para el grupo de banderas RA, la menor cantidad de TPM está en el grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de peso muerto y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 33. El buque LNG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de TPM superior 100.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior 75.000 toneladas bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 33 TPM de los buques LNG en cada grupo de peso muerto.

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|   | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| TPM < 75.000                                | 4,565                                     | 10,3       | 0,056        | 1,1        | 1,753         | 6,4        | 0,967        | 11,6       | 1,789        | 56,2       |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 15,422                                    | 34,9       | 1,372        | 27,1       | 10,421        | 37,7       | 2,936        | 35,2       | 0,694        | 21,8       |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 18,715                                    | 42,4       | 3,627        | 71,8       | 9,943         | 36,1       | 4,447        | 53,2       | 0,699        | 22,0       |
| TPM ≥ 100.000                               | 5,459                                     | 12,4       | 0            | 0          | 5,459         | 19,8       | 0            | 0          | 0            | 0          |
| <b>Total</b>                                | <b>44,161</b>                             | <b>100</b> | <b>5,055</b> | <b>100</b> | <b>27,576</b> | <b>100</b> | <b>8,350</b> | <b>100</b> | <b>3,182</b> | <b>100</b> |
|   | Valores por buque LNG (t)                 |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| TPM < 75.000                                | 54.997                                    |            | 18.756       |            | 60.454        |            | 50.867       |            | 55.901       |            |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 80.744                                    |            | 80.688       |            | 80.784        |            | 81.545       |            | 77.072       |            |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 92.194                                    |            | 92.989       |            | 92.068        |            | 92.639       |            | 87.336       |            |
| TPM ≥ 100.000                               | 121.311                                   |            | 0            |            | 121.311       |            | 0            |            | 0            |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" =millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la capacidad de carga (CC) para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LNG (Tabla 34), los buques en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.00 son los que más CC aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de CC se encuentran en el grupo de TPM de menos de 75.000 toneladas.

Para el grupo de bandera EU15 y RM, la mayor CC se encuentra en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas. En el grupo de banderas RA, la mayor CC está en el grupo 75.000 y 85.000 toneladas, mientras que en el grupo de banderas ROCDE, la mayor CC se encuentra en el grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

En cuanto a la menor CC para los grupos de banderas EU15, RM y ROCDE, este se encuentra en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas. Para el grupo de banderas RA, la menor CC está en el grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de peso muerto y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 34. El buque LNG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de TPM superior 100.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor CC por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior 75.000 toneladas bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 34 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de peso muerto.

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| TPM < 75.000                                | 8,425                                     | 10,5       | 0,106               | 1,2        | 3,280               | 6,5        | 1,732               | 11,7       | 3,307               | 56,5       |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 27,862                                    | 34,8       | 2,407               | 26,7       | 19,089              | 37,8       | 5,121               | 34,6       | 1,246               | 21,3       |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 33,691                                    | 42,1       | 6,491               | 72,1       | 17,941              | 35,6       | 7,957               | 53,7       | 1,302               | 22,2       |
| TPM ≥ 100.000                               | 10,129                                    | 12,6       | 0                   | 0          | 10,129              | 20,1       | 0                   | 0          | 0                   | 0          |
| <b>Total</b>                                | <b>80,107</b>                             | <b>100</b> | <b>9,004</b>        | <b>100</b> | <b>50,439</b>       | <b>100</b> | <b>14,810</b>       | <b>100</b> | <b>5,855</b>        | <b>100</b> |
|   | Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> )   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| TPM < 75.000                                | 101.503                                   |            | 35.365              |            | 113.114             |            | 91.144              |            | 103.331             |            |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 145.876                                   |            | 141.573             |            | 147.977             |            | 142.251             |            | 138.401             |            |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 165.964                                   |            | 166.426             |            | 166.116             |            | 165.778             |            | 162.781             |            |
| TPM ≥ 100.000                               | 225.098                                   |            | 0                   |            | 225.098             |            | 0                   |            | 0                   |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Respecto a las toneladas de arqueo bruto (GT) para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LNG (Tabla 35), los buques en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.00 son los que más GT aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas.

Para el grupo de bandera EU15 y RM, la mayor cantidad de GT se encuentra en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas. En el grupo de banderas RA, la mayor cantidad de GT está en el grupo 75.000 y 85.000 toneladas, seguido por el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas; mientras que en el grupo de banderas ROCDE, la mayor cantidad de GT se encuentra en el grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

En cuanto a la menor cantidad de GT para los grupos de banderas EU15, RM y ROCDE, este se encuentra en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas. Para el grupo de banderas RA, la menor cantidad de GT está en el grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de peso muerto y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 35. El buque LNG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de TPM superior 100.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con

menor GT por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior 75.000 toneladas bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 35 GT de los buques LNG en cada grupo de peso muerto.

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|   | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| TPM < 75.000                                | 6,735                                     | 11,9       | 0,079        | 1,3        | 2,620         | 7,4        | 1,299         | 12,5       | 2,738        | 58,0       |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 19,858                                    | 35,1       | 1,622        | 27,0       | 13,600        | 38,5       | 3,716         | 35,6       | 0,921        | 19,5       |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 23,397                                    | 41,4       | 4,312        | 71,7       | 12,603        | 35,6       | 5,423         | 51,9       | 1,059        | 22,5       |
| TPM ≥ 100.000                               | 6,542                                     | 11,6       | 0            | 0          | 6,542         | 18,5       | 0             | 0          | 0            | 0          |
| <b>Total</b>                                | <b>56,532</b>                             | <b>100</b> | <b>6,013</b> | <b>100</b> | <b>35,365</b> | <b>100</b> | <b>10,438</b> | <b>100</b> | <b>4,718</b> | <b>100</b> |

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores por buque LNG (ton) |         |         |         |         |
|---|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|
|   | total                       | EU15    | RA      | RM      | ROCDE   |
| TPM < 75.000                                | 81.148                      | 26.175  | 90.340  | 68.363  | 85.562  |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 103.971                     | 95.391  | 105.425 | 103.227 | 102.313 |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 115.258                     | 110.570 | 116.695 | 112.984 | 132.361 |
| TPM ≥ 100.000                               | 145.381                     | 0       | 145.381 | 0       | 0       |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" =millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la potencia propulsora para cada grupo de peso muerto de la flota de buques LNG (Tabla 36), los buques en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.00 son los que más potencia propulsora aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de potencia propulsora se encuentran en el grupo de TPM de menos de 75.000 toneladas y en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas.

Para el grupo de bandera EU15 y RM, la mayor cantidad de potencia propulsora se encuentra en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas. En el grupo de banderas RA, la mayor cantidad de potencia propulsora está en los grupos de TPM entre 75.000 y 85.000 toneladas, seguido por el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas; mientras que en el grupo de banderas ROCDE, la mayor potencia propulsora se encuentra en los grupos entre 75.000 y 85.000 toneladas, seguido por el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas.

En cuanto a la menor potencia propulsora para los grupos de banderas EU15, RM y ROCDE, este se encuentra en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas. Para el grupo de banderas RA, la menor cantidad de GT está en el grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de peso muerto y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 36. El buque LNG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de TPM superior 100.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior 75.000 toneladas bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 36 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de peso muerto.

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|   | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| TPM < 75.000                                | 1,660                                     | 10,3       | 0,038        | 2,0        | 0,646         | 6,4        | 0,366        | 12,1       | 0,061        | 10,6       |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 5,754                                     | 35,7       | 0,482        | 25,7       | 4,018         | 39,8       | 0,995        | 32,8       | 0,259        | 44,9       |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 7,070                                     | 43,8       | 1,359        | 72,3       | 3,785         | 37,5       | 1,669        | 55,1       | 0,257        | 44,5       |
| TPM ≥ 100.000                               | 1,652                                     | 10,2       | 0            | 0          | 1,652         | 16,3       | 0            | 0          | 0            | 0          |
| <b>Total</b>                                | <b>16,136</b>                             | <b>100</b> | <b>1,879</b> | <b>100</b> | <b>10,101</b> | <b>100</b> | <b>3,030</b> | <b>100</b> | <b>0,577</b> | <b>100</b> |

| Grupos de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | Valores por buque LNG (kW) |        |        |        |        |
|---|----------------------------|--------|--------|--------|--------|
|   | total                      | EU15   | RA     | RM     | ROCDE  |
| TPM < 75.000                                | 19.997                     | 12.533 | 22.274 | 19.280 | 19.059 |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                       | 30.127                     | 28.378 | 31.146 | 27.633 | 28.804 |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                      | 34.827                     | 34.851 | 35.046 | 34.772 | 32.082 |
| TPM ≥ 100.000                               | 36.705                     | 0      | 36.705 | 0      | 0      |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" =Gigavatios, "kW" = kilovatios

## 5.5. Estructura de la flota según grupos de capacidad de carga

La estructura de la flota de gaseros también se realiza separando la flota de buques LPG y LNG dado que existe una diferencia notable en los tamaños de cada uno de los tipos de gaseros, por lo tanto, los grupos de capacidad de carga son distintos entre los dos tipos de buques gaseros.

### 5.5.1. Estructura por grupos de capacidad de carga de gas para la flota de buques LPG

Se han realizado 4 grupos de capacidad de carga (CC) para estructurar la flota de buques LPG. Los grupos corresponden a buques LPG más pequeños, con menos de 5.000 m<sup>3</sup> de volumen de carga, hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, buques superiores o iguales a las 50.000 m<sup>3</sup> de volumen de carga.

En la *Tabla 37* se observa que los buques LPG con CC inferior a 5.000 m<sup>3</sup> es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LPG se encuentra en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

En los buques bajo el grupo EU15, RM y ROCDE, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>. Para el grupo de bandera RA, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup>.

En cuanto al menor número de buques, para el grupo EU15 se encuentra en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup>. Para los grupos de bandera RA, RM y ROCDE, el menor número de buques se encuentra en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

Tabla 37 Número de buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.

| Capacidad de carga (m <sup>3</sup> ) | N.º BUQUES<br>TOTAL | EU15 | RA  | RM  | ROCDE |
|--------------------------------------|---------------------|------|-----|-----|-------|
| CC < 5.000                           | 687                 | 41   | 152 | 303 | 191   |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                  | 262                 | 33   | 124 | 101 | 4     |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                 | 224                 | 40   | 115 | 69  | 0     |
| CC ≥ 50.000                          | 309                 | 5    | 172 | 129 | 3     |

Fuente: Elaboración propia

Respecto a las TPM para cada grupo de CC de la flota de buques LPG (Tabla 38), los buques dentro del grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> son los que más TPM aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría las TPM se encuentran en los grupos de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor cantidad de TPM en buques del grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

En los buques bajo el grupo RA y RM, tienen la mayoría las TPM en el grupo de CC superiores a 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo el menor TPM en buques del grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en los grupos de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor cantidad de TPM en el grupo de CC entre 15.000 y 10.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 38. El buque LPG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas RM. Y, el buque LPG con menor TPM por buque está en el grupo de TPM inferior a 5.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 38 TPM de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de<br>Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|--|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|  | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|  | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| CC < 5.000                                   | 1,743                                     | 6,7        | 0,135        | 7,5        | 0,600         | 4,4        | 0,717         | 7,1        | 0,292        | 60,8       |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                          | 2,305                                     | 8,9        | 0,334        | 18,6       | 1,070         | 7,9        | 0,873         | 8,7        | 0,029        | 6,0        |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                         | 5,318                                     | 20,6       | 1,078        | 60,1       | 2,706         | 20,0       | 1,534         | 15,3       | 0            | 0          |
| CC ≥ 50.000                                  | 16,475                                    | 63,8       | 0,247        | 13,8       | 9,163         | 67,7       | 6,905         | 68,9       | 0,159        | 33,1       |
| <b>Total</b>                                 | <b>25,841</b>                             | <b>100</b> | <b>1,794</b> | <b>100</b> | <b>13,539</b> | <b>100</b> | <b>10,029</b> | <b>100</b> | <b>0,480</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t)                    |   |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| CC < 5.000                                   | 2.537                                     |            | 3.291        |            | 3.945         |            | 2.365         |            | 1.526        |            |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                          | 8.799                                     |            | 10.105       |            | 8.628         |            | 8.639         |            | 7.339        |            |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                         | 23.742                                    |            | 26.955       |            | 23.531        |            | 22.233        |            | 0            |            |
| CC ≥ 50.000                                  | 53.316                                    |            | 49.370       |            | 53.275        |            | 53.529        |            | 53.088       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" =millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto al volumen de carga para cada grupo de CC de la flota de buques LPG (Tabla 39), los buques dentro del grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> son los que más volumen de carga aportan al total de la flota de LPG. El menor volumen de carga se encuentra en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría del volumen de carga se encuentra en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo el menor volumen de carga en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

En los buques bajo el grupo RA y RM, la mayoría del volumen de carga se encuentra en el grupo de CC superiores a 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo el menor volumen de carga en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría del volumen de carga se encuentra en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>, teniendo el menor volumen de carga en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de volumen de carga por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la *Tabla 39*. El buque LPG con mayor volumen de carga por buque se encuentra en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor volumen de carga por buque se encuentra en el grupo de CC inferior a 5.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 39 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| CC < 5.000                                | 1,807                                     | 5,2        | 0,134               | 6,4        | 0,570               | 3,1        | 0,766               | 5,6        | 0,338               | 55,2       |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 2,201                                     | 6,4        | 0,288               | 13,8       | 1,003               | 5,5        | 0,876               | 6,4        | 0,034               | 5,6        |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 6,247                                     | 18,0       | 1,303               | 62,4       | 3,191               | 17,4       | 1,753               | 12,9       | 0                   | 0          |
| CC ≥ 50.000                               | 24,405                                    | 70,4       | 0,361               | 17,3       | 13,623              | 74,1       | 10,181              | 75,0       | 0,240               | 39,2       |
| <b>Total</b>                              | <b>34,660</b>                             | <b>100</b> | <b>2,086</b>        | <b>100</b> | <b>18,386</b>       | <b>100</b> | <b>13,576</b>       | <b>100</b> | <b>0,612</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (m <sup>3</sup> )   |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| CC < 5.000                                | 2.631                                     |            | 3.271               |            | 3.748               |            | 2.528               |            | 1.767               |            |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 8.401                                     |            | 8.730               |            | 8.089               |            | 8.669               |            | 8.581               |            |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 27.889                                    |            | 32.573              |            | 27.749              |            | 25.407              |            | 0                   |            |
| CC ≥ 50.000                               | 78.980                                    |            | 72.253              |            | 79.201              |            | 78.925              |            | 79.924              |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

En cuanto a las toneladas de arqueo bruto (GT) para cada grupo de CC de la flota de buques LPG (Tabla 40), los buques dentro del grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> son los que más GT aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayoría las GT se encuentran en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayoría de GT se encuentra en el grupo de CC superiores a 50.000 m<sup>3</sup>, y la menor cantidad de GT en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 40. El buque LPG con mayor GT se encuentra en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor GT se encuentra en el grupo de CC inferior a 5.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 40 GT de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|   | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| CC < 5.000                                | 1,644                                     | 7,2        | 0,134        | 8,5        | 0,544         | 4,6        | 0,709        | 8,1        | 0,257        | 60,5       |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 2,031                                     | 9,0        | 0,297        | 18,8       | 0,924         | 7,8        | 0,783        | 8,9        | 0,027        | 6,3        |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 4,663                                     | 20,6       | 0,932        | 59,1       | 2,389         | 20,1       | 1,342        | 15,2       | 0            | 0          |
| CC ≥ 50.000                               | 14,349                                    | 63,3       | 0,213        | 13,5       | 8,023         | 67,5       | 5,972        | 67,8       | 0,141        | 33,2       |
| <b>Total</b>                              | <b>22,687</b>                             | <b>100</b> | <b>1,576</b> | <b>100</b> | <b>11,880</b> | <b>100</b> | <b>8,807</b> | <b>100</b> | <b>0,424</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t)                 |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| CC < 5.000                                | 2.393                                     |            | 3.278        |            | 3.578         |            | 2.341        |            | 1.343        |            |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 7.750                                     |            | 8.995        |            | 7.451         |            | 7.753        |            | 6.676        |            |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 20.816                                    |            | 23.289       |            | 20.774        |            | 19.453       |            | 0            |            |
| CC ≥ 50.000                               | 46.439                                    |            | 42.620       |            | 46.647        |            | 46.297       |            | 46.907       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" =millones de toneladas, "t" = toneladas

Analizando la potencia propulsora para cada grupo de CC de la flota de buques LPG (Tabla 41), los buques dentro del grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> son los que más potencia propulsora aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de potencia propulsora se encuentran en el grupo de CC entre 5.000 y 15.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques bajo el grupo EU15, la mayor potencia propulsora está en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de más de 50.000 m<sup>3</sup>.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayoría de la potencia propulsora se encuentran en el grupo de CC superiores a 50.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor potencia propulsora en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup> para los buques bajo banderas RA, y en el grupo de CC entre 5.000 y 15.000 m<sup>3</sup> para los buques bajo banderas RM.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de CC de menos de 5.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor potencia propulsora entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se ve también en la Tabla 41. El buque LPG con mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup> en el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora está en el grupo de CC menor a 5.000 m<sup>3</sup> en el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 41 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|   | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| CC < 5.000                                | 1,396                                     | 16,3       | 0,094        | 13,9       | 0,406        | 9,6        | 0,581        | 17,5       | 0,314        | 84,2       |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 1,305                                     | 15,2       | 0,184        | 27,1       | 0,607        | 14,4       | 0,493        | 14,9       | 0,021        | 5,5        |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 1,928                                     | 22,5       | 0,343        | 50,4       | 1,000        | 23,8       | 0,585        | 17,7       | 0            | 0          |
| CC ≥ 50.000                               | 3,948                                     | 46,0       | 0,058        | 8,6        | 2,198        | 52,2       | 1,653        | 49,9       | 0,038        | 10,3       |
| <b>Total</b>                              | <b>8,576</b>                              | <b>100</b> | <b>0,679</b> | <b>100</b> | <b>4,211</b> | <b>100</b> | <b>3,313</b> | <b>100</b> | <b>0,373</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (kW)                |   |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
| CC < 5.000                                | 2.031                                     |            | 2.300        |            | 2.672        |            | 1.918        |            | 1.644        |            |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 4.980                                     |            | 5.587        |            | 4.893        |            | 4.883        |            | 5.143        |            |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 8.608                                     |            | 8.564        |            | 8.698        |            | 8.481        |            | 0            |            |
| CC ≥ 50.000                               | 12.776                                    |            | 11.648       |            | 12.776       |            | 12.817       |            | 12.820       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

### 5.5.2. Estructura por grupos de capacidad de carga de gas para la flota de buques LNG

Se han realizado 4 grupos de capacidad de carga para estructurar la flota de buques LNG. Los grupos corresponden a buques LNG más pequeños, con menos de 100.000 m<sup>3</sup> de volumen de carga, hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, buques superiores o iguales a las 170.000 m<sup>3</sup> de volumen de carga.

En la Tabla 42 se observa que los buques LNG con CC entre 100.000 m<sup>3</sup> y 150.000 m<sup>3</sup> es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LNG se encuentra en el grupo de CC con menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques dentro del grupo EU15, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup>, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

En cuanto a los buques en el grupo RA, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de CC entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup>, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

Respecto buques dentro del grupo RM, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques dentro del grupo ROCDE, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup>.

Tabla 42 Número de buques LNG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM | ROCDE |
|---|------------------|------|-----|----|-------|
| CC < 100.000                              | 26               | 3    | 8   | 8  | 7     |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                    | 194              | 15   | 100 | 46 | 33    |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                    | 163              | 19   | 105 | 32 | 7     |
| CC ≥ 170.000                              | 139              | 22   | 98  | 17 | 2     |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 43 TPM de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|   | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| CC < 100.000                              | 0,461                                     | 1,0        | 0,056        | 1,1        | 0,229         | 0,8        | 0,163        | 2,0        | 0,013        | 0,4        |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                    | 15,145                                    | 34,3       | 1,208        | 23,9       | 7,870         | 28,5       | 3,674        | 44,0       | 2,394        | 75,3       |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                    | 14,355                                    | 32,5       | 1,707        | 33,8       | 9,107         | 33,0       | 2,940        | 35,2       | 0,601        | 18,9       |
| CC ≥ 170.000                              | 14,201                                    | 32,2       | 2,084        | 41,2       | 10,371        | 37,6       | 1,572        | 18,8       | 0,174        | 5,5        |
| <b>Total</b>                              | <b>44,161</b>                             | <b>100</b> | <b>5,055</b> | <b>100</b> | <b>27,577</b> | <b>100</b> | <b>8,349</b> | <b>100</b> | <b>3,181</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (t) |         |        |         |        |        |
|---------------------------|---------|--------|---------|--------|--------|
| CC < 100.000              | 17.731  | 18.756 | 28.638  | 20.392 | 1.787  |
| 100.000 ≤ CC < 150.000    | 78.066  | 80.501 | 78.696  | 79.859 | 72.548 |
| 150.000 ≤ CC < 170.000    | 88.065  | 89.847 | 86.733  | 91.868 | 85.830 |
| CC ≥ 170.000              | 102.164 | 94.713 | 105.826 | 92.493 | 86.885 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Analizando las TPM para cada grupo de CC de la flota de buques LNG (Tabla 43), la menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. Los otros tres grupos de CC tienen el resto de TPM con alrededor del 33% cada uno de los grupos.

Todos los grupos de banderas tiene la menor cantidad de TPM en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. En cuanto a la mayoría de las TPM, en los grupos de bandera EU15 y RA se encuentra dentro del grupo de CC de más de 170.000 m<sup>3</sup>, mientras que para los grupos RM y ROCDE se encuentra en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 43. El buque LNG con mayor TPM por buque se encuentra en

el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque están en el grupo de CC inferior a 100.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE.

Analizando el volumen de carga para cada grupo de CC de la flota de buques LNG (Tabla 44), la menor cantidad de volumen de carga se encuentran en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. Los otros tres grupos de CC tienen el restante volumen total de carga con alrededor del 33% para cada uno de los grupos.

Todos los grupos de banderas tiene la menor cantidad de volumen de carga en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. En cuanto al mayor volumen de carga, en los grupos de bandera EU15 y RA se encuentra dentro del grupo de CC de más de 170.000 m<sup>3</sup>, mientras que para los grupos RM y ROCDE se encuentra en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de volumen de carga por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la *Tabla 43*. El buque LNG con mayor volumen de carga se encuentra en el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor volumen de carga se encuentra en el grupo de CC inferior a 100.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 44 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| CC < 100.000                              | 0,810                                     | 1,0        | 0,106               | 1,2        | 0,409               | 0,8        | 0,278               | 1,9        | 0,017               | 0,3        |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                    | 26,955                                    | 33,6       | 2,080               | 23,1       | 14,086              | 27,9       | 6,406               | 43,3       | 4,382               | 74,9       |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                    | 26,045                                    | 32,5       | 3,043               | 33,8       | 16,677              | 33,1       | 5,218               | 35,2       | 1,107               | 18,9       |
| CC ≥ 170.000                              | 26,297                                    | 32,8       | 3,774               | 41,9       | 19,267              | 38,2       | 2,908               | 19,6       | 0,348               | 5,9        |
| <b>Total</b>                              | <b>80,107</b>                             | <b>100</b> | <b>9,003</b>        | <b>100</b> | <b>50,439</b>       | <b>100</b> | <b>14,810</b>       | <b>100</b> | <b>5,854</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> )   |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| CC < 100.000                              | 31.159                                    |            | 35.365              |            | 51.179              |            | 34.702              |            | 2.429               |            |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                    | 138.943                                   |            | 138.684             |            | 140.859             |            | 139.272             |            | 132.798             |            |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                    | 159.785                                   |            | 160.146             |            | 158.830             |            | 163.055             |            | 158.191             |            |
| CC ≥ 170.000                              | 189.188                                   |            | 171.559             |            | 196.600             |            | 171.072             |            | 173.885             |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

En cuanto a las toneladas de arqueado bruto (GT) para cada grupo de CC de la flota de buques LNG (Tabla 45), la menor cantidad de GT está en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. Los otros tres grupos de CC tienen el resto de GT distribuido casi por igual entre los tres grupos.

Todos los grupos de banderas tiene la menor cantidad de GT en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. En cuanto a la mayoría de las GT, en los grupos de bandera EU15 y RA se encuentra dentro del grupo de CC de más de 170.000 m<sup>3</sup>, mientras que para los grupos RM y ROCDE se encuentra en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 43. El buque LNG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LNG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de CC inferior a 100.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 45 GT de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de<br>Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|--|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|  | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|  | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| CC < 100.000                                 | 0.638                                     | 1.1        | 0.079        | 1.3        | 0.322         | 0.9        | 0.216         | 2.1        | 0.021        | 0.4        |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                       | 20.164                                    | 35.7       | 1.413        | 23.5       | 10.530        | 29.8       | 4.704         | 45.1       | 3.516        | 74.5       |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                       | 18.070                                    | 32.0       | 2.006        | 33.4       | 11.609        | 32.8       | 3.557         | 34.1       | 0.897        | 19.0       |
| CC ≥ 170.000                                 | 17.661                                    | 31.2       | 2.514        | 41.8       | 12.904        | 36.5       | 1.961         | 18.8       | 0.283        | 6.0        |
| <b>Total</b>                                 | <b>56.533</b>                             | <b>100</b> | <b>6.012</b> | <b>100</b> | <b>35.365</b> | <b>100</b> | <b>10.438</b> | <b>100</b> | <b>4.718</b> | <b>100</b> |
|  | Valores por buque LNG (t)                 |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| CC < 100.000                                 | 24.522                                    |            | 26.175       |            | 40.220        |            | 27.022        |            | 3.014        |            |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                       | 103.938                                   |            | 94.221       |            | 105.303       |            | 102.263       |            | 106.555      |            |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                       | 110.860                                   |            | 105.603      |            | 110.563       |            | 111.162       |            | 128.213      |            |
| CC ≥ 170.000                                 | 127.061                                   |            | 114.278      |            | 131.670       |            | 115.344       |            | 141.404      |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la potencia propulsora para cada grupo de CC de la flota de buques LNG (Tabla 46), la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de CC entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup>, mientras que la menor potencia propulsora está en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

Todos los grupos de banderas tiene la menor potencia propulsora en el grupo de CC de menos de 100.000 m<sup>3</sup>. En cuanto a la mayor potencia propulsora, en el grupo de bandera EU15 está en el grupo de CC entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup>, para el grupo de banderas RM y ROCDE se encuentra dentro del grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de CC y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 46. El buque LNG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de TPM inferior a 100.000 m<sup>3</sup> bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 46 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de capacidad de carga.

| Metros cúbicos de Capacidad de carga (CC) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|   | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| CC < 100.000                              | 0,219                                     | 1,4        | 0,038        | 2,0        | 0,093         | 0,9        | 0,072        | 2,4        | 0,016        | 1,4        |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                    | 5,092                                     | 31,6       | 0,403        | 21,4       | 2,663         | 26,4       | 1,200        | 39,6       | 0,826        | 73,4       |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                    | 6,124                                     | 38,0       | 0,701        | 37,3       | 4,047         | 40,1       | 1,149        | 37,9       | 0,227        | 20,1       |
| CC ≥ 170.000                              | 4,700                                     | 29,1       | 0,738        | 39,3       | 3,297         | 32,6       | 0,609        | 20,1       | 0,057        | 5,0        |
| <b>Total</b>                              | <b>16,136</b>                             | <b>100</b> | <b>1,879</b> | <b>100</b> | <b>10,100</b> | <b>100</b> | <b>3,030</b> | <b>100</b> | <b>1,126</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (kW) |        |        |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| CC < 100.000               | 8.422  | 12.533 | 11.605 | 9.042  | 2.313  |
| 100.000 ≤ CC < 150.000     | 26.249 | 26.842 | 26.635 | 26.092 | 25.031 |
| 150.000 ≤ CC < 170.000     | 37.572 | 36.900 | 38.546 | 35.909 | 32.396 |
| CC ≥ 170.000               | 33.813 | 33.540 | 33.641 | 35.795 | 28.405 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

## 5.6. Estructura de la flota según grupos de arqueo bruto

La estructura de la flota de gaseros también se realiza separando la flota de buques LPG y LNG dado que existe una diferencia notable en los tamaños de cada uno de los tipos de gaseros, por lo tanto, los grupos de arqueo bruto son distintos entre los dos tipos de buques gaseros.

### 5.6.1. Estructura por grupos de toneladas de arqueo bruto para la flota de buques LPG

Se han realizado 4 grupos de toneladas de arqueo bruto (GT) para estructurar la flota de buques LPG. Los grupos corresponden a buques LPG más pequeños, con menos de 3.000 toneladas de arqueo bruto, hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, buques superiores o iguales a las 15.000 toneladas de arqueo bruto.

En la Tabla 47 se observa que los buques LPG con GT superior a 15.000 toneladas es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LPG se encuentra en los grupos de GT entre 3.000 y 5.000 toneladas y entre 5.000 y 15.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo EU15, RA y RM, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas. Para el grupo de bandera ROCDE, el mayor número de buques se encuentra en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas.

En cuanto al menor número de buques, para el grupo EU15 y RA se encuentra en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas. Para el grupo RM el menor número de buques se encuentra en el grupo de GT entre 5.000 y 15.000 toneladas, y para el grupo de banderas ROCDE, el menor número de buques se encuentra en el grupo GT superior a 15.000 toneladas.

Tabla 47 Número de buques LPG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo<br>bruto (GT) | N.º BUQUES<br>TOTAL | EU15 | RA  | RM  | ROCDE |
|--------------------------------|---------------------|------|-----|-----|-------|
|                                |                     |      |     |     |       |
| GT < 3.000                     | 411                 | 16   | 34  | 193 | 168   |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 277                 | 23   | 119 | 112 | 23    |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 273                 | 37   | 129 | 103 | 4     |
| GT ≥ 15.000                    | 521                 | 43   | 281 | 194 | 3     |

Fuente: Elaboración propia

En cuanto las TPM para cada grupo de GT de la flota de buques LPG (Tabla 48), los buques dentro del grupo de GT superior a 15.000 toneladas son los que más TPM aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de TPM están en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, RA y RM, la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de TPM en buques del grupo GT de menos de 3.000 toneladas. En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de TPM en el grupo de GT entre 5.000 y 15.000 toneladas.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 48. El buque LPG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Respecto a la capacidad de carga (CC) para cada grupo de GT de la flota de buques LPG (Tabla 49), los buques dentro del grupo de GT superior a 15.000 toneladas son los que más CC aportan al total de la flota de LPG. La menor CC está en buques de menos de 3.000 toneladas.

Tabla 48 TPM de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto<br>(GT) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|--------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                                | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                                | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| GT < 3.000                     | 0,609                                     | 2,4        | 0,032        | 1,8        | 0,082         | 0,6        | 0,287         | 2,9        | 0,208        | 43,2       |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 1,145                                     | 4,4        | 0,095        | 5,3        | 0,524         | 3,9        | 0,442         | 4,4        | 0,084        | 17,5       |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 2,516                                     | 9,7        | 0,376        | 21,0       | 1,177         | 8,7        | 0,934         | 9,3        | 0,029        | 6,1        |
| GT ≥ 15.000                    | 21,570                                    | 83,5       | 1,290        | 71,9       | 11,756        | 86,8       | 8,365         | 83,4       | 0,159        | 33,2       |
| <b>Total</b>                   | <b>25,841</b>                             | <b>100</b> | <b>1,793</b> | <b>100</b> | <b>13,539</b> | <b>100</b> | <b>10,028</b> | <b>100</b> | <b>0,480</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (ton)    |   |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| GT < 3.000                     | 1.482                                     |            | 2.017        |            | 2.410         |            | 1.489         |            | 1.235        |            |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 4.135                                     |            | 4.151        |            | 4.403         |            | 3.947         |            | 3.648        |            |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 9.218                                     |            | 10.166       |            | 9.121         |            | 9.071         |            | 7.339        |            |
| GT ≥ 15.000                    | 41.401                                    |            | 29.990       |            | 41.838        |            | 43.117        |            | 53.088       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Para los buques bajo el grupo EU15, RA y RM, la mayoría de CC está en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas, teniendo la menor CC en buques de menos de 3.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de la CC se encuentra en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas, teniendo la menor CC entre 5.000 y 15.000 toneladas.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 49. El buque LPG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor CC por buque está en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 49 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT)             | Valores totales de la flota de buques LPG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| GT < 3.000                              | 0,712                                     | 2,1        | 0,038               | 1,8        | 0,083               | 0,5        | 0,337               | 2,5        | 0,254               | 41,4       |
| 3.000 ≤ GT < 5.000                      | 1,114                                     | 3,2        | 0,086               | 4,1        | 0,496               | 2,7        | 0,448               | 3,3        | 0,084               | 13,7       |
| 5.000 ≤ GT < 15.000                     | 2,388                                     | 6,9        | 0,332               | 15,9       | 1,097               | 6,0        | 0,923               | 6,8        | 0,034               | 5,6        |
| GT ≥ 15.000                             | 30,446                                    | 87,8       | 1,629               | 78,1       | 16,710              | 90,9       | 11,867              | 87,4       | 0,240               | 39,2       |
| <b>Total</b>                            | <b>34,660</b>                             | <b>100</b> | <b>2,086</b>        | <b>100</b> | <b>18,386</b>       | <b>100</b> | <b>13,576</b>       | <b>100</b> | <b>0,612</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (m <sup>3</sup> ) |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| GT < 3.000                              | 1.733                                     |            | 2.396               |            | 2.450               |            | 1.747               |            | 1.509               |            |
| 3.000 ≤ GT < 5.000                      | 4.022                                     |            | 3.760               |            | 4.164               |            | 4.001               |            | 3.652               |            |
| 5.000 ≤ GT < 15.000                     | 8.745                                     |            | 8.982               |            | 8.507               |            | 8.966               |            | 8.581               |            |
| GT ≥ 15.000                             | 58.438                                    |            | 37.889              |            | 59.467              |            | 61.172              |            | 79.924              |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Respecto a las toneladas de arqueo bruto (GT) para cada grupo de GT de la flota de buques LPG (Tabla 50), los buques dentro del grupo de GT superior a 15.000 toneladas son los que más GT aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, RA y RM, la mayoría las GT se encuentran en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas, teniendo el menor GT en buques del grupo de GT de menos de 3.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de GT entre 5.000 y 15.000 toneladas.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 50. El buque LPG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor GT por buque está en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 50 GT de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto<br>(GT) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|--------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                                | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| GT < 3.000                     | 0,566                                     | 2,5        | 0,036        | 2,3        | 0,076         | 0,6        | 0,281        | 3,2        | 0,174        | 41,1       |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 1,072                                     | 4,7        | 0,087        | 5,5        | 0,469         | 4,0        | 0,433        | 4,9        | 0,082        | 19,4       |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 2,200                                     | 9,7        | 0,334        | 21,2       | 1,005         | 8,5        | 0,834        | 9,5        | 0,027        | 6,3        |
| GT ≥15.000                     | 18,849                                    | 83,1       | 1,119        | 71,0       | 10,330        | 87,0       | 7,259        | 82,4       | 0,141        | 33,2       |
| <b>Total</b>                   | <b>22,687</b>                             | <b>100</b> | <b>1,576</b> | <b>100</b> | <b>11,880</b> | <b>100</b> | <b>8,807</b> | <b>100</b> | <b>0,424</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (t) |        |        |        |        |        |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| GT < 3.000                | 1.378  | 2.234  | 2.232  | 1.454  | 1.037  |
| 3.000 ≤ GT < 5.000        | 3.870  | 3.782  | 3.945  | 3.868  | 3.583  |
| 5.000 ≤ GT < 15.000       | 8.058  | 9.030  | 7.790  | 8.098  | 6.676  |
| GT ≥15.000                | 36.178 | 26.025 | 36.761 | 37.418 | 46.907 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Para la variable de potencia propulsora en cada grupo de GT de la flota de buques LPG (*Tabla 51*), los buques dentro del grupo de GT superior a 15.000 toneladas son los que más potencia propulsora aportan al total de la flota de LPG. La menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas.

Para los buques bajo el grupo EU15, RA y RM, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de GT de menos de 3.000 toneladas.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de GT de menos de 3.000 toneladas, teniendo la menor potencia propulsora en el grupo de GT entre 5.000 y 15.000 toneladas.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la *Tabla 51*. El buque LPG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 50.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas bajo el grupo de banderas RM.

Tabla 51 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                             | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| GT < 3.000                  | 0.628                                     | 7.3        | 0.028        | 4.1        | 0.069        | 1.6        | 0.280        | 8.4        | 0.251        | 67.4       |
| 3.000 ≤ GT < 5.000          | 0.778                                     | 9.1        | 0.061        | 9.0        | 0.343        | 8.2        | 0.311        | 9.4        | 0.063        | 16.8       |
| 5.000 ≤ GT < 15.000         | 1.402                                     | 16.3       | 0.205        | 30.2       | 0.653        | 15.5       | 0.522        | 15.8       | 0.021        | 5.5        |
| GT ≥ 15.000                 | 5.769                                     | 67.3       | 0.385        | 56.7       | 3.145        | 74.7       | 2.200        | 66.4       | 0.038        | 10.3       |
| <b>Total</b>                | <b>8.576</b>                              | <b>100</b> | <b>0.679</b> | <b>100</b> | <b>4.211</b> | <b>100</b> | <b>3.313</b> | <b>100</b> | <b>0.373</b> | <b>100</b> |

| Toneladas Arqueo bruto (GT) | Valores por buque LPG (kW) |       |        |        |        |
|-----------------------------|----------------------------|-------|--------|--------|--------|
|                             | total                      | EU15  | RA     | RM     | ROCDE  |
| GT < 3.000                  | 1.528                      | 1.747 | 2.022  | 1.450  | 1.497  |
| 3.000 ≤ GT < 5.000          | 2.807                      | 2.650 | 2.884  | 2.776  | 2.721  |
| 5.000 ≤ GT < 15.000         | 5.134                      | 5.550 | 5.066  | 5.070  | 5.143  |
| GT ≥ 15.000                 | 11.073                     | 8.958 | 11.193 | 11.340 | 12.820 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

### 5.6.2. Estructura por grupos de toneladas de arqueo bruto para la flota de buques LNG

Se han realizado 4 grupos de arqueo bruto para estructurar la flota de buques LNG. Los grupos corresponden a buques LNG más pequeños, con menos de 60.000 toneladas de arqueo bruto, hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, buques superiores o iguales a las 120.000 toneladas de arqueo bruto.

En la Tabla 52 se muestra que los buques LNG con GT entre 100.000 y 120.000 toneladas es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LNG se encuentra en los grupos de GT con menos de 60.000 toneladas.

Para todos los grupos de banderas, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas.

En cuanto al menor número de buques, para el grupo RA, RM y ROCDE se encuentra en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas. Para el grupo EU15 el menor número de buques se encuentran en los grupos de GT inferior a 60.000 toneladas y en el grupo GT superior a 120.000 toneladas.

Tabla 52 Número de buques LNG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT) | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM | ROCDE |
|-----------------------------|------------------|------|-----|----|-------|
| GT < 60.000                 | 24               | 3    | 6   | 8  | 7     |
| 60.000 ≤ GT < 100.000       | 119              | 17   | 65  | 31 | 6     |
| 100.000 ≤ GT < 120.000      | 264              | 36   | 148 | 53 | 27    |
| GT ≥ 120.000                | 115              | 3    | 92  | 11 | 9     |

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las TPM para cada grupo de GT de la flota de buques LNG (Tabla 53), los buques dentro del grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas son los que más TPM aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de GT de menos de 60.000 toneladas.

Para todos los grupos de banderas, la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas, teniendo el menor TPM en buques del grupo de GT de menos de 60.000 toneladas.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 53. El buque LNG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 120.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 53 TPM de los buques LNG en cada grupo de arqueado bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                             | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| GT < 60.000                 | 0,363                                     | 0,8        | 0,056        | 1,1        | 0,131         | 0,5        | 0,163        | 2,0        | 0,013        | 0,4        |
| 60.000 ≤ GT < 100.000       | 9,446                                     | 21,4       | 1,380        | 27,3       | 5,175         | 18,8       | 2,442        | 29,3       | 0,449        | 14,1       |
| 100.000 ≤ GT < 120.000      | 22,676                                    | 51,3       | 3,332        | 65,9       | 12,630        | 45,8       | 4,769        | 57,1       | 1,945        | 61,1       |
| GT ≥ 120.000                | 11,676                                    | 26,4       | 0,286        | 5,7        | 9,641         | 35,0       | 0,975        | 11,7       | 0,775        | 24,3       |
| <b>Total</b>                | <b>44,161</b>                             | <b>100</b> | <b>5,055</b> | <b>100</b> | <b>27,577</b> | <b>100</b> | <b>8,349</b> | <b>100</b> | <b>3,181</b> | <b>100</b> |
|                             | Valores por buque LNG (t)                 |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| GT < 60.000                 | 15.139                                    |            | 18.756       |            | 21.905        |            | 20.392       |            | 1.787        |            |
| 60.000 ≤ GT < 100.000       | 79.377                                    |            | 81.193       |            | 79.608        |            | 78.783       |            | 74.802       |            |
| 100.000 ≤ GT < 120.000      | 85.894                                    |            | 92.564       |            | 85.335        |            | 89.978       |            | 72.047       |            |
| GT ≥ 120.000                | 101.530                                   |            | 95.235       |            | 104.795       |            | 88.597       |            | 86.064       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la capacidad de carga (CC) para cada grupo de GT de la flota de buques LNG (Tabla 54), los buques dentro del grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas son los que más CC aportan al total de la flota de LNG. La menor CC se encuentran en el grupo de GT de menos de 60.000 toneladas.

Para los grupos de banderas EU15, RA y RM, la mayoría de la CC se encuentran en el grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas, teniendo el menor TPM en buques del grupo de GT de menos de 60.000 toneladas. En el grupo de banderas ROCDE, la mayor CC se encuentra en el grupo de GT superior a 120.000 toneladas y la menor CC en el grupo de GT de menos de 60.000 toneladas.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 54. El buque LNG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de GT

superior a 120.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor CC por buque está en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 54 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT)             | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| GT < 60.000                             | 0,635                                     | 0,8        | 0,106               | 1,2        | 0,235               | 0,5        | 0,278               | 1,9        | 0,017               | 0,6        |
| 60.000 ≤ GT < 100.000                   | 16,671                                    | 20,8       | 2,383               | 26,5       | 9,218               | 18,3       | 4,265               | 28,8       | 0,805               | 30,6       |
| 100.000 ≤ GT < 120.000                  | 41,303                                    | 51,6       | 5,985               | 66,5       | 23,184              | 46,0       | 8,557               | 57,8       | 0,358               | 13,6       |
| GT ≥ 120.000                            | 21,498                                    | 26,8       | 0,529               | 5,9        | 17,802              | 35,3       | 1,711               | 11,6       | 1,455               | 55,2       |
| <b>Total</b>                            | <b>80,107</b>                             | <b>100</b> | <b>9,003</b>        | <b>100</b> | <b>50,439</b>       | <b>100</b> | <b>14,810</b>       | <b>100</b> | <b>2,635</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> ) |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| GT < 60.000                             | 26.468                                    |            | 35.365              |            | 39.088              |            | 34.702              |            | 2.429               |            |
| 60.000 ≤ GT < 100.000                   | 140.094                                   |            | 140.178             |            | 141.820             |            | 137.571             |            | 134.196             |            |
| 100.000 ≤ GT < 120.000                  | 156.452                                   |            | 166.253             |            | 156.648             |            | 161.454             |            | 132.488             |            |
| GT ≥ 120.000                            | 186.935                                   |            | 176.407             |            | 193.505             |            | 155.520             |            | 161.678             |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Para la variable de toneladas arqueo bruto para cada grupo de GT de la flota de buques LNG (Tabla 55), los buques dentro del grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas son los que más toneladas arqueo bruto aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de GT de menos de 60.000 toneladas.

Para todos los grupos de banderas, la mayoría de las toneladas arqueo bruto se encuentran en el grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas, teniendo la menor cantidad de toneladas arqueo bruto en buques del grupo de GT de menos de 60.000 toneladas.

Los valores medio de toneladas arqueo bruto por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 55. El buque LNG con mayor toneladas arqueo bruto por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 120.000 toneladas bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor toneladas arqueo bruto por buque se encuentra en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Analizando la potencia propulsora para cada grupo de GT de la flota de buques LNG (Tabla 56), los buques dentro del grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas son los que más potencia propulsora aportan al total de la flota de LNG. La menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de GT de menos de 60.000 toneladas. Para todos los grupos de banderas, la mayor potencia propulsora está en el grupo entre 100.000 y 120.000 toneladas, y la menor potencia propulsora en buques del de menos de 60.000 toneladas.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de GT y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 56. El buque LNG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de GT superior a 120.000 toneladas bajo el grupo de

banderas RA. Y, el buque LNG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 55 GT de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                             | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| GT < 60.000                 | 0,505                                     | 0,9        | 0,079        | 1,3        | 0,189         | 0,5        | 0,216         | 2,1        | 0,021        | 0,4        |
| 60.000 ≤ GT < 100.000       | 11,300                                    | 20,0       | 1,609        | 26,8       | 6,209         | 17,6       | 2,921         | 28,0       | 0,561        | 11,9       |
| 100.000 ≤ GT < 120.000      | 29,053                                    | 51,4       | 3,960        | 65,9       | 16,275        | 46,0       | 5,863         | 56,2       | 2,955        | 62,6       |
| GT ≥ 120.000                | 15,675                                    | 27,7       | 0,365        | 6,1        | 12,691        | 35,9       | 1,438         | 13,8       | 1,180        | 25,0       |
| <b>Total</b>                | <b>56,533</b>                             | <b>100</b> | <b>6,012</b> | <b>100</b> | <b>35,365</b> | <b>100</b> | <b>10,438</b> | <b>100</b> | <b>4,718</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (t) |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| GT < 60.000               | 21.050  | 26.175  | 31.569  | 27.022  | 3.014   |
| 60.000 ≤ GT < 100.000     | 94.954  | 94.635  | 95.520  | 94.220  | 93.518  |
| 100.000 ≤ GT < 120.000    | 110.051 | 109.992 | 109.969 | 110.627 | 109.452 |
| GT ≥ 120.000              | 136.304 | 121.794 | 137.948 | 130.733 | 131.144 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 56 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de arqueo bruto.

| Toneladas Arqueo bruto (GT) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                             | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| GT < 60.000                 | 0,188                                     | 1,2        | 0,038        | 2,0        | 0,062         | 0,6        | 0,072        | 2,4        | 0,016        | 1,4        |
| 60.000 ≤ GT < 100.000       | 3,433                                     | 21,3       | 0,482        | 25,7       | 1,935         | 19,2       | 0,850        | 28,0       | 0,166        | 14,8       |
| 100.000 ≤ GT < 120.000      | 8,368                                     | 51,9       | 1,284        | 68,3       | 4,710         | 46,6       | 1,714        | 56,6       | 0,660        | 58,6       |
| GT ≥ 120.000                | 4,147                                     | 25,7       | 0,076        | 4,0        | 3,393         | 33,6       | 0,395        | 13,0       | 0,284        | 25,2       |
| <b>Total</b>                | <b>16,136</b>                             | <b>100</b> | <b>1,879</b> | <b>100</b> | <b>10,100</b> | <b>100</b> | <b>3,030</b> | <b>100</b> | <b>1,126</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (kW) |        |        |        |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| GT < 60.000                | 7.836  | 12.533 | 10.325 | 9.042  | 2.313  |
| 60.000 ≤ GT < 100.000      | 28.849 | 28.378 | 29.768 | 27.404 | 27.689 |
| 100.000 ≤ GT < 120.000     | 31.696 | 35.658 | 31.827 | 32.336 | 24.440 |
| GT ≥ 120.000               | 36.059 | 25.169 | 36.883 | 35.864 | 31.509 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

## 5.7. Estructura de la flota según grupos de potencia propulsora instalada

La estructura de la flota de gaseros también se realiza separando la flota de buques LPG y LNG dado que existe una diferencia notable en los tamaños de cada uno de los tipos de gaseros y en consecuencia en sus requerimientos de potencia propulsora, por lo tanto, los grupos de potencia propulsora instalada son distintos entre los dos tipos de buques gaseros.

### 5.7.1. Estructura por grupos de potencia propulsora instalada para la flota de buques LPG

Se han realizado 4 grupos de potencia instalada para propulsión con el fin de estructurar la flota de buques LPG para este grupo. Los grupos corresponden a buques LPG más pequeños, con menos de 2.000 kilovatios de potencia propulsora, hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, con una potencia propulsora igual o superior a 10.000 kilovatios.

En la Tabla 57 se puede ver que los buques LPG dentro del grupo de potencia propulsora entre 2.000 y 5.000 kW es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LPG se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW.

En los buques bajo el grupo EU15, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW.

Para los buques bajo el grupo RA, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 2.000 y 5.000 kW, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW.

Respecto a los buques bajo el grupo RM, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 2.000 y 5.000 kW, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW.

En los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW.

*Tabla 57 Número de buques LPG en cada grupo de potencia instalada.*

| <b>Kilovatios de Potencia propulsora (P)</b> | <b>N.º BUQUES TOTAL</b> | <b>EU15</b> | <b>RA</b> | <b>RM</b> | <b>ROCDE</b> |
|--|-------------------------|-------------|-----------|-----------|--------------|
| P < 2.000                                    | 338                     | 9           | 21        | 156       | 152          |
| 2.000 ≤ P < 5.000                            | 493                     | 42          | 205       | 205       | 41           |
| 5.000 ≤ P < 10.000                           | 337                     | 64          | 165       | 106       | 2            |
| P ≥ 10.000                                   | 314                     | 4           | 172       | 135       | 3            |

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto las toneladas de peso muerto (TPM) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LPG (Tabla 58), los buques dentro del grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW son los que más TPM aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo EU15 la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW, teniendo el menor TPM en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo el menor TPM en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayoría las TPM se encuentran en los grupos de potencia propulsora inferiores a 2.000 kW y también en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo el menor TPM en buques del grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 58. El buque LPG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 58 TPM de los buques LPG en cada grupo de potencia propulsora

| Kilovatios de Potencia propulsora (P) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|---------------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                                       | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                                       | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| P < 2.000                             | 0,399                                     | 1,5        | 0,015        | 0,8        | 0,043         | 0,3        | 0,180         | 1,8        | 0,160        | 33,4       |
| 2.000 ≤ P < 5.000                     | 2,342                                     | 9,1        | 0,192        | 10,7       | 1,053         | 7,8        | 0,954         | 9,5        | 0,143        | 29,8       |
| 5.000 ≤ P < 10.000                    | 6,850                                     | 26,5       | 1,387        | 77,3       | 3,543         | 26,2       | 1,902         | 19,0       | 0,017        | 3,6        |
| P ≥ 10.000                            | 16,250                                    | 62,9       | 0,199        | 11,1       | 8,900         | 65,7       | 6,992         | 69,7       | 0,159        | 33,2       |
| <b>Total</b>                          | <b>25,841</b>                             | <b>100</b> | <b>1,793</b> | <b>100</b> | <b>13,539</b> | <b>100</b> | <b>10,028</b> | <b>100</b> | <b>0,480</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (t) |        |        |        |        |        |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P < 2.000                 | 1.180  | 1.633  | 2.064  | 1.156  | 1.055  |
| 2.000 ≤ P < 5.000         | 4.750  | 4.575  | 5.134  | 4.654  | 3.490  |
| 5.000 ≤ P < 10.000        | 20.327 | 21.674 | 21.475 | 17.947 | 8.679  |
| P ≥ 10.000                | 51.751 | 49.871 | 51.742 | 51.789 | 53.088 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto capacidad de carga (CC) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LPG (Tabla 59), los buques dentro del grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW son los que más CC aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de CC se encuentran en el grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo EU15 la mayor CC se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW, teniendo la menor CC en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayor CC se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo la menor CC en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayor CC se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo la menor CC en buques del grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 59. El buque LPG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor CC por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW bajo el grupo de banderas RM.

Tabla 59 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de potencia instalada

| Kilovatios de Potencia propulsora (P) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---------------------------------------|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|                                       | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|                                       | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| P < 2.000                             | 0,478                                     | 1,4        | 0,019               | 0,9        | 0,041               | 0,2        | 0,211               | 1,6        | 0,207               | 33,8       |
| 2.000 ≤ P < 5.000                     | 2,368                                     | 6,8        | 0,181               | 8,7        | 1,040               | 5,7        | 1,004               | 7,4        | 0,143               | 23,4       |
| 5.000 ≤ P < 10.000                    | 7,908                                     | 22,8       | 1,607               | 77,0       | 4,162               | 22,6       | 2,117               | 15,6       | 0,022               | 3,5        |
| P ≥ 10.000                            | 23,906                                    | 69,0       | 0,280               | 13,4       | 13,143              | 71,5       | 10,244              | 75,5       | 0,240               | 39,2       |
| <b>Total</b>                          | <b>34,660</b>                             | <b>100</b> | <b>2,086</b>        | <b>100</b> | <b>18,386</b>       | <b>100</b> | <b>13,576</b>       | <b>100</b> | <b>0,612</b>        | <b>100</b> |

| Kilovatios de Potencia propulsora (P) | Valores por buque LPG (m <sup>3</sup> ) |        |        |        |        |
|---------------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|
|                                       | total                                   | EU15   | RA     | RM     | ROCDE  |
| P < 2.000                             | 1.414                                   | 2.078  | 1.957  | 1.354  | 1.361  |
| 2.000 ≤ P < 5.000                     | 4.803                                   | 4.311  | 5.073  | 4.896  | 3.496  |
| 5.000 ≤ P < 10.000                    | 23.467                                  | 25.108 | 25.226 | 19.976 | 10.805 |
| P ≥ 10.000                            | 76.134                                  | 69.928 | 76.413 | 75.879 | 79.924 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Analizando las toneladas de arqueado bruto (GT) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LPG (Tabla 60), los buques dentro del grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW son los que más GT aportan al total de la flota de LPG. La menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo EU15 la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW, teniendo el menor GT en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo la menor cantidad de GT en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayoría de GT se encuentran distribuidas casi de igual manera entre los grupos de potencia propulsora inferiores a 2.000 kW, entre 2.000 y 5.000 kW y también en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo la menor cantidad de GT en buques del grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 60. El buque LPG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LPG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 60 GT de los buques LPG en cada grupo de potencia instalada.

| Kilovatios de Potencia propulsora (P) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---------------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                       | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                                       | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| P < 2.000                             | 0,366                                     | 1,6        | 0,018        | 1,1        | 0,040         | 0,3        | 0,176        | 2,0        | 0,131        | 31,0       |
| 2.000 ≤ P < 5.000                     | 2,174                                     | 9,6        | 0,178        | 11,3       | 0,944         | 7,9        | 0,916        | 10,4       | 0,136        | 32,1       |
| 5.000 ≤ P < 10.000                    | 5,995                                     | 26,4       | 1,213        | 77,0       | 3,087         | 26,0       | 1,680        | 19,1       | 0,016        | 3,7        |
| P ≥ 10.000                            | 14,152                                    | 62,4       | 0,167        | 10,6       | 7,809         | 65,7       | 6,036        | 68,5       | 0,141        | 33,2       |
| <b>Total</b>                          | <b>22,687</b>                             | <b>100</b> | <b>1,576</b> | <b>100</b> | <b>11,880</b> | <b>100</b> | <b>8,807</b> | <b>100</b> | <b>0,424</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (t) |        |        |        |        |        |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| P < 2.000                 | 1.082  | 1.997  | 1.926  | 1.127  | 865    |
| 2.000 ≤ P < 5.000         | 4.409  | 4.246  | 4.603  | 4.467  | 3.318  |
| 5.000 ≤ P < 10.000        | 17.790 | 18.951 | 18.708 | 15.846 | 7.892  |
| P ≥ 10.000                | 45.071 | 41.673 | 45.402 | 44.708 | 46.907 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la potencia propulsora instalada para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LPG (Tabla 61), los buques dentro del grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW son los que más potencia propulsora aportan al total de la flota de LPG. La menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo EU15 la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 2.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayor la potencia propulsora se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 2.000 y 5.000 kW, teniendo la menor potencia propulsora en buques del grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 61. El buque LPG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora por buque está en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 61 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de potencia instalada.

| Kilovatios de Potencia propulsora (P) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|---------------------------------------|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                       | total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                                       | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| P < 2.000                             | 0,438                                     | 5,1        | 0,009        | 1,4        | 0,030        | 0,7        | 0,188        | 5,7        | 0,211        | 15,2       |
| 2.000 ≤ P < 5.000                     | 1,547                                     | 18,0       | 0,128        | 18,8       | 0,681        | 16,2       | 0,626        | 18,9       | 1,122        | 81,1       |
| 5.000 ≤ P < 10.000                    | 2,546                                     | 29,7       | 0,492        | 72,5       | 1,273        | 30,2       | 0,769        | 23,2       | 0,012        | 0,9        |
| P ≥ 10.000                            | 4,046                                     | 47,2       | 0,050        | 7,3        | 2,227        | 52,9       | 1,731        | 52,2       | 0,038        | 2,8        |
| <b>Total</b>                          | <b>8,576</b>                              | <b>100</b> | <b>0,679</b> | <b>100</b> | <b>4,211</b> | <b>100</b> | <b>3,313</b> | <b>100</b> | <b>1,383</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (kW) |        |  |        |  |        |        |        |
|----------------------------|--------|--|--------|--|--------|--------|--------|
| P < 2.000                  | 1.295  |  | 1.044  |  | 1.427  | 1.203  | 1.385  |
| 2.000 ≤ P < 5.000          | 3.138  |  | 3.041  |  | 3.322  | 3.054  | 2.736  |
| 5.000 ≤ P < 10.000         | 7.554  |  | 7.694  |  | 7.713  | 7.251  | 5.970  |
| P ≥ 10.000                 | 12.886 |  | 12.475 |  | 12.949 | 12.819 | 12.820 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = Kilovatios

### 5.7.2. Estructura por grupos de potencia propulsora instalada para la flota de buques LNG

Se han realizado 4 grupos de potencia instalada para propulsión con el fin de estructurar la flota de buques LNG para este grupo. Los grupos corresponden a buques LNG más pequeños, con menos de 20.000 kW de potencia propulsora, hasta los buques más grandes para transporte de carga a mayores distancias, con una potencia propulsora igual o superior a 40.000 kilovatios.

En la Tabla 62 se puede ver que los buques LNG dentro del grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LNG se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW.

En los buques bajo los grupos EU15 y RA, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW, mientras que el menor número de buques lo tienen en el grupo de potencia propulsora superior a 20.000 kW.

Para los buques bajo el grupo RM y ROCDE, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW para buques en banderas RM y en el grupo entre 30.000 y 40.000 kW para buques en banderas ROCDE.

Tabla 62 Número de buques LNG en cada grupo de potencia instalada.

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM | ROCDE |
|--------------------------------------|------------------|------|-----|----|-------|
| P ≤ 20.000                           | 37               | 2    | 11  | 9  | 15    |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 251              | 25   | 141 | 54 | 31    |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 199              | 27   | 142 | 30 | 0     |
| P ≥ 40.000                           | 35               | 5    | 17  | 10 | 3     |

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las toneladas de peso muerto (TPM) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LNG (Tabla 63), los buques dentro del grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW son los que más TPM aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de TPM se encuentran en el grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

Para los buques bajo los grupos EU15 y RA la mayoría las TPM se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW, teniendo el menor TPM en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

En los buques bajo el grupo RM, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo el menor TPM en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayoría las TPM se encuentran en los grupos de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo el menor TPM en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 63. El buque LNG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW bajo el grupo de banderas EU15.

Analizando la capacidad de carga (CC) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LNG (Tabla 64), los buques dentro del grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW son los que más CC aportan al total de la flota de LNG. La menor CC se encuentra en el grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

Para los buques bajo los grupos EU15 y RA la mayor CC se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW, teniendo la menor CC en el grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

En los buques bajo el grupo RM, la mayor CC se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo la menor CC en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayor CC se encuentra en los grupos de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo la menor CC en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 64. El buque LNG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor CC por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 63 TPM de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|--------------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                      | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                                      | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| P ≤ 20.000                           | 1,289                                     | 2,9        | 0,021        | 0,4        | 0,464         | 1,7        | 0,242        | 2,9        | 0,562        | 17,7       |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 20,550                                    | 46,5       | 2,097        | 41,5       | 11,606        | 42,1       | 4,494        | 53,8       | 2,353        | 74,0       |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 18,874                                    | 42,7       | 2,449        | 48,5       | 13,773        | 49,9       | 2,651        | 31,8       | 0            | 0          |
| P ≥ 40.000                           | 3,448                                     | 7,8        | 0,487        | 9,6        | 1,734         | 6,3        | 0,961        | 11,5       | 0,266        | 8,4        |
| <b>Total</b>                         | <b>44,161</b>                             | <b>100</b> | <b>5,055</b> | <b>100</b> | <b>27,577</b> | <b>100</b> | <b>8,349</b> | <b>100</b> | <b>3,181</b> | <b>100</b> |

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | Valores por buque LNG (t) |        |         |        |        |
|--------------------------------------|---------------------------|--------|---------|--------|--------|
|                                      | total                     | EU15   | RA      | RM     | ROCDE  |
| P ≤ 20.000                           | 34.847                    | 10.735 | 42.143  | 26.902 | 37.478 |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 81.874                    | 83.886 | 82.311  | 83.229 | 75.903 |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 94.843                    | 90.705 | 96.996  | 88.378 | 0      |
| P ≥ 40.000                           | 98.507                    | 97.378 | 101.992 | 96.096 | 88.674 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 64 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|--------------------------------------|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|                                      | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|                                      | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| P ≤ 20.000                           | 2,306                                     | 2,9        | 0,033               | 0,4        | 0,843               | 1,7        | 0,413               | 2,8        | 1,017               | 17,4       |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 36,857                                    | 46,0       | 3,706               | 41,2       | 20,910              | 41,5       | 7,900               | 53,3       | 4,341               | 74,2       |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 34,736                                    | 43,4       | 4,413               | 49,0       | 25,528              | 50,6       | 4,794               | 32,4       | 0                   | 0          |
| P ≥ 40.000                           | 6,208                                     | 7,7        | 0,851               | 9,4        | 3,158               | 6,3        | 1,703               | 11,5       | 0,497               | 8,5        |
| <b>Total</b>                         | <b>80,107</b>                             | <b>100</b> | <b>9,003</b>        | <b>100</b> | <b>50,439</b>       | <b>100</b> | <b>14,810</b>       | <b>100</b> | <b>5,854</b>        | <b>100</b> |

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> ) |         |         |         |         |
|--------------------------------------|---|---------|---------|---------|---------|
|                                      | total                                   | EU15    | RA      | RM      | ROCDE   |
| P ≤ 20.000                           | 62.337                                  | 16.543  | 76.658  | 45.934  | 67.782  |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 146.841                                 | 148.257 | 148.296 | 146.291 | 140.038 |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 174.551                                 | 163.449 | 179.777 | 159.805 | 0       |
| P ≥ 40.000                           | 177.374                                 | 170.158 | 185.761 | 170.284 | 165.512 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

En cuanto a las toneladas de arqueado bruto (GT) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LNG (Tabla 65), los buques dentro del grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW son los que más GT aportan al total de la flota de LNG. La menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

Para los buques bajo los grupos EU15 y RA la mayoría las GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW, teniendo la menor cantidad de GT en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

En los buques bajo el grupo RM, la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo la menor cantidad de GT en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 65. El buque LNG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 65 GT de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|--------------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                                      | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                                      | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| P ≤ 20.000                           | 1,870                                     | 3,3        | 0,030        | 0,5        | 0,656         | 1,9        | 0,325         | 3,1        | 0,859        | 18,2       |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 27,021                                    | 47,8       | 2,510        | 41,8       | 15,338        | 43,4       | 5,681         | 54,4       | 3,493        | 74,0       |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 23,252                                    | 41,1       | 2,920        | 48,6       | 17,078        | 48,3       | 3,254         | 31,2       | 0            | 0,0        |
| P ≥ 40.000                           | 4,390                                     | 7,8        | 0,553        | 9,2        | 2,294         | 6,5        | 1,178         | 11,3       | 0,366        | 7,8        |
| <b>Total</b>                         | <b>56,533</b>                             | <b>100</b> | <b>6,012</b> | <b>100</b> | <b>35,365</b> | <b>100</b> | <b>10,438</b> | <b>100</b> | <b>4,718</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (t) |         |         |         |         |         |  |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| P ≤ 20.000                | 50.537  | 14.801  | 59.607  | 36.162  | 57.276  |  |
| 20.000 ≤ P < 30.000       | 107.655 | 100.407 | 108.780 | 105.198 | 112.665 |  |
| 30.000 ≤ P < 40.000       | 116.843 | 108.146 | 120.265 | 108.474 | 0       |  |
| P ≥ 40.000                | 125.430 | 110.532 | 134.915 | 117.791 | 121.981 |  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto la potencia propulsora instalada (PP) para cada grupo de potencia propulsora de la flota de buques LNG (Tabla 66), los buques dentro del grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW son los que más PP aportan al total de la flota de LNG. La menor PP se encuentran en el grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

Para los buques bajo los grupos EU15 y RA la mayor PP se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW, teniendo la menor PP en buques del grupo de potencia propulsora de menos de 20.000 kW.

En los buques bajo el grupo RM, la mayor PP se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo la menor PP en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW.

Para los buques bajo el grupo ROCDE la mayor PP se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW, teniendo la menor PP en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW.

Los valores medio PP por buque para cada grupo de potencia propulsora y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 66. El buque LNG con mayor PP por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque

LNG con menor PP por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW bajo el grupo de banderas EU15.

Tabla 66 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de potencia instalada.

| Kilovatios de Potencia Instalada (P) | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|--------------------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                                      | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                                      | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| P ≤ 20.000                           | 0,412                                     | 2,6        | 0,015        | 0,8        | 0,144         | 1,4        | 0,092        | 3,0        | 0,161        | 14,3       |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 6,623                                     | 41,0       | 0,652        | 34,7       | 3,744         | 37,1       | 1,385        | 45,7       | 0,842        | 74,8       |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 7,320                                     | 45,4       | 0,996        | 53,0       | 5,243         | 51,9       | 1,080        | 35,7       | 0            | 0          |
| P ≥ 40.000                           | 1,781                                     | 11,0       | 0,216        | 11,5       | 0,969         | 9,6        | 0,473        | 15,6       | 0,123        | 10,9       |
| <b>Total</b>                         | <b>16,136</b>                             | <b>100</b> | <b>1,879</b> | <b>100</b> | <b>10,100</b> | <b>100</b> | <b>3,030</b> | <b>100</b> | <b>1,126</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (kW) |        |  |        |  |        |        |        |
|----------------------------|--------|--|--------|--|--------|--------|--------|
| P ≤ 20.000                 | 11.132 |  | 7.400  |  | 13.120 | 10.218 | 10.720 |
| 20.000 ≤ P < 30.000        | 26.387 |  | 26.081 |  | 26.552 | 25.654 | 27.165 |
| 30.000 ≤ P < 40.000        | 36.783 |  | 36.887 |  | 36.925 | 36.014 | 0      |
| P ≥ 40.000                 | 50.879 |  | 43.290 |  | 56.998 | 47.250 | 40.950 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = Kilovatios

## 5.8. Estructura de la flota según grupos de edad

Se ha estructurado la flota de gaseros siguiendo los grupos de edad empleados por la *United Nations Conference on Trade and Development* en el informe sobre el transporte marítimo del año 2019 como se ve en la Tabla 67.

Tabla 67 Estructura de los buques gaseros por grupo de edades.

| Tipo    | 0-5 años |       | 6-10 años |       | 11-15 años |       | 16-20 años |       | +20 años |       |
|---------|----------|-------|-----------|-------|------------|-------|------------|-------|----------|-------|
|         | No.      | %     | No.       | %     | No.        | %     | No.        | %     | No.      | %     |
|         | Buques   | Flota | Buques    | Flota | Buques     | Flota | Buques     | Flota | Buques   | Flota |
| LPG     | 335      | 22,6  | 147       | 9,9   | 327        | 22,1  | 159        | 10,7  | 514      | 34,7  |
| LNG     | 171      | 32,8  | 48        | 9,2   | 153        | 29,3  | 89         | 17,0  | 61       | 11,7  |
| Gaseros | 506      | 25,2  | 195       | 9,7   | 480        | 24    | 248        | 12,4  | 575      | 28,7  |

Fuente: Elaboración propia.

La media de edad de la flota de buques LPG es de 15,2 años y para buques LNG es de 9,4 años. De manera agregada toda la flota de gaseros tiene una media de edad de 13,7 años.

### 5.8.1. Estructura por grupos de edad para la flota de buques LPG

Se han realizado 5 grupos de edades con el fin de estructurar la flota de buques LPG para esta estructura. Los grupos corresponden a buques LPG de entre 0 y 5 años, entre 6 y 10, entre 11 y 15, entre 16 y 20 y mayores de 20 años.

En la Tabla 68 se puede ver que los buques LPG dentro del grupo de edades superiores a 20 años es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LPG está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de edades entre 15 y 20 años.

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo los grupos RM y ROCDE, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que el menor número de buques se encuentra en los grupos de edades entre 5 y 10 años, y entre 15 y 20 años.

Tabla 68 Número de buques LPG en cada grupo de edades.

| Grupos Edad (A) | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM  | ROCDE |
|-----------------|------------------|------|-----|-----|-------|
| A ≤ 5           | 335              | 30   | 161 | 120 | 24    |
| 5 < A ≤ 10      | 147              | 20   | 56  | 56  | 15    |
| 10 < A ≤ 15     | 327              | 32   | 143 | 120 | 32    |
| 15 < A ≤ 20     | 159              | 14   | 62  | 55  | 28    |
| A > 20          | 514              | 23   | 141 | 251 | 99    |

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las toneladas de peso muerto (TPM) (Tabla 69) se puede ver que los buques LPG dentro del grupo de edades inferiores a 5 años es el grupo donde mayor TPM hay. La menor cantidad de TPM está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor cantidad de TPM se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que la menor cantidad de TPM se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que la menor cantidad de TPM se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 69. El buque LPG con mayor TPM por buque está en el grupo de edades inferior a 5 años bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor TPM por buque está en el grupo de edades superior a 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 69 TPM de los buques LPG en cada grupo de edades

| Grupos Edad (A) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|-----------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                 | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                 | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| A ≤ 5           | 10,245                                    | 39,6       | 0,728        | 40,6       | 5,569         | 41,1       | 3,870         | 38,6       | 0,079        | 16,6       |
| 5 < A ≤ 10      | 2,279                                     | 8,8        | 0,287        | 16,0       | 1,115         | 8,2        | 0,801         | 8,0        | 0,076        | 15,8       |
| 10 < A ≤ 15     | 6,111                                     | 23,6       | 0,299        | 16,7       | 3,269         | 24,1       | 2,468         | 24,6       | 0,075        | 15,5       |
| 15 < A ≤ 20     | 3,004                                     | 11,6       | 0,298        | 16,6       | 1,257         | 9,3        | 1,355         | 13,5       | 0,093        | 19,4       |
| A > 20          | 4,203                                     | 16,3       | 0,182        | 10,1       | 2,329         | 17,2       | 1,535         | 15,3       | 0,157        | 32,7       |
| <b>Total</b>    | <b>25,841</b>                             | <b>100</b> | <b>1,793</b> | <b>100</b> | <b>13,539</b> | <b>100</b> | <b>10,028</b> | <b>100</b> | <b>0,480</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (t) |        |        |        |        |       |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| A ≤ 5                     | 30.583 | 24.253 | 34.588 | 32.246 | 3.311 |
| 5 < A ≤ 10                | 15.500 | 14.342 | 19.915 | 14.298 | 5.051 |
| 10 < A ≤ 15               | 18.687 | 9.340  | 22.859 | 20.570 | 2.329 |
| 15 < A ≤ 20               | 18.891 | 21.319 | 20.281 | 24.629 | 3.330 |
| A > 20                    | 8.176  | 7.899  | 16.516 | 6.116  | 1.586 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la capacidad de carga (CC), la Tabla 70 muestra que la mayor CC de los buques LPG está dentro del grupo de edades inferiores a 5 años. La menor cantidad de CC está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, RA y RM, la mayoría de la CC se encuentra en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor CC se encuentra en el grupo de más de 20 años en buques registrados en banderas EU15, mientras que para buques con banderas RA y RM la menor CC se encuentra en el grupo entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor CC se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que la menor CC se encuentra en el grupo entre 10 y 15 años.

Tabla 70 Capacidad de carga de los buques LPG en cada grupo de edades

| Grupos Edad (A) | Valores totales de la flota de buques LPG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|-----------------|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|                 | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|                 | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| A ≤ 5           | 14,479                                    | 41,8       | 0,853               | 40,9       | 7,948               | 43,2       | 5,565               | 41,0       | 0,114               | 18,6       |
| 5 < A ≤ 10      | 2,970                                     | 8,6        | 0,326               | 15,6       | 1,476               | 8,0        | 1,060               | 7,8        | 0,108               | 17,6       |
| 10 < A ≤ 15     | 7,937                                     | 22,9       | 0,346               | 16,6       | 4,249               | 23,1       | 3,255               | 24,0       | 0,086               | 14,1       |
| 15 < A ≤ 20     | 4,042                                     | 11,7       | 0,369               | 17,7       | 1,709               | 9,3        | 1,835               | 13,5       | 0,130               | 21,2       |
| A > 20          | 5,232                                     | 15,1       | 0,192               | 9,2        | 3,004               | 16,3       | 1,861               | 13,7       | 0,175               | 28,6       |
| <b>Total</b>    | <b>34,660</b>                             | <b>100</b> | <b>2,086</b>        | <b>100</b> | <b>18,386</b>       | <b>100</b> | <b>13,576</b>       | <b>100</b> | <b>0,612</b>        | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (m <sup>3</sup> ) |        |        |        |        |       |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|
| A ≤ 5                                   | 43.222 | 28.440 | 49.366 | 46.372 | 4.737 |
| 5 < A ≤ 10                              | 20.203 | 16.301 | 26.357 | 18.935 | 7.168 |
| 10 < A ≤ 15                             | 24.272 | 10.827 | 29.716 | 27.126 | 2.687 |
| 15 < A ≤ 20                             | 25.424 | 26.334 | 27.563 | 33.368 | 4.629 |
| A > 20                                  | 10.178 | 8.348  | 21.306 | 7.413  | 1.766 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 70. El buque LPG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor CC por buque se encuentra en el grupo de más de 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE.

En cuanto a las toneladas de arqueo bruto (GT), la Tabla 71 muestra que la mayoría de las GT de los buques LPG están dentro del grupo de edades inferiores a 5 años. La menor cantidad de GT está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, la mayoría de las GT se encuentran en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor cantidad de GT se encuentran en el grupo de edades superiores a 20 años.

Tabla 71 GT de los buques LPG en cada grupo de edades

| Grupos Edad (A)           | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                           | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                           | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| A ≤ 5                     | 9,205                                     | 40,6       | 0,648        | 41,1       | 5,015         | 42,2       | 3,475        | 39,5       | 0,067        | 15,8       |
| 5 < A ≤ 10                | 2,026                                     | 8,9        | 0,259        | 16,4       | 0,981         | 8,3        | 0,722        | 8,2        | 0,066        | 15,5       |
| 10 < A ≤ 15               | 5,260                                     | 23,2       | 0,266        | 16,9       | 2,811         | 23,7       | 2,119        | 24,1       | 0,065        | 15,3       |
| 15 < A ≤ 20               | 2,594                                     | 11,4       | 0,251        | 16,0       | 1,095         | 9,2        | 1,164        | 13,2       | 0,084        | 19,8       |
| A > 20                    | 3,601                                     | 15,9       | 0,152        | 9,7        | 1,978         | 16,7       | 1,328        | 15,1       | 0,143        | 33,7       |
| <b>Total</b>              | <b>22,687</b>                             | <b>100</b> | <b>1,576</b> | <b>100</b> | <b>11,880</b> | <b>100</b> | <b>8,807</b> | <b>100</b> | <b>0,424</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t) |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| A ≤ 5                     | 27.478                                    |            | 21.603       |            | 31.150        |            | 28.957       |            | 2.797        |            |
| 5 < A ≤ 10                | 13.785                                    |            | 12.933       |            | 17.510        |            | 12.887       |            | 4.368        |            |
| 10 < A ≤ 15               | 16.085                                    |            | 8.299        |            | 19.658        |            | 17.655       |            | 2.021        |            |
| 15 < A ≤ 20               | 16.315                                    |            | 17.955       |            | 17.665        |            | 21.157       |            | 2.995        |            |
| A > 20                    | 7.007                                     |            | 6.619        |            | 14.029        |            | 5.292        |            | 1.443        |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que la menor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que la menor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años.

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 71. El buque LPG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de edades superior a 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE.

Respecto a la potencia propulsora, en la Tabla 72 se puede ver que los buques LPG dentro del grupo de edades inferiores a 5 años es el grupo donde está la mayor potencia propulsora. La menor potencia propulsora está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

En los buques bajo los grupos RA y RM, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que la menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que la menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los valores medio de potencia propulsora instalada por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 72. El buque LPG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de edades superior a 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 72 Potencia propulsora de los buques LPG en cada grupo de edades.

| Grupos Edad (A)            | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|----------------------------|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                            | total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                            | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| A ≤ 5                      | 2,783                                     | 32,4       | 0,223        | 32,8       | 1,470        | 34,9       | 1,043        | 31,5       | 0,047        | 12,7       |
| 5 < A ≤ 10                 | 0,808                                     | 9,4        | 0,118        | 17,4       | 0,357        | 8,5        | 0,297        | 9,0        | 0,036        | 9,6        |
| 10 < A ≤ 15                | 2,164                                     | 25,2       | 0,146        | 21,5       | 1,124        | 26,7       | 0,826        | 24,9       | 0,067        | 18,0       |
| 15 < A ≤ 20                | 1,044                                     | 12,2       | 0,102        | 15,1       | 0,447        | 10,6       | 0,436        | 13,2       | 0,059        | 15,9       |
| A > 20                     | 1,777                                     | 20,7       | 0,090        | 13,2       | 0,813        | 19,3       | 0,711        | 21,5       | 0,163        | 43,8       |
| <b>Total</b>               | <b>8,576</b>                              | <b>100</b> | <b>0,679</b> | <b>100</b> | <b>4,211</b> | <b>100</b> | <b>3,313</b> | <b>100</b> | <b>0,373</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (kW) |   |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
| A ≤ 5                      | 8.307                                     |            | 7.423        |            | 9.128        |            | 8.693        |            | 1.973        |            |
| 5 < A ≤ 10                 | 5.496                                     |            | 5.922        |            | 6.375        |            | 5.299        |            | 2.387        |            |
| 10 < A ≤ 15                | 6.617                                     |            | 4.567        |            | 7.861        |            | 6.885        |            | 2.103        |            |
| 15 < A ≤ 20                | 6.568                                     |            | 7.306        |            | 7.208        |            | 7.926        |            | 2.114        |            |
| A > 20                     | 3.458                                     |            | 3.908        |            | 5.767        |            | 2.832        |            | 1.651        |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

## 5.8.2. Estructura por grupos de edad para la flota de buques LNG

Se han realizado 5 grupos de edades con el fin de estructurar la flota de buques LNG para esta estructura. Los grupos corresponden a buques LNG de entre 0 y 5 años, entre 6 y 10, entre 11 y 15, entre 16 y 20 y mayores de 20 años.

En la Tabla 73 se puede ver que los buques LNG dentro del grupo de edades inferior a 5 años es el grupo donde mayor número de buques hay. El menor número de buques LNG está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15 y RM, tienen la mayoría de los buques en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que el menor número de buques en el grupo de EU15 se encuentra en el grupo de edades superior a 20 años y para los buques en el grupo RM el menor número de buques se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años

En los buques bajo el grupo RA, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de edades superior a 20 años.

Para los buques bajo los grupos ROCDE, la mayoría de los buques se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que el menor número de buques se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Tabla 73 Número de buques LNG en cada grupo de edades.

| Grupos Edad LNG | N.º BUQUES TOTAL | EU15 | RA  | RM | ROCDE |
|-----------------|------------------|------|-----|----|-------|
| A ≤ 5           | 171              | 27   | 94  | 45 | 5     |
| 5 < A ≤ 10      | 48               | 7    | 34  | 4  | 3     |
| 10 < A ≤ 15     | 153              | 11   | 113 | 22 | 7     |
| 15 < A ≤ 20     | 89               | 14   | 50  | 20 | 5     |
| A > 20          | 61               | 0    | 20  | 12 | 29    |

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las toneladas de peso muerto (TPM) (Tabla 74) se puede ver que los buques LNG dentro del grupo de edades inferiores a 5 años es el grupo donde mayor TPM hay. La menor cantidad de TPM está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo los grupos EU15 y RA tienen la mayoría de las TPM en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor cantidad de TPM está en el grupo de más de 20 años.

En los buques bajo el grupo RM, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que la menor cantidad de TPM está en el grupo entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en el grupo de más de a 20 años y la menor cantidad de TPM se encuentra en el grupo entre 15 y 20 años.

Los valores medio de TPM por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 74. El buque LNG con mayor TPM por buque se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque se encuentra en el grupo de edades entre 15 y 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 74 TPM de los buques LNG en cada grupo de edades.

| Grupos Edad (A)             | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                             | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| A ≤ 5                       | 15,351                                    | 34,8       | 2,435        | 48,2       | 8,541         | 31,0       | 3,936        | 47,2       | 0,439        | 13,8       |
| 5 < A ≤ 10                  | 3,950                                     | 8,9        | 0,553        | 10,9       | 2,879         | 10,4       | 0,344        | 4,1        | 0,175        | 5,5        |
| 10 < A ≤ 15                 | 14,120                                    | 32,0       | 0,984        | 19,5       | 10,933        | 39,6       | 1,875        | 22,5       | 0,328        | 10,3       |
| 15 < A ≤ 20                 | 6,718                                     | 15,2       | 1,082        | 21,4       | 3,926         | 14,2       | 1,558        | 18,7       | 0,152        | 4,8        |
| A > 20                      | 4,021                                     | 9,1        | 0            | 0          | 1,298         | 4,7        | 0,635        | 7,6        | 2,088        | 65,6       |
| <b>Total</b>                | <b>44,161</b>                             | <b>100</b> | <b>5,055</b> | <b>100</b> | <b>27,577</b> | <b>100</b> | <b>8,349</b> | <b>100</b> | <b>3,181</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (ton) |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| A ≤ 5                       | 89.772                                    |            | 90.201       |            | 90.856        |            | 87.477       |            | 87.736       |            |
| 5 < A ≤ 10                  | 82.288                                    |            | 78.994       |            | 84.668        |            | 85.880       |            | 58.206       |            |
| 10 < A ≤ 15                 | 92.290                                    |            | 89.455       |            | 96.754        |            | 85.249       |            | 46.816       |            |
| 15 < A ≤ 20                 | 75.489                                    |            | 77.297       |            | 78.517        |            | 77.921       |            | 30.414       |            |
| A > 20                      | 65.926                                    |            | 0            |            | 64.924        |            | 52.909       |            | 72.003       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Analizando la capacidad de carga (CC) (Tabla 75) se puede ver que los buques LNG dentro del grupo de edades inferiores a 5 años es el grupo donde hay mayor CC. La menor CC está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, la mayor CC se encuentran en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor CC se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

Los buques bajo el grupo RA, la mayoría de las CC se encuentran en el grupo de edades entre 10 y 15 años, mientras que la menor CC se encuentra en el grupo más de 20 años.

En los buques bajo el grupo RM, la mayor CC se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que la menor CC se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor CC se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que la menor CC está en el grupo de edades entre 15 y 20 años.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 75. El buque LNG con mayor CC por buque se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor CC por buque está en el grupo de edades entre 15 y 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE

En cuanto a las toneladas de arqueo bruto (GT) (Tabla 76) se puede ver que los buques LNG dentro del grupo de edades inferiores a 5 años es el grupo donde hay mayor cantidad de GT La menor cantidad de GT está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo los grupos EU15 y RA tienen la mayoría de GT en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor cantidad de CC se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

En los buques bajo el grupo RM, la mayor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años, mientras que la menor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años, mientras que la menor cantidad de GT se encuentra en el grupo de edades entre 15 y 20 años.

Tabla 75 Capacidad de carga de los buques LNG en cada grupo de edades

| Grupos Edad (A)                         | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| A ≤ 5                                   | 27,928                                    | 34,9       | 4,409               | 49,0       | 15,639              | 31,0       | 7,078               | 47,8       | 0,802               | 13,7       |
| 5 < A ≤ 10                              | 7,182                                     | 9,0        | 0,961               | 10,7       | 5,290               | 10,5       | 0,602               | 4,1        | 0,329               | 5,6        |
| 10 < A ≤ 15                             | 25,836                                    | 32,3       | 1,750               | 19,4       | 20,154              | 40,0       | 3,305               | 22,3       | 0,627               | 10,7       |
| 15 < A ≤ 20                             | 11,908                                    | 14,9       | 1,883               | 20,9       | 6,987               | 13,9       | 2,743               | 18,5       | 0,295               | 5,0        |
| A > 20                                  | 7,254                                     | 9,1        | 0                   | 0          | 2,370               | 4,7        | 1,082               | 7,3        | 3,802               | 64,9       |
| <b>Total</b>                            | <b>80,107</b>                             | <b>100</b> | <b>9.003</b>        | <b>100</b> | <b>50,439</b>       | <b>100</b> | <b>14,810</b>       | <b>100</b> | <b>5,854</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> ) |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| A ≤ 5                                   | 163.320                                   |            | 163.291             |            | 166.372             |            | 157.294             |            | 160.345             |            |
| 5 < A ≤ 10                              | 149.622                                   |            | 137.327             |            | 155.579             |            | 150.443             |            | 109.707             |            |
| 10 < A ≤ 15                             | 168.860                                   |            | 159.081             |            | 178.353             |            | 150.241             |            | 89.516              |            |
| 15 < A ≤ 20                             | 133.798                                   |            | 134.530             |            | 139.732             |            | 137.140             |            | 59.043              |            |
| A > 20                                  | 118.917                                   |            | 0                   |            | 118.507             |            | 90.168              |            | 131.096             |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Los valores medio de GT por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 76. El buque LNG con mayor GT por buque se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años bajo el grupo de banderas ROCDE. Y, el buque LNG con menor GT por buque se encuentra en el grupo de edades entre 15 y 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE

Analizando la potencia propulsora (Tabla 77) se puede ver que los buques LNG dentro del grupo de edades inferiores a 5 años es el grupo donde hay mayor potencia propulsora. La menor potencia propulsora está en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

Los buques bajo el grupo EU15, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades inferiores a 5 años, mientras que la menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

Los buques bajo el grupo RA, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años, mientras que la menor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

En los buques bajo el grupo RM, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades inferior a 5 años. Para buques en el grupo de RM y ROCDE la menor potencia propulsora

se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años. Para los buques bajo el grupo ROCDE, la mayor potencia propulsora se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años.

Los valores medio de CC por buque para cada grupo de edades y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 77. El buque LNG con mayor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de edades entre 10 y 15 años bajo el grupo de banderas EU15. Y, el buque LNG con menor potencia propulsora por buque se encuentra en el grupo de edades entre 15 y 20 años bajo el grupo de banderas ROCDE

Tabla 76 GT de los buques LNG en cada grupo de edades

| Grupos Edad (A)             | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                             | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| A ≤ 5                       | 19,802                                    | 35,0       | 2,953        | 49,1       | 11,203        | 31,7       | 5,007         | 48,0       | 0,639        | 13,6       |
| 5 < A ≤ 10                  | 4,900                                     | 8,7        | 0,641        | 10,7       | 3,572         | 10,1       | 0,405         | 3,9        | 0,281        | 6,0        |
| 10 < A ≤ 15                 | 17,398                                    | 30,8       | 1,144        | 19,0       | 13,525        | 38,2       | 2,237         | 21,4       | 0,492        | 10,4       |
| 15 < A ≤ 20                 | 8,699                                     | 15,4       | 1,275        | 21,2       | 5,164         | 14,6       | 2,014         | 19,3       | 0,246        | 5,2        |
| A > 20                      | 5,735                                     | 10,1       | 0            | 0          | 1,901         | 5,4        | 0,776         | 7,4        | 3,059        | 64,8       |
| <b>Total</b>                | <b>56,533</b>                             | <b>100</b> | <b>6,012</b> | <b>100</b> | <b>35,365</b> | <b>100</b> | <b>10,438</b> | <b>100</b> | <b>4,718</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (ton) |   |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| A ≤ 5                       | 115.799                                   |            | 109.368      |            | 119.178       |            | 111.256       |            | 127.874      |            |
| 5 < A ≤ 10                  | 102.077                                   |            | 91.537       |            | 105.066       |            | 101.321       |            | 93.804       |            |
| 10 < A ≤ 15                 | 113.711                                   |            | 104.018      |            | 119.690       |            | 101.662       |            | 70.291       |            |
| 15 < A ≤ 20                 | 97.738                                    |            | 91.037       |            | 103.283       |            | 100.685       |            | 49.261       |            |
| A > 20                      | 94.024                                    |            | 0            |            | 95.033        |            | 64.688        |            | 105.468      |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 77 Potencia propulsora de los buques LNG en cada grupo de edades

| Grupos Edad (A)            | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                            | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                            | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| A ≤ 5                      | 5,794                                     | 35,9       | 0,857        | 45,6       | 3,311         | 32,8       | 1,452        | 47,9       | 0,174        | 15,4       |
| 5 < A ≤ 10                 | 1,651                                     | 10,2       | 0,221        | 11,7       | 1,241         | 12,3       | 0,131        | 4,3        | 0,058        | 5,1        |
| 10 < A ≤ 15                | 4,985                                     | 30,9       | 0,419        | 22,3       | 3,739         | 37,0       | 0,710        | 23,4       | 0,117        | 10,4       |
| 15 < A ≤ 20                | 2,271                                     | 14,1       | 0,383        | 20,4       | 1,317         | 13,0       | 0,511        | 16,9       | 0,061        | 5,4        |
| A > 20                     | 1,435                                     | 8,9        | 0            | 0          | 0,492         | 4,9        | 0,227        | 7,5        | 0,716        | 63,6       |
| <b>Total</b>               | <b>16,136</b>                             | <b>100</b> | <b>1,879</b> | <b>100</b> | <b>10,100</b> | <b>100</b> | <b>3,030</b> | <b>100</b> | <b>1,126</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (kW) |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| A ≤ 5                      | 33.880                                    |            | 31.746       |            | 35.223        |            | 32.258       |            | 34.770       |            |
| 5 < A ≤ 10                 | 34.388                                    |            | 31.514       |            | 36.508        |            | 32.700       |            | 19.316       |            |
| 10 < A ≤ 15                | 32.582                                    |            | 38.056       |            | 33.091        |            | 32.277       |            | 16.724       |            |
| 15 < A ≤ 20                | 25.522                                    |            | 27.348       |            | 26.337        |            | 25.535       |            | 12.204       |            |
| A > 20                     | 23.524                                    |            | 0            |            | 24.606        |            | 18.915       |            | 24.686       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

## 5.9. Estructura de la flota según tipo de sistema de propulsión

Hay una gran diferencia en cuanto a los sistemas de propulsión que hay instalados en los buques LPG y en los buques LNG. En este trabajo de investigación nos centramos en el tipo de motor como elemento definitorio del sistema de propulsión, por lo tanto, no se analiza el sistema de propulsión desde el punto de vista del tipo de hélice (paso fijo, paso variable, azimutal, etc.), ni desde el punto del número de hélices instaladas a bordo.

En los buques LPG aparecen solo dos sistemas de propulsión, motores diésel de dos tiempos (D2) y motores diésel de cuatro tiempos (D4), mientras que en los buques LNG, además de estos dos tipos de sistemas de propulsión, nos encontramos con otros 5 sistemas diferentes. Las plantas de vapor convencionales (T), las plantas de vapor de muy altas presiones y temperaturas conocidas como *Ultra Steam Plants* (TU), sistemas de propulsión diésel – eléctricos (G4), motores diésel de dos tiempos con inyección de gas a alta presión (G2A) y motores diésel de dos tiempos con inyección de gas a baja presión (G2B).

### 5.9.1. Estructura según sistema de propulsión para la flota de buques LPG

Como se ha mencionado anteriormente, en los buques LPG solo nos encontramos con dos sistemas de propulsión, D2 y D4. La mayoría de los buques LPG tienen instalados como sistema de propulsión, motores diésel de dos tiempos (D2) como se observa en la Tabla 78.

Los buques LPG bajo banderas EU15, RA y RM tienen la mayoría de sus buques con sistemas de propulsión D2. Solo en el grupo ROCDE tipo de motor D4 es predominante en los buques LPG.

Tabla 78 Número de buques LPG en cada tipo de motor.

| Tipo de motor | N.º BUQUES   |            | EU15       |            | RA         |            | RM         |            | ROCDE      |            |
|---------------|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|               | TOTAL        |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|               | N.º          | %          | N.º        | %          | N.º        | %          | N.º        | %          | N.º        | %          |
| D2            | 906          | 61,1       | 69         | 58,0       | 468        | 83,1       | 341        | 56,7       | 28         | 14,1       |
| D4            | 576          | 38,9       | 50         | 42,0       | 95         | 16,1       | 261        | 43,3       | 170        | 85,9       |
| <b>Total</b>  | <b>1.482</b> | <b>100</b> | <b>119</b> | <b>100</b> | <b>563</b> | <b>100</b> | <b>602</b> | <b>100</b> | <b>198</b> | <b>100</b> |

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las toneladas de peso muerto (TPM) para cada tipo de motor (Tabla 79), la mayoría de las TPM se encuentran en buques con motores D2. Esto mismo se observa analizando cada uno de los grupos de banderas.

Tabla 79 TPM de la flota de buques LPG en cada tipo de motor.

| Tipo de motor             | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|---------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|                           | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|                           | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| D2                        | 24,207                                    | 93,7       | 1,542        | 86,0       | 12,986        | 95,9       | 9,414         | 93,9       | 0,265        | 55,2       |
| D4                        | 1,634                                     | 6,3        | 0,252        | 14,0       | 0,553         | 4,1        | 0,614         | 6,1        | 0,215        | 44,8       |
| <b>Total</b>              | <b>25,841</b>                             | <b>100</b> | <b>1,793</b> | <b>100</b> | <b>13,539</b> | <b>100</b> | <b>10,028</b> | <b>100</b> | <b>0,480</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t) |   |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
| D2                        | 26.719                                    |            | 22.345       |            | 27.748        |            | 27.607        |            | 9.471        |            |
| D4                        | 2.836                                     |            | 5.032        |            | 5.819         |            | 2.354         |            | 1.264        |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Los valores medio de TPM por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 79. El buque LPG con mayor TPM por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor TPM por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE

En cuanto a la capacidad de carga (CC) para cada tipo de motor (Tabla 80), la mayor CC está en buques con motores D2. Igual que ocurre al analizar cada uno de los grupos de banderas.

Los valores medio de CC por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 80. El buque LPG con mayor CC por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor CC por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 80 Capacidad de carga de los buques LPG en cada tipo de motor

| Tipo de motor                           | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|   | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|   | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| D2                                      | 32,926                                    | 95,0       | 1,826               | 87,5       | 17,836              | 97,0       | 12,915              | 95,1       | 0,350               | 57,2       |
| D4                                      | 1,734                                     | 5,0        | 0,261               | 12,5       | 0,550               | 3,0        | 0,661               | 4,9        | 0,262               | 42,8       |
| <b>Total</b>                            | <b>34,660</b>                             | <b>100</b> | <b>2,086</b>        | <b>100</b> | <b>18,386</b>       | <b>100</b> | <b>13,576</b>       | <b>100</b> | <b>0,612</b>        | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> ) |   |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
| D2                                      | 36.342                                    |            | 26.460              |            | 38.111              |            | 37.873              |            | 12.487              |            |
| D4                                      | 3.011                                     |            | 5.212               |            | 5.793               |            | 2.534               |            | 1.541               |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Para las toneladas de arqueado bruto (GT) para cada tipo de motor (Tabla 81), la mayor cantidad de GT se encuentran en buques con motores D2. Igual que ocurre al analizar cada uno de los grupos de banderas.

Los valores medio de GT por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 81. El buque LPG con mayor GT por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor GT por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 81 GT de los buques LPG en cada tipo de motor

| Tipo de motor               | Valores totales de la flota de buques LPG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|-----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                             | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                             | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| D2                          | 21,135                                    | 93,2       | 1,329        | 84,3       | 11,367        | 95,7       | 8,199        | 93,1       | 0,240        | 56,6       |
| D4                          | 1,552                                     | 68         | 0,247        | 15,7       | 0,513         | 4,3        | 0,607        | 6,9        | 0,184        | 43,4       |
| <b>Total</b>                | <b>22,687</b>                             | <b>100</b> | <b>1,576</b> | <b>100</b> | <b>11,880</b> | <b>100</b> | <b>8,807</b> | <b>100</b> | <b>0,424</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (ton) |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| D2                          | 23.328                                    |            | 19.256       |            | 24.288        |            | 24.045       |            | 8.571        |            |
| D4                          | 2.694                                     |            | 4.944        |            | 5.401         |            | 2.328        |            | 1.083        |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a la potencia propulsora para cada tipo de motor (Tabla 82), la mayor potencia propulsora instalada se encuentra en buques con motores D2. Igual que ocurre al analizar los grupos de banderas EU15, RA y RM, sin embargo, la mayor potencia propulsora instalada en buques LPG bajo el grupo de bandera ROCDE se encuentra en buques con motores del tipo D4.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 82. El buque LPG con mayor potencia propulsora por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LPG con menor potencia propulsora tiene un tipo de motor D4 y está en el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 82 Potencia propulsora de los buques LPG en cada tipo de motor.

| Tipo de motor              | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
|----------------------------|---|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                            | total                                     |            | EU15         |            | RA           |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                            | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| D2                         | 7,332                                     | 85,5       | 0,521        | 76,7       | 3,881        | 92,2       | 2,814        | 84,9       | 0,117        | 31,4       |
| D4                         | 1,244                                     | 14,5       | 0,158        | 23,3       | 0,330        | 7,8        | 0,499        | 15,1       | 0,256        | 68,6       |
| <b>Total</b>               | <b>8,576</b>                              | <b>100</b> | <b>0,679</b> | <b>100</b> | <b>4,211</b> | <b>100</b> | <b>3,313</b> | <b>100</b> | <b>0,373</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (kW) |   |            |              |            |              |            |              |            |              |            |
| D2                         | 8.093                                     |            | 7.555        |            | 8.292        |            | 8.251        |            | 4.178        |            |
| D4                         | 2.160                                     |            | 3.164        |            | 3.476        |            | 1.913        |            | 1.506        |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios

### 5.9.2. Estructura según sistema de propulsión para la flota de buques LNG

Como se ha mencionado anteriormente, en los buques LNG además de los sistemas de propulsión D2 y D4, tienen otros cinco sistemas de propulsión en la flota, como son las plantas de vapor convencionales (T), las plantas de vapor de muy altas presiones y temperaturas conocidas como *Ultra Steam Plants* (TU), sistemas de propulsión diésel – eléctricos (G4), motores diésel de dos tiempos con inyección de gas a alta presión (G2A) y motores diésel de dos tiempos con inyección de gas a baja presión (G2B).

La mayoría de los buques LNG tienen como tipo de motor predominante las plantas de vapor (Tabla 83), siendo los motores D4 los que menor representación tienen.

Los buques LNG bajo bandera EU15 tienen el mayor número de barcos con motores G4, teniendo el menor número de buques en los motores D2 y D4.

Para los buques en los grupos RA, RM y ROCDE, la mayoría de los buques tienen motores T, y el menor número de buques está en el tipo de motor D4 para buques en los grupos RA y RM, mientras que para buques en el grupo ROCDE la menor cantidad de buques están en los tipos de motores D2, G2A y G2B.

Tabla 83 Número de buques LNG en cada tipo de motor.

| Tipo de motor | N.º BUQUES TOTAL |            | EU15      |            | RA         |            | RM         |            | ROCDE     |            |
|---------------|------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|
|               | N.º              | %          | N.º       | %          | N.º        | %          | N.º        | %          | N.º       | %          |
| D2            | 50               | 9.6        | 0         | 0          | 46         | 14.8       | 4          | 3.9        | 0         | 0.0        |
| D4            | 5                | 1.0        | 0         | 0          | 0          | 0.0        | 0          | 0.0        | 5         | 10.2       |
| G2A           | 50               | 9.6        | 13        | 22.0       | 28         | 9.0        | 9          | 8.7        | 0         | 0.0        |
| G2B           | 13               | 2.5        | 1         | 1.7        | 7          | 2.3        | 5          | 4.9        | 0         | 0.0        |
| G4            | 169              | 32.4       | 30        | 50.8       | 99         | 31.8       | 35         | 34.0       | 5         | 10.2       |
| T             | 228              | 43.7       | 15        | 25.4       | 130        | 41.8       | 45         | 43.7       | 38        | 77.6       |
| TU            | 7                | 1.3        | 0         | 0.0        | 1          | 0.3        | 5          | 4.9        | 1         | 2.0        |
| <b>Total</b>  | <b>522</b>       | <b>100</b> | <b>59</b> | <b>100</b> | <b>311</b> | <b>100</b> | <b>103</b> | <b>100</b> | <b>49</b> | <b>100</b> |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 84 TPM de los buques LNG en cada tipo de motor

| Tipo de motor | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|---------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|               | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|               | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          | (MMt)        | %          |
| D2            | 5,903                                     | 13,4       | 0            | 0          | 5,518         | 20,0       | 0,385        | 4,6        | 0            | 0          |
| D4            | 0,010                                     | 0,0        | 0            | 0          | 0             | 0          | 0            | 0          | 0,010        | 0,3        |
| G2A           | 4,776                                     | 10,8       | 1,233        | 24,4       | 2,690         | 9,8        | 0,854        | 10,2       | 0            | 0          |
| G2B           | 1,116                                     | 2,5        | 0,093        | 1,8        | 0,654         | 2,4        | 0,369        | 4,4        | 0            | 0          |
| G4            | 14,349                                    | 32,5       | 2,521        | 49,9       | 8,545         | 31,0       | 3,014        | 36,1       | 0,269        | 8,4        |
| T             | 17,420                                    | 39,4       | 1,208        | 23,9       | 10,091        | 36,6       | 3,305        | 39,6       | 2,816        | 88,5       |
| TU            | 0,586                                     | 1,3        | 0            | 0          | 0,078         | 0,3        | 0,422        | 5,0        | 0,086        | 2,7        |
| <b>Total</b>  | <b>44,161</b>                             | <b>100</b> | <b>5,055</b> | <b>100</b> | <b>27,577</b> | <b>100</b> | <b>8,349</b> | <b>100</b> | <b>3,181</b> | <b>100</b> |

Valores por buque LNG (t)

|     |         |        |         |        |        |
|-----|---------|--------|---------|--------|--------|
| D2  | 118.069 | 0      | 119.959 | 96.326 | 0      |
| D4  | 1.966   | 0      | 0       | 0      | 1.966  |
| G2A | 95.525  | 94.848 | 96.056  | 94.848 | 0      |
| G2B | 85.856  | 92.996 | 93.474  | 73.762 | 0      |
| G4  | 84.906  | 84.034 | 86.312  | 86.126 | 53.741 |
| T   | 76.404  | 80.501 | 77.626  | 73.447 | 74.109 |
| TU  | 83.763  | 0      | 78.311  | 84.307 | 86.497 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a las toneladas de peso muerto (TPM) para cada tipo de motor (Tabla 84), la mayoría de las TPM se encuentran en buques bajo el tipo motor T, teniendo la menor cantidad de TPM en el tipo de motor D4.

En cuanto al grupo de banderas EU15, la mayoría de las TPM se encuentran en el tipo de motor G4, teniendo la menor cantidad de TPM en el tipo de motor D2, D4 y TU.

Para los grupos de banderas RA y RM, la mayoría de las TPM se encuentran en el tipo de motor T, teniendo la menor cantidad de TPM en el tipo de motor D4.

Respecto al grupo de banderas ROCDE, la mayoría de las TPM se encuentran en el tipo de motor T, teniendo la menor cantidad de TPM en el tipo de motor D2, G2A y G2B.

Los valores medio de TPM por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 84. El buque LNG con mayor TPM por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor TPM por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE.

Analizando la capacidad de carga (CC) para cada tipo de motor (Tabla 85), la mayor CC se encuentran en buques bajo el tipo motor T, teniendo la menor CC en el tipo de motor D4.

En cuanto al grupo de banderas EU15, la mayor CC se encuentra en el tipo de motor G4, teniendo la menor CC en el tipo de motor D2, D4 y TU.

Para los grupos de banderas RA, RM y ROCDE, la mayor CC se encuentra en el tipo de motor T, teniendo la menor CC en el tipo de motor D4. En el grupo de banderas ROCDE, la menor CC en el tipo de motor D2, G2A y G2B.

Los valores medio de CC por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 85. El buque LNG con mayor CC por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor CC por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE.

Para la variable de toneladas de arqueo bruto (GT) para cada tipo de motor (Tabla 86), la mayoría de las GT se encuentran en buques bajo el tipo motor T, teniendo la menor cantidad de GT en el tipo de motor D4.

En cuanto al grupo de banderas EU15, la mayoría de las GT se encuentran en el tipo de motor G4, teniendo la menor cantidad de GT en el tipo de motor D2, D4 y TU.

Para los grupos de banderas RA, RM ROCDE, la mayoría de las GT se encuentran en el tipo de motor T, teniendo la menor cantidad de GT en el tipo de motor D4, excepto para buques en el grupo ROCDE donde la menor cantidad de GT en el tipo de motor D2, G2A y G2B.

Los valores medio de GT por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 86. El buque LNG con mayor GT por buque tiene un tipo de motor D2 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor GT por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 85 Capacidad de carga de los buques LNG en cada tipo de motor.

| Tipo de motor | Valores totales de la flota de buques LNG |            |                     |            |                     |            |                     |            |                     |            |
|---------------|---|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
|               | total                                     |            | EU15                |            | RA                  |            | RM                  |            | ROCDE               |            |
|               | (MMm <sup>3</sup> )                       | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          | (MMm <sup>3</sup> ) | %          |
| D2            | 10,895                                    | 13,6       | 0                   | 0          | 10,222              | 20,3       | 0,674               | 4,5        | 0                   | 0          |
| D4            | 0,013                                     | 0,0        | 0                   | 0          | 0                   | 0          | 0                   | 0          | 0,013               | 0,2        |
| G2A           | 8,629                                     | 10,8       | 2,234               | 24,8       | 4,867               | 9,7        | 1,528               | 10,3       | 0                   | 0          |
| G2B           | 2,090                                     | 2,6        | 0,176               | 2,0        | 1,215               | 2,4        | 0,698               | 4,7        | 0                   | 0          |
| G4            | 26,284                                    | 32,8       | 4,513               | 50,1       | 15,842              | 31,4       | 5,428               | 36,7       | 0,500               | 8,5        |
| T             | 31,165                                    | 38,9       | 2,080               | 23,1       | 18,150              | 36,0       | 5,746               | 38,8       | 5,188               | 88,6       |
| TU            | 1,031                                     | 1,3        | 0                   | 0          | 0,142               | 0,3        | 0,736               | 5,0        | 0,153               | 2,6        |
| <b>Total</b>  | <b>80,107</b>                             | <b>100</b> | <b>9,003</b>        | <b>100</b> | <b>50,439</b>       | <b>100</b> | <b>14,810</b>       | <b>100</b> | <b>5,854</b>        | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (m <sup>3</sup> ) |         |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|
| D2                                      | 217.907 | 0       | 222.209 | 168.427 | 0       |
| D4                                      | 2.687   | 0       | 0       | 0       | 2.687   |
| G2A                                     | 172.579 | 171.830 | 173.839 | 169.743 | 0       |
| G2B                                     | 160.762 | 176.400 | 173.606 | 139.653 | 0       |
| G4                                      | 155.524 | 150.433 | 160.021 | 155.096 | 100.020 |
| T                                       | 136.688 | 138.684 | 139.617 | 127.691 | 136.534 |
| TU                                      | 147.301 | 0       | 142.492 | 147.200 | 152.612 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMm<sup>3</sup>" = millones de metros cúbicos, "m<sup>3</sup>" = metros cúbicos

Tabla 86 GT de los buques LNG en cada tipo de motor

| Tipo de motor | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |               |            |              |            |
|---------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|
|               | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM            |            | ROCDE        |            |
|               | (MMt)                                     | %          | (MMt)        | %          | (MMt)         | %          | (MMt)         | %          | (MMt)        | %          |
| D2            | 7,069                                     | 12,5       | 0            | 0          | 6,612         | 18,7       | 0,457         | 4,4        | 0            | 0          |
| D4            | 0,016                                     | 0,0        | 0            | 0          | 0             | 0          | 0             | 0          | 0,016        | 0,3        |
| G2A           | 5,810                                     | 10,3       | 1,499        | 24,9       | 3,277         | 9,3        | 1,034         | 9,9        | 0            | 0          |
| G2B           | 1,414                                     | 2,5        | 0,121        | 2,0        | 0,823         | 2,3        | 0,470         | 4,5        | 0            | 0          |
| G4            | 17,815                                    | 31,5       | 2,980        | 49,6       | 10,779        | 30,5       | 3,686         | 35,3       | 0,371        | 7,9        |
| T             | 23,480                                    | 41,5       | 1,413        | 23,5       | 13,750        | 38,9       | 4,123         | 39,5       | 4,194        | 88,9       |
| TU            | 0,929                                     | 1,6        | 0            | 0          | 0,123         | 0,3        | 0,669         | 6,4        | 0,137        | 2,9        |
| <b>Total</b>  | <b>56,533</b>                             | <b>100</b> | <b>6,012</b> | <b>100</b> | <b>35,365</b> | <b>100</b> | <b>10,438</b> | <b>100</b> | <b>4,718</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LNG (t) |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| D2                        | 141.379 | 0       | 143.746 | 114.166 | 0       |
| D4                        | 3.276   | 0       | 0       | 0       | 3.276   |
| G2A                       | 116.203 | 115.284 | 117.046 | 114.910 | 0       |
| G2B                       | 108.735 | 120.859 | 117.536 | 93.990  | 0       |
| G4                        | 105.415 | 99.318  | 108.883 | 105.301 | 74.132  |
| T                         | 102.982 | 94.221  | 105.770 | 91.613  | 110.367 |
| TU                        | 132.732 | 0       | 123.005 | 133.881 | 136.716 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMT" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Analizando la potencia propulsora para cada tipo de motor (Tabla 87), la mayor CC se encuentran en buques bajo el tipo motor T, teniendo la menor CC en el tipo de motor D4.

En cuanto al grupo de banderas EU15, la mayor potencia propulsora se encuentra en el tipo de motor G4, teniendo la menor potencia propulsora en el tipo de motor D2, D4 y TU.

Para los grupos de banderas RA y RM, la mayor potencia propulsora se encuentra en el tipo de motor G4, teniendo la menor potencia propulsora en el tipo de motor D4.

Respecto al grupo de banderas ROCDE, la mayor potencia propulsora se encuentra en el tipo de motor T, teniendo la menor potencia propulsora en el tipo de motor D2, G2A y G2B.

Los valores medio de potencia propulsora por buque para cada tipo de motor y grupo de bandera se encuentran también en la Tabla 87. El buque LNG con mayor potencia propulsora por buque tiene un tipo de motor G4 y está bajo el grupo de banderas RA. Y, el buque LNG con menor potencia propulsora por buque tiene un tipo de motor D4 y está bajo el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 87 Potencia propulsora de los buques LNG en cada tipo de motor

| Tipo de motor              | Valores totales de la flota de buques LNG |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
|----------------------------|---|------------|--------------|------------|---------------|------------|--------------|------------|--------------|------------|
|                            | total                                     |            | EU15         |            | RA            |            | RM           |            | ROCDE        |            |
|                            | (GW)                                      | %          | (GW)         | %          | (GW)          | %          | (GW)         | %          | (GW)         | %          |
| D2                         | 1,789                                     | 11,1       | 0            | 0          | 1,661         | 16,4       | 0,128        | 4,2        | 0            | 0          |
| D4                         | 0,011                                     | 0,1        | 0            | 0          | 0             | 0          | 0            | 0          | 0,011        | 1,0        |
| G2A                        | 1,437                                     | 8,9        | 0,372        | 19,8       | 0,823         | 8,1        | 0,241        | 8,0        | 0            | 0          |
| G2B                        | 0,306                                     | 1,9        | 0,024        | 1,3        | 0,174         | 1,7        | 0,108        | 3,6        | 0            | 0          |
| G4                         | 6,583                                     | 40,8       | 1,080        | 57,5       | 4,026         | 39,9       | 1,349        | 44,5       | 0,128        | 11,4       |
| T                          | 5,839                                     | 36,2       | 0,403        | 21,4       | 3,390         | 33,6       | 1,084        | 35,8       | 0,962        | 85,4       |
| TU                         | 0,170                                     | 1,1        | 0            | 0          | 0,025         | 0,2        | 0,120        | 3,9        | 0,025        | 2,2        |
| <b>Total</b>               | <b>16,136</b>                             | <b>100</b> | <b>1,879</b> | <b>100</b> | <b>10,100</b> | <b>100</b> | <b>3,030</b> | <b>100</b> | <b>1,126</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (kW) |   |            |              |            |               |            |              |            |              |            |
| D2                         | 35.789                                    |            | 0            |            | 36.118        |            | 32.000       |            | 0            |            |
| D4                         | 2.206                                     |            | 0            |            | 0             |            | 0            |            | 2.206        |            |
| G2A                        | 28.735                                    |            | 28.651       |            | 29.397        |            | 26.793       |            | 0            |            |
| G2B                        | 23.563                                    |            | 24.168       |            | 24.911        |            | 21.554       |            | 0            |            |
| G4                         | 38.955                                    |            | 35.998       |            | 40.667        |            | 38.554       |            | 25.602       |            |
| T                          | 25.610                                    |            | 26.842       |            | 26.081        |            | 24.096       |            | 25.309       |            |
| TU                         | 24.221                                    |            | 0            |            | 25.000        |            | 23.910       |            | 25.000       |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "GW" = Gigavatios, "kW" = kilovatios



# **PARTE III. METODOLOGÍA Y DATOS**



El objetivo general de este trabajo de investigación es analizar los aspectos socioeconómicos y medioambientales de la flota mundial de buques gaseros determinantes de su sostenibilidad. Para lograr este objetivo se aplican una serie de metodologías necesarias para obtener resultados que permitan evaluar la eficiencia y sostenibilidad tanto medioambiental, centrada en las emisiones atmosféricas, como socioeconómica de la actividad desarrollada por la flota mundial de buques gaseros.

Tanto el análisis de la sostenibilidad medioambiental como la sostenibilidad socioeconómica, tiene una relación con las emisiones atmosféricas causadas por la actividad del transporte marítimo de los buques gaseros.

Luego, determinar el consumo de combustible de la flota de gaseros será el punto de partida para conocer las emisiones atmosféricas de la flota de gaseros (capítulo 6).

Para determinar el consumo de combustible de la flota de gaseros se aplican dos metodologías distintas. Una, basada en el Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero de la OMI complementada con asunciones de otros estudios internacionalmente aceptados denominada como "OMI I".

La segunda metodología para el cálculo de combustible, es una aportación resultante de este trabajo de investigación, la cual es específica para buques LNG y LPG y se formaliza a partir de un análisis más desagregado y específico de los procesos de combustión de los buques gaseros en concreto, además de añadir un componente empírico al emplear datos operacionales de los buques gaseros durante el año 2019 con el fin de desarrollar un perfil operacional más preciso y actualizado mejorando la metodología OMI I, esta segunda metodología se denomina "OMI II".

Dos fuentes adicionales de emisiones son también consideradas en este trabajo de investigación, teniendo sus propias metodologías de cálculo. Estas son las emisiones atmosféricas causadas por la quema de aceite lubricante de cilindros en motores diésel (ver capítulo 6.3), y las emisiones atmosféricas causadas por la fuga de refrigerantes a bordo en proceso de refrigeración y aire acondicionado (ver capítulo 6.4). La metodología empleada para el cálculo de las emisiones atmosféricas es la metodología *bottom-up* o basada en la actividad de la flota.

Una vez conocidos los consumos de combustibles, aceite lubricante y de refrigerantes para cada buque, se calculan los distintos gases contaminantes considerados en esta tesis tal y como se detalla en el capítulo 6.5.

Obtenidas las emisiones atmosféricas de cada buque de la flota de gaseros, es momento de analizar la sostenibilidad medioambiental y socioeconómica.

Para evaluar la sostenibilidad medioambiental se aplican 4 métodos (ver capítulo 7) que dan como resultado una serie de indicadores y variables que son determinantes para poder evaluar la sostenibilidad medioambiental de los buques, estos son: la huella de carbono, la huella ecológica, variables medioambientales definidos por la industria marítima (informes ESG) e indicadores de eficiencia energética de los buques.

Por último, en cuanto a la sostenibilidad socioeconómica y medioambiental (ver capítulo 8), se aplica una metodología input-output híbrida.

Para poder desarrollar las metodologías propuestas con el fin de obtener los resultados necesarios para lograr el objetivo de la tesis, se han empleado tres bases de datos.

La primera base de datos que se ha empleado ha sido sacada de la base de datos de *IHS Fairplay*, la mayor base de datos de buques mercantes existente, que incluye datos técnicos, rutas, información comercial y de los armadores, siendo una base de datos que está continuamente siendo actualizada y expandida.

La siguiente base de datos es construida a partir de los datos de alta frecuencia (cada 15 segundos) recogidos de buques LNG en servicio, a través de la utilización de sistemas de monitorización instalados a bordo. Esta base de datos construida es parte importante para el desarrollo de la metodología del cálculo de combustible nombrada como "OMI II".

La tercera base de datos son las tablas input-output mundiales de la Base de datos de tablas input-output mundial (WIOD). Esta base de datos cubre 28 países de la UE y otros 15 países importantes del mundo para el período de 2000 a 2014, siendo este último año el que se emplea en este trabajo de investigación.

## 6. EMISIONES ATMOSFÉRICAS

En este capítulo se detalla las metodologías aplicadas con el fin de calcular las emisiones atmosféricas causadas por la flota de buques gaseros, y que va a ser parte esencial para un posterior análisis de la eficiencia y sostenibilidad de los buques gaseros.

Para cuantificar las emisiones atmosféricas de la flota de gaseros, se consideran tres fuentes de emisiones:

- Consumo de combustibles en procesos de combustión a bordo
- Consumo de aceite lubricante en motores diésel marinos a bordo
- Pérdida o consumo de refrigerantes a bordo

Como se ha mencionado anteriormente, la primera variable que debe conocerse para saber las emisiones atmosféricas a partir de la metodología basada en la actividad de la flota de gaseros es el consumo de combustible de cada uno de los buques, esto se hace atendiendo a las diferencias y similitudes que presentan las dos flotas (buques LPG y LNG) que componen la flota mundial de gaseros.

Estimar de manera fiable las emisiones atmosféricas de los buques no es una tarea sencilla debido a la complejidad inherente de la industria, buques navegando en alta mar bajo condiciones permanentemente cambiantes, diferentes operaciones comerciales, distintos tipos de sistemas de propulsión, entre otros factores (Endresen et al., 2007; Rahim, et al., 2016).

Existen distintas metodologías empleadas internacionalmente aunque bien es cierto que aun siendo aceptadas todas ellas por organismos internacionales y por la comunidad científica, existen discrepancias entre ellas (McKinnon, 2007), incluso empleando la misma metodología, las emisiones reportadas son distintas (Corbett et al., 2003; Endresen, 2003; Dalsøren et al., 2009), esto pone de manifiesto la complejidad de la estimación de las emisiones atmosféricas. La calidad de los resultados que se obtienen, va a estar influenciada por los métodos que se empleen (Miola et al., 2011).

Actualmente, dos son las metodologías más aceptadas dentro de la comunidad científica para la estimación de emisiones atmosféricas del transporte marítimo, una es la metodología conocida como metodología basada en la actividad o bottom-up (Corbett et al., 2003, 2004; Schreier et al., 2007; De Meyer et al., 2008; Dalsøren et al., 2009) y la otra, conocida como "Top-down" o basada en las ventas de combustibles (Tzannatos, 2010; Dragović et al., 2018). Sin embargo, los resultados más fiables se consiguen aplicando la metodología basada en la actividad, sobre todo cuando se aplica a nivel global (Miola et al., 2011; Knežević, Radonja et al., 2018; Moreno-Gutiérrez et al., 2019a). Esto también queda refrendado por los resultados de otros trabajos de investigación dentro del marco institucional y académico donde se resalta la incertidumbre de los resultados de la metodología Top-Down, recomendando como método más fiable para el cálculo

de emisiones atmosféricas la metodología basada en la actividad (International Maritime Organization, 2009; Howitt et al., 2010; R.A.O. Nunes et al., 2017).

Parte esencial de la metodología basada en la actividad es la definición y utilización de un correcto perfil operacional de la flota, esto es necesario para obtener una estimación de emisiones atmosféricas más precisa.

Analizando los principales estudios sobre el tema, se han encontrado algunas inexactitudes dentro de los trabajos que se centran en los perfiles operativos y análisis de la eficiencia energética de los buques, ya que pasan por alto las diferencias en las asunciones y resultados obtenidos, causados por la diversidad de sistemas de propulsión instalados en los buques, así como las incertidumbres en cuanto a los sistemas encargados de la energía auxiliar. Un ejemplo de este hecho es la cuantificación de las emisiones de los buques a partir de los datos del Sistema de Identificación Automática (AIS), método muy común para estimar las emisiones atmosféricas basado en la actividad de los buques. Si bien este es un método ampliamente aceptado (Kano et al., 2014; Coello *et al.*, 2015a; Jalkanen et al., 2016; Smith *et al.*, 2016; Olmer *et al.*, 2017; Jafarzadeh et al., 2018; Yu et al., 2018a; Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019a), estos modelos se basan en la estimación de los parámetros que los satélites no capturan y que son esenciales para estimar el rendimiento operativo y energético del barco, tales como la potencia entregada a la hélice, la potencia eléctrica auxiliar y los diferentes tipos de combustible empleado a bordo.

En cuanto a los factores que son esenciales considerar dentro de la metodología bottom-up para la estimación de emisiones atmosféricas, se pueden considerar principalmente los siguientes factores listados a continuación (Endresen *et al.*, 2007; Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019a) y que son empleados también por OMI en sus estudios sobre gases de efecto invernadero (International Maritime Organization, 2009, 2014b):

- Características de diseño de los buques
- Potencia Instalada y régimen de carga del motor principal
- Año de construcción del buque
- Tipo y año de construcción del motor principal / sistema de propulsión
- Potencia Instalada y régimen de carga de los motores auxiliares
- Potencia demandada de las calderas auxiliares
- Número de horas en operación de las fuentes de emisiones atmosféricas (motores principales, motores auxiliares y calderas)
- Modo de operación del buque (Navegación, maniobra o en puerto)
- Tipo de combustible empleado

En este trabajo de investigación, los datos sobre los parámetros estructurales de los buques, así como las características de los sistemas de propulsión y de los motores auxiliares son obtenidos de la base de datos de IHS Fairplay (Information Handling Services Markit, 2018). Hay que hacer especial mención a que, en la base de datos, para algunos buques, falta información sobre los motores auxiliares con respecto a su construcción, potencia nominal y diseño, esto se ve sobre todo en buques construidos antes del año 2000 (International Maritime Organization, 2014b). Estudios adicionales y encuestas realizadas en el sector marítimo, van a posibilitar el empleo de datos sobre motores auxiliares que suplan las informaciones no incluidas en la base de datos de *Fairplay*.

Aunque la gran mayoría de las emisiones atmosféricas provienen de los procesos de combustión que ocurren a bordo de los buques, existen otras fuentes de emisiones de gases a la atmósfera como son la quema de aceite lubricantes en el interior de los cilindros de los motores diésel y, también, aunque en menor medida, las emisiones por fugas de refrigerantes en los circuitos de refrigeración y aire acondicionado.

Las siguientes subsecciones van a detallar las distintas metodologías y bases de datos obtenidas (OMI I y OMI II) para obtener un inventario de emisiones atmosféricas de la flota de buques gaseros, a partir del cálculo de los consumos de combustible, aceite lubricante de cilindros y refrigerantes de cada uno de los buques de la flota estudiada. Para concluir este capítulo, se realiza un análisis de la incertidumbre asociada al cálculo de las emisiones.

## **6.1. Método OMI I para cuantificar el consumo de la flota**

En este capítulo se detalla la metodología basada en el Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero de 2014, realizado por OMI, así como las adaptaciones y asunciones necesarias para complementar los vacíos que se han encontrado durante el estudio del Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero de 2014. Esta metodología se aplica sobre los datos técnicos de los buques existentes en la base de datos de IHS Fairplay, formando una base de datos que se denomina "OMI I" en este trabajo de investigación.

En 2014, con el fin de poder realizar un seguimiento sobre la efectividad de las medidas aprobadas por la Organización Marítima Internacional y por los Estados Miembro, así como su grado de implementación en las diferentes flotas y evaluar el progreso de la flota mundial en el objetivo de reducir las emisiones atmosféricas, la OMI publicó el Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero, donde se presentó el impacto del transporte marítimo en las emisiones globales.

Aunque la calidad de las estimaciones aumenta en este estudio respecto al Segundo Estudio de Gases de Efecto Invernadero de 2009, gracias a que la cobertura de datos AIS que se emplea como fuente de información en este informe, existe una gran incertidumbre respecto a la potencia

empleada por los buques, la cantidad de los distintos combustibles (residuales, destilados, LNG), cargas auxiliares y utilización de calderas auxiliares.

El consumo de combustible es el factor principal en la operación de los buques. Para los armadores y operadores buques, es un aspecto esencial debido en gran parte a implicaciones económicas, siendo el consumo de combustible el responsable de aproximadamente el 50% de los gastos por viaje (Bialystocki et al., 2016). Desde un punto medioambiental, la calidad del combustible empleado es objeto de debate entre los organismos internacionales debido al impacto del consumo de combustible y de la calidad de este en las emisiones atmosféricas.

La mayor fuente de emisión de contaminantes atmosféricos son los procesos de combustión a bordo de los buques. Esto se debe a que toda reacción de combustión va a causar una emisión de gases contaminantes que, en el caso de los buques, son liberados a la atmosfera a través de los gases de escape.

La cantidad de emisiones atmosféricas causadas por la combustión de combustibles abordo van a depender principalmente de los siguientes factores (Trozzi, 2010):

- Cantidad y calidad del combustible utilizado
- Tipo y año de construcción de los motores
- Perfil operacional y horas de operación de los equipos que realizan los procesos de combustión

Por lo tanto, una vez se conocen estos factores, el cálculo de las emisiones atmosféricas de cada uno de los buques de la flota de gaseros se calculará como muestra la ecuación 1.

$$E_{T_j} = \sum_j \sum_f^{f=1} E_f \quad 1$$

Donde:

E: Emisiones anuales, millones de toneladas

T: totales al año

j: contaminante (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc)

f: fase del viaje (Navegando, maniobra, puerto, etc.)

Los motores marinos empleados en los buques mercantes son mayoritariamente, motores diésel, estos son la selección predominante empleada para la propulsión de los barcos, así como para la generación de energía auxiliar. En 2010 un análisis de alrededor de 100.000 buques dió como resultado que los motores diésel marinos impulsan alrededor del 99% de la flota mundial, mientras que las turbinas de vapor son el sistema de propulsión seleccionado en menos del 1% de la flota (Trozzi, 2010).

Una de las particularidades de la flota de buques LNG es la diversidad de sistemas de propulsión instalados, donde las plantas de vapor siguen siendo el sistema predominante en la flota existente a fecha de enero de 2020, siendo el sistema de propulsión elegido en el 45% de la flota existente de LNG. Este grado de diversidad añade más complejidad al proceso de estimación de consumo de combustible, que ya se ve afectado por otro factor esencial para la estimación de las emisiones atmosféricas, los diferentes tipos de combustible empleados a bordo de estos buques; esto se ve reflejado en la metodología empleada por OMI, ya que no hace un análisis detallado de los buques con sistemas de propulsión menos convencionales, tales como plantas de vapor y motores duales (combustible líquido y gas natural). En el caso de las plantas de vapor, OMI emplea un consumo fijo como se verá más adelante en este capítulo.

Tradicionalmente, los buques han empleado un sólo tipo de combustible (combustibles residuales conocidos como HFO, "*Heavy Fuel Oil*", o IFO, "*Intermediate Fuel Oil*"), luego con las posteriores legislaciones que han ido limitando las emisiones de óxidos de azufre (MEPC, 2018; MEPC.320(74), 2019), los buques empezaron a usar combustibles destilados (MDO, "*Marine Diesel Oil*", o MGO, "*Marine Gas Oil*"). Al utilizar diferentes tipos de combustibles, la complejidad del modelo para estimar las emisiones atmosféricas aumenta, y esto es aún mayor en los buques LNG, ya que en estos buques se añade un tercer tipo de combustible, el propio LNG evaporado de los tanques de carga, que se emplea para producir energía auxiliar y/o potencia propulsora (Aldous y Smith, 2012; Ekanem *et al.*, 2015; Wang y Rutherford, 2015).

Por otro lado, la flota de buques LPG es más convencional respecto a los sistemas de propulsión que la flota de LNG, siendo los motores diésel de dos y cuatro tiempos las opciones empleadas para la propulsión y la energía auxiliar; también respecto a los distintos combustibles que se emplean a bordo, que, a fecha de la realización de este trabajo de investigación, son empleados combustibles residuales y combustibles destilados exclusivamente. Por lo que emplear esta metodología empleada por OMI en 2014 se considera apropiada para los buques LPG debido a la menor complejidad de los sistemas de propulsión (a fecha de este trabajo de investigación).

Para obtener el consumo de combustible de cada buque, tres procesos de combustión son considerados en esta metodología: motor(es) principal(es), motores y calderas auxiliares.

Otros sistemas a bordo también emiten contaminantes a la atmósfera, como por ejemplo los incineradores y plantas de generación de gas inerte, pero debido a que no están de manera continua en operación, su impacto se desprecia ya que su impacto es mínimo en comparación con los tres principales sistemas a bordo que son considerados por OMI (International Maritime Organization, 2014b). En los buques LNG, otro sistema que produce combustión y por lo tanto emite a la atmósfera es la unidad de combustión de gas, conocida por sus siglas en inglés como GCU (*Gas Combustion Unit*), este sistema no está considerado en el Tercer Estudio de GEI de la OMI.

El consumo de combustible anual total para cada buque se va a calcular como muestra la ecuación 2.

$$CA_i = \sum_f (CA_{mp_i} + CA_{ma_i} + CA_{ca,i}) \quad 2$$

Donde:

CA: Consumo Combustible Anual para cada buque, toneladas

mp: Motor principal

ma: Motores Auxiliares

ca: Caldera Auxiliar

f: cada fase del viaje (navegando, maniobra y puerto)

i: tipo de combustible

Es importante mencionar que el estudio de la OMI de 2014, no se detallada de manera clara como se consideran los distintos combustibles disponibles a bordo, en especial para aquellos buques que emplean LNG u otro combustible distinto al HFO o MDO. Además, otro factor que añade más opacidad a la hora de saber cuál es la distribución de combustible para la flota de gaseros es que, en ese estudio de 2014, la OMI considero juntos a los LPG y a los LNG (y demás buques gaseros como los que transportan CO<sub>2</sub> y los buques mixtos quimiqueros y LPG).

La metodología que se va a aplicar para obtener el consumo de combustible de cada uno de estos tres sistemas se va a explicar en las siguientes subsecciones.

### 6.1.1. Consumo de combustible motor principal

En este capítulo se detalla el método empleado para estimar el consumo de combustible del motor(es) principal(es) o motor(es) propulsor(es) de acuerdo con la metodología OMI de 2014.

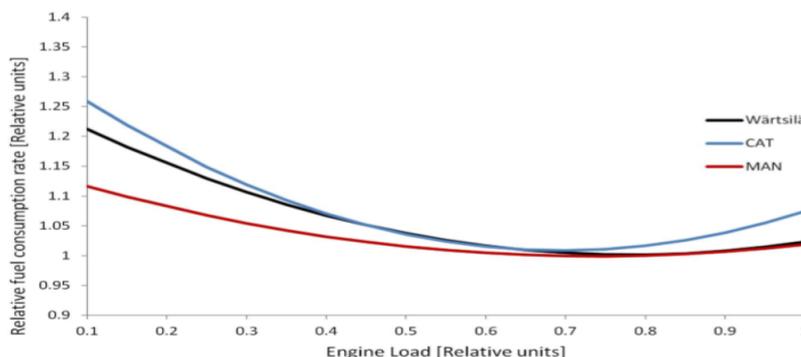
El número de motores principales en la flota de gaseros varía desde uno hasta seis motores.

Los motores principales a bordo de los buques son los encargados de desarrollar el trabajo necesario para ser entregado a la hélice o hélices y, en consecuencia, proporcionar el empuje necesario al buque para que éste navegue bajo unas condiciones determinadas.

El consumo de combustible de los motores principales, y en consecuencia sus emisiones atmosféricas, varían en función de la potencia nominal del motor principal, el factor de carga y el año de construcción del motor. La potencia desarrollada por el motor y el factor de carga varían en el tiempo como resultado de las operaciones específicas de los buques y de operación de los mismos: modo de operación (por ejemplo, en puerto, fondeado, maniobra o navegando), velocidad demandada, condición de carga, clima, etc. (Jalkanen *et al.*, 2012; International Maritime Organization, 2014b).

Los motores principales marinos se clasifican en motores lentos o de dos tiempos (Slow Speed Diesel = SSD), motores de velocidad media o de cuatro tiempos (Medium Speed Diésel = MSD) y motores alta velocidad (High Speed Diesel = HSD). Cada tipo de motor tienen un Consumo Específico de combustible (CE) (International Maritime Organization, 2009, 2014b), que indica la cantidad de combustible requerido para desarrollar un kWh, y depende del régimen de carga del motor, como muestra la Figura 15.

Figura 15 Relación del consumo de combustible y el régimen de carga del motor



Fuente: Jalkanen et al., (2012)

Tabla 88 Valores para el consumo específico base para motores diésel de dos tiempos.

| Año del Motor     | SSD | MSD | HSD |
|-------------------|-----|-----|-----|
| Antes del 1984    | 205 | 215 | 225 |
| 1984 < Año < 2000 | 185 | 195 | 205 |
| ≥ 2001            | 175 | 185 | 195 |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: g/kWh

El consumo específico de un motor indica su eficiencia, relacionando la cantidad de combustible necesario para desarrollar un *kilowatio* de potencia. La Tabla 88 muestra que, el desarrollo de nuevas tecnologías, diseños y restricciones medioambientales, el consumo de los motores principales está siendo más eficiente a lo largo del tiempo, siendo los últimos modelos los más eficientes en cuanto a su consumo específico (reduciendo el consumo en 30 g/kWh como muestra la Tabla 88).

Por lo tanto, el primer paso para la estimación del consumo de combustible es definir el consumo específico según el tipo de motor, el año de construcción, régimen de carga y el combustible empleado (Winnes *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 2015; Jalkanen *et al.*, 2016; Jafarzadeh *et al.*, 2018).

La Tabla 88 muestra los consumos específicos base para los distintos tipos de motores y según el año de construcción del motor. Sin embargo, el consumo específico del motor varía según el régimen de carga del motor. De manera general se supone que cada motor mantiene una dependencia parabólica según el régimen de carga del motor. Para saber el consumo

específico actual del motor para un régimen de carga dado, se aplica la ecuación 3 (Jalkanen *et al.*, 2012; International Maritime Organization, 2014b).

$$CE_{Diesel,f} = CE_{base,m} \times (0,455 \times C_f^2 - 0,71 \times C_f + 1,28) \quad 3$$

Donde:

$CE_{Diesel}$ : Consumo específico estimado para motores principales diésel de dos y cuatro tiempos y el régimen de operación determinado, g/kWh

$CE_{base}$ : Consumo específico sacado de los valores base de la Tabla 88 según año y tipo de motor, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada según la Tabla 94

f: cada fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

m: tipo de motor (SSD, MSD o HSD) según la Tabla 88.

A partir de la ecuación 3, se puede calcular el consumo horario del motor diésel (o motores) principal, de dos o de cuatro tiempos tal y como muestra la ecuación 4.

$$CH_{mp} = \frac{CE_{Diesel,f} \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 4$$

Donde:

$CH_{mp}$  : Consumo de combustible horario del motor principal diésel de dos o cuatro tiempos, Toneladas/hora

$CE_{Diesel}$ : Consumo específico estimado para motores principales diésel de dos y cuatro tiempos y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada según la Tabla 94

f: cada fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

P: Potencia nominal del motor, kW

Hay que remarcar que, los motores diésel de dos y cuatro tiempos no van a emplear otros combustibles que no sean líquidos, ya sean residuales o destilados. Exceptos para los buques con motores duales que puedan emplear LNG como combustible, en tal caso la OMI usa un consumo específico (para motores que desarrollen el ciclo Otto) de 166 g/kWh.

Para los buques con plantas de vapor (turbinas de vapor), la OMI aplica un consumo constante de 305 g/kWh para combustibles residuales y de 300 g/kWh para combustibles destilados.

### 6.1.2. Consumo de combustible motores auxiliares

Los motores auxiliares (MMAA) son los responsables a bordo de generar la energía eléctrica necesaria para el desarrollo de las actividades diarias, tales como iluminación, servicios auxiliares, sistemas de carga, etc.

Hay que mencionar que algunos buques llevan instalados generadores de cola (alternadores conectados al eje de la hélice) los cuales cuando están en funcionamiento el motor principal generan electricidad, quitando esta energía de la suministrada desde el motor principal al eje propulsor. Si el barco puede generar energía auxiliar con generadores de eje o utiliza el principio diésel-eléctrico para el suministro de energía, entonces el requisito de energía auxiliar se asignará al motor principal (Johansson *et al.*, 2017). Sin embargo, la base de datos empleada en esta tesis no tiene esta información disponible, luego se asume que los buques gaseros no llevan generadores de cola, esta asunción en la realidad es aplicable ya que no es un diseño común dentro de los buques gaseros, y pocos buques llevarían en realidad esta tecnología.

El consumo de combustible y, por tanto, las emisiones de los motores auxiliares varían en función de la demanda de potencia auxiliar (dependiente del perfil operacional de los buques), la potencia de salida nominal del motor auxiliar, el factor de carga y el año de fabricación del motor. Los datos técnicos y operativos sobre motores auxiliares a menudo faltan en las bases de datos comerciales, especialmente para barcos más antiguos, es decir construidos antes de 2000 (International Maritime Organization, 2014b).

Por lo general, hay dos o más motores auxiliares en estos barcos, y el número y la potencia nominal (no necesariamente la misma para todos los motores de un barco) de cada motor se determina según los criterios de diseño del barco. Esto significa que la operación real de los motores auxiliares específicos, según el tipo de buque y modo operativo, puede variar significativamente de un barco a otro.

Como se ha mencionado anteriormente, el número de motores auxiliares a bordo de los buques varían según el tipo de buque y su diseño, teniendo un mínimo a bordo de dos motores auxiliares. Por lo tanto, como primer paso para saber el consumo de combustible de los buques gaseros es saber cuántos motores auxiliares llevan en operación, como muestra la Tabla 89.

Tabla 89 Número de motores auxiliares en operación.

| Tipo de barco | Peso muerto (TPM) | Número MMAA en operación |
|---------------|-------------------|--------------------------|
| Gasero        | TPM < 50.000      | 1,1                      |
| Gasero        | TPM ≥ 50.000      | 1,23                     |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b)

Como se ha hecho para los motores principales, se necesita saber el consumo específico de los motores auxiliares para estimar el consumo de combustible de estos. A diferencia de los motores principales, en los auxiliares se asume un valor constante para el consumo específico, tal y como se detalla en la Tabla 90, ya que la demanda de energía y, por ende, el régimen de

carga de los motores auxiliares, generalmente se ajusta al acoplar o desacoplar varios motores auxiliares. La tripulación mantiene el rango de trabajo óptimo de los motores auxiliares y no se espera que tenga una gran variabilidad, en contraste con la carga del motor principal (International Maritime Organization, 2014b; Scarbrough, 2017).

*Tabla 90 Consumo específico estimado para los motores auxiliares*

| <b>Tipo de combustible</b> | <b><math>CE_{MMAA}</math><br/>(g/kWh)</b> |
|----------------------------|---|
| RO                         | 225                                       |
| DO                         | 225                                       |

Fuente: Cooper y Gustafsson, (2004), International Maritime Organization, (2014b)

El consumo de combustible de los motores auxiliares es calculado aplicando la ecuación 5:

$$CH_{maD} = \frac{CE_{ma} \cdot P \cdot C_f \cdot \frac{N_o}{N_a}}{10^6} \quad 5$$

Donde:

$CH_{maD}$ : consumo horario de combustible motores auxiliares diésel, ton/h

$CE_{ma}$ : Consumo específico para los motores auxiliares g/kWh, Tabla 90

P: Potencia nominal total de los motores auxiliares, kW

C: Régimen de carga del motor expresado en tanto por 1

$N_o$ : Número de motores auxiliares en operación según la Tabla 89

$N_a$ : Número de motores auxiliares instalados a bordo

f: fase del viaje

Para completar los datos que faltan sobre los motores auxiliares en la base de datos obtenida de *IHS Fairplay*, se ha empleado la relación del motor principal y motores auxiliares y el número de motores auxiliares instalados a bordo que se detallan en la Tabla 91.

*Tabla 91 Datos operacional de los motores auxiliares en la flota de Gaseros*

| <b>Tipo de Buque</b> | <b>Peso Muerto (TPM)</b> | <b>Ratio MP / MMAA</b> | <b>Nº MMAA</b> | <b>MMAA potencia instalada (kW)</b> |
|----------------------|--------------------------|------------------------|----------------|-------------------------------------|
| Gaseros              | TPM < 50.000             | 2,9                    | 3              | 240                                 |
|                      | TPM ≥ 50.000             | 2,9                    | 3              | 1.710                               |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b)

En el Tercer estudio de la OMI sobre GEI, la potencia desarrollada por los motores auxiliares en cada una de las fases se consideró como se muestra en la Tabla 92.

Tabla 92 Potencia de los motores auxiliares para la flota de gaseros para cada fase de viaje

| Tipo de Barco | Peso muerto (TPM)      | Navegando | Maniobra | En Puerto |
|---------------|------------------------|-----------|----------|-----------|
| Buque Gasero  | TPM < 50.000           | 240       | 360      | 240       |
|               | 50.000 ≤ TPM < 200.000 | 1.710     | 2.565    | 1.710     |
|               | TPM ≥ 200.000          | 1.710     | 2.565    | 1.710     |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Kilovatios

En la flota de LPG, todos los motores auxiliares instalados son motores diésel de cuatro tiempos. Sin embargo y como ya ha sido previamente mencionado, la flota de LNG tiene una mayor complejidad de sistemas propulsores y de suministro eléctrico a bordo. Esto no se ve reflejado en el estudio de la OMI de 2014, y se dará respuesta en este trabajo de investigación como se explica en el capítulo 6.2.

### 6.1.3. Consumo de combustible calderas de vapor auxiliares

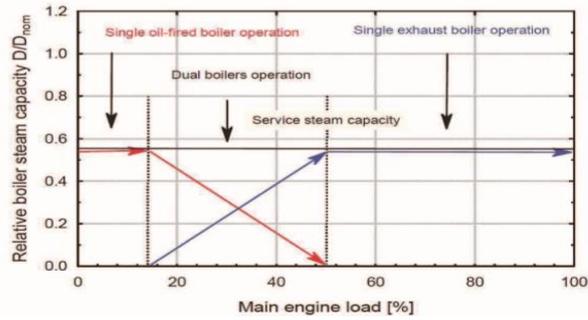
El vapor proveniente de las calderas auxiliares a bordo de los barcos se utiliza para proporcionar calefacción a la carga (si fuese requerido), y para calentar los tanques de combustibles, así como para ejecutar operaciones de carga con bombas de vapor o con otras maquinillas de cubierta.

Durante los viajes, con el fin de incrementar la eficiencia global de la planta propulsora, el calor residual del motor principal se utiliza para proporcionar la energía necesaria para la generación de vapor. Sin embargo, con regímenes bajos, el calor proporcionado los gases de escape no es suficiente para satisfacer toda la demanda de vapor a bordo, a bajas cargas del motor, tanto la caldera auxiliar como la de recuperación de calor residual proporcionan el calor que necesitan los buques. El cambio de las calderas recuperadoras a las auxiliares se realiza con un rango de carga del motor del 20% al 50% del régimen del motor principal (Myśków y Borkowski, 2012; International Maritime Organization, 2014b).

Dicho esto, se asume que las calderas auxiliares sólo están en funcionamiento durante la maniobra y en puerto.

Al no tener datos suficientes, OMI con el fin de simplificar la cuantificación del consumo de combustible de las calderas auxiliares, asume un consumo de combustible constante para las calderas auxiliares y una operación nominal. Sin embargo, en realidad este consumo es variable una vez que el sistema está bajo control de los operarios. Se supone también que, la relación aire-combustible es constante en una operación nominal, pero es variable una vez que el sistema está bajo control manual, donde el ingeniero de la planta puede establecer la concentración de oxígeno necesario en el aire de combustión (Gutiérrez Ortiz, 2011).

Figura 16 Operación de las calderas auxiliares y recuperadoras.



Fuente: Myśków y Borkowski, (2012)

En el tercer estudio de la OMI sobre los gases de efecto invernadero, se establece un valor constante para el consumo específico de calderas de 305 g/kWh. En el mismo estudio, se estima el trabajo desarrollado por las calderas (Tabla 93).

Tabla 93 Potencia de la caldera auxiliar para la flota de gaseros para cada fase de viaje

| Tipo de Barco               | Peso muerto (TPM)      | Navegando | Maniobra | En Puerto |
|-----------------------------|------------------------|-----------|----------|-----------|
| Buque Gasero <sup>(1)</sup> | TPM < 50.000           | 100       | 200      | 1.000     |
|                             | 50.000 ≤ TPM < 200.000 | 150       | 300      | 1.500     |
|                             | TPM ≥ 200.000          | 300       | 600      | 3.000     |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Kilovatios

<sup>1)</sup> Excepto buques LNG con plantas de vapor.

Las calderas auxiliares no están continuamente en operación, sino que se usan según sea la demanda de vapor para los sistemas auxiliares de los buques. Tanto los buques LPG como los LNG todos tienen calderas auxiliares excepto los buques LNG con plantas de vapor donde el vapor auxiliar es producido por las calderas principales.

Se asume que las calderas auxiliares durante la navegación no están en funcionamiento, y el vapor requerido es suministrado por otros sistemas a bordo tales como las calderas de aprovechamiento de los gases de escape.

El consumo horario de combustible de las calderas auxiliares es calculado en la ecuación 6:

$$CH_{CA} = \sum_f \frac{CE_{CA} \cdot P}{10^6} \quad 6$$

Donde:

$CH_{CA}$ : consumo horario de combustible calderas auxiliares, ton/h

$CE_{CA}$ : Consumo específico para las calderas auxiliares g/kWh, (valor constante de 305 g/kWh)

P: Potencia desarrollada por la caldera auxiliar en la Tabla 93, kW

f: fase del viaje

### 6.1.4. Perfil operacional

Para estimar la cantidad de emisiones anuales de cada buque, causadas por cada una de las fuentes de emisión a bordo de los buques, hay que definir el régimen de carga en el que operan para cada una de las fases del viaje consideras. La OMI considera tres fases: Navegando, Maniobra y en Puerto. Cada una de las fases, va a tener un régimen de carga para motores principales y auxiliares como muestra la siguiente tabla:

*Tabla 94 Régimen de operación de los motores principales y motores auxiliares.*

| <b>Fase del viaje</b> | <b>MCR MP</b> | <b>tiempo en operación del MP</b> | <b>MCR MMAA</b> | <b>Tiempo en operación de MMAA</b> |
|-----------------------|---------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Navegando             | 80            | 100                               | 30              | 100                                |
| Maniobra              | 20            | 100                               | 50              | 100                                |
| Puerto                | 20            | 5                                 | 40              | 100                                |

Fuente: Entec, (2002). Unidades: Porcentaje

Por otro lado, en el Tercer estudio de GEI de la OMI, se emplea una distribución promedio de las horas de operación que se estimó en el 2005 por ENTEC, como se muestra en la Tabla 95.

*Tabla 95 Horas operacionales de la flota en diferentes fases operativas*

| <b>Fase del viaje</b> | <b>Promedio horas (horas/año)</b> |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Navegando             | 6.000                             |
| En puerto             | 700                               |
| Maniobra              | 20                                |
| Fuera de operación    | 2.040                             |
| Total                 | 8.760                             |

Fuente: ENTEC, (2005)

La fase “Fuera de operación”, se considera toda actividad cuyos regímenes de operación no son relevantes o son nulos, como por ejemplo entradas a dique, mantenimiento o paradas técnicas). Se va a considerar que durante el periodo “fuera de operación” los buques que no están en operativos o están en dique seco y/o conectados a corriente de tierra (cold - ironing).

En el Tercer Estudio de GEI de OMI, se detallan los días empleados por los buques navegando, aunque no se detallan el tiempo empleado en las distintas fases de los viajes.

*Tabla 96 Tiempo anual navegando de los buques gaseros.*

| <b>Toneladas de Peso muerto (TPM)</b> | <b>Promedio días (días/año)</b> | <b>Promedio horas (horas/año)</b> |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| TPM < 50.000                          | 180                             | 4.320                             |
| 50.000 ≤ TPM < 200.000                | 254                             | 6.096                             |
| TPM ≥ 200.000                         | 277                             | 6.649                             |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b)

Se emplean las horas anuales en cada una de las fases del viaje de la Tabla 95 para los cálculos de las emisiones atmosféricas, definiendo las horas en cada una de las fases del viaje.

Por lo tanto, el consumo anual de cada motor y caldera para cada buque es calculado como muestran las siguientes ecuaciones.

$$CA_{mp,i} = \sum (CH_{mp,f} \cdot H_f \cdot D_i) \quad 7$$

$$CA_{ma,i} = \sum (CH_{ma,f} \cdot H_f \cdot D_i) \quad 8$$

$$CA_{ca,i} = \sum (CH_{ca,f} \cdot H_f \cdot D_i) \quad 9$$

Donde

$CA_{mp}$ : Consumo anual de combustible de los motores principales, Toneladas

$CA_{ma}$ : Consumo anual de combustible de los motores auxiliares, Toneladas

$CA_{ca}$ : Consumo anual de combustible de la caldera auxiliar, Toneladas

$CH_{mp}$ : Consumo horario de combustible de los motores principales, Ton/h

$CH_{ma}$ : Consumo horario de combustible de los motores auxiliares, Ton/h

$CH_{ca}$ : Consumo horario de combustible de la caldera auxiliar, Ton/h

H: número de horas operativas según la Tabla 95

f: fases del viaje (navegando, maniobra y puerto)

i: tipo de combustible (FO o DO)

D: Distribución (porcentaje) de cada combustible empleado a bordo según la Tabla 99.

#### 6.1.4.1. Distribución del mix de combustible empleado por la flota de gaseros

Los resultados del tercer estudio de GEI de OMI no refleja con claridad la distribución de combustible empleado para lograr los resultados que se presentan en ese informe. Se asume que OMI no considera el consumo de LNG en los resultados ya que buques que empleasen LNG en tiempos de ese estudio eran muy limitados, por lo que los combustibles considerados posiblemente fueron residuales (HFO/IFO) y destilados (MGO/MDO).

La metodología empleada para estimar el porcentaje de cada combustible utilizado es una metodología *Top-Down* con las ventas mundiales de combustibles como hace OMI en su Tercer estudio sobre GEI (ver Tabla 97).

Tabla 97 Consumo anual de combustible del sector marítimo, metodología "Top-Down"

| Combustible                    | Años       |            |            |            |            |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                                | 2007       | 2008       | 2009       | 2010       | 2011       |
| DO                             | 71         | 73         | 77         | 64         | 73         |
| RO                             | 258        | 258        | 245        | 256        | 244        |
| <b>Total</b>                   | <b>329</b> | <b>331</b> | <b>321</b> | <b>319</b> | <b>318</b> |
| Distribución en porcentaje (%) |            |            |            |            |            |
| DO                             | 22         | 22         | 24         | 20         | 23         |
| RO                             | 78         | 78         | 76         | 80         | 77         |
| <b>Total</b>                   | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> | <b>100</b> |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: millones de toneladas

Tabla 98 Consumo anual de combustible del sector marítimo, metodología "Bottom-up"

| Tipo de combustible | Navegación Domestica |      | Navegación Internacional |       | Total |       |
|---------------------|----------------------|------|--------------------------|-------|-------|-------|
|                     | MMt                  | %    | MMt                      | %     | MMt   | %     |
|                     | Residual             | 39,9 | 31,3                     | 667,9 | 83,9  | 707,8 |
| Destilado           | 87,8                 | 68,7 | 105,2                    | 13,2  | 193   | 20,9  |
| LNG                 | 0                    | 0    | 22,6                     | 2,6   | 22,6  | 2,4   |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: "MMt": Millones de toneladas

Tabla 99 Distribución del consumo total de combustible método bottom-up

| Tipo de motor       | RO    | DO    | LNG   | Total |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| Diesel de 2 tiempos | 76,7% | 23,3% | 0     | 100%  |
| Diesel de 4 tiempos | 76,7% | 23,3% | 0     | 100%  |
| Calderas Auxiliares | 76,7% | 23,3% | 0     | 100%  |
| Duales de 2 tiempos | 20,9% | 2,4%  | 76,7% | 100%  |
| Duales de 4 tiempos | 20,9% | 2,4%  | 76,7% | 100%  |
| Plantas de vapor    | 20,9% | 2,4%  | 76,7% | 100%  |

Fuente: Elaboración propia.

Dado que, en el momento de publicación de dicho estudio, los buques mercantes que empleaban LNG como combustibles eran muy pocos en comparación con el total de la flota (menos de mil buques sobre los más de 50.000 buques mercantes que forman la flota mundial), se asume que, en dicho estudio, la OMI sólo considera combustibles residuales y destilados para motores diésel de dos y cuatro tiempos y para calderas auxiliares.

Para aquellos buques que emplean LNG como combustibles, se asume que el orden de prioridad en el uso de los distintos combustibles a bordo es:

1. LNG → 2. Residual → 3. Destilado

Para la flota de LPG, dado que a fecha de este estudio no tiene constancia de buques de esta clase utilizando LNG como combustible (aunque si se sabe que hay buques en servicio empleando metanol y LPG como combustible), para mayor simplicidad, se van a considerar sólo combustibles residuales (76,7%) y combustibles destilados (23,3%).

## 6.2. Método OMI II para cuantificar el consumo de la flota

Como se ha mencionado anteriormente en el capítulo 6.1, el Tercer Estudio de GEI de la OMI mantiene una serie de asunciones e incertidumbres (Ančić et al., 2015) que otros estudios posteriores y en este trabajo de investigación, se han tratado de resolver. Estas incertidumbres se hacen más relevantes a la hora de considerar la calidad del combustible y su efecto en la eficiencia de los procesos de combustión ya que, combustibles más destilados siempre van a tener una mayor energía calorífica (poder calorífico), haciendo que el consumo específico sea inferior a cuando se emplea combustibles residuales. Del mismo modo, en esta metodología se usa una distribución más clara y desagregada de la distribución del combustible, siendo este un aspecto esencial para mejorar la calidad de los resultados (Schim et al., 2018).

A partir de esta metodología, y empleando los datos técnicos de los buques disponibles en la base de datos de IHS Fairplay, se va a crear una segunda base de datos (OMI II) aplicando un análisis más desagregado respecto a las fases de los viajes y la distribución del tiempo operacional en cada fase, basado en el análisis de datos operacionales de buques recibidos a través del sistema AIS y desde sistemas de recolección de datos instalados a bordo de los buques para el año 2019. A este respecto, las horas operativas de los buques se desagregan según flota (LPG y LNG) y según tamaño de buque, reflejando con una precisión mayor la operatividad de estos buques de manera más específica. Las horas operativas difieren en gran medida de las empleadas por OMI en el Tercer Estudio de GEI, lo cual, es una de las causas de obtener distintos resultados para el consumo de combustible y emisiones atmosféricas.

Para buques LNG se van a emplear datos operacionales medidos a bordo de 73 buques en servicio, va a hacer posible la reducción de las incertidumbres respecto al régimen de carga o potencia desarrollada y tipos de combustibles empleados a bordo, ya que se omiten asunciones sobre regímenes de carga y tipos de combustibles empleados al usar mediciones reales.

Otra modificación que aporta esta metodología, es que, a diferencia del Tercer Estudio de GEI de OMI, en esta metodología se analizan por separados los buques LPG y LNG analizando con más detalle las particularidades de ambas flotas (Delft, 2017), esto se hace esencial ya que existen importantes diferencias entre ambas flotas en cuanto a sistemas de propulsión así como en la manera de ser comercialmente operados (Aldous et al., 2015; Wang, et al., 2015; López-Aparicio et al., 2017; Sheng, et al., 2018; Zhang et al., 2018).

Este método también pretende mostrar la importancia de manejar datos reales y obtenidos a partir de mediciones en vez de utilizar estimaciones, siendo este hecho vital para poder realizar modelos que ayuden a tomar decisiones más precisas (Schim van der Loeff, et al., 2018).

En esta metodología, se hace un análisis desagregado del consumo de combustible de los motores principales y auxiliares que se encuentran instalados en las flotas de LPG y LNG.

De igual modo, se detalla el método empleado para calcular el consumo de las calderas auxiliares y el consumo de la evaporación de la carga transportada para buques LNG.

Para obtener esta información, y con el fin de desarrollar una metodología lo más genérica posible, se han empleados datos de diseño recibidos de los fabricantes de los motores y calderas más representativos de la industria marítima, en combinación de datos operacionales de estas flotas para definir un perfil operacional propio de estas flotas.

En esta segunda metodología se considera también, el efecto de la calidad de combustible en la eficiencia térmica de los motores diésel diferenciando los consumos específicos de los motores según empleen combustibles residuales, destilados o LNG. Además, se emplean una distribución de horas operativas de los buques gaseros actualizada con datos de 2019 así como también, se consideran más fases de viajes adicionales a las empleadas en OMI I.

Respecto a las emisiones, se consideran, además de las ya consideradas por OMI, las emisiones de carbón negro como parte del inventario de emisiones.

### 6.2.1. Consumo de combustible del motor principal

Para motores diésel de dos y cuatro tiempos, se añade en esta segunda metodología la consideración del efecto del tipo de combustible en el consumo específico del motor principal. Para este tipo de motores, la metodología para estimar su consumo de combustible es la misma que se detalla en el capítulo 6.1.1. seguida por OMI en su Tercer Estudio de GEI.

El tipo de combustible empleado es un factor importante respecto a la eficiencia de los procesos de combustión (Winnes and Fridell, 2009). Los procesos de combustión internos se estima que son 10 g/kWh más eficientes cuando son operados con combustibles destilados (DO) que cuando usan combustibles residuales (RO) (European Environment Agency, 2013). Esto se debe a que la energía neta contenida en combustibles destilados, tales como el Marine Gas Oil, MGO o, el Marine Diesel Oil, MDO, es superior a la energía neta de los combustibles residuales como el Heavy Fuel Oil, HFO. Esto hace que se requiera menos cantidad de combustible para generar la energía demandada.

Tabla 100 Consumo específico de combustible base para Motores Principales

| Edad del motor     | SSD |     | MSD |     | HSD |     |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                    | RO  | DO  | RO  | DO  | RO  | DO  |
| Antes del 1983     | 205 | 195 | 215 | 205 | 225 | 215 |
| 1984 ≤ Edad < 2000 | 185 | 175 | 195 | 185 | 205 | 195 |
| ≥ 2001             | 175 | 165 | 185 | 175 | 195 | 185 |

Fuente: Adaptado del International Maritime Organization (2014) y European Environment Agency (2013)

En el 3º Estudio de GEI de la IMO (International Maritime Organization, 2014b), debido a que la opción de motores duales no era muy extendida y que los únicos motores con inyección a gas en aquel momento eran motor duales de cuatro tiempos, que operan según el ciclo Otto, se mencionó en dicho informe que el consumo específico de gas (LNG) para esto motores se asumía de 166 g/kWh tal y como se menciona en el capítulo 6.1.1. Este valor fue empleado por

OMI como un valor constante, no dependiente de la carga del motor. En esta segunda metodología, se ha hecho un estudio más detallado de los motores duales que emplean combustibles líquidos (RO y DO) y también gas (LNG), donde se definen los consumos de combustibles según la carga de los motores y combustibles empleados.

Además de las consideraciones sobre el tipo de combustible empleado para calcular el consumo de combustible de manera correcta, otra novedad que se incluye en esta segunda metodología y que ya se ha introducido en el párrafo anterior, es el análisis más desagregado de los distintos tipos de propulsión empleados en la flota de LNG y LPG.

Mientras que los estudios sobre emisiones atmosféricas se centran en motores diésel de dos y cuatro tiempos, y brevemente en plantas de vapor y turbinas de gas, en esta metodología, se detalla la manera de calcular el consumo de combustible y, por lo tanto, las emisiones atmosféricas de los siguientes sistemas de propulsión:

- Motores diésel de dos tiempos
- Motores diésel de cuatro tiempos
- Motores duales de dos tiempos e inyección de gas a alta presión
- Motores duales de dos tiempos e inyección de gas a baja presión
- Motores duales de cuatro tiempos
- Plantas de vapor convencionales
- Plantas de vapor a alta presión (Ultra-Steam Plant)

Los tipos de propulsión no cubiertos en otras metodologías o cubiertos de manera parcial (sistemas indexados de la c a la g) son tratados en las siguientes subsecciones.

#### **6.2.1.1. Motor dual de dos tiempos con inyección de gas**

Aunque los motores diésel son la opción predominante dentro del transporte marítimo, cabe mencionar que en los últimos años se han desarrollado otros conceptos de motores más flexibles en cuanto a la posibilidad de usar varios tipos de combustibles, haciéndoles más eficientes al reducir las emisiones atmosféricas. Un claro ejemplo son los motores de dos y de cuatro tiempos que usa LNG como fuel, pudiendo trabajar bajo los ciclos de combustión Diesel y Otto.

El Tercer Estudio IMO de Gases de Efecto Invernadero del 2014 (International Maritime Organization, 2014b) asumió que todos los motores de los barcos que usan LNG como combustibles, operaban con el ciclo Otto y no relacionaron su consumo específico en función de la carga de los motores.

Las mejoras en diseños hacen que haya actualmente motores de ciclo diésel que usan también LNG como combustible, teniendo distintos factores de emisión que aquellos operando

con el ciclo Otto. Se supone que los motores de ciclo diésel que emplean LNG son aproximadamente un 20% (ver Gráfica 21) más eficientes que los que emplean el ciclo Otto aunque tienen mayores índices emisiones de NO<sub>x</sub> debido a temperaturas de combustión más altas; por otro lado, los motores de ciclo Diesel que usan LNG como combustible tienen mucho menos deslizamiento de metano (“Methane Slip”) que los de ciclo Otto, debido a una combustión de LNG más completa con el ciclo Diesel (Livanos, Theotokatos and Pagonis, 2014; Olmer *et al.*, 2017; Stoumpos *et al.*, 2018). Además de lo mencionado anteriormente, estos motores que emplean LNG como combustible, tienen un consumo distinto al que se detalla en las tablas 88 y 90, lo cual tiene un gran impacto en la correcta estimación de las emisiones atmosféricas (Olmer *et al.*, 2017).

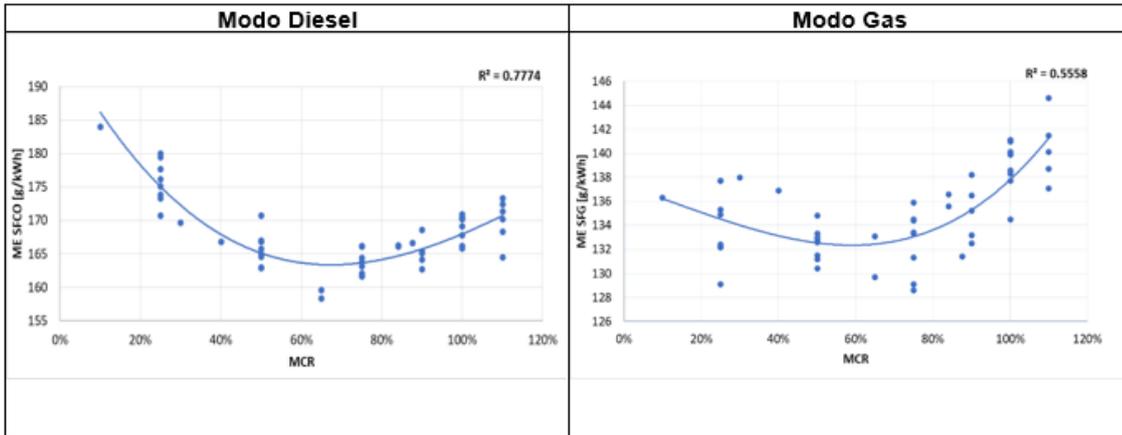
Actualmente, dos fabricantes dominan el mercado de los motores duales de dos tiempos. Estos son MAN B&W con su motor dual con inyección de gas a alta presión (modelo G70ME-C9.5-GI) y en contraposición, Winterthur Gas & Diesel (WINGD) con su motor dual con inyección de gas a baja presión (modelo W5X72DF).

Debido a que WinGD y MAN B&W usan rutas técnicas distintas, cada opción tiene sus propias ventajas y desventajas en términos de rendimiento de potencia, emisiones y economía. Los motores de baja presión tienen ciertas ventajas en términos de emisiones de NO<sub>x</sub>, sistemas de suministro de combustible de gas y costos de inversión, mientras que los motores de alta presión funcionan mejor en términos de potencia, eficiencia térmica, compatibilidad de gas y deslizamiento de metano (Tu Huan *et al.*, 2019).

De manera análoga al estudio del consumo específico de motores diésel realizado por Jalkanen *et al.*, (2012), se han analizado informes y se han obtenidos los datos de consumo de doce motores de duales de dos tiempos con inyección de gas a alta y baja presión, con el fin de aplicar una regresión, obtener el consumo específico de los motores en modo diésel y gas para cualquier régimen de carga tal y como se muestra en las gráficas de este capítulo.

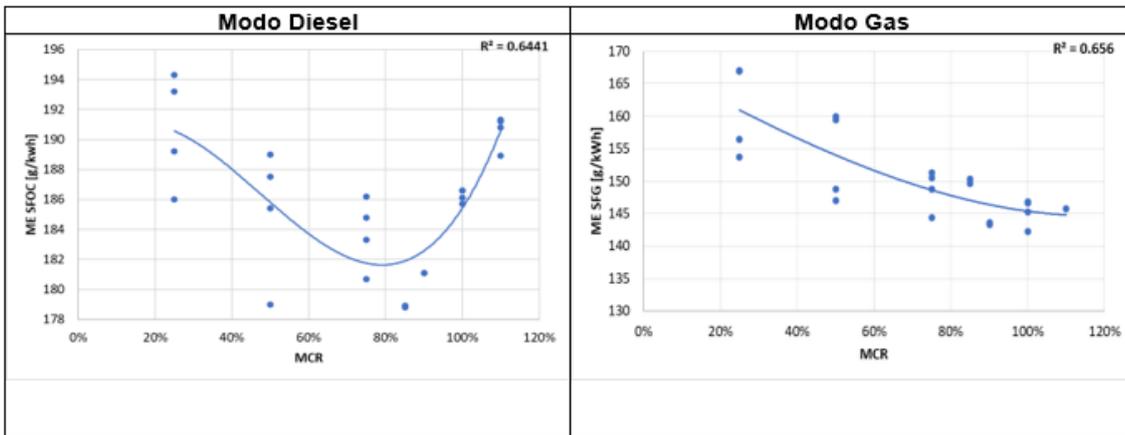
Las gráficas donde se muestra el consumo específico de los motores en modo diésel, están referenciadas a un poder calorífico inferior (PCI) de 42,7 MJ/kg, siendo esto la energía del combustible destilado estándar empleado por la Organización Internacional de estandarización (ISO), y bajo modo Gas, los resultados están empleando un PCI referencia de 50 MJ/kg (ISO, 2002). Para el cálculo de manera correcta el consumo real de combustible, hay que saber qué tipo de combustible es el empleado y cuál es el PCI de este, con el fin de obtener una estimación más precisa del consumo (Kristenen y Kristensen, 2015).

Gráfica 19 Relación consumo específico y régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión



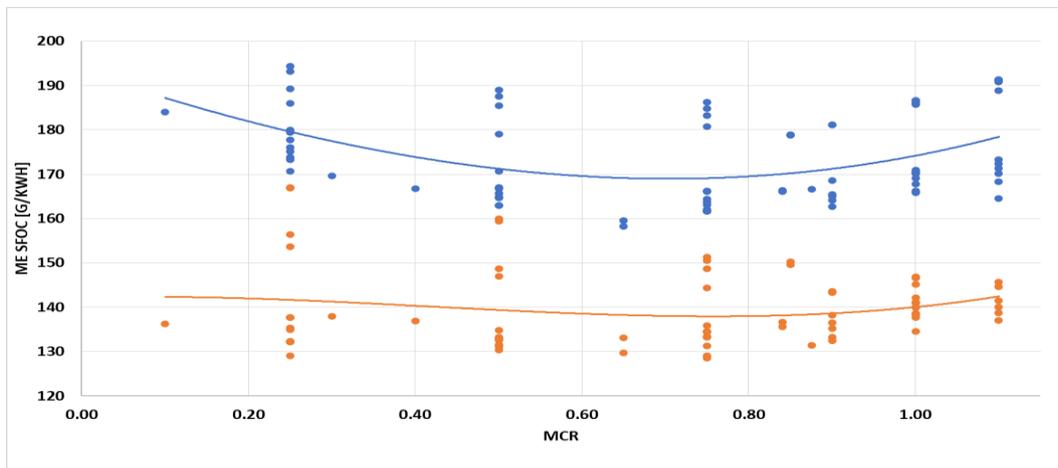
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 20 Relación consumo específico y el régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 21 Relación consumo específico y régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta y baja presión, combinando ambas tecnologías

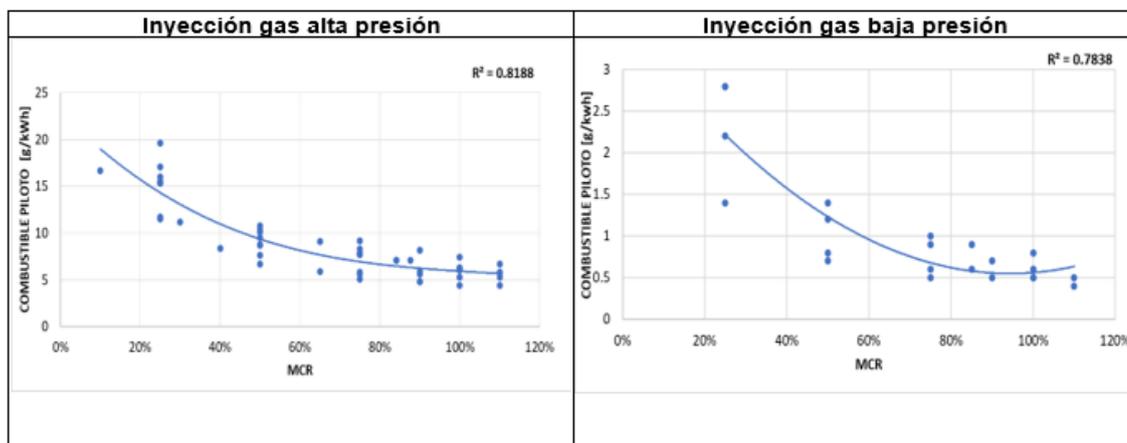


Fuente: Elaboración propia.

Azul: combustibles líquidos, naranja: combustible LNG

Los motores duales cuando operan en modo gas necesitan para la correcta combustión una pequeña cantidad de combustible líquido, ya sea residual o destilado, conocido como combustible piloto. La cantidad de combustible piloto requerido en modo gas es muy diferente según el motor inyecte el gas a alta o baja presión, tal y como muestra los resultados obtenidos de los informes de MAN B&W y WINGD (MAN, 2019; WINGD, 2020).

Gráfica 22 Consumo específico de combustible piloto y el régimen de carga para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta y baja presión en modo gas.



Fuente: Elaboración propia.

Los motores duales con inyección de gas también usan combustible piloto en modo diésel. En la Gráfica 21 esta cantidad de combustible piloto ya está incluida en el consumo total del motor, por lo tanto, el combustible piloto para modo diésel será considerado como cero.

Al aplicar la regresión polinómica de tercer orden, el consumo de los motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión queda definido por las ecuaciones 13, 14 y 15.

$$CE_{MG2AD} = \frac{(-28,788 \cdot C_f^3 + 110,94 \cdot C_f^2 - 110,29 \cdot C_f + 196,12) \cdot 42,7}{PCI_{actual,i}} \quad 13$$

Donde

$CE_{MG2AD}$ : Consumo específico combustible, modo diésel, para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{actual}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CE_{MG2AG} = \frac{(18,355 \cdot C_f^3 - 7,4254C_f^2 - 10,434 \cdot C_f + 137,32) \cdot 50}{PCI_{LNG}} \quad 14$$

Donde

$CE_{MG2AG}$ : Consumo específico combustible, modo gas, para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{LNG}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg

$$CP_{MG2AG} = \frac{(-11,988 \cdot C_f^3 + 38,303C_f^2 - 43,333 \cdot C_f + 22,949) \cdot 42,7}{PCI_{actual,i}} \quad 15$$

Donde

$CP_{MG2AG}$ : Consumo específico combustible piloto, modo gas, para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{actual}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado en Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

El consumo de combustible piloto de motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión es cero durante la operación con combustibles RO o DO.

Tabla 101 Poder Calorífico asumido por tipo de combustible

|                                   | RO                | DO                | LNG               |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Poder Calorífico Inferior (MJ/kg) | 40,2 <sup>a</sup> | 42,7 <sup>a</sup> | 50,0 <sup>e</sup> |
| Poder Calorífico Superior (MJ/kg) | 43,0 <sup>b</sup> | 45,6 <sup>c</sup> | 53,6 <sup>d</sup> |

Fuente: <sup>a</sup>International Maritime Organization, (2016b) <sup>b</sup>SNAME, (1961), <sup>c</sup>Lam, 2017), <sup>d</sup>International Gas Union, (2012), <sup>e</sup>ISO,(2016)

Habiendo establecido el consumo específico para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión dependiendo de la carga de los motores, se puede entonces obtener el consumo de combustible, tanto líquido (incluyendo el combustible piloto) como de LNG, como se muestra en la ecuación 16, 17 y 18.

$$CHF_{MG2AD} = \frac{(CE_{MG2AD,f,i} + CP_{MG2AG,f,i}) \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 16$$

Donde

$CHF_{MG2AD}$  : Consumo de combustible horario del motor principal dual de dos tiempos con inyección de gas a alta presión para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CE_{MG2AD}$  : Consumo específico de combustible (RO o DO) estimado para motores principales duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

$CP_{MG2AG}$  : Consumo de combustible piloto (RO o DO) para motores principales duales de tiempos con inyección de gas a alta presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

P: Potencia nominal del motor, kW

$$CHG_{MG2AG} = \frac{CP_{MG2AG,f} \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 17$$

Donde:

$CHG_{MG2AG}$  : Consumo de LNG horario del motor principal duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión, Toneladas/hora

$CE_{MG2AG}$  : Consumo específico de LNG estimado para motores principales duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

P: Potencia nominal del motor, kW

$$CHFP_{MG2AD} = \frac{(CP_{MG2AG,f,i}) \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 18$$

Donde:

$CHFP_{MG2AD}$  : Consumo de combustible piloto horario del motor principal dual de dos tiempos con inyección de gas a alta presión para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CP_{MG2AG}$  : Consumo de combustible piloto (RO o DO) para motores principales duales de tiempos con inyección de gas a alta presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

P: Potencia nominal del motor, kW

De igual modo que el empleado para los motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión, se obtiene el consumo específico de los motores duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión como indican las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$CE_{MG2BD} = \frac{(75,092 \cdot C_f^3 - 107,06 \cdot C_f^2 + 28,419 \cdot C_f + 188,98) \cdot 42,7}{PCI_{actual,i}} \quad 19$$

Donde

$CE_{MG2BD}$ : Consumo específico combustible, modo diésel, para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{actual}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CE_{MG2BG} = \frac{(6,2155 \cdot C_f^3 + 3,0649C_f^2 - 32,762 \cdot C_f + 168,84) \cdot 50}{PCI_{LNG}} \quad 20$$

Donde

$CE_{MG2BG}$ : Consumo específico combustible, modo gas, para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a alta presión, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{LNG}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

$$CP_{MG2BG} = \frac{(3,4734C_f^2 - 6,5516 \cdot C_f + 3,639) \cdot 42,7}{PCI_{actual,i}} \quad 21$$

Donde

$CP_{MG2BG}$ : Consumo específico combustible piloto, modo gas, para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{actual}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

Habiendo establecido el consumo específico para motores duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión, se puede entonces obtener el consumo de combustible, tanto líquido (incluyendo el cálculo del combustible piloto) como de LNG, como se muestra en la ecuación 22, 23 y 24 respectivamente.

$$CHF_{MG2BD} = \frac{(CE_{MG2BD,f,i} + CP_{MG2BG,f,i}) \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 22$$

Donde:

$CHF_{MG2BD}$  : Consumo de combustible horario del motor principal dual de dos tiempos con inyección de gas a baja presión para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CE_{MG2BD}$ : Consumo específico de combustible (RO o DO) estimado para motores principales duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

$CP_{MG2BG,f}$ : Consumo de combustible piloto (RO o DO) para motores principales duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

P: Potencia nominal del motor, kW

$$CHG_{MG2BG} = \frac{CE_{MG2BG,f} \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 23$$

Donde:

$GC_h$  : Consumo de LNG horario del motor principal dual de dos tiempos con inyección de gas a baja presión, Toneladas/hora

$CE_{MG2BG}$ : Consumo específico de LNG estimado para motores principales duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

P: Potencia nominal del motor, kW

$$CHFP_{MG2BD} = \frac{(CP_{MG2BG,f,i}) \cdot P \cdot C_f}{10^6} \quad 24$$

Donde:

$CHFP_{MG2BD}$ : Consumo de combustible piloto horario del motor principal dual de dos tiempos con inyección de gas a baja presión para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CP_{MG2AG}$ : Consumo de combustible piloto (RO o DO) para motores principales duales de dos tiempos con inyección de gas a baja presión y el régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

P: Potencia nominal del motor, kW

### 6.2.1.2. Motores duales de cuatro tiempos con inyección de gas

Dentro de la flota de LNG, aproximadamente el 30% de los buques, hasta enero del 2020, tienen como sistema de propulsión lo que se conoce como Diesel-Eléctrico.

Tradicionalmente, el sistema de propulsión en la flota de LNG ha estado dominado por plantas de vapor, desde los años 60 (K. Kim *et al.*, 2019). Sin embargo, el cambio antes mencionado en los patrones comerciales de un contrato tradicional a largo plazo a un contrato a corto plazo o en el mercado spot, requiere un mayor nivel de flexibilidad en los destinos del barco y diseños óptimos, lo que hace esencial una mejor eficiencia del combustible. Desde 2016, el cambio en el patrón de negociación es visible al observar el volumen significativamente mayor de LNG comercializado sin un largo plazo. La participación del mercado de LNG negociado sin un contrato a largo plazo en 2018 alcanzó el 31%, aproximadamente un 50% más que en 2008 (International Gas Union, 2019).

A pesar de que las plantas de vapor ofrecen algunas ventajas, como los bajos costos de mantenimiento y un diseño más simple (especialmente en la gestión del gas evaporado de los tanques de carga, BOG). Sin embargo, tienen otras desventajas, especialmente la baja eficiencia

térmica y resultando costos de transporte de carga más altos, han propiciado el desarrollo de otros sistemas de propulsión alternativos a las plantas de vapor.

Esto también está respaldado por el desarrollo de diseños de tanques de carga más eficientes, que proporcionan tasas de evaporación de la carga transportada (conocido como boil-off gas, BOG) más bajas que diseños anteriores instalados en los LNG con plantas de vapor, produciendo una cantidad insuficiente de BOG natural para desarrollar la energía requerida para la propulsión, siendo necesario complementarlo con BOG forzado o combustibles líquidos. Esto sin duda, promovió la aparición de una nueva generación de alternativas de propulsión, como los sistemas de propulsión eléctrica diésel (DFDE) (Ekanem et al., 2015; Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019b).

El BOG en los buques LNG con sistemas de propulsión DFDE puede usarse como combustible para propulsión, generación de energía eléctrica y cubrir la demanda de calefacción o desechándolo al enviarlo a la Unidad de Combustión de Gas (GCU).

La necesidad de un sistema de propulsión más eficiente térmicamente en los buques LNG hizo que en 2001 se le ordenara el buque de LNG con DFDE como sistema de propulsión, convirtiéndose en ese momento, en el reemplazo de los sistemas de propulsión tradicionales de las plantas de vapor. El DFDE también tiene otras ventajas en comparación con las plantas de vapor tradicionales, como la reducción del espacio requerido para la planta de energía, ganar espacio para el transporte de carga, es más fácil cerrar y poner en marcha la planta y, además, se incrementó la redundancia con cuatro motores principales y dos ejes de propulsión en la mayoría de los buques LNG con DFDE.

Para este trabajo de investigación, se ha tratado este tipo de motores de igual manera que se ha hecho para los motores duales de dos tiempos con inyección de gas, es decir, se han sacado las regresiones de la relación del consumo específico de combustible y la carga del motor. Para esto, se han analizado informes de pruebas de bancada de 26 motores duales de cuatro tiempos con inyección de gas, de los fabricantes Wartsila y MAN B&W, obteniéndose los siguientes resultados (ver gráficas 23 y 24).

$$CE_{GED} = \frac{(-83,931 \cdot C_f^3 + 263,02 \cdot C_f^2 - 261,84 \cdot C_f + 274,6) \cdot 42,7}{PCI_{actual,i}} \quad 25$$

Donde

$CE_{GED}$ : Consumo específico combustible, modo diésel, para motores duales de cuatro tiempos, g/kWh

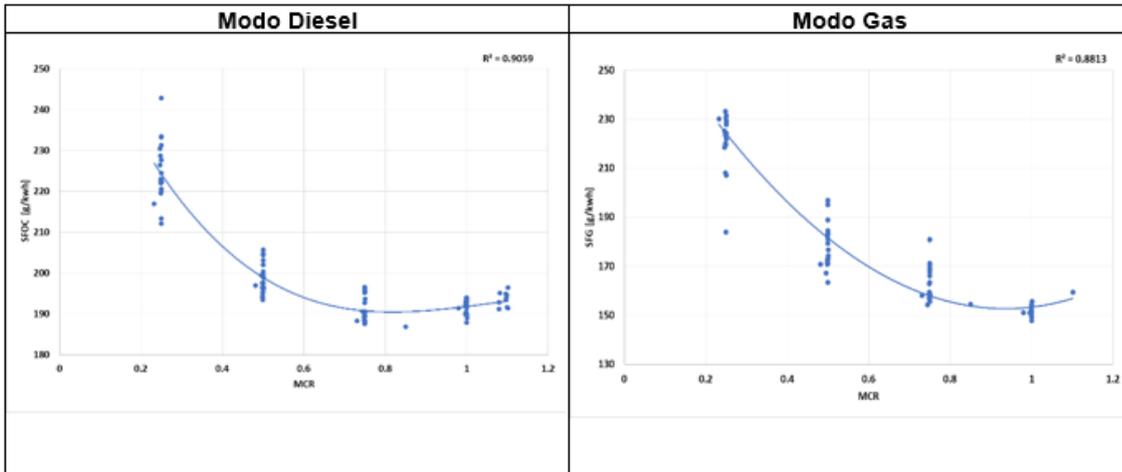
C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{actual}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

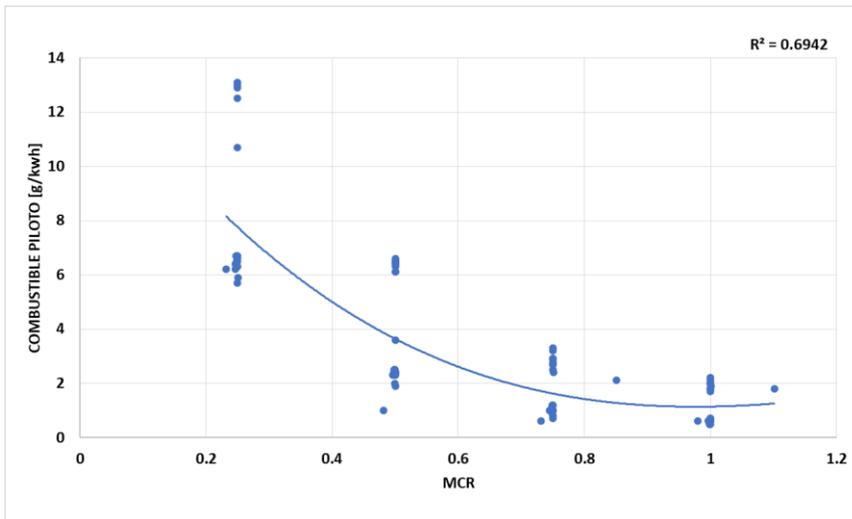
i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

Gráfica 23 Relación consumo específico y el régimen de carga para motores duales de cuatro tiempos. Modo diésel y Modo gas.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 24 Relación consumo específico de combustible piloto y el régimen de carga para motores duales de cuatro tiempos, en modo gas.



Fuente: Elaboración propia.

$$CE_{GE_G} = \frac{(152,18 \cdot C_f^2 - 284,77 \cdot C_f + 285,87) \cdot 50}{PCI_{actual,i}}$$

26

Donde

$CE_{GE_G}$ : Consumo específico combustible, modo gas, para motores duales de cuatro tiempos, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCI_{actual,i}$ : el poder calorífico inferior del combustible empleado según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CP_{GE_G} = (-6,0567 \cdot C_f^3 + 25,925C_f^2 - 33,288 \cdot C_f + 14,559) \quad 27$$

Donde

$CP_{GE_G}$ : Consumo específico combustible piloto (sólo DO), modo gas, para motores duales de cuatro tiempos, g/kWh

C: El régimen de carga del motor

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$$CHF_{GE} = \frac{(CE_{GE,f,i} + CP_{GE,f}) \cdot P_{GE} \cdot \frac{N_o}{N_a} \cdot C_f}{10^6} \quad 28$$

Donde

$CHF_{GE}$ : Consumo horario de combustible líquido del motor principal dual de cuatro tiempos, Toneladas/hora

$CE_{GE}$ : Consumo específico de combustible (RO o DO) estimado para motores duales de cuatro tiempos y para un régimen de operación determinado, g/kWh

$CP_{GE}$ : Consumo de combustible piloto (DO) para motores duales de cuatro tiempos y para un régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

$P_{GE}$ : Potencia nominal total de los motores auxiliares instalada a bordo (MCR), kW

$N_o$ : Número de motores auxiliares en operación según la Tabla 89 (buques LPG) y Tabla 113 (buques LNG)

$N_a$ : Número de motores auxiliares instalados a bordo

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CHG_{GE} = \frac{CE_{GE,f} \cdot P_{GE} \cdot \frac{N_o}{N_a} \cdot C_f}{10^6} \quad 29$$

Donde,

$CHG_{GE}$ : Consumo horario de LNG de los motores duales de cuatro tiempos, Toneladas/hora

$CE_{GE}$ : Consumo específico de LNG estimado para motores duales de cuatro tiempos y para un régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga del motor relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$P_{GE}$ : Potencia nominal total de los motores auxiliares (MCR), kW

$N_o$ : Número de motores auxiliares en operación según la Tabla 89 (buques LPG) y Tabla 113 (buques LNG)

$N_a$ : Número de motores auxiliares instalados a bordo

Los motores duales de cuatro tiempos, sólo emplean combustibles destilado (Marine Diesel Oil o Marine Gas Oil) como combustible piloto (Wartsila, 2018). Y de igual manera que los motores duales de dos tiempos, los valores están referenciados a un poder calorífico inferior (PCI) de 42,7 MJ/kg, siendo esto la energía del combustible destilado estándar empleado por la Organización Internacional de estandarización (ISO), y bajo modo Gas, los resultados están empleando un PCI referenciado de 50 MJ/kg.

En buques LNG con motores duales de dos tiempos con inyección de gas como sistema de propulsión, tienen como generadores auxiliares los motores de cuatro tiempos duales, por lo tanto, las fórmulas 28 y 29 también son empleadas para estimar el consumo de los motores auxiliares para este tipo de sistemas de propulsión.

Hay que hacer una consideración especial en aquellos buques que se emplean como sistema de propulsión el concepto diésel - eléctrico (DFDE) y los datos disponibles en la base de datos de Fairplay. En esta base de datos, la potencia instalada como motor principal es la potencia total disponible por los motores duales de cuatro tiempos (DF) instalados, lo cual no se ajusta con la realidad ya que estos buques distribuyen la energía eléctrica generada por los DF tanto para carga auxiliar (servicios auxiliares) como para la propulsión a través de unos motores eléctricos (motores de propulsión) (liquefiedgascarrier.com, 2019).

Los motores eléctricos empleados para la propulsión tienen una máxima potencia diferente a la energía eléctrica total disponible, es decir, si los DF pueden generar en total 40 MW, los motores eléctricos propulsores están diseñados para sólo producir la potencia propulsora necesaria para alcanzar la velocidad de diseño del buque, por ejemplo, 25MW.

Con el fin de establecer la relación entre los datos disponibles en la base de datos y la potencia real disponible para la propulsión, se han revisado especificaciones recibidas de 20 buques LNG con DFDE a bordo, donde se ve cual es la potencia total instalada y cuál es la potencia máxima disponible para la propulsión para distintos tamaños de buques (toneladas de peso muerto, TPM), tal y como se muestra en la Gráfica 25.

El promedio de la potencia empleada para la propulsión es de 67% de la potencia total instalada en buques DFDE. Y la relación del porcentaje de la potencia total instalada a bordo empleada para la propulsión del buque según el peso muerto del mismo, se muestra en la siguiente ecuación.

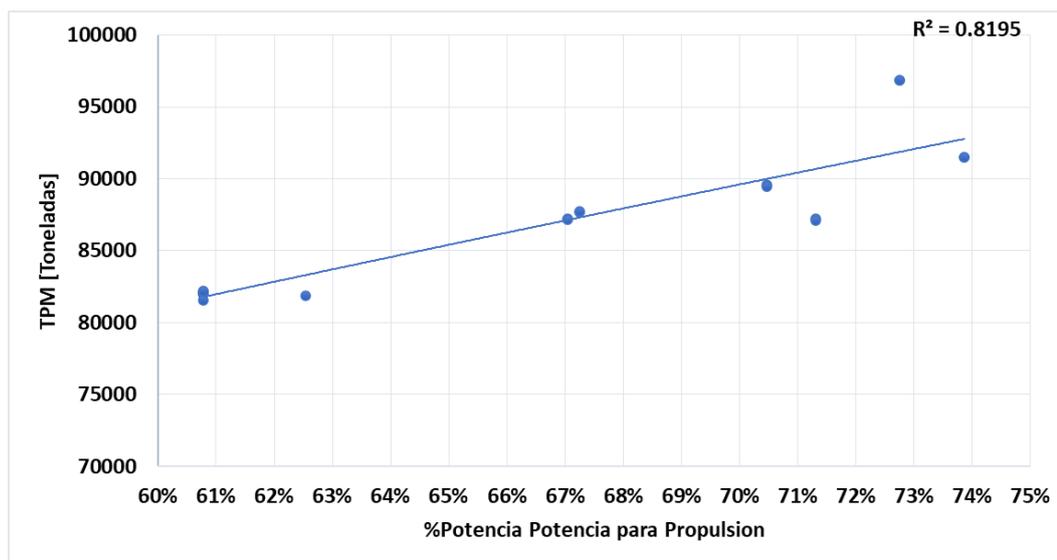
$$\%P = 112839 \cdot TPM^{0.6465}$$

Donde

%P: porcentaje de la potencia total instalada disponible para la propulsión del buque, %

TPM: Toneladas de Peso Muerto, Toneladas

Gráfica 25 Porcentaje de la potencia instalada empleada para propulsión en buques DFDE según el peso muerto.



. Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.1.3. Turbinas de vapor

Como se ha mencionado anteriormente, a fecha de este trabajo de investigación, alrededor del 45% de la flota existente de LNG tiene como sistema de propulsión turbinas de vapor, siendo estas un sistema dentro de la planta de vapor instalada a bordo.

Los sistemas de propulsión de plantas de vapor han sido históricamente la opción predominante para los buques LNG debido a su simplicidad y seguridad para la gestión de carga llevada a bordo (Chang *et al.*, 2008; Afon y Ervin, 2012; Ekanem *et al.*, 2015). La operación de la planta de vapor en los buques LNG comienza con los generadores de vapor, que son dos calderas marinas de alta presión instalada que producen VS. El VS es enviado a la planta de vapor a una presión entre 6 y 7 MPa a dos rangos de temperatura diferentes: de 310 a 340 °C, conocido como vapor de saturado utilizado para fines de calentamiento, y de 510 a 530 °C, conocido como vapor sobrecalentado (VS) que se utiliza para propulsión y generación de energía y para suministrar con la energía necesaria a otros sistemas auxiliares de la planta de vapor como las turbo-bombas de alimentación (Mrzljak *et al.*, 2017). Las calderas pueden funcionar simultáneamente con combustible residual (RO) o combustible destilado (DO) a través de un sistema de suministro de combustible regular; y a su vez empleando LNG alimentado a través de los compresores centrífugos de una etapa (Fernández *et al.*, 2017).

El vapor producido se conduce a la turbina principal para propulsión; turbogeneradores y bombas de alimentación para energía auxiliar; y evaporadores para producción de agua dulce.

Las calderas principales están equipadas con un colector de agua donde se recibe el agua de alimentación. El agua del colector pasa a través de los tubos de la caldera donde se evapora y se acumula en el colector de vapor. Debido a su presión entre 6 y 7 MPa y un rango de temperatura entre 310 y 340 °C, este vapor se llama saturado. El vapor saturado se utiliza principalmente para calentar a bordo del barco; de lo contrario, se recircula y calienta dentro de las calderas, a través de unos sobre-calentadores, para generar VS. Las calderas modernas también incluyen recalentadores donde el vapor recibido de la turbina de alta presión se recalienta de nuevo hasta aproximadamente 510 a 530 °C y se dirige a la turbina de presión intermedia, formando parte del concepto de Plantas Ultra-Steam (MHI, 2007).

Las calderas principales incluyen diferentes sistemas auxiliares que tienen un impacto en la eficiencia de las calderas, en consecuencia, tienen un impacto en la eficiencia general de la planta de vapor. Estos sistemas auxiliares pueden instalarse en las calderas o fuera de ellas, principalmente son los economizadores que calientan el agua de alimentación utilizando la energía de los gases de escape; y los calentadores de aire de vapor o de gases de escape, dependiendo de la fuente de calefacción utilizada para calentar el aire.

La línea de VS es el sistema más importante que controlar a bordo de un buque con planta de vapor; esto se debe a que el VS se utiliza para la generación eléctrica y para la propulsión. El VS de las calderas va a la turbina de vapor de alta presión donde se expande a través de diferentes etapas y luego se conduce a la turbina de vapor de baja presión, que se conecta, a través de un engranaje reductor, al eje de cola para proporcionar la potencia requerida para la propulsión. El vapor de escape de la turbina de baja presión se envía al condensador principal donde se condensa y vuelve al estado líquido, para ser recirculado como agua de alimentación para las calderas.

El VS producido en las calderas va también a los turbogeneradores (TG) para generar la energía eléctrica necesaria para hacer funcionar el barco. Cada TG está conectado directamente a un alternador para producir la energía eléctrica cuando el eje de la turbina gira, y la electricidad generada por el alternador está conectada a la red del barco. La demanda eléctrica del barco se satisface con la energía producida por los TG, además, los buques LNG tienen generadores diésel (auxiliares o de emergencia) conectados a la red del barco, como medida de seguridad, asegurando el suministro eléctrico de manera continua en caso de fallo de los TG.

Una cantidad de VS se conduce a las turbobombas de agua de alimentación (TBA) para hacer circular el agua de alimentación a través de la planta. Este sistema es una bomba de circulación movida por una turbina de vapor. Otro sistema que utiliza el VS para son los evaporadores para la producción de agua dulce a bordo.

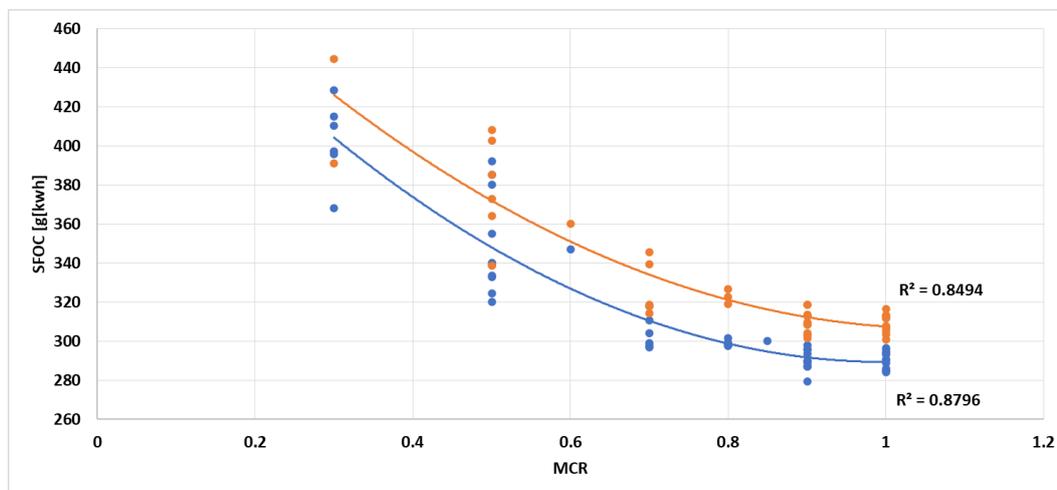
En el ciclo de la planta de vapor, las TBA y las calderas introducen en el ciclo la energía, y a través de la turbina donde, se expande el vapor y su posterior salida al condensador principal

(MC), es donde se produce el trabajo del ciclo de vapor. La presión de MC es crítica para obtener la mayor expansión posible, por lo tanto, una mayor eficiencia del ciclo. Existen varios estudios que muestran los efectos del condensador principal en la eficiencia general de la planta de vapor (Davies et al., 2018; Li y Wen, 2012; Nebot et al., 2007), por lo que es un sistema esencial para la operación óptima de la planta.

El MC recibe el vapor de escape de la turbina de baja presión y lo condensa en forma líquida. Luego, el agua condensada pasa a través de diferentes calentadores, como el calentador de la primera etapa, el desaireador, entre otros, hasta que los TBA circulan el agua hacia las calderas y el ciclo comienza nuevamente.

Finalmente, otro parámetro crítico que afecta la operación y eficiencia de la planta de vapor es la temperatura de entrada de aire a las calderas. Hay dos formas de calentar el aire antes de ingresar a las calderas. Uno mediante el uso de calentadores de aire por medio del vapor (SAH), siendo intercambiadores de calor que utilizan vapor para calentar el aire. En segundo lugar, mediante el uso de calentadores de aire por medio de los gases de escape (GAH) donde el aire se calienta por los gases de escape de las calderas.

Gráfica 26 Relación consumo específico de combustible para varios regímenes de carga para plantas de vapor, en modo gas y modo diésel



Fuente: Elaboración propia.

azul: combustible líquido, naranja: combustible LNG

En los estudios existentes, el consumo de combustible de las calderas se centra principalmente a buques con calderas auxiliares, de media y baja presión (EPA, 2009; TNO, 2010). En los estudios donde se tratan las plantas de vapor con turbinas de vapor como sistema de propulsión, calculan el consumo de combustible de estas plantas de vapor con un valor constante para el consumo de combustible (Trozzi, 2010; International Maritime Organization, 2014b), por ejemplo la OMI establece en su tercer estudio de Gases de Efecto Invernadero, que el consumo específico de las plantas de vapor es 305 g/kWh y este valor se considera constante

independientemente del régimen de carga empleado. Sin embargo, el consumo específico de las plantas de vapor también tiene un comportamiento parabólico dependiente del régimen de carga, tal y como se ha visto en este trabajo de investigación, al analizar los balances energéticos obtenidos de los principales constructores de buques LNG del mundo, Mitsubishi Heavy Industries y Kawasaki Heavy Industries en Japón, y Hyundai Heavy Industries, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering y Samsung Heavy Industries en Corea del Sur. Los resultados obtenidos de los balances energéticos se muestran en la Gráfica 26. Los valores para los consumos específicos de plantas de vapor están referenciados a 43,032 MJ/kg (SNAME, 1961) y muestran la cantidad combustible empleado para operar la planta y generar la energía para la propulsión necesaria.

$$CE_{TD} = \frac{(234,13 \cdot C_f^2 - 468,56 \cdot C_f + 523,78) \cdot 43,032}{PCS_{actual,i}} \quad 31$$

Donde

$CE_{TD}$ : Consumo específico combustible, modo diésel, para plantas de vapor, g/kWh

C: El régimen de carga de la propulsión

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra, fondeado).

$PCS_{actual}$ : el poder calorífico superior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CE_{TG} = \frac{(202,18 \cdot C_f^2 - 432,21 \cdot C_f + 537,53) \cdot 43,032}{PCS_{actual}} \quad 32$$

Donde

$CE_{TG}$ : Consumo específico combustible, modo gas, para plantas de vapor, g/kWh

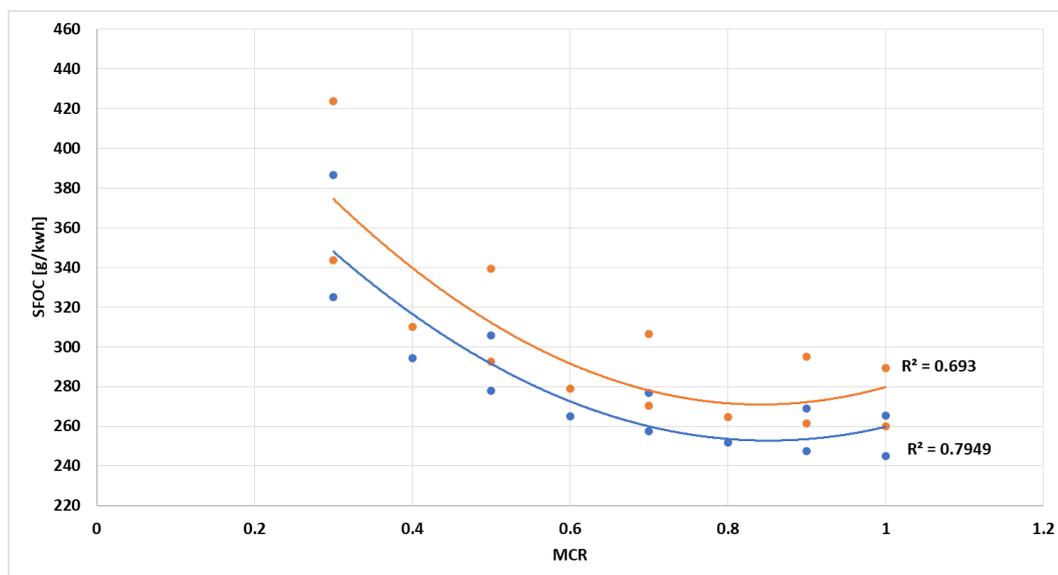
C: El régimen de carga de la propulsión

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra, fondeado).

$PCS_{actual}$ : el poder calorífico superior del LNG según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg

Los diseños más modernos de plantas de vapor que incluyen una turbina intermedia y unos recalentadores en las calderas mejorando la eficiencia de las plantas de vapor. Este diseño se conoce como *ultra-steam plant* y el concepto fue desarrollado por el astillero japonés Mitsubishi Heavy Industries (MHI, 2007). El consumo específico de estas plantas de vapor se va a calcular por separado, y se ha calculado analizando balances energéticos recibidos de Mitsubishi y Hyundai Heavy Industries, como se muestra en la Gráfica 27.

Gráfica 27 Relación consumo específico de combustible para varios regímenes de carga para plantas de vapor ultra-steam, en modo gas y modo diésel.



Fuente: Elaboración propia.

azul: combustible líquido, naranja: combustible LNG

$$CE_{TU_D} = \frac{(313,31 \cdot C_f^2 - 533,44 \cdot C_f + 479,83) \cdot 43,032}{PCS_{actual,i}} \quad 33$$

Donde

$CE_{TU_D}$ : Consumo específico combustible, modo diésel, para plantas de vapor ultra-steam, g/kWh

C: El régimen de carga de la propulsión

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCS_{actual}$ : el poder calorífico superior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CE_{TU_G} = \frac{(352,76 \cdot C_f^2 - 593,98 \cdot C_f + 520,97) \cdot 43,032}{PCS_{actual}} \quad 34$$

Donde

$CE_{TU_G}$ : Consumo específico combustible, modo gas, para plantas de vapor ultra-steam, g/kWh

C: El régimen de carga de la propulsión

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$PCS_{actual}$ : el poder calorífico superior del LNG según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg.

El consumo específico de combustible considerado es el total de la planta para producir la energía necesaria para la propulsión, pero sin considerar en dicho consumo específico la energía eléctrica producida por los turbogeneradores, siendo necesario, deducir el consumo de los turbogeneradores calculado en el capítulo 6.2.2.2.

$$CHF_T = \frac{(CE_{TD,f,i}) \cdot P_f \cdot C_f}{10^6} - CHF_{TG} \quad 35$$

$$CHF_{TU} = \frac{(CE_{TUD,f,i}) \cdot P_f \cdot C_f}{10^6} - CHF_{TG} \quad 36$$

Donde:

$CHF_T$ : Consumo de combustible horario de la planta de vapor convencional para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CHF_{TU}$ : Consumo de combustible horario de la planta de vapor Ultra-Steam para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CHF_{TG}$ : Consumo de combustible horario de los turbogeneradores para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CE_{TD}$ : Consumo específico de combustible (RO o DO) estimado para plantas de vapor convencional y para un régimen de operación determinado, g/kWh

$CE_{TUD}$ : Consumo específico de combustible (RO o DO) estimado para plantas de vapor Ultra-Steam y para un régimen de operación determinado, g/kWh

C: Régimen de carga relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

P: Potencia nominal del motor principal (MCR) entregada a la hélice, kW

$$CGH_T = \frac{CE_{TG,f} \cdot P_f \cdot C_f}{10^6} - CHG_{TG} \quad 37$$

$$CGH_{TU} = \frac{CE_{TUG,f} \cdot P_f \cdot C_f}{10^6} - CHG_{TG} \quad 38$$

Donde:

$CGH_T$ : Consumo horario de LNG de plantas de vapor convencional, Toneladas/hora

$CE_{TG}$ : Consumo específico de LNG estimado para plantas de vapor convencionales y para un régimen de operación determinado, g/kWh

$CGH_T$  : Consumo horario de LNG de plantas de vapor Ultra-Steam, Toneladas/hora

$CE_{TG}$ : Consumo específico de LNG estimado para plantas de vapor Ultra-Steam y para un régimen de operación determinado, g/kWh

$CHG_{TG}$  Consumo de combustible horario de los turbogeneradores para LNG, Toneladas/hora

C: Régimen de carga relativo a la potencia nominal instalada (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

P: Potencia entregada a la hélice, kW

### 6.2.2. Consumo de combustible de los motores auxiliares

Los estudios sobre emisiones atmosféricas que se han encontrado, la estimación del consumo de combustible de los motores auxiliares tiene bastante incertidumbre ya que se basa puramente en asunciones sobre su modo de operación y tipo de combustible que se emplea (Scarborough, 2017).

Uno de los factores que influye sensiblemente en la eficiencia de los motores diésel es la calidad del combustible. Es decir, estos motores cuando emplean combustibles destilados consumen 10 g/kWh menos que cuando emplean combustibles residuales.

El consumo específico para motores auxiliares diésel de cuatro tiempos, empleados en este trabajo de investigación, empleados en esta segunda metodología para el cálculo de consumo de combustible, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 102 Consumo específico (g/kWh) estimado para los motores auxiliares.

| Tipo de combustible | $CE_{MMAA}$ |
|---------------------|-------------|
| RO                  | 225         |
| DO                  | 215         |

Fuente: Adaptado del International Maritime Organization, 2014

El consumo de combustible para los motores auxiliares es calculado como muestra la siguiente ecuación.

$$CH_{maD} = \frac{CE_{mai} \cdot P \cdot C_f \cdot \frac{N_o}{N_a}}{10^6} \quad 39$$

Donde:

$CH_{ma}$ : consumo horario de combustible motores auxiliares diésel, ton/h

$CE_{ma}$ : Consumo específico para los motores auxiliares g/kWh, Tabla 102

P: Potencia nominal total de los motores auxiliares, kW

C: Régimen de carga del motor expresado en tanto por 1

$N_o$ : Número de motores auxiliares en operación según la Tabla 89 para buques LPG y la Tabla 113 para buques LNG.

$N_a$ : Número de motores auxiliares instalados a bordo

f: fase del viaje

i: tipo de combustible (FO, DO, LNG)

Para la flota de LPG, el método empleado para el consumo de motores auxiliares es según se muestra en la ecuación 39, ya que todos los motores auxiliares instalados en la flota de LPG a fecha de este trabajo de investigación con motores diésel de cuatro tiempos y estos están bien definidos en el capítulo mencionado y es el método más empleado para estos motores en los estudios de emisiones atmosféricas de la industria marítima basados en la actividad.

Sin embargo, la flota de LNG tiene una mayor complejidad de sistemas propulsores y de suministro eléctrico a bordo. Esto no se ve reflejado en el estudio de la OMI de 2014, teniendo un impacto en la cuantificación total de emisiones.

En los buques LNG, se encuentran tres sistemas para el suministro de energía auxiliar a bordo de los buques LNG, además de los generadores de cola en los barcos que estén instaladas. Se encuentran un grupo de buques LNG que tienen instalados motores diésel de cuatro tiempos que sólo emplean combustibles líquidos (RO o DO) para los cuales, la ecuación 39 es aplicable, estos son únicamente los buques construidos desde el año 2008 para el megaproyecto catari explotado principalmente por las empresas Qatar Gas y Nakilat entre otras, donde la propulsión de los buques es por medio de motores diésel de dos tiempos sin posibilidad de emplear el BOG de los tanques de carga como combustible (el BOG en estos buques se manda a una planta de licuefacción donde se enfría y se manda de nuevo a los buques de carga como LNG). Además hay otras dos alternativas para generar la energía auxiliar necesaria para la operación de buques metaneros; los buques LNG con plantas de vapor en los que la energía auxiliar es suministrada por turbo-generadores (Mrzljak, et al., 2017), y los buques LNG cuyo sistema de propulsión son motores de dos tiempos duales o sistema Diesel-Eléctricos, en los cuales, la energía auxiliar es siempre suministrada por motores duales de cuatro tiempos (Zoolfakar *et al.*, 2014; Ekanem et al., 2015; Stoumpos *et al.*, 2018).

Por lo tanto, el consumo de combustible para la carga auxiliar para buques LNG con este tipo de motores auxiliares, se aplicará la metodología explicada en las siguientes subsecciones.

### **6.2.2.1. Motores auxiliares duales de cuatro tiempos con inyección de gas**

Este tipo de motor será la tecnología seleccionada para suministrar la energía auxiliar en todos los buques LNG cuyo sistema de propulsión son motores de dos tiempos duales o sistema Diesel-Eléctricos.

Hay que hacer una aclaración respecto a los datos obtenidos de IHS Fairplay para buques con sistemas de propulsión Diesel-Eléctrico. Para estos buques, los datos de la potencia instalada a bordo incluyen la potencia instalada para propulsión y para la carga auxiliar, por lo que se hace necesario diferenciar cuanto de esta potencia instalada es diseñada para cubrir la máxima demanda de la propulsión y cuanto para cubrir la máxima demanda de carga auxiliar. La potencia para la propulsión de media para buques convencionales de LNG (excluyendo buques LNG empleados sólo para operaciones de bunkering) va de 23 a 26 MW y la potencia instalada total va de 36 a 40 MW (IHS Markit, 2017). Dada esta particularidad, para buques con DFDE, se calcula mediante el análisis de datos operacionales de 20 buques con este sistema de propulsión (ver capítulo 6.2.1.2), la distribución de la potencia eléctrica generada para carga auxiliar y para propulsión para cada fase del viaje se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 103 Distribución de la energía para buques LNG con sistemas de propulsión DFDE.

| Fase                    | Energía Auxiliar | Energía Propulsión |
|-------------------------|------------------|--------------------|
| Navegando Total         | 16,0%            | 84,0%              |
| Navegando Slow steaming | 19,7%            | 80,3%              |
| Navegando Normal        | 12,4%            | 87,6%              |
| Maniobra                | 49,1%            | 50,9%              |
| Fondeado                | 100%             | 0%                 |
| Puerto                  | 100%             | 0%                 |

Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de consumo de combustible, la ecuación 28 en el capítulo 6.2.1.2 es aplicable.

### 6.2.2.2. Turbogeneradores

La energía eléctrica auxiliar en los buques LNG con plantas de vapor, es suministrada por los turbogeneradores (TG). Normalmente hay 2 o 3 TG instalados a bordos de estos buques, los cuales son alimentados por el vapor producido por las calderas principales. Además de estos TG, los buques con plantas de vapor llevan un motor diésel que suministraría la energía eléctrica necesaria en caso de fallo en los turbogeneradores (Fernández *et al.*, 2017).

Cada uno de los turbogeneradores tiene la capacidad de exceder la máxima demanda de energía eléctrica para cada una de las fases del viaje. Sin embargo, dada la necesidad de un mayor tiempo para arrancar un turbogenerador en vez de un motor diésel, los buques con plantas de vapor llevan dos TG en paralelo durante maniobras y en puerto y muchas veces incluso en navegación normal (Adamkiewicz y Drzewienieckij, 2013; Banaszkiwicz, 2014; Mrzljak *et al.*, 2018).

Los turbogeneradores funcionan usando el vapor producido por las calderas a alta presión y temperatura, esto implica que para saber cuál es el consumo de combustible causado por la generación de energía eléctrica auxiliar en buques con plantas de vapor, es necesario saber

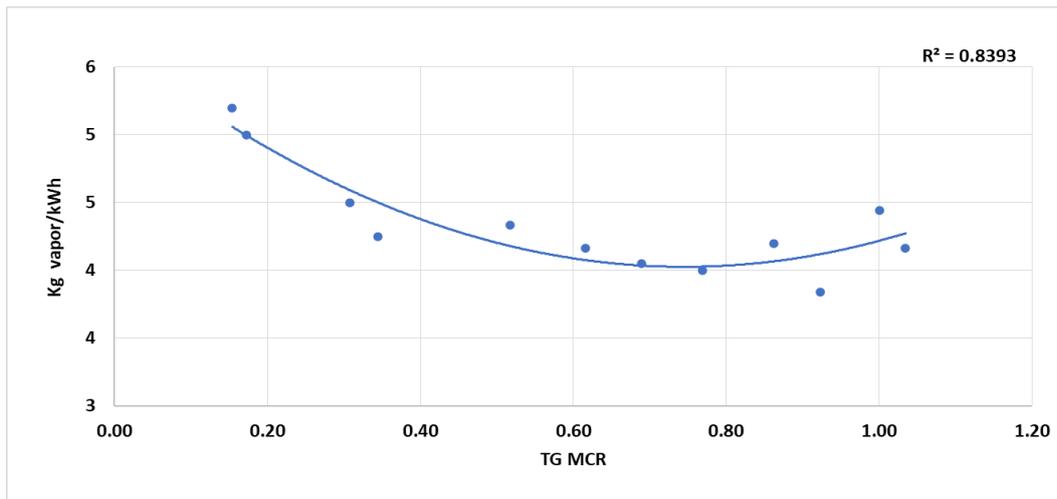
cuántos kilogramos de vapor necesitan los TG para producir un kW de energía eléctrica, y a su vez, es necesario saber cuántos kilogramos de combustible necesitan las calderas para producir un kilogramo de vapor.

Se han obtenido datos de los principales astilleros constructores de buques LNG con plantas de vapor, por lo que ha sido posible establecer la relación de la energía eléctrica producida por los TG y el consumo de combustible que necesitan para producir los kilovatios necesarios.

Después de analizar las especificaciones técnicas de las calderas principales de los fabricantes japoneses Kawasaki y Mitsubishi, se ha obtenido que las calderas necesitan una media de 0.072 kilogramos de combustible (referido al PCS referencia) para generar un kilogramo de vapor en modo diésel, mientras que en modo gas, necesitan 0.06 kilogramos de LNG para generar un kilogramo de vapor.

Según el análisis hecho sobre turbogeneradores, después de recibir el *performance sheet* de diferentes astilleros, se establece que los turbogeneradores, para distintas cargas de trabajo, necesitan la cantidad de vapor dependiente del régimen de carga.

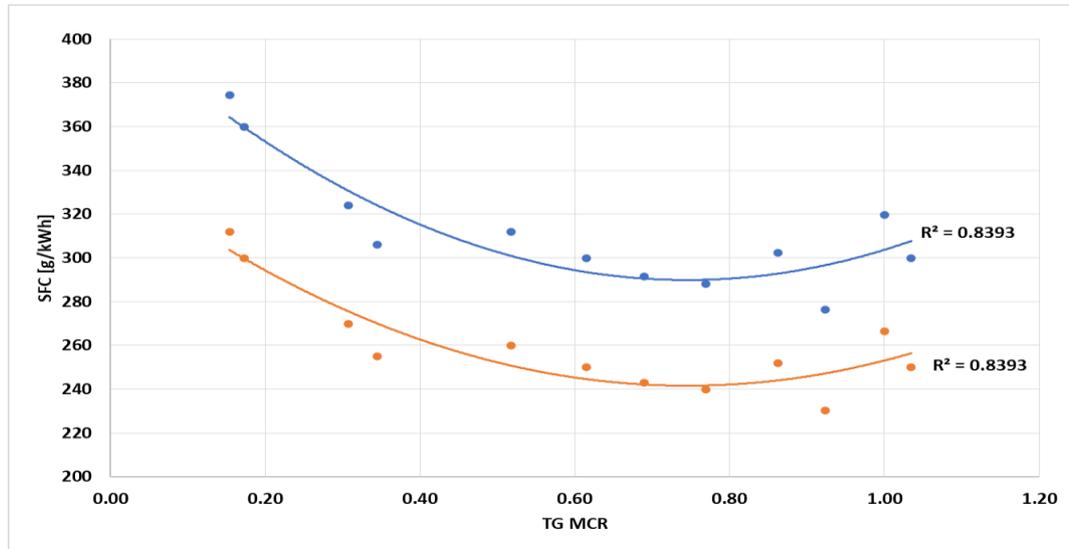
Gráfica 28 Relación consumo específico de vapor varios regímenes de carga para turbo generadores.



Fuente: Elaboración propia.

Al saber cuánto vapor necesitan los turbogeneradores para producir un kilovatio (Gráfica 28) y, sabiendo también, el combustible que se necesita para producir un kilogramo de vapor saturado en las calderas principales entonces es posible establecer un consumo específico de combustible de los turbogeneradores como muestra la Gráfica 29 y las ecuaciones 40, 41, 42 y 43.

Gráfica 29 Relación consumo específico combustible varios regimenes de carga para turbo generadores.



Fuente: Elaboración propia.

azul: combustible líquido, naranja: combustible LNG

$$CE_{TG_D} = \frac{(212,95 \cdot C_f^2 - 317,39 \cdot C_f + 408,15) \cdot 43,032}{PCS_{actual,i}} \quad 40$$

Donde

$CE_{TG_D}$ : Consumo específico combustible, modo diésel, para turbogeneradores, g/kWh

C: El régimen de carga de los turbogeneradores

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra, fondeado).

$PCS_{actual}$ : el poder calorífico superior del combustible empleado según la Tabla 101, MJ/kg

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

$$CE_{TG_G} = \frac{(177,46 \cdot C_f^2 - 264,49 \cdot C_f + 340,13) \cdot 43,032}{PCS_{actual\_LNG}} \quad 41$$

Donde

$CE_{TG_G}$ : Consumo específico combustible, modo gas, para turbogeneradores, g/kWh

C: El régimen de carga de los turbogeneradores

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra, fondeado).

$PCS_{actual,LNG}$ : el poder calorífico superior del LNG según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg

Para buques LNG con plantas de vapor ultra-steam, también se van a emplear los consumos específicos, definidos en las fórmulas 40 y 41.

El consumo horario de combustible equivalente al vapor saturado que necesitan los turbogeneradores para producir la energía auxiliar se calcula según las ecuaciones 42 y 43.

$$CHF_{TG} = \frac{(CE_{TG_D,f,i}) \cdot P_{GE_f} \cdot \frac{N_o}{N_a} \cdot C_{GE_f}}{10^6} \quad 42$$

Donde:

$CHF_{TG}$ : Consumo de combustible horario de los turbogeneradores para combustibles líquidos, Toneladas/hora

$CE_{TG_D}$ : Consumo específico de combustible (RO o DO) estimado para turbogeneradores y para un régimen de operación determinado, g/kWh

$N_o$ : Número de motores auxiliares en operación según la Tabla 104

$N_a$ : Número de motores auxiliares instalados a bordo

$C_{GE}$ : Régimen de carga relativo a la potencia disponible de los turbogeneradores (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra, fondeado).

i: tipo de combustible empleado (RO o DO)

$P_{GE}$ : Potencia nominal total (MCR) auxiliar instalada a bordo, kW

$$CHG_{TG} = \frac{(CE_{TG_G,f,i}) \cdot P_{GE_f} \cdot \frac{N_o}{N_a} \cdot C_{GE_f}}{10^6} \quad 43$$

Donde:

$CHG_{TG}$ : Consumo de horario de LNG de los turbogeneradores, Toneladas/hora

$CE_{TG_G}$ : Consumo específico de LNG estimado para turbogeneradores y para un régimen de operación determinado, g/kWh

$N_o$ : Número de motores auxiliares en operación según la Tabla 104

$N_a$ : Número de motores auxiliares instalados a bordo

$C_{GE}$ : Régimen de carga relativo a la potencia disponible de los turbogeneradores (MCR)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

$P_{GE}$ : Potencia nominal total (MCR) auxiliar instalada a bordo, kW

Tabla 104 Número de TG en operación, MCR y potencia eléctrica entregada por los TG.

| Fase del viaje            | Número de TG en operación | Régimen de Carga de los TG (% MCR) | Promedio de potencia eléctrica entregada (kW) |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|---|
| Navegando                 | 1,30                      | 41,4                               | 1.620   |
| Slow steaming             | 1,40                      | 33,5                               | 1.540   |
| Media Ponderada Navegando | 1,36                      | 35,7                               | 1.580   |
| Maniobra                  | 1,67                      | 29,1                               | 1.500   |
| Fondeado                  | 1,82                      | 29,4                               | 1.820   |
| En puerto                 | 1,76                      | 35,5                               | 1.960   |

Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.3. Consumo de combustible calderas de vapor auxiliares

El perfil operacional de las calderas auxiliares es uno de los emisores más complicados de obtener información veraz y esto hace que quede fuera de muchos inventarios de emisiones (Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2012) o bien, se usan estimaciones con un grado importante de incertidumbre dada la falta de datos (California Air Resources Board, 2011; Peeters, 2018).

Y en cierto modo, es complicado de saber la potencia de salida de las calderas, ya que esta depende de las propiedades del vapor y del agua de alimentación, lo cual requiere una gran cantidad de telemetría a bordo para capturar este parámetro (Li, 2017).

En esta segunda metodología, se han analizado 18 buques LNG que ha compartido los datos de consumo de la caldera auxiliar. La metodología seguida para definir cada fase del viaje y el método para gestionar los datos se detalla en el capítulo 6.2.5.2. La información sobre las propiedades del vapor y del agua de alimentación de las calderas no están disponible en los conjuntos de datos recibidos, sólo está disponible el consumo de combustible y el tipo de combustible empleado. De manera simplista, el cálculo de la potencia de salida de la caldera auxiliar para buques LNG se calcula como muestra la siguiente ecuación:

$$P_c = \frac{CH_{CA_i} \cdot PCI_i \cdot \frac{\varepsilon_{CA}}{100}}{3600} \quad 44$$

Donde

$P_c$ : es la potencia desarrollada por la caldera auxiliar, kW

$CH_{CA_i}$ : es el consumo de combustible horario de la caldera auxiliar medido por caudalímetros a bordo de los buques, kg/h

PCI: el poder calorífico inferior del combustible según se detalla en la Tabla 101, MJ/kg

$\varepsilon_{CA}$ : es la eficiencia de la caldera, %

La eficiencia de la caldera se considera un valor constante. Este valor se asume del 84% (Karthikeyan, 2014).

Tabla 105 Tiempo de operación y potencia desarrollada de la caldera auxiliar.

| Fase del Viaje            | %Tiempo Caldera Auxiliar en Operación | Potencia desarrollada por la caldera auxiliar (kW) |
|---------------------------|---------------------------------------|--|
| Navegando Normal          | 36,8                                  | 222  |
| Navegando Slow steaming   | 45,4                                  | 233  |
| Navegando media ponderada | 42,0                                  | 229  |
| Maniobra                  | 75,6                                  | 623  |
| Fondeado                  | 91,4                                  | 1.057  |
| Puerto                    | 79,0                                  | 980  |

Fuente: Elaboración propia.

Aunque se ha detectado en los buques analizados que durante la navegación normal y en slow steaming, las calderas auxiliares están en funcionamiento una media de 42% del tiempo, con el fin de emplear la misma asunción que en OMI respecto a la disponibilidad de tecnologías a bordo que recuperen la energía de los gases de escape para generar vapor, se va a considerar que las calderas auxiliares durante la navegación, como norma general permanecerán apagadas (Myśków y Borkowski, 2012; International Maritime Organization, 2014b).

El consumo específico de combustible de las calderas auxiliares empleado es el mismo que se detalla en el capítulo 6.1.3 para combustibles residuales (305 g/kW) y se aplica la reducción de 10 g/kWh para combustibles destilados (295 g/kWh).

Por lo tanto, el consumo de combustible de las calderas auxiliares para buques LNG en este trabajo de investigación se calcula como se muestra en la siguiente ecuación.

$$CH_{ca} = \frac{CE_{ca} \cdot P_{caf}}{10^6} \quad 45$$

Donde

$CH_{ca}$ : Consumo horario combustible para calderas auxiliares en buques LNG, Ton/h

$P_{ca}$ : Potencia de la caldera auxiliar para cada fase de viaje según Tabla 105, kW

$CE_{ca}$ : consume específico de combustible para calderas auxiliares (305 g/kWh para RO, 295 g/kWh para DO)

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra, fondeado).

i: Tipo de combustible empleado (RO o DO)

Para buques LPG, el consumo de la caldera auxiliar se va a calcular como se detalla en el capítulo 6.1.3.

Para ambas flotas (LPG y LNG) debido a que no se ha obtenido información sobre si hay calderas auxiliares a bordo de los buques o no, se asume que buques de menos de 1.000 toneladas de peso muerto no disponen de calderas auxiliares, esto se hace porque de lo contrario, algunos buques desarrollarían más potencia en la caldera auxiliar que en los motores principales para propulsión.

#### 6.2.4. Unidades de combustión de gas en buques LNG

El gas natural cambia a estado líquido (LNG) a temperaturas criogénicas y así es como se transporta en los tanques de carga de los buques LNG, operando y manteniendo unas temperaturas en los tanques de carga de aproximadamente -163 °C (Kurle et al., 2015; Migliore et al., 2015).

Sin embargo, los tanques de carga no están perfectamente aislados, haciendo que la temperatura del LNG transportado se incremente, haciendo que una parte gas transportado en forma líquida se vaporice durante el viaje. Este gas evaporado (conocido por sus siglas en inglés BOG, Boil-Off Gas) puede usarse potencialmente como combustible para los motores principales y auxiliares y / o licuarse y devolverse a los tanques de carga o desecharse en una Unidad de combustión de gas (conocido por sus siglas en inglés GCU, *Gas Combustion Unit*) (Dimopoulos et al., 2016).

El BOG es inevitable y debe de manejarse de manera eficiente para no comprometer la seguridad de los buques, ya que la presión interna de los tanques de carga deben mantenerse dentro de unos límites de seguridad determinados (Chang et al., 2008; Dimopoulos y Frangopoulos, 2008; Zanne y Grčić, 2009; D. Kim et al., 2019a).

Las alternativas para manejar el BOG son influenciadas por el tipo de propulsión empleado principalmente (Chang et al., 2008). Los buques LNG con plantas de vapor dirigen el BOG a las calderas donde es quemado, produciendo un exceso de vapor que se manda al condensador principal de la planta, sin realizar ningún trabajo. Los buques con motores diésel de dos tiempos que no pueden emplear el BOG (LNG) como combustible, llevan a bordo plantas de licuefacción, donde se envía el BOG, se vuelve a condensar a su estado líquido y se devuelve a los tanques de carga (Sinha et al., 2012). Estas plantas de licuefacción también pueden estar instaladas en buques LNG con otros tipos de propulsión distintos a motores diésel de dos tiempos (Kurle et al., 2015; Sinha et al., 2012; Tu Huan et al., 2019) aunque aún no es una práctica muy extendida.

Por lo tanto, los GCU se van a encontrar, y así es como se va a tratar en este trabajo de investigación, en aquellos buques LNG con motores duales de dos y cuatro tiempos como sistemas de propulsión (Fernández et al., 2017).

Con el fin de estimar el consumo de gas en los GCU, se han analizados datos operacionales de 24 buques LNG con este sistema instalado a bordo. La metodología seguida para definir cada fase del viaje y el método para gestionar los datos se detalla en el capítulo 6.2.5.3.

Es importante mencionar que la quema de gas en el GCU va a depender principalmente de la cantidad de BOG generado (tipo de tanque de carga, perfil operacional del buque y condiciones de la mar), de su composición (en consecuencia, la energía disponible por kilogramo de BOG) y de la velocidad del buque (a bajas velocidades el BOG generado es proporcionaría un exceso de energía en la planta propulsora, por lo que ese exceso debe quemarse en el GCU) (Zakaria et al., 2012; Kurle et al. , 2017; Krikkis, 2018).

Tabla 106 Consumo y tiempo operativo del GCU.

| Tipo de propulsión            | Fase del Viaje          | %Tiempo GCU en Operación | Consumo de LNG promedio por la GCU (Ton/h) |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|--|
| DFDE                          | Navegando Normal        | 12.5%                    | 0,222                                      |
|                               | Navegando Slow steaming | 32.0%                    | 0,662                                      |
|                               | Navegando Promedio      | 23.5%                    | 0,483                                      |
|                               | Maniobra                | 29.7%                    | 1,090                                      |
|                               | Fondeado                | 53.6%                    | 1,261                                      |
|                               | Puerto                  | 80.8%                    | 1,001                                      |
| Motores duales de dos tiempos | Navegando Normal        | 13,4%                    | 0,323                                      |
|                               | Navegando Slow steaming | 14,5%                    | 0,324                                      |
|                               | Navegando Promedio      | 14,1%                    | 0,339                                      |
|                               | Maniobra                | 40,7%                    | 0,731                                      |
|                               | Fondeado                | 8,4%                     | 0,305                                      |
|                               | Puerto                  | 83,4%                    | 0,787                                      |

Fuente: Elaboración propia.

La práctica normal de los buques LNG es minimizar el uso del GCU (en los buques con turbinas, minimizar el *dump steam*) con el fin de evitar perder carga sin que realice ningún trabajo. Normalmente, los buques durante la navegación apenas usan el GCU o esto al menos, es lo ideal y lo que buscan los operadores de buques, sin embargo, en los datos de la Tabla 106 se observa que el GCU dan un tiempo operativo promedio de entre 14 y 23% cuando los buques están navegando. Esto se debe a las características de las terminales de carga, donde a veces, el LNG es cargado a bordo de los buques a relativamente altas presiones y temperaturas haciendo necesario que durante la navegación se queme el exceso de gas en el GCU para mantener la presión interna de los tanques de carga.

En este trabajo de investigación, se asume que sólo los buques LNG con sistemas de propulsión diésel eléctricos y con motores duales de dos tiempos van a llevar GCU a bordo. Quedando el consumo anual de LNG del GCU como muestra la siguiente ecuación.

$$CAG_{GCU} = \frac{CHG_{GCU,f} \cdot H_f \cdot Op_f}{10^6} \quad 46$$

Donde:

$CAG_{GCU}$  : Consumo anual de LNG del GCU, Millones Toneladas

$CHG_{GCU}$ : Consumo horario de LNG en el GCU según la Tabla 106, Toneladas / hora

f: fase del viaje (navegando, puerto, maniobra).

H: Horas en operativas de cada buque en cada fase del viaje según la Tabla 106, horas

OP: porcentaje que GCU está en operación en cada una de las fases del viaje de acuerdo con la Tabla 106.

### 6.2.5. Perfil operacional

Las principales modificaciones que incluyen esta segunda metodología con respecto a la metodología basada en la OMI, es una mayor desagregación de los sistemas de propulsión, consideración de más fases de viajes, distribución de los tipos de combustible por cada fase, así como una actualizada distribución de horas operativas para cada flota.

El consumo anual de cada motor y caldera para cada buque es calculado como muestran las siguientes ecuaciones.

$$CA_{mp,i} = \sum (CH_{mp,f} \cdot H_f \cdot D_i) \quad 47$$

$$CA_{ma,i} = \sum (CH_{ma,f} \cdot H_f \cdot D_i) \quad 48$$

$$CA_{ca,i} = \sum (CH_{ca,f} \cdot H_f \cdot D_i) \quad 49$$

Donde

$CA_{mp}$ : Consumo anual de combustible de los motores principales, Toneladas

$CA_{ma}$ : Consumo anual de combustible de los motores auxiliares, Toneladas

$CA_{ca}$ : Consumo anual de combustible de la caldera auxiliar, Toneladas

$CH_{mp}$ : Consumo horario de combustible motores principales, Ton/h

$CH_{ma}$ : Consumo horario de combustible de los motores auxiliares, Ton/h

$CH_{ca}$ : Consumo horario de combustible de la caldera auxiliar, Ton/h

H: número de horas operativas para cada buque de acuerdo con la Tabla 107, horas

f: fases del viaje (navegando, maniobra, fondeo y puerto)

i: tipo de combustible (RO, DO, LNG)

D: Distribución de combustible empleado a bordo según Tabla 99 para buques LPG y Tabla 116 para buques LNG.

Como ya se ha mencionado anteriormente, las emisiones atmosféricas dependen en gran medida del perfil operacional de los mismos, entendiéndose como perfil operacional las horas de

operación, el tiempo empleado en cada una de las fases del viaje, la potencia empleada en cada fase y el tipo de combustible empleado.

En este subcapítulo, se va a detallar el método empleado para determinar cada uno de los factores necesarios para definir el perfil operacional de cada buque LNG y LPG, difiriendo del método empleado por OMI. Los elementos operativos de los buques gaseros que se desarrollan en esta metodología son:

- Tiempo operacional para cada una de las fases del viaje
- Distribución de combustible para la flota de LPG y LNG
- Perfil operacional de motores principales, motores y calderas auxiliares

El tiempo operacional empleado en cada una de las fases consideradas en este estudio (navegando, maniobra, fondeado y en puerto) se obtiene a través del de adaptar el empleado por OMI con otros estudios.

Una buena manera de conocer la horas operativas de los buques es a través del análisis de datos de AIS (Kano et al., 2014; Coello *et al.*, 2015a; Jalkanen et al., 2016; Smith *et al.*, 2016; Olmer *et al.*, 2017; Yu, et al., 2018a; Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019a). Desafortunadamente, estos datos de AIS no están disponibles durante la realización de esta tesis.

Por otro lado, existen algunas limitaciones sobre los datos disponibles en las bases de datos de AIS, ya que algunos datos como la distribución del uso de distintos combustibles o la potencia empleada a bordo de los buques no están disponibles en estas bases de datos. En esta segunda metodología, para los buques LNG se van a emplear datos reales de buques LNG en operación recibidos a través de un sistema de monitorización continuo, los cuales nos dan una información más precisa y transparente.

Para buques con motores diésel convencionales donde sólo queman RO o DO, la cantidad de cada uno de los combustibles empleados se va a estimar comprobando la cantidad vendida de cada uno de los combustibles a nivel global (International Maritime Organization, 2014b). Sin embargo, buques con sistemas de propulsión más flexibles, además del RO y DO pueden quemar otro tipo de combustible como el LNG. En este estudio, la flota de buques LNG tiene esta característica de, además de usar RO y DO, emplear LNG como combustible. Por lo tanto, con el fin de saber la distribución del consumo de combustible a bordo de los buques que emplean gas natural licuado, se analizan datos reales de 73 buques LNG durante dos años, con el fin de obtener la distribución de cada uno de los combustibles empleados a bordo.

Se van a considerar los tres procesos de combustión como se han mencionado anteriormente. Motores principales, cuyo fin primario es la propulsión del buque; los motores auxiliares, encargado de suministrar la energía eléctrica demandada y, por último, las calderas auxiliares que generan el vapor necesario para servicios auxiliares.

### 6.2.5.1. Actividad de la flota

En esta segunda metodología se va a adaptar las horas operativas del capítulo 6.1.4.

En ese capítulo, la Tabla 95 muestra la distribución de las horas anuales siguiente: 68.5% del tiempo los buques navegan, 0,2% del tiempo están maniobrando, 8% del tiempo en puerto y 23,3% del tiempo no están operativos.

El transporte de LNG por medio de buques, en el periodo desde 2012 hasta 2018, creció de media un 13,9% (IEA, 2019). Para la flota de LPG es más complejo dada la volatilidad de este mercado. Los datos empleados en el capítulo 6.1.4 son bastante antiguos, y dado que no existe mucha transparencia ni disponibilidad de datos para este mercado de LPG, se va a considerar que la demanda de LPG crece a una media del 3% (Danish Ship Finance, 2018). Este crecimiento en el mercado de LNG y LPG se emplea para adaptar las horas operativas de dichas flotas.

Para la flota de LPG, la distribución de horas anuales de la actividad de la flota será de 70,5% Navegando, 0.2% Maniobra, 8,2% Puerto y 21% no operativo. Mientras que para la flota de LNG la distribución queda 78% Navegando, 0.3% Maniobra, 9,1% Puerto y 12,6% no operativo

Considerando esta distribución y crecimiento del mercado, así como el tiempo navegando que define OMI en el Tercer Estudio de GEI para los buques gaseros según su peso muerto, los tiempos operacionales para los buques LNG y LPG son detallados en la siguiente tabla.

Tabla 107 Horas operativas de los buques gaseros

| Tipo de Buque | Peso Muerto (toneladas) | Horas Navegando (horas/año) | Horas Maniobra (horas/año) | Horas Fondeado (horas/año) | Horas Puerto (horas/año) | No Operativo (horas/año) |
|---------------|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|
| LPG           | 0-49.999                | 4.450                       | 33                         | 33                         | 1.160                    | 3.084                    |
|               | 50.000-199.000          | 6.279                       | 21                         | 21                         | 746                      | 1692                     |
| LNG           | 200.000 -               | 6.848                       | 25                         | 25                         | 891                      | 970                      |
|               | 0-49.999                | 4.920                       | 37                         | 37                         | 1.283                    | 2.520                    |
|               | 50.000-199.000          | 6.943                       | 24                         | 24                         | 825                      | 968                      |
|               | 200.000 -               | 7.573                       | 28                         | 28                         | 985                      | 146                      |

Fuente: Adaptado de International Maritime Organization, 2014a.

Se asume que los buques están el mismo tiempo fondeado que en maniobra para simplificar el proceso.

### 6.2.5.2. Régimen de carga motores principales, motores y calderas auxiliares

Una vez establecido el tiempo operacional en cada una de las fases consideradas, hay que saber cuándo están en funcionamiento y cuando no los distintos sistemas consumidores de combustible a bordo.

Además, es esencial tener en cuenta que la carga de trabajo de cada uno de estos sistemas varía según la fase en la que se encuentra el barco. Los motores principales se consideran que están apagados durante el fondeo y el atraque. Los motores auxiliares generalmente siempre

están encendidos y las calderas normalmente se encienden durante las maniobras, el atraque y el fondeo (Olmer *et al.*, 2017).

Es importante mencionar, que algunos puertos ofrecen la posibilidad de recibir energía eléctrica desde tierra para permitir que los barcos apaguen sus motores auxiliares durante su atraque en el muelle, sin embargo, en este análisis se asume que los motores auxiliares siempre están operativos en el muelle.

*Tabla 108 Operación del motor principal, motores y caldera auxiliar por fase de viaje*

| <b>Fase</b> | <b>Estado Motor Principal</b> | <b>Estado Motores Auxiliares</b> | <b>Estado Caldera Auxiliar</b> |
|-------------|-------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| Navegando   | Funcionando                   | Funcionando                      | Apagado                        |
| Fondeado    | Apagado                       | Funcionando                      | Funcionando                    |
| Maniobra    | Funcionando                   | Funcionando                      | Funcionando                    |
| Puerto      | Apagado                       | Funcionando                      | Funcionando                    |

Fuente: Olmer et al., (2017)

Con respecto a los factores de carga, estos se pueden estimar dependiendo de los modos de operación y el tipo de motor. Generalmente, los factores de carga de los motores pueden obtenerse de las siguientes fuentes e hipótesis: a) considerar los valores por defecto de otros estudios, como resultado del análisis de una flota dada; b) usar la ley de hélice (sólo para navegación) cuando hay suficiente información sobre las velocidades de los barcos; y c) modelos que consideran el efecto de las olas, la resistencia del casco, la eficiencia de la hélice y otros factores que influyen en las cargas del motor (Nunes et al., 2017).

Para la flota de LPG, debido a la falta de datos operacionales de buques para el año 2019, se asumen los mismos factores de carga que OMI, tal y como se detallan en el capítulo 6.1.4 y como se muestran en la Tabla 109.

*Tabla 109 Régimen de carga de los motores auxiliares para buques LPG (OMI II)*

| <b>Tipo de buque</b> | <b>Navegación normal</b> | <b>Slow steaming</b> | <b>Maniobra</b> | <b>Fondeo</b> | <b>Puerto</b> |
|----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------|---------------|---------------|
| Motor Auxiliar       | 30%                      | 30%                  | 50%             | 50%           | 40%           |
| Motor principal      | 80%                      | 60%                  | 20%             | 20%           | 0%            |

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al régimen de carga de los motores principales de la flota de LPG, se van a emplear los mismos factores de carga que OMI, tal y como se detallan en el capítulo 6.1.4 con la modificación del régimen de carga cuando los buques navegan en slow steaming, que se utilizara un régimen de carga en esa fase menor del 65%, asumiéndose un valor igual al 60% de MCR.

Respecto al tiempo en que los buques LPG navegan normal o en slow steaming, al no disponerse de datos operacionales de esta flota se aproxima esta distribución a partir de los calculado en los capítulos 6.2.5.3 y 0 para buques LNG, con la salvedad de que la flota de LNG dominan los contratos en time charter con puntos de carga y descarga más fijos lo que permite una mayor facilidad de ajustar los tiempos de llegada a las terminales que en los buques de LPG,

donde contratos por viaje o tramp predominan. La flota de LNG da como resultado que el 32,5% navegan normal y el 67,5% del tiempo navegan en slow steaming. En este trabajo de investigación, para los buques LPG se toman la siguiente distribución entre navegación normal y en slow steaming.

Para la flota de buques LNG se va a emplear para definir la carga de los motores principales, motores y calderas auxiliares, datos operativos de alta frecuencia (cada 15 segundos) de 73 buques LNG en servicio.

### 6.2.5.3. Datos Operacionales de buques LNG para el año 2019

Con el fin de establecer un perfil operacional más actualizado en cuanto a la operación de buques, así como a los nuevos sistemas de propulsión en buques LNG, en este trabajo de investigación se realiza un análisis de datos recibidos a alta frecuencia (disponibles cada 15 segundos) de buques que están en servicio provenientes de sistemas de monitorización continua instalados en varios buques LNG. Estos datos son recogidos a bordo de varios sensores instalados como muestra la siguiente tabla.

Tabla 110 Sensores empleados a bordo de los buques

| Variable                              | Sensor                     | Error de medida asociado |
|---------------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Potencia entregada a la hélice        | Torsiómetro                | 0.5%                     |
| Revoluciones de la hélice             | Torsiómetro                | 0.1%                     |
| Consumo de combustible liquido        | Caudalímetros volumétricos | 0.5-1.0% <sup>a</sup>    |
| Consumo de LNG                        | Caudalímetros masicos      | 0.1-0.2% <sup>a</sup>    |
| Velocidad de corredera                | Doppler o electromagnético | 3.0% <sup>b</sup>        |
| Velocidad sobre el fondo              | GPS                        | 5.0% <sup>b</sup>        |
| Potencia eléctrica de los Generadores | Kilowatt-meters            | 0.1% <sup>c</sup>        |

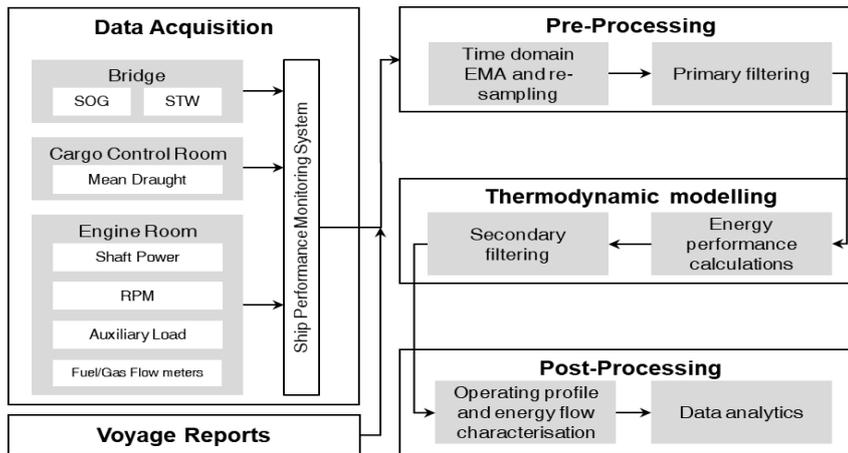
Fuentes: <sup>a</sup>Hunsucker et al., (2018); <sup>b</sup>: International Organization for Standardization, (2016); <sup>c</sup> Datum Electronics Limited, (2018)

A través del análisis de las bases de datos, se puede encontrar información y relaciones valiosas con respecto a la operación de la flota y su rendimiento (Wang *et al.*, 2017). Este estudio es construido con más de 675.000 observaciones con una frecuencia de colección de una hora, desde septiembre 2018 hasta noviembre 2019, recogidos en 73 buques LNG operados comercialmente con contratos de fletamento por tiempo.

El método se puede dividir en cinco bloques principales: Adquisición de datos, Informes por viaje, preprocesamiento de datos, modelo operacional y post -procesamientos de los datos.

La adquisición de datos medidos por los sensores especificados en la Tabla 110 se hace a través del sistema de Monitoreo del rendimiento del buque (SPM), instalados en los buques LNG. El SPM recibe datos continuamente de los diferentes sistemas a bordo y promedia los datos cada 15 segundos (monitoreo continuo, CM) aplicando el método promedio móvil exponencial ponderado (EMA) entre registros como se muestra en la ecuación 50.

Figura 17 Diagrama de bloques explicativo del proceso empleado para definir el perfil operacional a partir de datos operacionales



Fuente: González Gutiérrez et al., (2020)

$$S_t = (1 - \alpha) \cdot S_{t-1} + \alpha \cdot Y_t, \quad t > 1 \quad 50$$

Donde  $S_t$  es el valor de la EMA en cualquier período de tiempo  $t$ ,  $\alpha$  representa el grado de disminución de la ponderación y la  $Y_t$  es el valor en el período de tiempo  $t$ . Finalmente, los datos de envío se anonimizan y se guardan en un archivo de valores separados por comas (csv).

Al analizar los valores de los calados medios medidos por los sensores instalados a bordo, a proa y popa de los buques, se vieron fuertes fluctuaciones en los valores recogidos debidos a los movimientos propios de los buques (por ejemplo, debido a los cabeceos de los buques), tipo de sensores – normalmente sensores de presión- y su localización, y a su falta de mantenimiento (Huang y Ye, 1999). El comportamiento errático de esta variable, visto en algunos informes de viajes, hace que definir el estado de carga del buque sea difícil. Con la finalidad de emplear los datos medidos por los sensores a bordo de la mejor manera posible, se cruzan los datos con los informes de los viajes obtenidos de AIS, mejorando la fiabilidad del sistema SPM a la hora de definir el estado de carga de los buques en cualquier instante. Los datos de AIS contienen información sobre el puerto de llegada, fecha de salida, calado medio a la llegada y salida y tiempo en puerto. Es importante mencionar que los valores de los calados medios reportados por AIS son entradas manuales hechas por las tripulaciones.

Durante esta etapa, los datos recogidos por el SPM cada 15 segundos, se agrupan en medidas por hora, a partir de una media aritmética. Esto genera una base de datos de aproximadamente 700.000 observaciones. Esta base de datos es purgada con un filtro primario, hecho manualmente, con el cual se eliminan los datos anómalos (3,57% de la base de datos original). La mayor parte de esta eliminación de datos ha sido condiciones operativas anómalas como, por ejemplo, que el barco estuviera navegando, pero ningún motor auxiliar estuviese en marcha (sin tener a bordo ningún generador de cola), o que los caudalímetros no midiesen combustible para los motores cuando estos estaban funcionando.

Con los parámetros definidos en la Tabla 110 se define cual es la carga de los motores en cada una de las fases del viaje, así como cuál es la distribución de los motores auxiliares (número de ellos en operación y carga de trabajo). De igual manera y como se detallará más adelante, se va a definir también la distribución del consumo de combustible a bordo de los buques LNG, según el tipo de sistema de propulsión.

La manera de agrupar los datos en las distintas fases del viaje (entendiendo Viaje como el periodo de tiempo donde el barco realiza un viaje cargado seguido de otro en lastre), se hace empleando las expresiones lógicas que se detallan en la Tabla 111.

*Tabla 111 Expresiones lógicas para definir las fases de un viaje.*

| <b>Fase</b>   | <b>Variable</b>                 | <b>Expresión Lógica</b>                       |
|---------------|---------------------------------|---|
| Navegando     | Potencia Hélice                 | $P > 65\% \text{ MCR}$                        |
| Slow steaming | Potencia Hélice                 | $20 < P < 65\% \text{ MCR}$                   |
| Maniobra      | Potencia Hélice y Velocidad     | $v > 3 \text{ kn y } P \leq 20\% \text{ MCR}$ |
| Fondeado      | Velocidad                       | $1 \text{ kn} < v < 3 \text{ kn}$             |
| En puerto     | Velocidad y revoluciones hélice | $v < 1 \text{ kn y RPM} < 1$                  |

*Fuente:* International Maritime Organization, 2014b.

Durante los eventos de fondeado y en puerto, la utilización del motor principal es prácticamente cero. Por lo tanto, en este trabajo de investigación se va a considerar que el motor principal va a estar apagado en los eventos de “Fondeado” y “En puerto”, coincidiendo con lo propuesto por Olmer et al. (2017). La operativa asumida para los motores principales para los buques LNG según su tipo de propulsión está en la Tabla 112, y la operativa asumida para los motores auxiliares se recoge en la Tabla 113.

En el caso de no tener datos sobre los modelos o tipos de motores auxiliares, el análisis de datos realizado sobre la operación de buques LNG aporta un enfoque holístico sobre el consumo de energía auxiliar según el tipo de propulsión instalado para cada una de las fases de viaje, quedando recogido en la Tabla 114. La distribución del tiempo navegando en slow steaming o en navegación normal por tipo de sistema propulsor se muestra en la Tabla 115.

*Tabla 112 MCR empleado por el motor principal para la propulsión del buque en las distintas fases del viaje.*

| <b>Fase</b>               | <b>Turbinas</b> | <b>DFDE*</b> | <b>D2</b> | <b>G2</b> |
|---------------------------|-----------------|--------------|-----------|-----------|
| Navegando                 | 79,2%           | 70,7%        | 73,3%     | 78,0%     |
| Slow steaming             | 43,5%           | 60,0%        | 45,3%     | 40,5%     |
| Media Ponderada Navegando | 65,4%           | 64,6%        | 51,6%     | 51,1%     |
| Maniobra                  | 11,5%           | 40,4%        | 10,2%     | 14,6%     |
| Fondeado                  | 2,7%            | 23,5%        | 0,8%      | 1,3%      |
| En puerto                 | 1,8%            | 28,4%        | 0,0%      | 0,0%      |

*Fuente:* Elaboración propia.

\*En los buques con propulsión DFDE, los motores duales de cuatro tiempos tienen conectados alternadores que producen energía eléctrica. Esta energía eléctrica se emplea para suministrar la energía requerida para la propulsión y para la energía auxiliar, por esto, el MCR son más elevados en maniobra-fondeado-puerto que los otros sistemas de propulsión. Sin embargo, se observó que buques LNG con este sistema de propulsión, si observamos el MCR del sistema de propulsión de manera aislada (potencia entregada a la hélice) los valores del MCR fueron de 80.5% para “Navegación normal”, 41,4% para “Navegación Slow Steaming”, 10.2% en “Maniobra”, 3,2% para “Fondeado” y 1,2% para “Puerto”.

Tabla 113 Operativa de motores auxiliares en las distintas fases del viaje.

| Fase                      | Turbinas |         | DFDE* |         | D2    |         | G2    |         |
|---------------------------|----------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
|                           | No MA    | MCR (%) | No MA | MCR (%) | No MA | MCR (%) | No MA | MCR (%) |
| Navegando                 | 1,30     | 41,4    | 3,53  | 70,7    | 2,76  | 42,1    | 2,17  | 51,9    |
| Slow steaming             | 1,40     | 33,5    | 2,39  | 60,0    | 2,73  | 42,3    | 2,21  | 52,0    |
| Media Ponderada Navegando | 1,36     | 35,7    | 2,86  | 64,6    | 2,73  | 42,2    | 2,19  | 52,0    |
| Maniobra                  | 1,67     | 29,1    | 1,50  | 40,4    | 2,86  | 42,1    | 2,45  | 46,4    |
| Fondeado                  | 1,82     | 29,4    | 1,71  | 23,5    | 2,89  | 44,4    | 2,61  | 46,6    |
| En puerto                 | 1,76     | 35,5    | 1,22  | 28,4    | 2,38  | 34,3    | 2,66  | 47,9    |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 114 Energía auxiliar requerida por los buques gaseros.

| Fase                      | Turbinas         | DFDE             | D2               | G2               |
|---------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                           | Energía Auxiliar | Energía Auxiliar | Energía Auxiliar | Energía Auxiliar |
| Navegando                 | 1.620            | 2.793            | 6.046            | 3.303            |
| Slow steaming             | 1.540            | 2.624            | 6.092            | 3.357            |
| Media Ponderada Navegando | 1.571            | 2.988            | 6.072            | 3.345            |
| Maniobra                  | 1.500            | 2.304            | 6.059            | 3.321            |
| Fondeado                  | 1.820            | 2.481            | 6.391            | 3.562            |
| En puerto                 | 1.960            | 2.599            | 4.962            | 3.783            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: Kilovatios

Tabla 115 Distribución tiempo en navegación en los dos distintos modos considerados.

| Tipo de propulsión | Navegación Normal | Navegación en Slow steaming |
|--------------------|-------------------|-----------------------------|
|                    | T                 | 38,7%                       |
| G4                 | 41,4%             | 58,6%                       |
| D2                 | 22,4%             | 77,6%                       |
| G2                 | 27,5%             | 72,5%                       |

Fuente: Elaboración propia.

#### 6.2.5.4. Distribución del combustible empleado

Los buques LPG disponibles en este estudio sólo emplean como combustibles el residuales (HFO) y destilados (MGO/MDO). Para la flota de LPG en esta tesis, se consideran únicamente consumos de combustible residual (RO) o combustible destilado (DO), y se emplea la distribución bottom-up empleada por OMI y detallada en el capítulo 6.1.

La distribución del tipo de combustible para la flota de LPG se va a tomar los valores definidos en la Tabla 99. Sin embargo, los datos recibidos de los buques LNG en servicio muestran que, según el tipo de propulsión, la distribución de combustible es distinta. En esta metodología, la distribución de combustible por cada fase de viaje para la flota de buques LNG se emplea los porcentajes definidos en la Tabla 116.

Para las calderas auxiliares en buques LNG, como se asume que sólo emplean combustibles RO y DO, la distribución de combustible para las calderas se ponderan los resultados de la Tabla 116 dando la distribución que se muestra en la Tabla 117.

Tabla 116 Distribución consumo de combustible en buques LNG según tipo de propulsión a bordo.

| Fase                      | T         |          |           | G4        |          |           | D2        |           |          | G2        |           |           |
|---------------------------|-----------|----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|
|                           | RO        | DO       | Gas       | RO        | DO       | Gas       | RO        | DO        | Gas      | RO        | DO        | Gas       |
| Navegando                 | 22,9      | 0,5      | 76,6      | 14,3      | 1,5      | 84,2      | 99,4      | 0,6       | 0        | 12,9      | 2,8       | 84,5      |
| Slow steaming             | 17,7      | 0,5      | 81,8      | 15,3      | 2,0      | 82,7      | 98,6      | 1,4       | 0        | 13,1      | 3,5       | 83,6      |
| Media Ponderada Navegando | 19,7      | 0,5      | 79,8      | 14,1      | 1,8      | 84,2      | 98,8      | 1,2       | 0        | 12,9      | 3,3       | 84,0      |
| Maniobra                  | 26,7      | 1,2      | 72,2      | 36,9      | 4,9      | 58,2      | 84,4      | 15,6      | 0        | 12,2      | 10,3      | 78,0      |
| Fondeado                  | 35,4      | 3,1      | 61,5      | 37,3      | 16,5     | 46,2      | 64,6      | 35,4      | 0        | 12,5      | 28,3      | 59,8      |
| En puerto                 | 35,4      | 3,8      | 60,8      | 35,5      | 21,2     | 43,3      | 56,3      | 43,7      | 0        | 12,4      | 21,6      | 66,7      |
| <b>Total</b>              | <b>23</b> | <b>1</b> | <b>76</b> | <b>23</b> | <b>6</b> | <b>71</b> | <b>85</b> | <b>15</b> | <b>0</b> | <b>13</b> | <b>12</b> | <b>76</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: Porcentaje (%)

Tabla 117 Distribución consumo de combustible de las calderas auxiliares en buques LNG según tipo de propulsión.

| Fase                      | T        |          | G4          |            | D2          |             | G2          |             |
|---------------------------|----------|----------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                           | RO       | DO       | RO          | DO         | RO          | DO          | RO          | DO          |
| Navegando                 | 0        | 0        | 97,9        | 2,1        | 99,4        | 0,6         | 82,2        | 17,8        |
| Slow steaming             | 0        | 0        | 97,3        | 2,7        | 98,6        | 1,4         | 78,9        | 21,1        |
| Media Ponderada Navegando | 0        | 0        | 97,5        | 2,5        | 98,8        | 1,2         | 79,6        | 20,4        |
| Maniobra                  | 0        | 0        | 95,7        | 4,3        | 80,5        | 19,5        | 54,2        | 45,8        |
| Fondeado                  | 0        | 0        | 91,9        | 8,1        | 70,5        | 29,5        | 30,6        | 69,4        |
| En puerto                 | 0        | 0        | 90,3        | 9,7        | 56,3        | 43,7        | 36,5        | 63,5        |
| <b>Total</b>              | <b>0</b> | <b>0</b> | <b>95,8</b> | <b>4,2</b> | <b>85,0</b> | <b>15,0</b> | <b>60,0</b> | <b>40,0</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: Porcentaje (%)

### 6.3. Consumo de aceite lubricante

El aceite lubricante empleado para la lubricación de las camisas de los cilindros de motores diésel, tiene una influencia importante en las emisiones de partículas de los motores diésel, al ingresar el aceite lubricante en la cámara de combustión y en consecuencia, el parte del proceso de combustión (Kleiser, 1996; Zhang *et al.*, 2013). El aceite lubricante ingresa en la cámara de combustión por tres medios: a través de los anillos del pistón, por el sistema de ventilación del cárter y por la guía de la válvula (Tan, Li and Shen, 2018).

La proporción de emisión de partículas de los motores diésel producido por el aceite lubricante tiene una relación con la construcción y el tipo del motor, las condiciones de operación y las propiedades físicas y químicas del aceite empleado. Para limitar las emisiones, la reducción del consumo específico de aceite lubricante se convierte en un objetivo importante en el desarrollo, diseño y operación de los motores diésel (Zhang *et al.*, 2013). El consumo de aceite lubricante tiene a su vez, un impacto lineal en la cantidad de emisiones de partículas (PM) (CIMAC, 2008; Di Natale y Carotenuto, 2015).

Otro factor a tener en cuenta es el marco legislativo respecto a las emisiones atmosféricas causadas por el transporte marítimo, ya que el empleo de combustibles con mejores calidades, por lo tanto, con menor contenido de azufre (Yang *et al.*, 2012), influyen en el consumo de aceite lubricante en los motores diésel ya que las características que debe tener el aceite lubricante y el consumo específico en los cilindros son diferentes según el contenido de azufre del combustible quemado en el motor (Lack *et al.*, 2009; Langella *et al.*, 2016).

El tipo de combustible empleado define una característica del esencial, el TBN (Número Básico Total), actualmente llamado BN (Número Básico). El BN representa la reserva alcalina en miligramos de Hidróxido de Potasio que contiene un gramo de aceite. Es decir, es la capacidad que tiene el aceite para neutralizar los ácidos que se forman durante la combustión en los cilindros y que pasan a través de los anillos (blow-by) al aceite lubricante. Es más acentuado en la medida en que el combustible contiene mayor porcentaje de Azufre. Por tal razón, a mayor azufre mayor será la reserva alcalina (BN) exigido al lubricante para proteger al motor.

Tabla 118 Número Básico (BN) estimado para el aceite lubricante de cilindros según el contenido de azufre del combustible.

| Contenido de azufre del combustible | BN             |
|-------------------------------------|----------------|
| <1,5% S                             | BN 15 – BN 40  |
| ≥1,5% S                             | BN 70 – BN 100 |

Fuente: B&W, (2015)

La cantidad de aceite lubricante en los cilindros también está influenciada por el número de horas de operación de los motores. Al principio de que los motores empiecen a estar en operación, la cantidad de aceite lubricante necesario será mayor. Esto se estima que pase durante las primeras 500 horas de operación. A partir de las 500 horas, el consumo específico de aceite se considera constante.

La cantidad de aceite lubricante que se introduce en los cilindros de los motores de dos tiempos deber ser controlado con el objetivo de optimizar la cantidad del mismo empleado. Esta optimización se hace ajustando el consumo específico de aceite lubricante. El consumo específico de aceite lubricante es ajustado en función del contenido de azufre del combustible empleado, esto se conoce como “Alpha Adaptive Cylinder oil Control”, abreviadamente Alpha ACC, y se calcula como se muestra en la ecuación 51 (MAN, 2019).

$$CE_{AL_{2T}} = ACC_{factor} \cdot S \tag{51}$$

Donde

$CE_{AL_{2T}}$ : Consumo específico de aceite lubricante en los cilindros de motores diésel de dos tiempos, g/kWh

$ACC_{factor}$ : Factor Alpha Adaptive Cylinder Oil Control como muestra la Tabla 119, g/kWh

S: Contenido de azufre del combustible en uso según la Tabla 128, %

Tabla 119 Factor ACC según el contenido de azufre del combustible Motores de dos tiempos diésel

| Contenido de azufre del combustible | Factor ACC |
|-------------------------------------|------------|
| <1,5% S                             | 0,6        |
| >1,5% S                             | 0,3        |

Fuente: MAN, (2019). Unidades: g/kWh

Para combustibles con bajo contenido de azufre (donde se incluye también el LNG), el consumo específico de aceite lubricante de cilindros para motores de dos tiempos se toma como un valor constante igual a 0,6 g/kWh (MAN, 2014, 2019; MAN Diesel & Turbo, 2016)

Para estimar el consumo específico de aceite lubricante en los cilindros en motores de cuatro tiempos, se ha consultado las guías técnicas que emplean Wartsila, ya que este fabricante es uno de los líderes en el diseño de este tipo de motores. El consumo específico de aceite lubricante en cilindros va de 0,4 a 0,8 g/kWh (Wärtsilä Corporation, 2008; Wartsila, 2019b, 2019a).

En este trabajo de investigación, el consumo de aceite lubricante para motores diésel de cuatro tiempos se toma 0,8 g/kWh para combustibles de alto contenido de azufre (FO) y 0,4 g/kWh para combustibles de bajo contenido de azufre (DO y LNG).

Las emisiones de PM causadas por los aceites lubricantes quemados en los cilindros tienen unos factores de emisión de 0,183 g/kWh para combustibles residuales (FO) y de 0,074 g/kWh para combustibles destilados (DO), estos últimos se van también a considerar como tal el LNG (Eichler *et al.*, 2017).

Por último, en este trabajo de investigación para los buques con plantas de vapor como sistemas de propulsión, se va a asumir que el consumo de aceite lubricante que se quema y se mezcla con los gases de escape va a ser cero. Si bien es cierto que turbinas y demás componentes de las plantas de vapor necesitan lubricación, estos aceites y grasas que se encargan de esta tarea, no se quema, por lo tanto, no se emite a la atmósfera en forma de gases.

Tabla 120 Factor de emisión de materia particulada (PM) causadas por el consumo de aceite lubricantes en los cilindros de los motores.

| Tipo de Combustible | EF <sub>PM</sub> causados por el aceite lubricante (g/kWh) |
|---------------------|--|
| RO                  | 0,183  |
| DO                  | 0,074  |
| LNG                 | 0,074  |

Fuente: Eichler *et al.* (2017).

## 6.4. Consumo de refrigerantes a bordo

Hay una parte de las emisiones atmosféricas que no están causadas por procesos de combustión. Estas emisiones provienen en su mayor parte, de los refrigerantes empleados a bordo de los buques. Estas emisiones tienen un impacto en el agotamiento de la capa de ozono.

Los refrigerantes a bordo de los buques mercantes se emplean para mantener los frigoríficos donde se almacenan los víveres, para el aire acondicionado o para preservar la carga bajo unas condiciones térmicas definidas (Nordic Council, 2019).

Existe un marco legal que regula esta clase de refrigerantes. Se puede encontrar en la norma 12 del anexo VI de MARPOL, aquí se tratan las sustancias químicas empleadas como refrigerantes que producen agotamiento de la capa de ozono, siendo las más representativas las que se muestran a continuación:

- CFC: Estos incluyen el triclorofluorometano (CFC11), el diclorodifluorometano (CFC12) y el cloropentafluoroetano (CFC15)
- Halón (compuesto orgánico): Incluyen dos subcategorías donde se prohibió la utilización de los compuestos de primera categoría en buques con fecha de construcción del 19 de mayo de 1995 y se prohibió que los compuestos de la segunda categoría se utilizasen en buques con construcción Fecha del 1 de enero de 2020. Los compuestos del primer tipo son R11 a R13, R111 a R115 y R211 a R217 mientras que algunos de los compuestos del segundo tipo incluyen R21, R22, R31 y R271.
- Cloroformiato de Metilo
- Bromuro de metilo
- Bromoclorodifluorometano
- Bromotrifluorometano

Refrigerantes tales como el R-22 (y los pertenecientes a este grupo) el cual tenía efectos muy negativos sobre la capa de ozono, se han ido eliminando en las nuevas construcciones de buques.

IMO en su 3º Estudio de GEI de la OMI (International Maritime Organization, 2014b), se entiende que sólo los barcos construidos antes del año 2000, usan el refrigerante R-22 a fecha de este trabajo de investigación.

Los refrigerantes utilizados en buques construidos antes de 2000 se asumen como R-22 para el aire acondicionado y la refrigeración para los cálculos de las emisiones. Para los buques construidos posteriormente al año 2000, entendiendo que el refrigerante R134a se emplea para el aire acondicionado y el refrigerante R404a para refrigeración. Se supone una pérdida de refrigerante del 35% (Nordic Council, 2019) para los buques objeto de este estudio como muestra la Tabla 121.

*Tabla 121 Cantidad de refrigerantes llevados a bordo y consumidos al año por los buques gaseros*

| <b>Sistema</b>     | <b>Disponible a bordo (kg)</b> | <b>Consumido anualmente (kg)</b> |
|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|
| Aire Acondicionado | 150                            | 10                               |
| Refrigeración      | 52,5                           | 3,5                              |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b)

Las principales razones para que ocurran fugas de refrigerantes a bordo de los buques son (Schwarz y Rhiemeier, 2007):

- Exposición permanente de todo el sistema a las vibraciones de las olas

- El movimiento continuo, provoca que el movimiento de los fluidos refrigerantes adquiera mucha energía, conduciendo a daños en las partes mecánicas y causan las fugas, especialmente en las tuberías
- Hay pocos miembros de la tripulación a bordo expertos en refrigeración. Cuando el barco está en el mar durante semanas, las fugas no se reparan. Para lograr el enfriamiento, las unidades de refrigeración simplemente se rellenan con refrigerante

Otros refrigerantes como los Hexafluoruros de Azufre (SF6) o las mezclas binarias o terciarias de distintos refringentes, conocidos comúnmente como PCFs, no son analizados debido a su escasa influencia en la flota analizada.

Cada refrigerante considerado tiene un índice potencial de calentamiento global, GWP (Global Warming Potential), el cual relaciona la cantidad de refrigerante emitido con las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente.

## 6.5. Emisiones atmosféricas y contaminantes aéreos

La metodología empleada para calcular las emisiones atmosféricas elegido es el método basado en la actividad o bottom-up. Para un sólo viaje, las emisiones pueden expresarse como muestra la siguiente ecuación.

$$E_{viaje,j} = \sum_{n=1}^n E_{P,j} + E_{M,j} + E_{N,j} \quad 52$$

Donde:

$E_{viaje}$ : son las emisiones totales por viaje de cada barco, toneladas

$E_P$ : son las emisiones producidas en puerto y por viaje, toneladas

$E_M$ : son las emisiones producidas durante la maniobra y por viaje, toneladas

$E_N$ : son las emisiones producidas navegando y por viaje, toneladas

$j$ : tipo de contaminante (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, etc)

En este trabajo de investigación, se van a calcular las emisiones causadas por la flota de buques gaseros para un periodo de un año, que sirve para la creación de un inventario de emisiones para la flota de buques gaseros para el año sujeto a análisis.

$$E_T = \sum_{n=1}^n (CA_{mp,i} + CA_{ma,i} + CA_{ca,i}) \cdot EF_{j,i} \quad 53$$

Donde

$E_T$ : Emisiones anuales, toneladas

$EF$ : Factor de emisión, tonelada / tonelada combustible

$CA_{mp}$ : Consumo anual de combustible de los motores principales, Toneladas

$CA_{ma}$ : Consumo anual de combustible de los motores auxiliares, Toneladas

$CA_{ca}$ : Consumo anual de combustible de la caldera auxiliar, Toneladas

$i$ : tipo de combustible

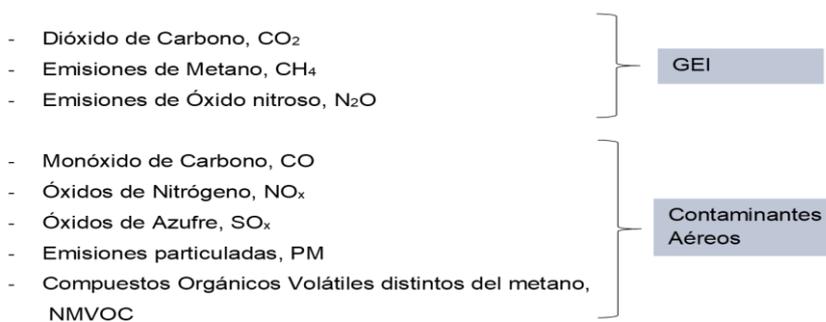
$j$ : tipo de contaminante

Exclusivamente desde una perspectiva del ciclo de vida, las emisiones del transporte marítimo son básicamente generados por los motores (principales y auxiliares) y las calderas de los barcos, que van a producir la energía suficiente para mover al buque y para generar la energía necesaria para los sistemas auxiliares del buque (Ciuffo, B y Miola, A, 2012).

OMI emplea los factores de emisión para cada contaminante junto con el consumo de energía o combustible para estimar las emisiones y pueden variar según el contaminante, el tipo de motor, el ciclo de trabajo y el combustible. Los factores de emisión empleados son basados en combustible (masa del contaminante por masa de combustible consumido).

Una vez se calcula el consumo de combustible, de aceite lubricante de cilindros y el consumo o pérdida de refrigerantes para cada buque, es posible realizar un inventario de emisiones para la flota de buques gaseros. En este trabajo de investigación, se van a emplear los contaminantes atmosféricos y contaminantes aéreos que se incluyeron en el Tercer Estudio de GEI de 2014 realizado por la OMI son:

Figura 18 Contaminantes incluidos en el Tercer Estudio de GEI de OMI.



Fuente: Elaboración propia.

Existe una diferencia en cuanto al proceso de cálculo de emisiones en aplicando la OMI I u OMI II para cuantificar los consumos de combustibles, y es que en OMI II, al realizarse de una manera más desagregada, permite el cálculo de un contaminante que no se incluye en el Tercer Estudio de GEI de la OMI, las emisiones de carbono negro. Por lo tanto, cuando se aplique la

OMI I para calcular el consumo de combustible se obtendrán los contaminantes mostrados en la Figura 18, y, cuando se aplique OMI II, se obtendrán los más las emisiones de carbono negro.

### 6.5.1. Emisiones de Dióxido de Carbono, CO<sub>2</sub>

Las emisiones de CO<sub>2</sub> son calculadas directamente en función del consumo de combustible a bordo de los buques. Aplicando la ecuación 53 y con los valores de la Tabla 122, se obtendrán la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> liberadas a la atmósfera por los buques de la flota de gaseros.

*Tabla 122 Factores de emisión de CO<sub>2</sub>*

| <b>Tipo de combustible</b> | <b>Factor de emisión</b> |
|----------------------------|--------------------------|
| RO                         | 3,114                    |
| DO                         | 3,206                    |
| LNG                        | 2,750                    |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de CO<sub>2</sub>/Tonelada combustible

### 6.5.2. Emisiones de Monóxido de Carbono, CO

Las emisiones de CO son calculadas directamente en función del consumo de combustible a bordo de los buques. Aplicando la ecuación 53 y con los valores de la Tabla 123, se obtendrán la cantidad de emisiones de CO liberadas a la atmósfera por los buques de la flota de gaseros.

*Tabla 123 Factores de emisión de CO*

| <b>Tipo de combustible</b> | <b>Factor de emisión</b> |
|----------------------------|--------------------------|
| RO                         | 0,00277                  |
| DO                         | 0,00277                  |
| LNG                        | 0,00783                  |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de CO/Tonelada combustible

### 6.5.3. Emisiones de Metano, CH<sub>4</sub>

Las emisiones de metano están principalmente relacionadas con la combustión de LNG.

La referencia que se usa en este trabajo de investigación son los factores de emisión empleados por OMI en su Tercer Estudio de GEI, en el cual, además de establecer un factor de emisión para la combustión de LNG también establece factores de emisión para la combustión de combustibles tanto residuales como destilados, por lo tanto, se van a emplear los tres factores de emisión para cada uno de los combustibles empleados a pesar que conocer que las emisiones de metano están casi únicamente relacionadas con la combustión de LNG/BOG. Los factores de emisión son constantes en el tiempo.

A partir de los factores de emisión de la Tabla 124 y la ecuación 53, se van a obtener las emisiones de este contaminante originado por la flota de gaseros.

Tabla 124 Factores de emisión CH<sub>4</sub>

| Tipo de combustible | Factor de emisión |
|---------------------|-------------------|
| RO                  | 0,00006           |
| DO                  | 0,00006           |
| LNG                 | 0,05120           |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de CH<sub>4</sub>/Tonelada combustible

#### 6.5.4. Emisiones de Óxido Nitroso, N<sub>2</sub>O

El óxido nitroso resulta de la combustión de combustibles. Sus factores de emisión son constantes en el tiempo. A partir de los factores de emisión de la Tabla 125 y la ecuación 53, se van a obtener las emisiones de este contaminante originado por la flota de gaseros.

Tabla 125 Factores de emisión N<sub>2</sub>O

| Tipo de combustible | Factor de emisión |
|---------------------|-------------------|
| RO                  | 0,00016           |
| DO                  | 0,00015           |
| LNG                 | 0,00011           |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de N<sub>2</sub>O/Tonelada combustible

#### 6.5.5. Emisiones de Óxidos de Nitrógeno, NO<sub>x</sub>

En el estudio de la OMI de 2014, existe una gran incertidumbre con estas emisiones, en especial cuando se emplea LNG.

Las emisiones de NO<sub>x</sub> en los motores diseñados para operar con ciclo Otto y quemar LNG son diferentes a las de los motores de ciclo diésel alimentados con LNG. En el período de estudio de la OMI la mayoría de los buques que usan LNG como combustible en la flota mundial no usan motores de ciclo además de que el sistema AI empleado por OMI para esta metodología no indica que combustible se quema en los barcos. Para el tercer estudio 2014 de OMI sobre GEI, se supuso que los buques que usan LNG como combustibles, operaban motores de ciclo Otto. Dependiendo de cuántos motores de combustible dual ingresen a la flota mundial, los inventarios futuros pueden necesitar ajustarse tanto a los ciclos Otto como a diésel a partir de los factores de emisión de la Tabla 126 y la ecuación 53, se van a obtener las emisiones de este contaminante originado por la flota de gaseros.

Tabla 126 Factores de emisión de NO<sub>x</sub>

| Tipo Motor (Tier) | Factores de Emisión |         |         |
|-------------------|---------------------|---------|---------|
|                   | RO                  | DO      | LNG     |
| SSD (Tier 1)      | 0,09282             | 0,08725 | 0,00783 |
| SSD (Tier 2)      | 0,08718             | 0,08195 | 0,00783 |
| SSD (Tier 3)      | 0,07846             | 0,07375 | 0,00783 |
| MSD (Tier 1)      | 0,06512             | 0,06121 | 0,00783 |
| MSD (Tier 2)      | 0,06047             | 0,05684 | 0,00783 |
| MSD (Tier 3)      | 0,05209             | 0,04896 | 0,00783 |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de NO<sub>x</sub>/Tonelada combustible

Tabla 127 Niveles de emisiones de NOx (Tier) según año de construcción del motor

| Año de construcción del buque         | Nivel |
|---------------------------------------|-------|
| Construidos antes o desde el año 2000 | 1     |
| Construidos en o desde el 2011        | 2     |
| Construidos en o desde el 2016        | 3     |

Fuente: Trozzi et al, (2019)

Para los generadores de vapor (calderas), el factor de emisión de los NO<sub>x</sub> es 0,02 Tonelada de NO<sub>x</sub>/Tonelada combustible (International Maritime Organization, 2014b). Así que con los factores de la Tabla 126, teniendo en cuenta el año de construcción de los motores (Tabla 127) y la ecuación 53, se calculan las emisiones de NO<sub>x</sub>.

### 6.5.6. Emisiones de Óxidos de Azufre, SO<sub>x</sub>

Las emisiones de SO<sub>x</sub> están directamente unidas a la calidad del combustible empleado, esto se traduce al contenido de azufre del combustible. La ecuación 54 muestra la expresión que relaciona el consumo de combustible con las emisiones de óxidos de azufre:

$$E_{SO_x} = \sum_m CA_i \cdot S_i \tag{54}$$

Donde

$E_{SO_x}$  : Emisiones de SO<sub>x</sub>, toneladas

CA: Consumo de combustible, toneladas

S: Contenido de azufre en el combustible definido en la Tabla 128

i: tipo de combustible

m: proceso de combustión (motores principales, motores y calderas auxiliares)

Tabla 128 Factores de emisión SO<sub>x</sub>

| Tipo de combustible | Contenido de Azufre (%) |
|---------------------|-------------------------|
| RO                  | 2,5                     |
| DO                  | 0,1                     |
| LNG                 | 0                       |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de SO<sub>x</sub>/Tonelada combustible

Aproximadamente el 98% del azufre del combustible se convierte en SO<sub>2</sub> gaseoso y aproximadamente el 2% del azufre se puede encontrar en emisiones de partículas (SO<sub>4</sub>) (Cooper, 2002; International Maritime Organization, 2014b).

Tabla 129 Factores de emisión de SO<sub>2</sub> y de SO<sub>4</sub>

| Emisiones de SO <sub>2</sub> | Emisiones de SO <sub>4</sub> |
|------------------------------|------------------------------|
| $E_{SO_2} \times 0,98$       | $E_{SO_2} \times 0,02$       |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b) y Cooper, (2002)

### 6.5.7. Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles distintos del metano, NMVOC

Las emisiones de NMVOC son calculadas directamente en función del consumo de combustible a bordo de los buques. Aplicando la ecuación 53 y con los valores de la Tabla 130, se obtendrán la cantidad de emisiones de NMVOC liberadas a la atmósfera por los buques de la flota de gaseros.

Tabla 130 Factores de emisión de NMVOC

| Tipo de combustible | Factor de emisión |
|---------------------|-------------------|
| RO                  | 0,00308           |
| DO                  | 0,00308           |
| LNG                 | 0,00301           |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de NMVOC/Tonelada combustible

### 6.5.8. Emisiones de Materia Particulada, PM

Las emisiones de partículas resultan de la combustión incompleta de combustibles y de la formación de partículas de sulfato, que son el resultado de las emisiones de azufre. Se asume que son constantes en el tiempo (International Maritime Organization, 2014b)

Aplicando la ecuación 53 y con los valores de la Tabla 131, se obtendrán la cantidad de emisiones de PM liberadas a la atmósfera por los buques de la flota de gaseros.

Tabla 131 Factores de emisión de PM

| Tipo de combustible | Factor de emisión |
|---------------------|-------------------|
| RO                  | 0,00728           |
| DO                  | 0,00097           |
| LNG                 | 0,00018           |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b). Unidades: Tonelada de PM/Tonelada combustible

A las emisiones de PM calculadas aplicando los factores de emisiones de la Tabla 131, hay que añadir también las emisiones de PM causadas por la quema de aceite en el interior de los cilindros (ver capítulo 6.3).

### 6.5.9. Emisiones de carbón negro

El Tercer Estudio de la OMI de GEI, sólo considera los contaminantes mencionados del capítulo 6.5.1 al capítulo 6.5.8.

Además de estas emisiones empleadas por OMI, a partir de los resultados de consumos de combustible de metodología OMI II (capítulo 6.2), se calcula además las emisiones de carbón negro. Esto se puede hacer en esta metodología gracias a la mayor desagregación de las fases de cada viaje y tipo de propulsión que se hace en la metodología OMI II comparado con OMI I.

Las emisiones de carbono negro (BC) están en foco debido a que es un aerosol que tiene la capacidad de absorber la radiación del sol y convertirla en calor. El carbono negro es parte de la fracción de carbono elemental a causa de las emisiones de PM (Messner, 2020).

La reducción del contenido de azufre en los combustibles parece aumentar la vida útil de las partículas de BC emitidas por los buques. El azufre aumenta la higroscopicidad de las partículas BC, lo que aumenta la cantidad de agua que se une a la partícula, reduciendo el tiempo antes de que la partícula se elimine de la atmósfera. Las partículas carbonosas son por sí mismas no higroscópicas, lo que significa que su vida útil en la atmósfera es larga. Por lo tanto, la reducción del contenido de azufre del combustible puede aumentar el efecto de la BC en el calentamiento global y aumentar la exposición humana a partículas de carbono elementales debido a la mayor vida útil en la atmósfera (Lack y Corbett, 2012).

La evaluación y control de emisiones de carbono negro es importante debido al impacto de este contaminante tanto en el cambio climático como en la salud de las personas (Brewer, 2019), siendo su efecto especialmente severo en las zonas árticas (Zhang *et al.*, 2019).

Este contaminante no ha sido ampliamente estudiado dentro de la industria marítima, por lo que es complicado encontrar un consenso a la hora de estimar estas emisiones en función del combustible. El factor de emisión más empleado es 0,35 g BC/kg combustible y no cambia según el combustible empleado (Corbett *et al.*, 2010; Mjelde *et al.*, 2014; Winther *et al.*, 2014).

En esta metodología, se va a emplear el método empleado por *International Council on Clean Transportation* (ICCT) para estimar el factor de emisión de este contaminante, en el que se establece una relación entre las emisiones de BC (g BC /kg combustible) el combustible empleado, la carga y tipo de motor (Tabla 132).

Para calderas, dado que no se consideran en el inventario de emisiones de ICCT, se va a considerar los factores de conversión para cada tipo de combustibles empleados por ICCT, (2017) y Corbett *et al.*, (2010); Mjelde *et al.*, (2014); Winther *et al.*, (2014) recogidos en la Tabla 133.

Tabla 132 Emisiones de BC según combustible y tipo de motor

| Tipo de Motor                               | Combustible                        | Emisiones de BC (g BC / kg combustible)           |
|---|------------------------------------|---|
| Motor Diesel 2 tiempos                      | RO                                 | $0,0382 \cdot Carga_{motor}^{-0,392}$             |
|   | DO                                 | $0,0072 \cdot Carga_{motor}^{-0,557}$             |
|   | LNG (90% reducción respecto al RO) | $(0,0382 \cdot Carga_{motor}^{-0,392}) \cdot 0,1$ |
| Motor Diesel 4 tiempos                      | RO                                 | $0,0509 \cdot Carga_{motor}^{-0,978}$             |
|   | DO                                 | $0,0243 \cdot Carga_{motor}^{-1,167}$             |
|   | LNG (90% reducción respecto al RO) | $(0,0509 \cdot Carga_{motor}^{-0,978}) \cdot 0,1$ |
| Motor Diesel 2 tiempos con inyección de gas | RO                                 | El 8,4% de las emisiones de Materia Particulada   |
|   | DO                                 | El 8,4% de las emisiones de Materia Particulada   |
|   | LNG (90% reducción respecto al RO) | El 8,4% de las emisiones de Materia Particulada   |
| Motor Duales de 4 tiempos                   | RO                                 | El 8,4% de las emisiones de Materia Particulada   |
|   | DO                                 | El 8,4% de las emisiones de Materia Particulada   |
|   | LNG (90% reducción respecto al RO) | El 8,4% de las emisiones de Materia Particulada   |

Fuente: ICCT, (2017) Unidades: Gramo de BC/kilogramo de combustible

Tabla 133 Emisiones de BC para las calderas auxiliares según combustible.

| Tipo de Motor      | Combustible                        | Emisiones de BC (g BC / kg combustible) |
|--------------------|------------------------------------|---|
| Caldera Auxiliares | RO                                 | 0,35                                    |
|                    | DO                                 | 0,35                                    |
|                    | LNG (90% reducción respecto al RO) | 0,035                                   |

Unidades: gramo de BC / kilogramo de combustible

## 6.6. Incertidumbre asociada al cálculo emisiones atmosféricas

El análisis de la incertidumbre de la metodología basada en la actividad o bottom-up para la estimación de emisiones atmosféricas empleada en este estudio, es un paso esencial para realizar un control de calidad de la información empelada para cada buque y de los resultados obtenidos (Yuan, Ng and Sou, 2016).

La principal fuente de incertidumbre en los datos del Tercer Estudio de GEI de OMI del año 2014 son las estimaciones de la potencia empleada, el consumo de combustible y la asignación del tipo de combustible empleado (International Maritime Organization, 2014b). Esta falta de certeza viene del hecho de emplear datos asumidos en vez de datos reales medidos.

Según la propia OMI, una contribución importante para reducir la incertidumbre es la observación y medición directa de los datos de los buques para evitas asunciones (International Maritime Organization, 2014b), esto es precisamente lo que se hace en esta tesis con la metodología basada en los datos operativos reales de buques LNG (OMI II).

La metodología OMI II empleada para buques LNG donde varios parámetros son obtenidos a partir del análisis estadístico de datos recogidos por un sistema de monitorización continuo a bordo de los buques, tiene un grado de incertidumbre menor que si nos basásemos sólo en datos provenientes del sistema AIS o si nos basamos sólo en datos recogidos en informe de viajes como otros estudios de emisiones atmosféricas han hecho anteriormente (International Maritime Organization, 2014b; Aldous *et al.*, 2015).

A continuación, se va a exponer brevemente las fuentes de incertidumbre que se encuentran dentro de las metodologías OMI I y OMI II para el cálculo de emisiones atmosféricas de los buques gaseros.

### **6.6.1. Incertidumbre asociada a los factores de emisión**

Tal y como explica Frey (2007), la variabilidad se refiere a la certeza de que diferentes fuentes de emisión tendrán emisiones diferentes (variabilidad entre unidades) o que las emisiones variarán con el tiempo para una fuente dada (variabilidad dentro de la unidad). La incertidumbre se refiere a la falta de conocimiento sobre el verdadero valor de una cantidad fija pero desconocida, o la verdadera distribución de la población para la variabilidad. Tanto la variabilidad como la incertidumbre dependen del tiempo promedio. Por lo general, la variabilidad de las emisiones a corto plazo (p. ej., cada hora) es mucho mayor que la de las emisiones a largo plazo (p. ej., anuales). De manera similar, la incertidumbre asociada con las emisiones a corto plazo suele ser mucho mayor que la asociada con las estimaciones a largo plazo.

Según Frey (2007), las fuentes típicas de incertidumbre en los factores de emisión son:

- Error estadístico. Es cuantificable mediante métodos estadísticos frecuentistas, suponiendo que los datos son una muestra aleatoria representativa. Por ejemplo, este tipo de error es la base para la estimación de intervalos de confianza basados en el error estándar de la media.
- Errores de medición. Cada medición puede contener errores debido a imperfecciones en los métodos analíticos y de muestreo. Las mediciones pueden tener varias combinaciones de sesgo e imprecisión.
- Falta de representatividad: esta fuente de incertidumbre es difícil de cuantificar y surge cuando las fuentes específicas que se prueban, o las condiciones bajo las cuales se prueban las fuentes, no son representativas de la situación del mundo real que afecta las emisiones para el área geográfica y el tiempo. período de interés. Además, es posible que un conjunto de datos sea representativo para un propósito, pero no para otro.
- Omisiones. A veces faltan datos debido a la pérdida temporal de la capacidad de medición. En algunos casos, se podrían utilizar métodos estadísticos para imputar valores faltantes. Otra forma común omisión es la "no detección", que es cuando un valor de medición está por debajo de la capacidad de detección del instrumento.

- Falta de datos relevantes. Esta situación ocurre cuando no hay datos relevantes y no hay una oportunidad realista o significativa de usar datos sustitutos.

Las incertidumbres en los factores de emisión suelen tener un sesgo positivo, a menos que las incertidumbres sean relativamente pequeñas (p. ej., menos de más o menos el 30 por ciento).

### **6.6.2. Incertidumbre en el cálculo del consumo de combustible específico**

En los motores principales, se considera el tipo de motor y su año de construcción del motor como parámetros que influyen en el consumo específico de combustible de los motores. Hay más factores que afectan al consumo de combustible específico de los motores y que no son conocidos, como es la degradación de los componentes del motor en sí, así como de sus componentes periféricos (Basurko y Uriondo, 2015; Cipollini *et al.*, 2018) y también, es necesario considerar las modificaciones que se han realizado en los motores con el fin de emitir menos y de optimizar la eficiencia de los procesos de combustión (Mohammed *et al.*, 2020). De igual modo, una fuente de incertidumbre es el uso de los valores y regresiones cuadráticas para estimar el consumo específico de combustible empleado valores de diseño de los buques, ya que estas se realizan en un banco de pruebas con unas condiciones controladas, habiendo alguna diferencia entre los valores obtenidos en los barcos de pruebas y los valores reales de los motores una vez instalados y funcionando a bordo de los buques (Kökkülünk, Parlak and Erdem, 2016). Estas consideraciones hacen que, al aplicar las metodologías a toda la flota, y siendo esta heterogénea en cuanto a años de construcción, operación y rutinas de mantenimiento a bordo, así como la ausencia de información acerca de modificaciones que se hayan podido hacer en los motores principales, esto hace los valores de consumo específico de combustible de tengan inherente un grado de incertidumbre asociado.

Para los motores auxiliares, además de los factores que introducen incertidumbre en los motores principales, se añade otro más, y es que a excepción de en la metodología II para los motores duales de cuatro tiempos y los turbogeneradores, no se considera la dependencia de la carga de los motores auxiliares. Aunque este factor está parcialmente cubierto por la justificación empleada en el Tercer Estudio de GEI de OMI, ya que la demanda de energía y, por ende, el régimen de carga de los motores auxiliares, generalmente se ajusta al acoplar o desacoplar varios motores auxiliares. La tripulación mantiene el rango de trabajo óptimo de los motores auxiliares y no se espera que tenga una gran variabilidad, en contraste con la carga del motor principal (International Maritime Organization, 2014b; Scarbrough, 2017). Esta consideración, si bien es cierta que se valida de manera generalizada, se ha visto en esta tesis que el régimen operacional de los motores auxiliares, en concreto en la flota de LNG varía del 29% al 70% del régimen nominal (ver Tabla 113), por lo tanto, asumir un valor constante para el consumo específico de combustible es una fuente de incertidumbre.

### **6.6.3. Incertidumbre de los regímenes de carga de motores principales y auxiliares**

El régimen de carga de los motores principales en los buques se ve influenciado por la fecha de llegada al puerto destino, por el contrato comercial con el fletador y por factores económicos (precios del combustible, navegación por áreas de emisiones controladas, etc.) (Banks *et al.*, 2013; Trivyza, Rentizelas and Theotokatos, 2016; Jafarzadeh and Schjøberg, 2018; Zaccone *et al.*, 2018).

Al tratar una flota con dos tipos de buques (LNG y LPG), con distintos tamaños, operando globalmente y bajo distintos contratos de fletamentos, la metodología I tiene una gran incertidumbre al emplear unos valores de régimen de cargas idénticos para todos los buques. Mientras que en la metodología II, esta incertidumbre se reduce en cierta manera, al considerar los tipos de buques por separado y emplear datos empíricos de buques en operación.

### **6.6.4. Incertidumbre en el cálculo del consumo de las calderas auxiliares**

Estimar el consumo de combustible de las calderas es un proceso con un alto grado de incertidumbre. Esto se debe a la ausencia de datos empíricos sobre la operación de las calderas a bordo (propiedades del vapor generado, potencia real generada, etc.). El método empleado en la metodología I y II se hace partiendo de la potencia generada por la caldera auxiliar y un consumo específico de combustible asignado a las calderas (valor constante).

Al no disponer de datos suficientes para saber el consumo específico de combustible para cada potencia, no saber de manera precisa la potencia desarrollada por la caldera en cada fase del viaje (esto se mejora en la metodología II de esta tesis), no tener una condición a la que referenciar el uso de la caldera a bordo (por ejemplo, el consumo de motor principal es función de la velocidad del buque) y no saber que sistemas de aprovechamiento energético (por ejemplo, calderas de recuperación de gases de escape) hay instalados a bordo (Goldsworthy, 2017; Goldsworthy, Enshaei and Jayasinghe, 2019), esto hace que los resultados de consumo de combustible y en consecuencia las emisiones atmosféricas producidas por las calderas auxiliares tengan un gran grado de incertidumbre.

Las emisiones atmosféricas causadas por las calderas tienen otro factor que introduce incertidumbre en la flota de LNG, ya que, en algunos buques, las calderas auxiliares están diseñadas para usar LNG como combustible y, en este trabajo de investigación, se ha asumido que sólo combustibles líquidos son empleados en las calderas auxiliares.

### 6.6.5. Incertidumbre en la distribución del consumo de distintos combustibles

Para el cálculo de emisiones basado en el tipo de combustible quemado que se emplea en este trabajo de investigación, es esencial saber qué cantidad de cada tipo de combustible ha sido empleado.

La metodología I, usa la distribución de combustible del genérica para todos los buques. Esto obvia las particularidades de los LNG y sus sistemas de propulsión y disponibilidad de los combustibles en cada una de las fases del viaje.

Los estudios que se centran en los perfiles operativos y eficiencia energética pasan por alto las diferencias matizadas de la propulsión de buques LNG y los sistemas auxiliares que conducen a algunas imprecisiones. Un ejemplo es la cuantificación de las emisiones de los buques a partir de los datos del Sistema de Identificación Automática (AIS), que es un método ampliamente aceptado basado en la actividad del buque (Kano y Namie, 2014; Coello *et al.*, 2015b; Smith *et al.*, 2016; Olmer *et al.*, 2017; Yu, Zhou *et al.*, 2018b; Moreno-Gutiérrez *et al.*, 2019a).

Para la flota de LNG, en la metodología II la distribución de combustible es calculada a partir de los análisis estadísticos de los datos reales almacenados por sistemas de monitorización continua instalados en varios buques para el año 2019, así pues, la distribución de combustible empleado en esta tesis en la metodología II, refleja una distribución de combustible con mayor grado de certeza que la metodología I, para la flota de LNG y para el año 2019.

### 6.6.6. Impacto del estado del casco de los buques en las emisiones atmosféricas

La condición del casco tiene un impacto considerable en la demanda de potencia de un barco debido a las incrustaciones marinas y crecimiento y adhesión de microorganismos (en inglés y de manera global, esto se conoce como *fouling*), haciendo que aumente la resistencia al avance del buque (resistencia friccional) (Coraddu *et al.*, 2019). Con un número de Froude bajo (velocidades bajas o longitudes de barco largas), la resistencia a la fricción es el componente más grande de la resistencia y, por lo tanto, aumenta la rugosidad del casco tienen un efecto mayor en relación con otros componentes de resistencia (Speranza *et al.*, 2019). Es decir, un aumento en la cantidad de *fouling* acumulado en el casco de un buque hará que los requerimientos de potencia para alcanzar la velocidad de servicio deseada aumenten, y en consecuencia aumente el consumo de combustible y las emisiones atmosféricas (Hydrex, 2010, 2011; Giorgiutti, Y. *et al.*, 2014; Yusim, J. y Suastika, 2018). Por lo tanto, es una preocupación de los operadores de las flotas el mitigar los efectos adversos de la acumulación del *fouling* en los cascos de los buques, poniendo especial atención en la pintura aplicada a los cascos como principal medida para contrarrestar la acumulación de *fouling* y aumentar la eficiencia operacional de los buques (Notti *et al.*, 2019; Song, D. y Atlar, 2020).

Debido a la cantidad de factores involucrados en la cuantificación de las propiedades de la superficie del casco, existe un gran grado de incertidumbre en torno a los valores que deben utilizarse para la amplitud de la rugosidad inicial del casco y el aumento posterior por año. La acumulación de fouling en el casco depende del tipo de barco, la velocidad, el patrón comercial y las distancias navegadas, el intervalo de varadas, los puertos visitados, la temperatura del mar, tipo de limpieza de casco que se haga, espesor y tipo de pintura antiincrustante (International Maritime Organization, 2014b).

En el Tercer Estudio de GEI de la OMI, la acumulación de fouling es considerado en el modelo para calcular las emisiones atmosféricas, aplicando un factor de fouling sobre la potencia demandada por buque. En ese estudio, OMI realiza una serie de asunciones basados en los trabajos de investigación de Carlton (2007) y Doulgeris et al. (2012).

Para la metodología empleada en esta tesis basado en los datos operativos reales de buques LNG (metodología III), al recibirse datos de los buques durante dos años, con periodos entre varadas distintos (desde buques recién salidos del dique hasta buques cuyos intervalos entre varadas llegaban al máximo de los 5 años) y teniendo los datos reales de la potencia entregada a la hélice y la velocidad del buque en todo momento, el efecto del fouling se incorpora de manera directa al modelo al tener estos datos medidos, además de los también tener los datos de operación del buque (asiento y calado).

#### **6.6.7. Impacto las condiciones medioambientales operación de los buques**

El impacto de las condiciones medioambientales en la operación de los buques viene principalmente definida por la resistencia adicional al avance de los buques causados por las olas y por el viento y, por lo tanto, se debe considerar la carga adicional en la hélice y los requisitos de potencia adicionales de los sistemas de propulsión de los buques causados por estos factores (International Maritime Organization, 2014b). Las olas y el viento, por lo tanto, tienen un impacto sobre la demanda de potencia para propulsar los buques, lo cual afecta al consumo de combustible y en consecuencia a las emisiones atmosféricas. OMI en su Tercer Estudio de GEI, considera en su modelo el impacto del viento y de las olas a la hora de cuantificar las emisiones atmosféricas, basándose en el trabajo de International Maritime Organization (2009) y Prpić-Oršić y Faltinsen (2012).

Para la metodología empleada en esta tesis basado en los datos operativos reales de buques LNG (metodología III), los buques navegan por todo el mundo y durante todo el año (en este caso en concreto para los dos años que se han analizado). Se asume que dado que los barcos navegan por todo el mundo en distintas rutas, el efecto de los factores medioambientales en este modelo se compensan ya que, en algunas zonas, para algunos buques y para algunos días, el viento y las olas penalizaran a los buques por sus condiciones adversas, mientras que para otros días y para otros buques en otras zonas, las condiciones medioambientales serán beneficiosas

para la operación de los buques, y dado que el periodo de la muestra analizada alcanza los dos años de datos, se asume que el efecto de los factores medioambientales en este modelo quedan compensados por la cantidad de datos analizados de diferentes buques y posiciones geográficas.

## 7. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL

La mayoría de las empresas de hoy entienden que la responsabilidad social y el uso eficiente de los recursos significan también que se producen beneficios en términos de negocio. Los líderes se han vuelto más inteligentes y rápidos para reconocer las oportunidades comerciales que surgen al conciliar crecimiento, productividad y rentabilidad con los principios básicos de sostenibilidad, los primeros en moverse saben que tendrán más opciones de tener ventajas respecto a las otras compañías a largo plazo. La última década ha visto a estas compañías hacer grandes progresos analizando los impactos negativos de sus negocios sobre el medioambiente y la sociedad, ayudando a que las empresas se enfoquen en la creación de estrategias que mitiguen tales efectos. Las estrategias y objetivos de sostenibilidad bien definidos relacionados principalmente con la producción y el uso final ya forman parte integrada del mercado global (Sustainable Shipping Initiative, 2014).

En la última década también, han surgido varias obligaciones legales nacionales y regionales a este respecto, tales como la Ley de Contabilidad de Noruega que requiere que todas las “grandes empresas”, principalmente empresas que cotizan en bolsa e instituciones financieras informen sobre sus prácticas de sostenibilidad (Berner, et al, 2013), incluyendo aspectos como políticas, prácticas y resultados relacionados con los derechos humanos, las condiciones laborales, la lucha contra la corrupción y el medio ambiente que ejecutan las empresas. Paralelamente, la Directiva de la UE sobre información no financiera de 2014 establece requisitos de información similares para las grandes empresas de la UE (Directiva 2014/95 / UE), y países como el Reino Unido y Francia también tienen requisitos de información específicos.

Estados Unidos no tiene regulaciones específicas de información no financiera, sin embargo, las audiencias recientes en la Cámara de Representantes parlamentarios y en el Senado sobre la divulgación de informes denominados “*Environmental, Social and Governance*” (ESG) acerca de la divulgación del cambio climático han despertado interés. Si bien es poco probable que la divulgación de informes ESG se regule en un futuro cercano, ya existe un requisito de divulgación en la *Securities Exchange Commission* (SEC) que dice que si las empresas determinan que los temas de ESG son relevantes para el mostrar el rendimiento financiero de las empresas, entonces estas deben considerar la publicación de los datos e informes de manera adecuada (Norges Rederiforbund, 2020).

Entre los distintos marcos de informes de sostenibilidad que se pueden encontrar, cuatro de ellos se destacan como hitos a nivel mundial en cuanto a informes, siendo aplicables independientemente de la industria y la geografía (Norges Rederiforbund, 2020):

- *Iniciativa de Información Global* (GRI por sus siglas en inglés): GRI es el marco de información internacional más utilizado para la elaboración de informes de sostenibilidad, con más del 90% de las empresas más grandes del mundo utilizando este estándar. GRI se basa en estándares internacionales como los Principios Rectores de Empresas y

- Derechos Humanos de las Naciones Unidas, el Pacto Mundial de las Naciones Unidas y las Directrices de la OCDE para empresas multinacionales.
- *Sustainability Accounting Standards Board (SASB)* tiene como objetivo ayudar a las empresas a identificar, gestionar e informar sobre los temas de sostenibilidad que más importan a sus inversores. SASB ha desarrollado 77 estándares específicos de la industria aplicables a nivel mundial que identifican el conjunto mínimo de temas de sostenibilidad financieramente importantes y sus métricas asociadas para la empresa típica en una industria.
- *Iniciativa de Información Integrada (IIRC)* por sus siglas en inglés): El marco la Información Integrada es un formato para informar sobre cómo se utilizan seis capitales: financiero, manufacturado, humano, social y de relaciones, intelectual y natural, para crear valor. El propósito de este Marco es establecer principios rectores y elementos de contenido que rigen el contenido general de un informe integrado y explicar los conceptos fundamentales que los sustentan.
- *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)*: Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la ONU, definen las prioridades y aspiraciones mundiales de desarrollo sostenible para 2030. Los ODS exigen una acción mundial entre los gobiernos, las empresas y la sociedad civil para poner fin a la pobreza y crear una vida digna y con oportunidades para todos, dentro de los límites del planeta. Si bien no es un marco de presentación de informes per se, muchas empresas se refieren a los ODS en sus informes.

Además de estos cuatro estándares sobre informes, existen otros estándares específicos por tema e industria.

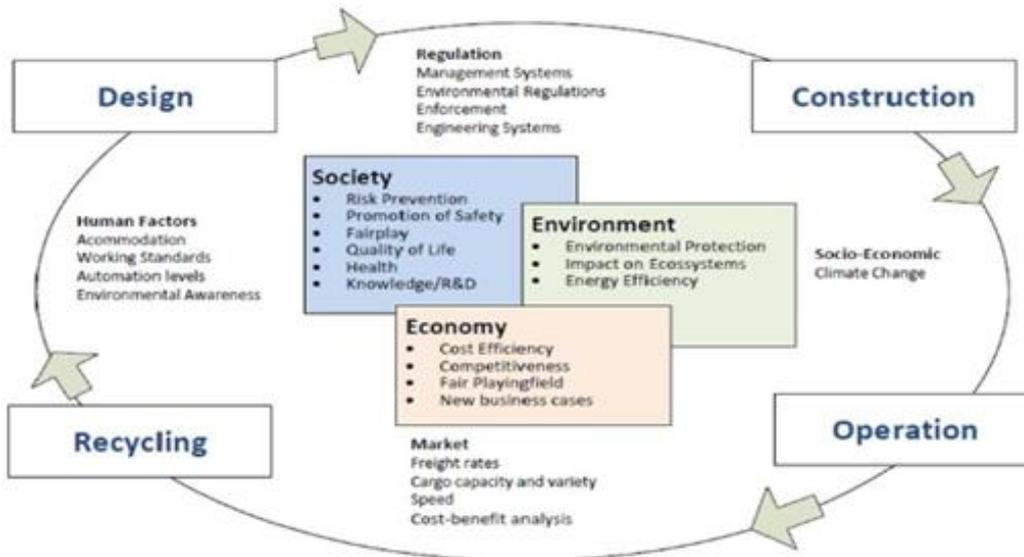
- *El Grupo de Trabajo sobre Divulgaciones Financieras Relacionadas con el Clima (TCFD)* se estableció en diciembre de 2015 para desarrollar un conjunto de divulgaciones voluntarias de riesgos financieros relacionados con el clima que permita a los inversores y al público en general conocer los riesgos que una empresa puede enfrentar relacionados con el cambio climático.
- El TCFD recomienda 11 elementos de divulgación estructurados en torno a la administración, la estrategia, la gestión de riesgos y los objetivos relacionados con los riesgos climáticos. El TCFD ha ganado un impulso considerable y ahora es el punto de referencia internacional tanto para la comunidad financiera como para los gobiernos.
- *Carbon Disclosure Project (CDP)* es el marco de presentación de informes más grande para la información climática y los analistas de la industria financiera utilizan activamente la clasificación anual de CDP. Más de 5500 empresas informan a través de CDP, y la base de datos abarca cerca de una quinta parte de las emisiones climáticas globales. CDP está respaldada por más de 800 inversores institucionales con más de 100 billones de dólares en activos bajo gestión.

- *Poseidon Principles*: Los Principios de Poseidón fueron establecidos en 2019 por 13 bancos líderes en colaboración con los principales actores de la industria. Los bancos signatarios se comprometen a mejorar el papel de las finanzas marítimas para abordar los problemas ambientales globales.
- La OMI tiene la ambición de reducir las emisiones de GEI anuales totales del transporte marítimo en al menos un 50% para el 2050, y la expectativa detrás de los Principios de Poseidón es que los signatarios que no están alineados con la trayectoria pueden querer mejorar su puntaje y la representación de su banco. Sin embargo, los Principios de Poseidón no contienen recomendaciones articuladas ni requisitos de establecimiento de objetivos relacionados con las emisiones de CO<sub>2</sub>. Incluso si varios bancos importantes para la industria del transporte marítimo se han comprometido con los principios, aún no está claro si, cuándo y cómo los perfiles de emisión de los buques afectarán los términos del crédito. Dado el mayor escrutinio del riesgo climático sobre los bancos por parte de las autoridades de supervisión financiera, es natural suponer que las evaluaciones del riesgo crediticio en el futuro intermedio incluirán perfiles de emisión; los Principios de Poseidón mejorarán la capacidad de los bancos para realizar tales evaluaciones.
- Standard para el Reciclado Responsable de Buques (RSRS): Cada año se reciclan cientos de barcos, un proceso que a menudo conlleva una contaminación ambiental significativa y riesgos para la salud de las personas. El objetivo de la iniciativa RSRS es que las compañías navieras cumplan los estándares mínimos de seguridad laboral y protección del medio ambiente al desguazar sus barcos. El RSRS trabaja para incorporar cláusulas para el desguace de buques en los contratos de fletamentos de acuerdo con estándares internacionales como el Convenio de Hong Kong. Los bancos ABN Amro, ING y NIBC establecieron los Estándares de reciclaje responsable de buques (RSRS) en 2017, y varios bancos nórdicos, como Nordea, DNB, SEB y Export Credit Norway han firmado la iniciativa.

El transporte marítimo sostenible es un concepto de gestión integral para el desarrollo sostenible de la actividad (Lai *et al.*, 2011). La sostenibilidad incluye tres pilares principales: medio ambiente, sociedad y economía, y el desarrollo del transporte marítimo sostenible es el resultado del fortalecimiento de estos tres pilares (EMSA, 2013).

Diferentes factores afectan el desarrollo de la sostenibilidad en el transporte marítimo, desde los factores regulatorios hasta los socioeconómicos, los aspectos relacionados con el mercado y los factores humanos, que en conjunto contribuyen de diferentes maneras al desarrollo de estos tres pilares. Dado que muchas partes interesadas diferentes están involucradas en el proceso, se deduce que uno de los factores críticos para apoyar el transporte marítimo sostenible es la comprensión de las preocupaciones, necesidades y expectativas de todas las partes. Los diálogos constructivos, las asociaciones, las sinergias y el "I + D" son algunos de los instrumentos claves para desarrollar el transporte marítimo sostenible (EMSA, 2013).

Figura 19 Ciclo del desarrollo sostenible del transporte marítimo.



Fuente: EMSA, (2013).

Cuando se habla de sostenibilidad ambiental se está haciendo referencia a que las relaciones que se establezcan con el medio ambiente no conlleven la destrucción de este, de modo que, estas relaciones, sean perdurables a largo plazo. Decir que una actividad es sostenible ambientalmente, es lo mismo que decir que dicha actividad tiene un impacto suficientemente pequeño sobre el medio ambiente como para no suponer la degradación de este, desde una perspectiva de los recursos naturales, ya sean enfocados a la conservación del agua, la calidad del suelo, la riqueza y diversidad animal y vegetal, etcétera.

En este trabajo de investigación, se va a evaluar la sostenibilidad medioambiental de la flota de gaseros analizando de la huella de carbono, huella ecológica, los indicadores eficiencia energética de la flota de gaseros y también empleado métricas incluidas en los informes ESG.

## 7.1. Huella de Carbono

El cálculo de la huella de carbono de una actividad, en el caso de esta tesis el transporte marítimo de la flota de LNG y LPG, consiste básicamente en recopilar los datos referentes a los consumos directos e indirectos de materiales y energía y convertirlos en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes con el fin de contar con un inventario de emisiones lo más completo posible.

La definición de la huella de carbono es compleja y no hay un consenso. La definición que se emplea en esta tesis es “La huella de carbono (HC) es una medida de la cantidad total de dióxido de carbono que es directamente e indirectamente causado por una actividad o es acumulado durante las diferentes etapas que atraviesa un producto a lo largo de su vida” (Wiedmann *et al.*, 2007). Otra definición ampliamente utilizada es la que hace Carbon Trust: “La HC estima las

emisiones totales de gases de efecto invernadero en toneladas equivalentes de carbono de un producto a lo largo de su ciclo de vida, desde la producción de las materias primas empleadas en su producción hasta la eliminación del producto acabado” (Carbon Trust, 2007).

Se observa que la mayoría de los estudios que estiman este indicador emplean el término para determinar la totalidad de emisiones de CO<sub>2</sub> u otros gases de efecto invernadero de empresas y sus productos, y existen diferentes métodos de cálculo alternativos. Las diferencias más relevantes entre las distintas alternativas surgen a la hora de considerar dos cuestiones fundamentales, relacionadas con, 1) los gases que se incluyen y 2) el alcance del indicador, en el sentido de si se consideran sólo emisiones directas o si también se deben considerar aquellas emisiones generadas indirectamente, tanto al adquirir bienes y servicios que necesitaron energía para ser producidos, como las generadas en la cadena de suministradores de los que se abastece la empresa para obtener sus productos (Wiedmann and Minx, 2007),

En cuanto a la primera cuestión, algunos estudios optan por considerar las emisiones de todos o parte de los gases de efecto invernadero, expresados en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> (Carballo-Penela and Doménech, 2010; Energetics, 2007; Carbon Trust, 2007; Wiedmann et al., 2007) prefieren limitarse exclusivamente a un único gas, el CO<sub>2</sub>.

La consideración de otros gases de efecto invernadero ofrecería una huella más completa, si bien implica la transformación de emisiones de gases de efecto invernadero en CO<sub>2</sub>, lo que en algunos casos puede incrementar la complejidad de los cálculos (Leonardi and Browne, 2010).

Por último, de acuerdo con *Global Footprint Network* “La HC se refiere a la demanda de biocapacidad precisa para secuestrar, mediante fotosíntesis, las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión de combustibles fósiles.

Como metodologías de cálculo de huella de carbono más comunes encontramos el GHG Protocol, desarrollado por el World Resources Institute (World Resources Institute, 2013) y el standard para el cálculo de la huella de carbono la ISO 14067: 2016.

La manera de formalizar la huella de carbono genéricamente viene dada por la ecuación 55.

$$HC = \sum E_{GEI} \cdot F_{CO_2eq,i} \quad 55$$

Donde

HC: Huella de carbono, Ton CO<sub>2</sub> equivalente

E<sub>GEI</sub>: emisiones de GEI expresados, toneladas

F<sub>CO<sub>2</sub>eq</sub>: Factor conversión a CO<sub>2</sub> equivalente

La utilidad del indicador se incrementa añadiendo más gases que el CO<sub>2</sub>, pues de este modo se ofrecerá una visión más completa de la posición de las corporaciones estudiadas y permitirá que las decisiones tomadas tengan un mayor impacto real. En la medida en que el Protocolo de Kioto establece objetivos de emisiones para seis gases (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, HFC, PFC, SF<sub>6</sub>), su inclusión en la HC aumenta el interés de este indicador.

En este trabajo de investigación, vamos a considerar los gases definidos en la Tabla 134 para calcular la HC a través del cálculo del CO<sub>2</sub> equivalente.

*Tabla 134 Factores de conversión de GEI a CO<sub>2</sub> equivalente.*

| Gas de Efecto Invernadero | Factor conversión a CO <sub>2</sub> Equivalente<br>(GWP 100) |
|---------------------------|--|
| CO <sub>2</sub>           | 1 <sup>a</sup>   |
| CH <sub>4</sub>           | 28 <sup>a</sup>  |
| N <sub>2</sub> O          | 265 <sup>a</sup>   |
| BC                        | 680 <sup>c</sup>   |
| R-22                      | 1.760 <sup>a</sup>   |
| R134a                     | 1.300 <sup>a</sup>   |
| R404a                     | 3.260 <sup>b</sup>   |

Fuente: <sup>a</sup>Greenhouse Gas Protocol, (2015); <sup>b</sup>International Maritime Organization, (2014a); <sup>c</sup>Atlantic Consulting, (2010)

Para calcular la huella de carbono de una empresa, es necesario comprender que existen tres tipos de emisiones que deben ser consideradas según ISO 14067: 2016.

- **Emisiones directas (alcance 1):** estas son las originadas por cálculo del consumo de combustibles que la organización utiliza en sus procesos o en el transporte. El proceso es tan sencillo como introducir los datos de consumo de combustibles y multiplicarlo por sus factores de conversión.
- **Emisiones indirectas (alcance 2):** Para conocer la huella de la electricidad tan sólo hay que introducir el consumo eléctrico total en kWh, del mix de la compañía o compañías suministradoras. Este consumo se desglosa automáticamente en los diferentes componentes del mix de estas compañías, pues cada uno tiene factores de conversión diferente: térmica de carbón, ciclo combinado (gas), nuclear, hidráulica o minihidráulica, cogeneración, eólica, fotovoltaica, solar térmica, biomasa y residuos. Resulta conveniente actualizar anualmente en este cálculo, el mix suministrado por la compañía suministradora.

En los buques, la generación de electricidad se hace por medio de los motores auxiliares instalados a bordo, estos queman combustibles fósiles y al estar acoplados a generadores eléctricos, estos generan la electricidad necesaria para satisfacer la demanda energética a bordo de los buques. Por lo tanto, en los buques no existe las emisiones indirectas (alcance 2) puesto que se genera por medio de la quema de combustible a bordo.

- **Emisiones indirectas (alcance 3):** El cálculo de la huella de las llamadas “otras emisiones indirectas” (alcance 3), incluyen todo aquello que no sean combustibles, emisiones directas

de cualquier tipo y electricidad. Por ejemplo, el aceite lubricante empleado en los motores, los refrigerantes empleados a bordo, etc.

En este trabajo de investigación, entendemos que cada buque es una empresa en sí mismo, y nos centramos en las emisiones de alcance 1 y 3, a la vista de los datos que están disponibles.

## 7.2. Huella Ecológica

La huella ecológica (HE) es un índice bien conocido, diseñado al comienzo de 1990s por Mathis Wackernagel y William Rees, para determinar el uso de los recursos biológicos y la generación de desechos en términos de la superficie apropiada del ecosistema, comparándolos con la capacidad de la biosfera en un cierto año (Wackernagel y Rees, 1996).

Las definiciones actuales establecen que la huella ecológica puede aplicarse no sólo a individuos y poblaciones, sino que también puede ser aplicado a diferentes tipos de actividades tales como bienes y organizaciones. Varios estudios dan detalles del concepto del índice, la base teórica del método de cálculo, los objetivos, el uso y la evolución en el tiempo (Ewing et al., 2008; Galli, A., et al., 2007; Wackernagel, M., Rees, 1996).

La huella ecológica (HE) es la superficie terrestre productiva (o el ecosistema acuático) necesaria para mantener el consumo de recursos y energía, así como para poder absorber los residuos producidos por una determinada población humana o economía, empleando la tecnología habitualmente utilizada, independientemente de donde esté situada la superficie”.

En la actualidad la definición se ha actualizado y desde Global Footprint Network (GFN), organismo en el que participan Wackernagel y Rees que entre otras cosas trata de avanzar en la estandarización de la metodología de cálculo de la HE, se propone la siguiente definición: “La HE es una medida de cuánta superficie biológicamente productiva, incluyendo agua y tierra, precisa un individuo, población o actividad para producir todos los recursos que consume y absorber los residuos que genera, empleando la tecnología y prácticas de gestión más frecuentes” (GFN, 2007).

Un primer punto de partida es que la HE no incluye la totalidad de superficie, sino que se refiere a la superficie biológicamente productiva (SBP), incluyendo la superficie marina. Así, la pretensión de la HE es considerar sólo la demanda de la “superficie que es ecológicamente productiva para usos humanos, excluyendo, por ejemplo, desiertos”, incluyendo sólo aquella que es capaz de producir bienes de los que los humanos nos apropiamos (Wackernagel, M., Rees, 1996).

Considerando una definición más reciente, pero que no modifica la visión inicial de Wackernagel y Rees, se entiende que la superficie biológicamente productiva abarca la superficie de tierra y agua que soporta una actividad fotosintética y una acumulación de biomasa que puede ser empleada por los humanos de forma significativa, incluyendo los océanos y las

masas de agua en tierra y excluyendo las áreas no productivas y marginales como regiones áridas, alta mar, superficies marginales con la vegetación distribuida no homogéneamente, criósfera y otras superficies de baja productividad, además de las superficies que producen biomasa que no es empleada por los humanos (GFN, 2007, 2009).

En ambos casos, la definición no es demasiado concreta, por lo que los autores avanzan un paso más en este sentido, estableciendo exactamente su composición. Así, se definen cinco tipos de superficie que cumplirían los requisitos de la definición: superficie cultivada, pastos, bosques, mar y superficie construida (Wackernagel, M., Rees, 1996).

Su determinación se realiza recurriendo a estadísticas existentes que cuantifican la extensión de cada una de estas superficies. De acuerdo con Global Footprint Network, en nuestro planeta existen en la actualidad 11.200 millones de hectáreas de Superficie Biológicamente Productiva (SBP), de las cuales 1.500 millones son de cultivos, 3.400 millones de pastos, 3.700 millones de bosques, 2.400 millones de superficie acuática empleada por los humanos, incluyendo las plataformas continentales y las masas de agua interiores, y 200 millones de superficie construida.

Los ecosistemas naturales no tienen los mismos niveles de biocapacidad. Al no ser superficies equivalentes sería incorrecto sumarlas directamente para obtener una única medida de superficie como pretende la huella ecológica: una hectárea de bosque más una hectárea de mar no es lo mismo que dos hectáreas de mar. Para que las medidas de superficie sean comparables entre sí, se ha definido la hectárea global, que no es más que una media de las áreas biológicas mundiales, las cuales se han ponderado con un factor de equivalencia según la productividad de cada tipo de superficie. En esta tesis, como se ha mencionado anteriormente, las emisiones de GEI se consideran que son absorbidas por los bosques, teniendo estos bosques un factor de equivalencia de una hectárea de bosques es 1,34 hectáreas global (FUHEM, 2009).

El segundo elemento importante presente en la definición de la HE hace referencia al consumo de recursos y la generación de residuos. Cabe preguntarse, en primer lugar, a qué recursos nos estamos refiriendo. La respuesta la obtenemos en Wackernagel y Rees (1996), que nos dice que la huella no debe incluir sólo la superficie necesaria para producir recursos renovables y servicios que soportan vida, sino también aquella superficie productiva, en el sentido en que acabamos de señalar, que se perdió debido a la contaminación, radiación, erosión, salinización o urbanización humana (pavimentación, edificación...) (Wackernagel, *et al.*, 1996).

La HE abarca la superficie de la que se obtienen recursos renovables que son consumidos por los humanos, además de aquella que estropeamos u ocupamos, aunque no produzca. De este modo, los autores definen el modo en que, a efectos de HE, los humanos modificamos el medio ambiente: consumiendo recursos naturales o bióticos, produciendo residuos y transformado la superficie productiva en improductiva. La HE contabiliza tres funciones de los ecosistemas empleadas por los humanos: suministro de recursos, absorción de residuos y el espacio ocupado por la infraestructura humana (Haberl *et al.*, 2004). Considerando los impactos

señalados, se diferencian seis tipos de actividades humanas que requieren SBP y, por lo tanto, alteran el medio ambiente (Wackernagel *et al.*, 2002):

- Recolección de cultivos para alimento, fibra, aceite y caucho.
- La producción de alimento para el ganado para la obtención de carne, cuero, lana y leche.
- La obtención de madera de los bosques para la obtención de productos de madera, fibras y combustibles.
- La pesca de agua salada y dulce.
- La creación de infraestructuras para la edificación de viviendas, transporte, la producción industrial y la producción de energía hidroeléctrica.
- La quema de combustibles fósiles.

Se asume que cada una de estas actividades requiere un único tipo de superficie específica: la obtención de cultivos necesita superficie cultivable; la alimentación del ganado necesita de pastos; la obtención de madera, bosques o plantaciones de árboles; la pesca precisa de superficie productiva en el mar; y la creación de las infraestructuras se realiza en diferentes tipos superficies, contabilizando la superficie construida. La quema de combustibles fósiles se relaciona con la superficie de los bosques necesaria para absorber las emisiones de CO<sub>2</sub> que esta actividad produce. Igualmente, se considera que cada tipo de superficie proporciona sólo un único tipo de servicio ecológico, a pesar de que suministran dos o más al mismo tiempo.

La HE tratará de determinar la cantidad empleada de cada una de estas superficies bio productivas, considerando que recogen la mayoría de las transformaciones que los humanos realizamos en el medio ambiente.

La HE puede ser calculada a diferentes escalas, tanto para los habitantes de territorios de extensión reducida como para la totalidad del planeta. En el caso de HE regionales, entendidas como aquellas referidas a los habitantes de cualquier territorio excepto la totalidad del planeta, la estimación de la huella presenta un elemento adicional como es el comercio entre los habitantes de diferentes regiones, el cual no existe a la hora de estimar el indicador desde una perspectiva planetaria, si bien esto no implica el diseño de un método de cálculo específico para este caso.

La inclusión del comercio entre los habitantes de diferentes territorios se justifica desde que en la definición se menciona que el indicador trata de recoger el consumo de recursos y la generación de residuos. Si consideramos que el consumo de una gran parte de los ciudadanos del mundo está compuesto por recursos que provienen de regiones diferentes a la suya, computar sólo la superficie empleada en el territorio de referencia excluiría de la HE una buena parte de las necesidades de superficie totales.

Los alimentos que consume, por ejemplo, un ciudadano inglés no procede exclusivamente de la SBP del Reino Unido, sino que en la medida en que esa persona consume productos procedentes de otros países, requiere y emplea su superficie productiva.

Si se trata de cuantificar el total de superficie que usa ese ciudadano, debe considerarse también la que está fuera de su país, sin que eso se pueda hacer de modo directo. De ahí que la HE no sea una superficie continua, sino que la superficie total de la que se apropia cualquier ciudadano puede estar repartida por todo el planeta (Wackernagel and Yount, 1998).

Tal y como señalan Wackernagel y Rees (1996), el comercio exterior oculta la verdadera superficie que necesitan los habitantes de un país para mantener su estilo de vida, especialmente en el caso de los ciudadanos de los países más industrializados, con mayor capacidad de abastecerse de productos procedentes de otros países. De este modo, los ecosistemas que mantienen a las típicas regiones industrializadas yacen invisiblemente más allá de sus propias fronteras políticas y geográficas, e influyen en la salud del medio ambiente de países muy distantes a ellos. Por estos dos motivos, los autores proponen un método indirecto de estimación de la superficie modificada por los humanos.

La elaboración de la metodología para el cálculo de la HE requiere que se consideren dos cuestiones. En primer lugar, es necesario que se puedan estimar, con una precisión razonable, los recursos que consumen y los residuos que generan los habitantes de la región estudiada. La segunda asunción alude a la necesidad de transformar ese consumo de recursos y flujos de residuos en la superficie productiva necesaria para suministrar esas funciones (Wackernagel and Yount, 1998).

Para la primera tarea, en este trabajo de investigación sólo se consideran el consumo de combustibles fósiles de cada buque, y son obtenidos tal y como se ha mostrado en el capítulo 6. En cuanto a la segunda tarea, es necesario la determinación del modo en que se van a transformar los consumos/residuos en las hectáreas de superficie productiva necesarias para su obtención, como se detalla en los siguientes párrafos.

La huella ecológica de los combustibles consta de tres componentes principales; el área necesaria para la producción de energía; el área necesaria para secuestrar las emisiones de gases de efecto invernadero; y el área necesitaba el depósito seguro de nitrógeno y azufre (Holden y Høyer, 2005). Sin embargo, dada la complejidad de obtener datos sobre donde ha sido producido el combustible empleado por los buques, ya que estos navegan por todo el mundo y el repostaje puede hacerse en cualquier lugar, en este trabajo de investigación sólo se considerará el área de bosques necesaria para asimilar las emisiones de CO<sub>2</sub> de la flota de gaseros. Esto se calcula multiplicando el consumo (o emisión) por un factor de conversión siendo la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en los bosques empleada en este trabajo de 1,58 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por hectárea (Holden y Høyer, 2005).

$$HE_{GEI} = \sum \frac{E_{CO_2eq}}{F_{CO_2eq-h}} \quad 56$$

Donde

$HE_{GEI}$ : Hectáreas de bosques requeridas para asimilar las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, hectáreas

$E_{CO_2eq}$ : emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, toneladas

$F_{CO_2-h}$ : Factor conversión de emisiones CO<sub>2</sub> equivalente por hectárea (1,58 toneladas CO<sub>2</sub> Equivalente por hectárea)

La huella ecológica total producida por la quema de combustible en los buques gaseros, expresándolo como la cantidad de hectáreas globales de superficie bio productiva se calcula aplicando la siguiente ecuación.

$$HE_{global} = \sum HE_{GEI} \cdot 1,34 \quad 57$$

### 7.3. Factores Ambientales, Sociales y de gestión (ESG)

ESG es un acrónimo de los informes sobre factores “ambientales, sociales y de gestión”. La contaminación y el consumo de energía son ejemplos de factores ambientales, los derechos humanos y las condiciones laborales son ejemplos de factores sociales, y el cumplimiento de las leyes y los mecanismos de control interno de la empresa son ejemplos de factores de administración.

La industria marítima está comenzando a emplear informes ESG (*Environmental, Social and Governance*) para mostrar sus medidas y planes acerca del desarrollo sostenible de su actividad (DNV GL, 2019). Esto informes ESG tienen dos principales focos de atención respecto al impacto medioambiental:

- Reducción de emisiones y energía: La principal preocupación son las emisiones de GEI y la capacidad de cumplir con las regulaciones más estrictas relacionadas con el clima, pero también la preocupación por las emisiones de contaminación del aire de los barcos, incluidos los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y las partículas en suspensión (PM) en las zonas portuarias.
- Biodiversidad y contaminación marina: La principal preocupación es la transferencia de especies invasoras a través, por ejemplo, del agua de lastre, el impacto en la vida marina de los productos químicos antiincrustantes, la gestión insuficiente de desechos a bordo, los derrames y las prácticas ambientales responsables para las nuevas construcciones y las prácticas de reciclaje de buques.

Respecto al impacto social, los informes ESG se centran en dos temas:

- **Salud, seguridad y protección:** La principal preocupación es la salud y la seguridad de los trabajadores, en particular las altas tasas de accidentes y muertes de la industria, y las preocupaciones de seguridad relacionadas con la piratería y otras amenazas a los activos o tripulaciones. Los informes deben cubrir las prácticas de salud, seguridad y protección de los propios empleados, así como el personal contratado y los problemas de salud y seguridad relacionados con las nuevas construcciones y el reciclaje de buques.
- **Derechos laborales y humanos:** La principal preocupación es el posible incumplimiento de las normas laborales generales y de derechos humanos, en particular las relacionadas con el uso de contratos de corta duración y el empleo temporal a través de agencias de dotación de personal, que pueden debilitar los derechos de los trabajadores. Los informes deben cubrir cómo la empresa aborda los derechos laborales y humanos para sus propios empleados, así como en la cadena de valor, particularmente en lo que respecta a los trabajadores contratados y los trabajadores del astillero para nuevas construcciones y reciclaje de barcos.

Sobre la gestión empresarial, estos informes se centran en dos temas:

- **Anticorrupción:** Como industria, el transporte marítimo es altamente vulnerable a la corrupción y la demanda de pagos de facilitación, una vulnerabilidad que aumenta con el uso generalizado de agentes, corredores e intermediarios en la industria. Los informes deben abordar cómo la empresa gestiona el riesgo de corrupción y ser transparente sobre los desafíos.
- **Responsabilidad y transparencia:** La naturaleza supranacional de la industria implica que a veces es un desafío seleccionar un nivel de divulgación pública que satisfaga a todas las audiencias relevantes. Sin embargo, se recomienda que el informe explique cómo la estructura directiva de la empresa salvaguarda el cumplimiento de los requisitos legales, las posibles sanciones y los estándares de la industria, y cómo la empresa garantiza la responsabilidad y la transparencia en sus operaciones.

En este trabajo de investigación, los indicadores que se muestran en la Tabla 135 son calculados y analizados como parte del análisis de la sostenibilidad medioambiental de la flota de gaseros. En los informes ESG se definen otras métricas, además de la huella de carbono, huella ecológica y los indicadores de eficiencia energética, que se emplean como herramientas para analizar la sostenibilidad medioambiental desde un punto de vista de las emisiones atmosféricas y son calculadas en este trabajo de investigación, estas métricas adicionales son:

- Energía auxiliar y energía para la propulsión anual
- Tiempo que operan los buques en zonas de control de emisiones
- Energía proveniente del consumo de combustibles de alto y bajo contenido en azufre

Tabla 135. Métricas empleadas en los informes EGS

| Concepto                            | Métrica   | Referencia  |
|-------------------------------------|---|---|
| Riesgo Climático y huella climática | Emissiones atmosféricas de GEI  | SASB TR-MT-110a.1<br>GRI 305-1<br>Poseidon Principles<br>SDG 13<br>CDP C6-C8<br>MEPC.304(72)      |
|                                     | GEI intensidad de las emisiones   | GRI 305-4<br>SDG 13   |
|                                     | Mix energético: La cantidad total de energía consumida agregada, en giga julios, el porcentaje de energía consumida que se suministró a partir de 1) combustible residual y 2) el porcentaje de energía consumida que es renovable / energía baja en carbono.   | SASB TR-MT-110a.3<br>GRI 302-1<br>SDG 13<br>CDP C8  |
|                                     | Emissiones de SO <sub>x</sub>   | SASB TR-MT-110a.3<br>GRI 302-1<br>SDG 13<br>CDP C8  |
| Contaminación Aérea                 | Otros contaminantes (NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , PM, BC, etc.)  | SASB TR-MT-120a.1<br>GRI 305-7<br>SDG 3<br>MARPOL VI Reg. 13/14                                   |
| Impacto Ecológico                   | Duración (días) de las operaciones dentro de zonas protegidas: La duración del envío en áreas marinas protegidas o áreas de estado de conservación protegido, donde la duración del envío es la suma de los días de viaje (períodos de 24 horas o fracciones de estos), incluido el tiempo de atraque en los puertos. | SASB TR-MT-160a.1<br>SDG 14<br>GRI 304-2<br>UNEP World Conservation Monitoring Centre (UNEP WCMC) |

Fuente: Adaptado de Norges Rederiforbund (2020)

## 7.4. Indicadores de eficiencia energética dentro del sector marítimo

Desde principio del siglo XXI, se han desarrollado una serie de indicadores específicos del transporte marítimo con el fin de lograr una mayor claridad y utilidad a la hora de evaluar la eficiencia de la operación y diseño de buques. Algunos de los indicadores se centran en el diseño de buques, siendo el *Energy Efficiency Design Index* (EEDI) el más empleado, que entró en vigor en 2011 como una enmienda del MARPOL VI. Mientras que otros indicadores se centran más en la eficiencia de la operación de los buques. Siendo los más relevantes el *Energy Efficiency Operational Index* (EEOI), publicado también por OMI como un indicador de aplicación voluntaria en 2011 que se ha hecho obligatorio a partir del 1 de enero de 2019 con la enmienda del MARPOL VI (MEPC.278(70), 2016), y la Relación Anual de eficiencia de los buques (AER) que ha sido adoptado como indicador de eficiencia operacional de los buques dentro de los Principios de Poseidón adoptados por los bancos y fondos de inversión que tienen inversiones en activos marítimos.

En este trabajo de investigación, nos centramos en los indicadores de eficiencia operacional para poder evaluar la eficiencia energética de los buques en servicio. Se deja fuera de este trabajo los indicadores técnicos o de diseño (EEDI) ya que esto son regulaciones que afectan a la construcción de los buques y, por lo tanto, no son influenciados por la operación de los mismos, en consecuencia, no dan una información demasiado relevante para responder a las preguntas planteadas en esta tesis.

#### 7.4.1. Indicador de la Eficiencia Energética Operacional, EEOI

La OMI, aprobó en la 53ª edición del *Marine Environment Protection Committee* (MEPC) la definición de un concepto que expresase la eficiencia energética operacional de la actividad de los buques. El concepto es conocido como el Índice Operacional de Eficiencia Energética (EEOI).

El EEOI fue desarrollado por la OMI con el fin de permitir a los buques controlar las emisiones de carbono de sus actividades de envío. La EEOI es el total de las emisiones de carbono en un período de tiempo dado por trabajo real de transporte en toneladas-millas. Las variaciones en el índice se deben principalmente a tres factores: la eficiencia técnica del barco, la cantidad de carga transportada por unidad de tiempo y las variaciones en la velocidad.

En su forma más simple, el Indicador Operacional de Eficiencia Energética se define como la relación de masa de CO<sub>2</sub> emitida por unidad de trabajo del transporte.

El trabajo del transporte es calculado como muestra la ecuación 58:

$$TT = CBM \times d \quad 58$$

Donde

TT: Trabajo del transporte, expresado en unidades de carga por milla náutica

CBM: Carga total entregada en la terminal, expresada en metros cúbicos

D: distancia navegada, expresada en millas náuticas

La siguiente ecuación muestra cómo se calcula el EEOI:

$$EEOI = \frac{\sum_{i=1}^m CC_i \cdot EF_{CO_2,i}}{TT} \quad 59$$

Donde

EEOI: Índice Operacional de Eficiencia Energética, TCO<sub>2</sub> / CBM y milla náutica

CC: Consumo de combustible por viaje, Toneladas

m: cada motor considerado a bordo (proceso de combustión), motores principales, motores auxiliares, calderas auxiliares y GCU (para LNG con este dispositivo).

i: tipo de combustible (RO, DO, LNG)

$EF_{CO_2}$  factor de emisión para cada combustible como se muestra en la Tabla 122

TT: Trabajo del transporte marítimo, calculado a partir de la ecuación 58

Este indicador es más significativo si se calcula para un periodo determinado o para un número de viajes determinado. Para obtener el promedio del indicador de un período o de varios viajes, el indicador se calcula como se muestra en la ecuación 60:

$$\overline{EEOI} = \frac{\sum_v \sum_j CC_{i,m} \cdot EF_{CO_2,i}}{\sum_i TT} \quad 60$$

Donde

$\overline{EEOI}$ : Promedio del índice EEOI para un periodo de tiempo o número de viajes,  $TCO_2$  / CBM y milla náutica

CC: Consumo de combustible por viaje, Toneladas

TT: Trabajo del transporte marítimo, calculado a partir de la ecuación 65

m: cada motor considerado a bordo (proceso de combustión), motores principales, motores auxiliares, calderas auxiliares y GCU (para LNG con este dispositivo).

i: tipo de combustible (RO, DO, LNG)

v: número de viaje

El número de viajes al año de la flota de LNG tomado en este trabajo de investigación es de 10,5 viajes, entendiendo “viaje” como la combinación de una ruta en lastre y otra cargado, siendo 14 días la media de los viaje con carga (International Gas Union, 2019). Combinando esta media de 14 días en condición de carga con los valores promedios de días navegando reportados por OMI en su Tercer Estudio de GEI (237 días navegando para buques gaseros), esto da que los buques navegan 62% del tiempo en condición de carga. Este valor se va a emplear para buques LNG y LPG.

El tercer estudio de GEI de la OMI da una velocidad promedio navegando de 14,9 nudos para la flota de buques gaseros, sin distinguir entre buques LNG y LPG. Para el año 2012, Olmer et al. (2017) mostraron que la velocidad operativa promedio entre 2013 y 2015 se redujo levemente y el informe Estadística de uso de combustible y emisiones (FUSE) obtuvo una velocidad general

para buques gaseros de 14,4 nudos para el año 2016 (UMAS, 2016). En este estudio, se van a emplear los valores de OMI ya que distingue entre el tamaño de buque, lo cual es importante ya que los valores engloban las flotas de LPG y LNG, y el tamaño de los buques es un parámetro que ayuda a diferenciar entre ambas flotas y con un impacto en las emisiones atmosféricas.

En cuanto a la carga llevada a bordo, para buques LNG se va a asumir que para viajes con carga, los tanques pueden ser llenados hasta el 98% de su capacidad (International Maritime Organization, 2016a) y se asume también que se dejan 4% de la cantidad transportada (*heeling*) en los tanques para mantenerlos fríos en el viaje en lastre (Hasan, Zheng and Karimi, 2009; Rogers, 2018). La carga que se considera para calcular el EEOI en buques LNG es la carga entregada en la terminal, ya que dado la peculiaridad del transporte de LNG, parte de la carga es “perdida” durante la navegación en forma de LNG vaporizado (Boil-Off gas).

Para la flota de LPG, la literatura es mucho más escasa en cuanto a la utilización de los buques, y en muchos casos, los resultados son agregados con la flota de LNG, esto hace complicado obtener datos específicos para los buques LPG. Con el fin de obtener los valores de la carga transportada se va a emplear los valores empleados por UMAS (2015), el porcentaje de capacidad de carga empleada es de 73,7% y 82,2% para el 2012, según el tamaño del buque.

Tabla 136 Valores asumidos para el cálculo del EEOI

|   | Peso muerto      | LNG  | LPG  |
|---|------------------|--|--|
| Días navegando con carga                    | 0 – 49.999       | 112  | 112  |
|   | 50.000 – 199.999 | 158  | 158  |
|   | 200.000 +        | 172  | 172  |
| Días navegando en lastre                    | 0 – 49.999       | 68   | 68   |
|   | 50.000 – 199.999 | 96   | 96   |
|   | 200.000 +        | 105  | 105  |
| Distancia Navegada al día (millas náuticas) | 0 – 49.999       | 286  | 286  |
|   | 50.000 – 199.999 | 358  | 358  |
|   | 200.000 +        | 406  | 406  |
| Carga transportada                          | 0 – 49.999       | $0.94 \cdot V_{carga}$   | $0.737 \cdot V_{carga}$  |
|   | 50.000 – 199.999 | $0.94 \cdot V_{carga}$   | $0.822 \cdot V_{carga}$  |
|   | 200.000 +        | $0.94 \cdot V_{carga}$   | -  |
| Número de Viajes                            | -                | 10,5 (21 viajes si se considera por separado los viajes en lastre y cargado) | 10,5 (21 viajes si se considera por separado los viajes en lastre y cargado) |

Fuente: International Maritime Organization, (2014b) y International Gas Union, (2019)

#### 7.4.2. Relación anual de eficiencia energética, AER

En la septuagésima reunión del Comité de Protección del Medio Marino de la OMI (MEPC70) el 28 de octubre de 2016, se introdujeron algunas enmiendas al Capítulo 4 del Anexo VI de MARPOL, agregando una nueva Regulación, la 22ª, que define ciertas pautas sobre la Recopilación y notificación de datos de consumo de combustible de buques y nuevos indicadores para la evaluación de la eficiencia energética de los buques. Uno de estos indicadores es el cálculo de una métrica de intensidad de carbono conocida como Relación de eficiencia media (AER), utilizando los parámetros de emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por procesos de combustión,

distancia navegada y tonelaje de peso muerto de diseño. La AER se calcula en gramos de CO<sub>2</sub> por tonelada de peso muerto-milla.

$$AER = \frac{\sum_{i=1}^m CC_i \cdot EF_{CO_2,i} \cdot 10^6}{DWT \cdot d_a} \quad 61$$

Donde

AER es el índice Operacional de Eficiencia Energética, gramos de CO<sub>2</sub> / tonelada de peso muerto y milla náutica

CC es el consumo de combustible anual, Toneladas

M es cada motor considerado a bordo (procesos de combustión), motores principales, motores auxiliares, calderas auxiliares y GCU (para LNG con este dispositivo).

i es el tipo de combustible (RO, DO, LNG)

$EF_{CO_2}$  es el factor de emisión para cada combustible como se muestra en la Tabla 122

DWT es el peso muerto del buque en toneladas

$d_a$  es la distancia navegada por cada buque en un año expresado en millas náuticas

El índice AER se computa para todos los viajes que realiza cada barco en un año natural (The Poseidon Principles Association, 2019).

La distancia anual navegada para cada buque se obtiene aplicando la siguiente ecuación:

$$d_a = \sum_{DWT}^{t_b} d_d \cdot N_d \quad 62$$

Donde

$d_a$  es la distancia navegada por cada buque anualmente

$d_d$  es la distancia navegada por cada buque diariamente

$N_d$  es el número de días navegando según el tamaño del buque, Tabla 136

$t_b$  es el tipo de buque (LNG o LPG)

DWT es el peso muerto del buque en toneladas



## 8. SOSTENIBILIDAD SOCIOECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL

En este trabajo de investigación, se analiza la sostenibilidad socioeconómica y también medioambiental de la flota de gaseros aplicando un modelo input-output mundial extendido sobre las bases de datos desarrolladas para el cálculo de las emisiones atmosféricas con el fin de lograr una evaluación del impacto de la flota mundial de gaseros sobre la economía mundial desde un enfoque híbrido, combinando aspectos medioambientales y socioeconómicos.

### 8.1. Metodología Input-Output

El modelo input-output es una herramienta analítica fundamental para el conocimiento de la estructura productiva de una región en un momento determinado, en el caso de esta tesis, se aplica a nivel mundial. A través de ella se pone de manifiesto el peso relativo que ocupan las diferentes ramas productivas en la economía de referencia, las interrelaciones que existen entre los diferentes sectores, sus vinculaciones con otras áreas económicas a través de los flujos de entrada y salida de bienes y servicios, la orientación de las producciones hacia otras actividades, o hacia el consumo final y la inversión, así como el valor añadido y su distribución entre los factores primarios que intervienen en los procesos productivos (Pardo *et al.*, 2002).

Esta metodología tiene sus orígenes en el primer desarrollo para representar la estructura económica de un país fue llevado a cabo por el economista francés François Quesnay, que en 1758 publicó “Tableau Économique”, donde se representaba de manera sistemática la distribución de gastos de una economía. En esta tabla, Quesnay representaba cómo distribuía un granjero sus ganancias, a la vez que compraba productos agrícolas necesarios para su granja (Miller and Blair, 1985).

Un siglo después de la publicación de Quesnay, Leon Walras (1834-1910) construyó un sistema de ecuaciones simultáneas que describían las interacciones entre compradores y vendedores, creando de esta manera el primer modelo de equilibrio general, en el cual se describían las relaciones de interdependencia existentes entre los componentes que forman el sistema económico.

Ya en el siglo XX, en 1936, el economista ruso Wassily Leontief (1905-1999) presentó su primer estudio sobre las relaciones entre sectores de la economía de Estados Unidos (Leontief, 1936). Cinco años después publicó su primer libro, “The Structure of the American Economy, 1919-1939”, en el que exponía el análisis input-output, que fue revisado posteriormente por el mismo autor (Fabricant, 1952).

Leontief introdujo tres simplificaciones sobre el modelo de Walras. En primer lugar, agrupó diferentes mercancías en grupos homogéneos o sectores, suponiendo que cada sector produce un grupo de mercancías con la misma tecnología. En segundo lugar, introdujo una función lineal

y homogénea para describir las relaciones entre la demanda y la oferta. Por último, consideró los sectores finales (consumo, inversión, comercio exterior) como sectores productivos endógenos al análisis. Este último supuesto generó muchas críticas, por lo que el propio Leontief sustituyó el modelo por uno en el que los sectores finales (consumo, inversión, comercio exterior) se consideraban exógenos, estableciéndose a partir de este momento como el método clásico de input-output (del Castillo Cuervo-Arango, 1993), por el que Leontief fue galardonado en 1973 con el premio Nobel de Economía por “el desarrollo del método input-output y su aplicación a los más importantes problemas económicos”.

La metodología Input-Output ha seguido evolucionando gracias a otros economistas como el premio Nobel Richard Stone y al desarrollo de potentes herramientas de cálculo digitales. Asimismo, ha servido para configurar, entre otros, los sistemas de cuentas económicas de la Organización de las Naciones Unidas y de Eurostat, la oficina de estadística de la Unión Europea.

Actualmente, en los países miembros de la Unión Europea existe el llamado Sistema Europeo de Cuentas (SEC-95) Económicas Nacionales, Regionales y Trimestrales que describe las reglas contables necesarias para tener estadísticas armonizadas y fiables de la estructura económica de cada país. Consecuentemente, los países miembros deben seguir estas reglas obligatoriamente en la elaboración de sus Cuentas Económicas Nacionales.

A nivel mundial, existen tablas input-output bajo el proyecto *World Input-Output Database* (WIOD), donde se construyó una primera versión de la Base de datos mundial de insumos y productos dentro del Proyecto WIOD, financiado por la Comisión Europea como parte del Séptimo Programa Marco, dentro del tema 8: Ciencias socioeconómicas y humanidades. Este proyecto se ejecutó desde mayo de 2009 a abril de 2012. La base de datos se lanzó oficialmente el 16 de abril de 2012 en Bruselas, durante la conferencia "Competitividad, comercio, medio ambiente y empleo en Europa: Perspectivas de la nueva *World Input Output Database* (WIOD) (Timmer, 2012). El elemento central de la WIOD es una serie temporal de tablas input-output mundiales (ver Figura 20). Una tabla input-output mundial (TIOM) puede considerarse como un conjunto de tablas input-output nacionales (Figura 20) que están conectadas entre sí por flujos comerciales internacionales bilaterales (Timmer *et al.*, 2015). A fecha de este trabajo de investigación, la publicación más reciente es para el año 2016, mostrando los resultados del año 2014 (Timmer *et al.*, 2016), siendo esta tabla sobre la que se trabaja en esta tesis.

Figura 20 Esquema de una tabla input-output mundial (TIOM)

|                                   |           | Use by country-industries |            |            |            | Final use by countries |           | Total use |
|-----------------------------------|-----------|---------------------------|------------|------------|------------|------------------------|-----------|-----------|
|                                   |           | Country 1                 |            | Country M  |            | Country 1              | Country M |           |
|                                   |           | Industry 1                | Industry N | Industry 1 | Industry N | ...                    | ...       |           |
| Supply from country-industries    | Country 1 | Industry 1                | ...        | Industry N | ...        | Country 1              | ...       | Country M |
|                                   | ...       | ...                       | ...        | ...        | ...        | ...                    | ...       | ...       |
|                                   | Country M | Industry 1                | ...        | Industry N | ...        | ...                    | ...       | ...       |
|                                   | ...       | ...                       | ...        | ...        | ...        | ...                    | ...       | ...       |
| Value added by labour and capital |           |                           |            |            |            |                        |           |           |
| Gross output                      |           |                           |            |            |            |                        |           |           |

Fuente: Timmer *et al.*, (2015).

### 8.1.1. El análisis input-output extendido al medioambiente

Como se ha señalado el modelo inicial de Leontief ha sido desarrollado y utilizado por cientos de analistas e investigadores para el estudio y aplicación de múltiples cuestiones asociadas a la economía, tales como trabajo, temas sociales, comercio, energía, ecología, uso de recursos, ecología industrial y ciencias ambientales (Wiedmann, 2009). Sobre estos últimos campos, se ha incrementado el número de trabajos basados en el modelo input output con el fin de analizar las relaciones entre economía y medio ambiente. Se camina hacia modelos híbridos que integren las cuentas ambientales y las económicas.

La idea de relacionar la información física ambiental y monetaria tuvo como precedentes conceptuales los trabajos desarrollados por Daly (1968), Isard, (1969), Ayres y Kneese (1969), Leontief (1970) y Victor (1972) , que introdujeron el análisis de la “economía física” en los modelos input-output. Asimismo, desde la perspectiva analítica las aportaciones que utilizan como marco metodológico el análisis de Leontief y como base contable una tabla simétrica input-output medioambiental (TSIOMA) han sido extensas, sobre todo, las que tienen que ver con las emisiones atmosféricas. En dicho contexto destacan los trabajos de Leontief y Ford (1971), Førsund (1985), Proops (1988), Hawdon y Pearson, (1995).

Desde la perspectiva de la estadística oficial, no es hasta la aprobación del “Sistema de Cuentas Nacionales de la ONU de 1993 (SCN93)”, cuando se recoge, por primera vez, la extensión de los sistemas de cuentas nacionales hacia la contabilidad del medio ambiente. Sin embargo, el SCN93 sólo presentó el estado del debate sobre cómo introducir la medición del medio ambiente en los sistemas de cuentas nacionales, dejando abierta la metodología a utilizar. Debido a ello, se constituyó en 1994, en el seno de la Comisión Estadística de la ONU, el denominado Grupo de Londres sobre Contabilidad Ambiental que ha sido el que ha dinamizado el debate internacional entorno a este tema. Este grupo está formado por representantes de: Alemania, Australia, Austria, Canadá, Dinamarca, Estados Unidos de América, Finlandia, Italia, Japón, Noruega, países Bajos, Reino Unido de Gran Bretaña e Irlanda del Norte, Suecia, Eurostat, la División Estadística de las Naciones Unidas, el Banco Mundial, la OCDE y varios representantes invitados de otras organizaciones. Las ideas apuntadas en el SCN93 han sido desarrolladas en los trabajos realizados principalmente por Hollanders y Keuning (1994), Keuning y Timmerman (1995), De Haan y Keuning, (2000) y Stahmer (2002).

Desde mediados de 2003 se dispone del denominado SEEA (*System Environmental and Economic Accounting*). Este manual modifica y revisa los antiguos manuales referidos al año 1993 y 2000 (complementario del anterior) y ha sido realizado por el Grupo de Londres sobre Contabilidad del Medio Ambiente. El manual recoge de forma sistemática y coherente las precisiones y delimitaciones conceptuales referentes a la contabilización de flujos físicos vinculados a la esfera medioambiental y su conexión con flujos monetarios asociados con las actividades de producción y consumo. En el mismo se hace referencia a la articulación conjunta de una matriz de contabilidad social (SAM) y los flujos físicos asociados a la misma, resultando con ello una SAM híbrida, es decir, una SAMEA según la terminología al uso.

Ha sido en el ámbito de la Comunidad Europea donde se han realizado los progresos más importantes. En este sentido, el documento emitido por la Comisión Europea en 1994, titulado “Direcciones de la Unión Europea con relación a los indicadores medioambientales y la contabilidad nacional verde: la integración de los sistemas de información económico y medioambiental” marcó un punto de referencia importante.

En España a nivel oficial hay que destacar el precedente que supuso la elaboración de la Tabla input- output medioambiental de Andalucía por la Agencia del Medio Ambiente de Andalucía para el año 1990 (TIOMA-90), si bien esta labor no ha sido posteriormente continuada. En base a dicha matriz cabe destacar las aplicaciones realizadas por: Castro *et al.* (1996); Saenz de Miera (2000); Velázquez (2003); André *et al.* (2005).

Asimismo, nos parece relevante la contribución de Manresa y Sancho, (1997) quienes utilizaron una Matriz de Contabilidad Social para Cataluña (referida al año 1987) para integrar datos sobre consumos energéticos y emisiones atmosféricas y evaluar las repercusiones ambientales a través de los denominados multiplicadores SAM. También el estudio realizado por Sánchez Chóliz *et al.*, (1995), que calcula los denominados “valores agua” para la Comunidad de Aragón.

Para el conjunto nacional estos sistemas de información híbridos se encuentran poco desarrollados: no se ha realizado ninguna estimación oficial de matrices de contabilidad social y medioambiental. Sin embargo, el INE sí ha avanzado en el desarrollo de estadísticas ambientales relacionadas con el agua, los residuos, los flujos de materiales y de protección ambiental aplicando las directrices que sobre esas cuentas marca Eurostat. Estas estadísticas, a nuestro juicio, necesitan una mayor conexión para extender las cuentas económicas hacia la contabilidad social y medioambiental dentro de un marco común.

Desde al ámbito académico, sí han existido múltiples intentos de construir este tipo de sistemas híbridos de información para aplicaciones concretas, aunque en general no directamente a partir de SAMEA sino de TSIOMA. Se pueden destacar las aportaciones de: Pajuelo *et al.* (1980); Alcántara (1995); Alcántara y Roca (1995).

Con el fin de integrar valores medioambientales a los modelos input-output, se han desarrollado varias metodologías con el fin de aunar ambos enfoques. Como referencia, en Miller y Blair (2009) se examinan en profundidad tres tipos de modelos input-output medioambientales: modelos económico-ecológicos, modelos de producto por industria y modelos input-output generalizados.

### **8.1.2. Modelos Input-Output generalizados**

Su estructura se basa en la extensión del modelo estándar añadiendo a la matriz de coeficientes técnicos distintas filas y columnas adicionales que reflejen la generación de contaminación. Así, el modelo generalizado input-output medioambiental puede representarse

como el clásico Modelo de Leontief ampliado. Esta extensión propuesta en Leontief (1970) y aplicada más tarde en Leontief y Ford (1971), es tanto un modelo como un marco contable. Como se ha indicado, estos modelos se forman aumentando la matriz de coeficientes técnicos con filas y/o columnas adicionales para reflejar las actividades de generación y de reducción de contaminación.

### **Análisis de los impactos**

Entre las diversas opciones metodológicas para determinar los impactos socioeconómicos y medioambientales de la flota mundial de gaseros, en la Tesis utilizamos el modelo de Leontief ampliado. Bajo este enfoque, para analizar el efecto en la contaminación, se parte de la tabla de coeficientes técnicos de la matriz de consumos intermedios o de demanda intermedia y la misma se amplía con un conjunto de coeficientes de generación y/o reducción de contaminación en cada sector. Cada contaminante para analizar (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, etc.) tendría una fila/columna de coeficientes. En el caso de generación de contaminación, los coeficientes reflejan la cantidad de un determinado contaminante generada por dólar de producción de la industria. Del mismo modo, los coeficientes de reducción de la contaminación reflejan contribuciones a las actividades de eliminación de la contaminación. Este procedimiento fue propuesto por primera vez en Leontief (1970) y ha sido desarrollado por Qayum, (1991) y Luptáčík y Böhm (1994,1999).

### **8.1.3. Formalización del modelo de impactos**

En el presente epígrafe se formaliza un modelo input-output híbrido para analizar los impactos socioeconómicos y medioambientales de la flota mundial de gaseros en la economía mundial. Se trata de un modelo input-output híbrido de la economía mundial. La metodología utilizada se basa en los modelos input output generalizados de Leontief formalizados por Miller y Blair (2009) para una economía simplificada. El modelo que se presenta se formaliza con tres sectores de la economía real (extractivo, industrial y servicios), aplicando el enfoque integrado o de políticas de Miller y Blair centrándonos en el modelo de impactos.

En relación con dicho modelo hemos formalizado las dos opciones o enfoques planteados por los autores aludidos: el denominado Modelo de Leontief ampliado y la determinación de los impactos mediante coeficientes de la demanda final.

### 8.1.3.1. Modelo Input-Output mundial

A partir de la base de datos World Input-Output Database (WIOD) se ha obtenido la Tabla Input-Output Mundial (TIOM) empleada en este trabajo de investigación, que está formada por 43 países, y un modelo para el resto del mundo para el período 2000-2014. Esta tabla input-output mundial fue publicada en 2016. Los datos son para 56 sectores de la economía que se clasifican de acuerdo con la revisión 4 de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU Rev. 4) (Timmer *et al.*, 2015). La formación de esta tabla mundial se basa en tablas input-output publicadas de manera oficial y se combinan con datos de cuentas nacionales y estadísticas de comercio internacional.

La TIOM está formada por datos de series temporales. Como se indicó, una tabla mundial input-output puede considerarse como un conjunto de tablas input-output nacionales que están conectadas entre sí por flujos comerciales internacionales bilaterales (Figura 20).

Una tabla de input-output mundial proporciona un resumen completo de todas las transacciones en la economía global entre industrias y usuarios finales en todos los países. Las columnas de la tabla de input-output mundial contienen información sobre los procesos de producción. Los productos pueden ser utilizados como productos intermedios por otras industrias, o como productos finales por los hogares y los gobiernos (consumo) o empresas (existencias y formación bruta de capital fijo). La distribución de la producción de industrias sobre categorías de usuarios se indica en las filas de la tabla. Una identidad contable importante en la tabla input-output mundial es que la producción bruta de cada industria (dada en el último elemento de cada columna) es igual a la suma de todos los usos de la producción de esa industria (dada en el último elemento de cada fila).

Las importaciones se desglosan según el país y la industria de origen en la tabla input-output mundial, permitiendo observar los flujos comerciales entre países para cualquier producto contenido en la tabla. La combinación de los flujos de productos nacionales e internacionales proporciona una herramienta poderosa para el análisis de las redes de producción mundiales.

Los valores en la tabla input-output mundial se expresan en millones de dólares estadounidenses y se utilizaron los tipos de conversión de moneda según los valores fijados por el tipo de cambio de mercado. Todos los valores de transacción están en precios básicos que reflejan todos los costos asumidos por el productor, que es el concepto de precio apropiado para la mayoría de las aplicaciones. En consecuencia, los flujos de comercio internacional se expresan en precios "Free on Board" (FOB) mediante la estimación de los márgenes de comercio y transporte internacionales (Timmer *et al.*, 2015).

Continuando con la descripción de la tabla input-output, a continuación, se detallan brevemente sus elementos principales:

**Matriz de demanda intermedia o de relaciones intersectoriales:** Sintetiza los intercambios que se producen entre las diferentes ramas productivas. Cada elemento  $X_{ij}$  de esta matriz es el resultado del cruce entre una fila (i) y una columna (j). Las filas muestran la distribución del

producto entre las diferentes ramas compradoras, mientras que las columnas reflejan la estructura de las compras intermedias de cada rama productiva. En consecuencia, cada elemento  $X_{ij}$  refleja las compras que la rama  $j$  realiza de productos de la rama  $i$ . Dado que los flujos entre ramas muestran intercambios de productos intermedios, esta matriz refleja la estructura del consumo (o demanda) intermedio.

**La matriz de demanda final:** Recoge los empleos diferentes al consumo intermedio dentro de la Tabla (consumo privado, consumo público, formación bruta de capital, etc.).

**La matriz de inputs primarios:** Recoge, para cada rama de actividad, la remuneración de los factores de producción (salarios y excedente bruto de explotación). Agregado a los Consumos Intermedios y a las Importaciones de Productos equivalentes, proporcionan el valor de los recursos o Inputs Totales utilizados por la economía.

**Producción de bienes y servicios:** Es el resultado de la actividad económica de las unidades residentes, que consiste en producir bienes y servicios durante el período de referencia. Dentro de la misma debe distinguirse entre producción de bienes, producción de servicios destinados a la venta y producción de servicios no destinados a la venta.

**Consumo intermedio:** Representa el valor de todos los bienes (excluyendo los de capital fijo) y servicios destinados a la venta que se consumen durante el período de referencia con la finalidad de producir otros bienes y servicios. Por lo tanto, el consumo intermedio incluye el valor de los bienes adquiridos en el mercado y consumidos efectivamente en el proceso de producción por la unidad correspondiente durante el período considerado, excepto los servicios asociados a la transmisión de terrenos, de construcciones existentes y de otros bienes de capital fijo y activos inmateriales. Se excluyen expresamente los servicios de transporte incorporados a los bienes que forman parte de las existencias de los productos.

**Consumo final:** Equivale al valor de los bienes y servicios utilizados para satisfacer directamente las necesidades de la población, ya sean de carácter individual (consumo final de las familias), o las colectivas (consumo de las administraciones públicas y de las instituciones privadas sin finalidad de lucro). El consumo final de las familias o consumo privado incluye el valor de las compras en el mercado de bienes nuevos (duraderos y no duraderos) y de las compras de servicios destinados a la venta, así como de otras partidas de menor importancia, como los productos agrícolas y los alimentos auto consumidos por los hogares de los empresarios o cultivadores agrícolas, las remuneraciones en especie suministradas por los empresarios asalariados, las prestaciones sociales en especie y los servicios domésticos producidos por los hogares para ellos mismos como usuarios de personal doméstico asalariado.

**Formación bruta de capital:** Representa el valor de los bienes duraderos (destinados a fines no militares) adquiridos por las unidades de producción residentes con la finalidad de utilizarlos durante más de un año en sus procesos de producción. Se incluye, además, el valor de los servicios incorporados a los bienes de capital fijo.

**Remuneración de asalariados:** Recoge todos los pagos, bien en dinero, bien en especie, realizados por los empleadores como remuneración a las prestaciones de trabajo efectuadas por sus asalariados durante el período considerado. Incluye sueldos y salarios brutos y cotizaciones a cargo de los empleadores.

**Excedente bruto de explotación:** Equivale a la suma del excedente neto de explotación y del consumo de capital fijo. El excedente neto incluye, básicamente, las rentas de propiedad y de la empresa obtenidas en el proceso de producción. En conclusión, el excedente bruto de explotación se obtiene deduciendo del valor añadido bruto (a precios de mercado) la cifra de remuneración de asalariados y sumando la diferencia que resulta de deducir los impuestos ligados a la producción a las subvenciones de explotación

La TIOM tiene una serie de características distintivas cuando se compara con tablas input-output nacionales o regionales.

Primero y, sobre todo, las tablas y las bases de datos input-output mundiales han sido diseñados específicamente para observar la evolución a lo largo del tiempo por medio de la realización de una evaluación comparativa sobre unas series de datos temporales de producción, valor añadido, comercio y consumo a partir de estadísticas de cuentas nacionales. Por el contrario, los conjuntos de datos de otras tablas input-output nacionales o regionales, se han compilado para años de referencia particulares,

En segundo lugar, los datos empleados se basan en fuentes oficiales y disponibles públicamente de institutos de estadística, garantizando un alto nivel de calidad de los datos. En particular, se construye en el marco del Sistema internacional de Cuentas Nacionales y obedece a sus conceptos e identidades contables. Obviamente, esto restringió el número de países que podrían estar cubierto en WIOD ya que existe un compromiso entre calidad y cobertura. La base de datos input-output mundial está cubriendo 40 países y una región del resto del mundo. Por ejemplo, las tablas asiáticas de *IDE-JETRO* son posiblemente de mayor calidad estadística, pero solo cubren un número limitado de países. Por el contrario, *Eora* cubre todos los países del mundo, pero se basa en gran medida en métodos de imputación para llenar los muchos espacios en blanco en los datos de países con sistemas estadísticos menos desarrollados.

Por otro lado, la base de datos input-output mundiales proporcionan información sobre la cantidad y los precios de los factores de entrada, incluidos datos sobre trabajadores y salarios por nivel de educación e insumos de capital. Estos datos se proporcionan en las denominadas cuentas socioeconómicas y se pueden utilizar junto con las tablas input-output mundiales, ya que se utilizan clasificaciones industriales similares.

Por último, es necesario mencionar, que las tablas input-output mundiales, dada su naturaleza global, no incluyen importaciones ni exportaciones, ya que muestra los valores agregados mundiales, es decir, no existen fugas.

En este trabajo de investigación, la TIOM original, compuesta por una matriz de 56 x 56 sectores económicos, constituida por todos los países y los sectores de producción, se ha reducido a una Tabla de 10 x 10, agregando los valores de cada uno de los sectores productivos, realizando operaciones de suma de las matrices de 56 x 56 de cada país, en 10 sectores de la economía según se detalla en el proyecto HISPALINK-HERMES, agregando el total de todos los países.

Consiguientemente, los 10 sectores de la economía empleados en este trabajo de investigación son:

- Agricultura
- Producción energía
- Bienes Intermedios
- Bienes de equipo
- Bienes de consumo
- Construcción
- Transporte marítimo
- Resto Transporte y Comunicaciones
- Otros servicios de Mercado
- Otros servicios de no Mercado (públicos)

### 8.1.3.2. El modelo de Leontief ampliado

Una economía configurada por tres sectores o ramas de actividad puede representarse por el sistema de ecuaciones como el mostrado a continuación en el sistema de ecuaciones 63:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11} \cdot X_1 + a_{12} \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_3 + Y_1 \\ X_2 = a_{21} \cdot X_1 + a_{22} \cdot X_2 + a_{23} \cdot X_3 + Y_2 \\ X_3 = a_{31} \cdot X_1 + a_{32} \cdot X_2 + a_{33} \cdot X_3 + Y_3 \end{cases} \quad 63$$

Donde:

$X_i$ = Producción efectiva de la rama i

$x_{ij}$ = Compras de la rama j a la rama i

$Y_i$ = Demanda final total de productos de la rama i

El modelo ampliado añade una fila adicional al sistema descrito por el sistema de ecuaciones 63, que incorpora la contaminación por rama o sector de actividad. Así la representación del sistema con información económica y medioambiental (contaminación) se añade la ecuación 64 al sistema de ecuaciones 63.

$$X_p = P_1 + P_2 + P_3 \quad 64$$

Donde:

$X_p$  = Contaminación de tipo P total originada por la producción de las ramas de actividad

$P_i$  = Contaminación de tipo P originada por la producción del sector i (i= 1,2 y 3)

Si tenemos en cuenta las siguientes relaciones:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{X_j} \quad x_{ij} = a_{ij} X_j \quad c_j = \frac{P_j}{X_j} \quad P_j = c_j X_j$$

Donde:

$a_{ij}$  = coeficiente técnico de producción que representa qué proporción (en tanto por uno) de la producción efectiva de la rama j procede de la rama i; dicho de otra forma, cuántas unidades de la producción de i son necesarias para producir una unidad de j.

$C_j$  = coeficiente técnico de contaminación que representa cuántas unidades monetarias de la producción de i son necesarias para originar una unidad de polución en unidades físicas de j.

Sustituyendo en el sistema de ecuaciones 63, el resultado es un sistema de ecuaciones como el siguiente:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11} \cdot X_1 + a_{12} \cdot X_2 + a_{13} \cdot X_3 + Y_1 \\ X_2 = a_{21} \cdot X_1 + a_{22} \cdot X_2 + a_{23} \cdot X_3 + Y_2 \\ X_3 = a_{31} \cdot X_1 + a_{32} \cdot X_2 + a_{33} \cdot X_3 + Y_3 \\ X_p = c_1 \cdot X_1 + c_2 \cdot X_2 + c_3 \cdot X_3 \end{cases} \quad 65$$

Si tenemos en cuenta que:

$$X^* = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_p \end{pmatrix} \quad A^* = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ c_1 & c_2 & c_3 & 0 \end{pmatrix} \quad Y^* = \begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ 0 \end{pmatrix}$$

El sistema se puede representar de forma matricial como muestra la siguiente ecuación:

$$X^* = A^* \cdot X^* + Y^* \quad 66$$

Luego, trabajando sobre la ecuación 66, se puede despejar en la matriz  $X^*$  (ecuación 68).

$$(1 - A^*) \cdot X^* = Y^* \quad 67$$

$$X^* = (1 - A^*)^{-1} \cdot Y^* \quad 68$$

Donde:

$(1 - A^*)^{-1}$  es la inversa de Leontief ampliada, que puede calcularse de la siguiente manera.

Partiendo de la siguiente expresión (69):

$$(1 - A^*)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 - a_{11} & -a_{12} & -a_{13} & 0 \\ -a_{21} & 1 - a_{22} & -a_{23} & 0 \\ -a_{31} & -a_{32} & 1 - a_{33} & 0 \\ -c_1 & -c_2 & -c_3 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad 69$$

Operando se puede establecer que:

$$\begin{bmatrix} I - A & 0 \\ -c & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (I - A)^{-1} & 0 \\ c \cdot (I - A)^{-1} & 1 \end{bmatrix} \quad 70$$

Para que la igualdad planteada en 70 se verifique, se tiene que cumplir que el producto de las dos matrices es igual, tal y como se demuestra en 71.

$$\begin{bmatrix} I - A & 0 \\ -c & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (I - A)^{-1} & 0 \\ c \cdot (I - A)^{-1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -c \cdot (I - A)^{-1} + c \cdot (I - A)^{-1} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 71$$

En tal sentido, la inversa de Leontief ampliada quedaría expresada de la siguiente manera:

$$(1 - A^*)^{-1} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & 0 \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} & 0 \\ \mu_1 & \mu_1 & \mu_1 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \quad 72$$

Donde:

$\alpha_{ij}$  es  $(I-A)^{-1}$

$\mu_j$  es  $c(I-A)^{-1}$

Cada elemento de la inversa expresa cuánto tiene que aumentar la producción de  $i$  si se desea satisfacer una unidad de demanda final de productos de la rama  $j$ , resumiendo las necesidades derivadas de los efectos inicial, directo e indirecto. Por tanto, la suma de los elementos de la columna  $j$  de dicha matriz (denominada multiplicador del output) expresa cuánto tendrá que incrementarse la producción global del sistema productivo para satisfacer un aumento de una unidad en la demanda final de productos de la rama  $j$ .

Asimismo, cada elemento de la inversa expresa cuánto se incrementa o disminuye la contaminación en  $j$  como consecuencia de incrementar o disminuir su producción.

De acuerdo con lo indicado, el sistema económico planteado de tres sectores económicos, con los multiplicadores socioeconómicos ( $\alpha$ ) y medioambientales ( $\mu$ ), puede formalizarse como se indica en el sistema de ecuaciones 73.

$$\begin{cases} X_1 = \alpha_{11} \cdot Y_1 + \alpha_{12} \cdot Y_2 + \alpha_{13} \cdot Y_3 \\ X_2 = \alpha_{21} \cdot Y_1 + \alpha_{22} \cdot Y_2 + \alpha_{23} \cdot Y_3 \\ X_3 = \alpha_{31} \cdot Y_1 + \alpha_{32} \cdot Y_2 + \alpha_{33} \cdot Y_3 \\ X_p = \mu_1 \cdot Y_1 + \mu_2 \cdot Y_2 + \mu_3 \cdot Y_3 \end{cases} \quad 73$$

Los multiplicadores medioambientales  $\mu_j$  estimados en función de los coeficientes técnicos de contaminación  $c_j$  se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\begin{cases} \mu_1 = c_1 \cdot \alpha_{11} + c_2 \cdot \alpha_{21} + c_3 \cdot \alpha_{31} \\ \mu_2 = c_1 \cdot \alpha_{12} + c_2 \cdot \alpha_{22} + c_3 \cdot \alpha_{32} \\ \mu_3 = c_1 \cdot \alpha_{13} + c_2 \cdot \alpha_{23} + c_3 \cdot \alpha_{33} \end{cases} \quad 74$$

Finalmente, el modelo socioeconómico y medioambiental propuesto se puede expresar de forma matricial con dos ecuaciones como se indica a continuación (ecuaciones 75 y 76):

$$X = (1 - A)^{-1} \cdot Y \quad 75$$

$$X_p = C \cdot (1 - A)^{-1} \cdot Y \quad 76$$

Donde:

$X = (1 - A)^{-1} \cdot Y$  recoge los efectos totales sociales y económicos, de la demanda total.

$X_p = C \cdot (1 - A)^{-1} \cdot Y$  recoge los efectos totales medioambientales, de la demanda total.

### 8.1.3.3. Determinación del vector de coste de la flota de gaseros

La cuantificación de los costes de cada buque de la flota de buques gaseros mundial es uno de los requisitos esenciales previos para poder determinar los efectos de este segmento del transporte marítimo sobre la economía mundial.

Para poder determinar el coste total anual de cada uno de los buques LPG y LNG que conforman la flota mundial de buques gaseros, al no existir una base de datos o tabla input-output con esta información específica, se ha contactado con distintas empresas navieras que operan buques gaseros con el fin de obtener los datos necesarios para poder extrapolarlos a toda la flota de gaseros. Se han recopilado información sobre los siguientes costes para poder constituir el vector de los costes de toda la flota de buques gaseros para el año 2019:

- Costes de adquisición (amortización anual de cada buque)
- Costes medio del combustible residual (DNV, 2020a)
- Coste medio del combustible destilado (DNV, 2020b)
- Coste medio del LNG (DNV, 2020b)
- Costes de tripulación
- Costes de pertrechos
- Costes de lubricantes
- Costes de mantenimiento y reparación (M y R)
- Costes del seguro(s)
- Costes generales (donde se incluyen los gastos en inspecciones, actualizaciones de software, administración, etc.)

Excepto los costes de combustibles, los demás costes han sido recibido de distintas navieras.

Los datos recibidos de las navieras corresponden a los buques LPG y/o LNG que ellos operan, habiendo obtenido datos para buques de distintos tamaños y con sistemas de propulsión diferentes, esto permite poder emplear estos datos para toda la flota de gaseros. También se han recibido los costes anuales de tripulación (incluyendo los viajes hasta/desde los buques), pertrechos, lubricantes, mantenimiento y reparación, seguros y gastos generales.

El número de tripulantes en cada buque se ha definido según el tamaño de los buques, siguiendo las recomendaciones para cumplir con la matriz de experiencia de tripulaciones a bordo de buques gaseros publicado por SIGTTO (SIGTTO, 2016)

El precio de adquisición que se impacta es el coste de la amortización anual, estableciendo el periodo de amortización en 10 años.

A partir de estos datos, se formaliza la estructura de costes por conceptos de consumo y se proyecta sobre los sectores económicos (10) estableciendo las correspondencias entre conceptos de consumo y actividades sectoriales, determinando el vector de consumo de la flota mundial de gaseros.

Cada uno de estos costes tienen un impacto sobre uno o más sectores de la economía mundial. En la Tabla 137 se muestran los impactos de cada uno de los gastos de la flota de gaseros sobre los sectores de la economía.

*Tabla 137 Impacto de los costes de la flota de gaseros sobre los sectores de la economía.*

| <b>Costes</b>                          | <b>Sector de la economía donde impacta</b>               |
|--|--|
| Precio de adquisición                  | Bienes de Equipo   |
| Coste de combustible                   | Producción de energía                                    |
| Coste de tripulación                   | Transporte marítimo                                      |
| Coste de pertrechos                    | 75% en Bienes de consumo<br>25% en Bienes intermedios    |
| Costes de lubricantes                  | Bienes intermedios                                       |
| Costes de mantenimiento y reparaciones | 60% Bienes intermedios<br>40% Otros servicios de mercado |
| Costes de seguros                      | Otros servicios de mercado                               |
| Costes generales                       | Otros servicios de mercado                               |

Fuente: Elaboración propia.

#### 8.1.4. Los coeficientes de la demanda final. Formalización de los multiplicadores económicos, sociales y medioambientales

Como ya se ha indicado el objetivo del modelo planteado es medir los efectos socioeconómicos y medioambientales en la economía mundial originados por la actividad de la flota mundial de buques gaseros. A efectos también de acotar la formalización de los multiplicadores, se han seleccionado cuatro variables macroeconómicas: 3 socioeconómicas (producción, valor añadido bruto y empleo) y 1 medioambiental (contaminación atmosférica).

Un multiplicador o el efecto multiplicador por definición en macroeconomía hacen referencia a las variaciones que se producen cuando el incremento, o decremento, de una variable exógena produce, a su vez, un incremento, o decremento, en una variable endógena.

Para nuestra economía simplificada de tres sectores productivos, la primera gama de multiplicadores, que resultaría de cruzar entre sí los elementos que se reflejan en la Figura 21 de doble entrada.

*Figura 21 Ejemplo de tabla de doble entrada.*

| Variables           | Impactos de la flota mundial de gaseros |            |         |
|---------------------|---|------------|---------|
|                     | Directos                                | Indirectos | Totales |
| Producción Efectiva |   |            |         |
| Valor Añadido Bruto |   |            |         |
| Empleos (ocupados)  |   |            |         |
| Contaminación       |   |            |         |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las ecuaciones planteadas en la formalización del modelo, el proceso de cálculo para cada tipo de multiplicador es similar, y se basa, por un lado, en la matriz inversa de Leontief, y por otro, en los coeficientes de las variables analizadas.

La inversa de Leontief  $(I-A)^{-1}$ , se determina a partir de las TIOM del sistema económico sobre el que se quiere medir el impacto. En el caso simplificado que hemos formalizado una economía de tres sectores de actividad.

Para calcular los diferentes coeficientes de impacto de la demanda de la flota de gaseros se parte de la estructura por ramas productivas. Por analogía con los “coeficientes netos de demanda” del modelo de demanda, los denominaremos coeficientes técnicos mundiales ya que en el modelo mundial no existen importaciones ni exportaciones. Para ello, basta con tomar la demanda y dividir cada consumo final total por el montante global de la categoría de demanda que corresponda. Es decir, la participación de cada rama de actividad en el gasto total. De esta manera se obtiene una matriz de coeficientes que permite “distribuir” por ramas la demanda global.

Para cada rama de actividad se calculan los siguientes coeficientes:

$$T_i^* = \frac{TT_i}{\sum_i TT_i} \quad 77$$

Donde

$T_i^*$  es el coeficiente de demanda satisfecho por la rama i

$TT_i$  es la demanda (consumo) total de la rama i

$\sum_i TT_i$  es la demanda (consumo) total de la flota analizada

Procediendo de igual manera para cada una de las ramas de actividad, se obtiene la matriz de “coeficientes mundiales” (78) de la actividad de la flota mundial de buques gaseros:

$$T^* = \begin{pmatrix} T_1^* \\ T_2^* \\ T_3^* \end{pmatrix} \quad 78$$

$T^*$  permite delimitar a partir de una cifra dada de actividad (demanda) total, qué porción va a incidir directamente en la producción de cada rama de actividad; dicho de otra manera, cuantifica, en forma de coeficientes, los efectos directos de la demanda sobre la producción.

La matriz columna resultante de efectuar el producto  $(I-A)^{-1} T^*$  proporciona los multiplicadores sectoriales totales de producción derivados de la actividad de la flota T; cada uno de ellos medirá el incremento de producción que debe suministrar la rama i por cada cantidad adicional de la demanda; la suma de todos ellos proporcionará lógicamente, el total de la producción que se genera en el conjunto del sistema a partir de la actividad de la flota, es decir, en qué cantidad deberá aumentar la producción de la economía mundial por cada cantidad adicional demandada por la flota mundial de gaseros.

De forma análoga se pueden calcular los multiplicadores de la actividad de la flota sobre las restantes macromagnitudes: valor añadido bruto (VAB), empleo (EMP) y contaminación (C).

Para ello basta con calcular previamente las siguientes matrices de coeficientes que se obtienen de diagonalizar los correspondientes vectores del VAB, EMP y C.

Matriz de coeficientes de Valor Añadido Bruto (VAB\*) (79):

$$VAB^* = \begin{pmatrix} VAB_1^* & 0 & 0 \\ 0 & VAB_2^* & 0 \\ 0 & 0 & VAB_3^* \end{pmatrix} \quad 79$$

Donde

$$VAB_i^* = \frac{VAB_i}{X_i}$$

$VAB_i$  es el Valor Añadido Bruto de la rama  $i$

$X_i$  es la producción de la rama  $i$

Matriz de coeficientes de Empleo (EMP\*) (80):

$$EMP^* = \begin{pmatrix} EMP_1^* & 0 & 0 \\ 0 & EMP_2^* & 0 \\ 0 & 0 & EMP_3^* \end{pmatrix} \quad 80$$

Donde

$$EMP_i^* = \frac{EMP_i}{X_i}$$

$EMP_i$  es el Empleo de la rama  $i$

$X_i$  es la producción de la rama  $i$

Matriz de coeficientes de contaminación (C\*) (81):

$$C^* = \begin{pmatrix} C_1^* & 0 & 0 \\ 0 & C_2^* & 0 \\ 0 & 0 & C_3^* \end{pmatrix} \quad 81$$

Donde

$$C_i^* = \frac{C_i}{X_i}$$

$C_i$  es la contaminación producida por la rama  $i$

$X_i$  es la producción de la rama  $i$

Puesto que la matriz  $T^*$  proporciona los efectos directos del tráfico marítimo sobre cada una de las ramas de actividad, el producto de cada elemento de esta matriz por el correspondiente coeficiente de cada variable (VAB, EMP y C) proporcionará los efectos directos del tráfico sobre la rama de actividad correspondiente para cada variable.

Por otro lado, con el producto  $(I-A)^{-1} T^*$  se obtenían los multiplicadores sectoriales totales del tráfico marítimo sobre la producción. Basta efectuar el producto de cada uno de estos multiplicadores por el coeficiente correspondiente de la variable que interese (VAB, EMP y C) para obtener los multiplicadores totales del tráfico marítimo sobre la variable analizada. Por último, para calcular los efectos indirectos del tráfico marítimo sobre las diferentes variables analizadas basta restar el coeficiente correspondiente a los efectos directos del multiplicador de efectos totales.



## **PARTE IV. RESULTADOS**



## 9. CONSUMO DE COMBUSTIBLE DE LA FLOTA DE GASEROS

Los resultados de esta tesis tienen su punto de partida en el cálculo de consumo de combustibles de cada uno de los buques gaseros de la flota activa a fecha de enero de 2020, luego los resultados variaran según se aplique la base de datos OMI I u OMI II.

Se parte de la hipótesis de que buques tipológicamente similares en diseño, tamaño, sistema de propulsión y desarrollo operativo de su actividad tendrán consumos de combustible similares.

Los resultados del consumo total anual para cada tipo combustible (residual (RO), destilado (DO) y LNG) para OMI I y OMI II se observa en la Tabla 138.

Tabla 138 Consumo de combustible anual de los buques gaseros para cada tipo de combustible

| Buque        | OMI I       |            |             | OMI II      |            |             |
|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|-------------|
|              | RO          | DO         | LNG         | RO          | DO         | LNG         |
| LNG          | 5,2         | 0,8        | 12,6        | 4,3         | 0,2        | 10,5        |
| LPG          | 6,3         | 1,9        | 0           | 9,6         | 2,8        | 0           |
| <b>Total</b> | <b>11,5</b> | <b>2,7</b> | <b>12,6</b> | <b>13,9</b> | <b>3,0</b> | <b>10,5</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

En las siguientes subsecciones se analizan los consumos de combustibles para motores principales, motores auxiliares, calderas auxiliares y unidades de combustión de gas (GCU).

### 9.1. Consumo de combustible de los motores principales

Los motores principales son los mayores consumidores de combustible a bordo. En la Tabla 139 se muestra el porcentaje de cada tipo de combustible consumido por los motores principales aplicando la metodología OMI I y OMI II. El consumo total de cada combustible por el motor principal, en millones de toneladas, en los buques gaseros se muestra en la Tabla 140.

Tabla 139 Porcentaje de combustible consumido por los motores principales

| Tipo de combustible | Buques LPG |        | Buques LNG |        |
|---------------------|------------|--------|------------|--------|
|                     | OMI I      | OMI II | OMI I      | OMI II |
| Combustible RO      | 90,1%      | 89,3%  | 87,6%      | 82,3%  |
| Combustible DO      | 90,1%      | 89,2%  | 90,4%      | 54,4%  |
| Combustible LNG     | 0          | 0      | 93,7%      | 85,7%  |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 140 Consumo de combustible anual de motores principales en los buques gaseros

| Buque        | OMI I       |            |             | OMI II      |            |            |
|--------------|-------------|------------|-------------|-------------|------------|------------|
|              | RO          | DO         | LNG         | RO          | DO         | LNG        |
| LNG          | 4,6         | 0,7        | 11,8        | 3,5         | 0,1        | 9,0        |
| LPG          | 5,7         | 1,7        | 0           | 8,6         | 2,5        | 0          |
| <b>Total</b> | <b>10,2</b> | <b>2,4</b> | <b>11,8</b> | <b>12,1</b> | <b>2,6</b> | <b>9,0</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

### 9.1.1. Consumo de combustible de los motores principales en buques LPG

A continuación, se analiza el consumo anual para el año 2019 de los motores principales de los buques LPG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (tablas 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147 y 148).

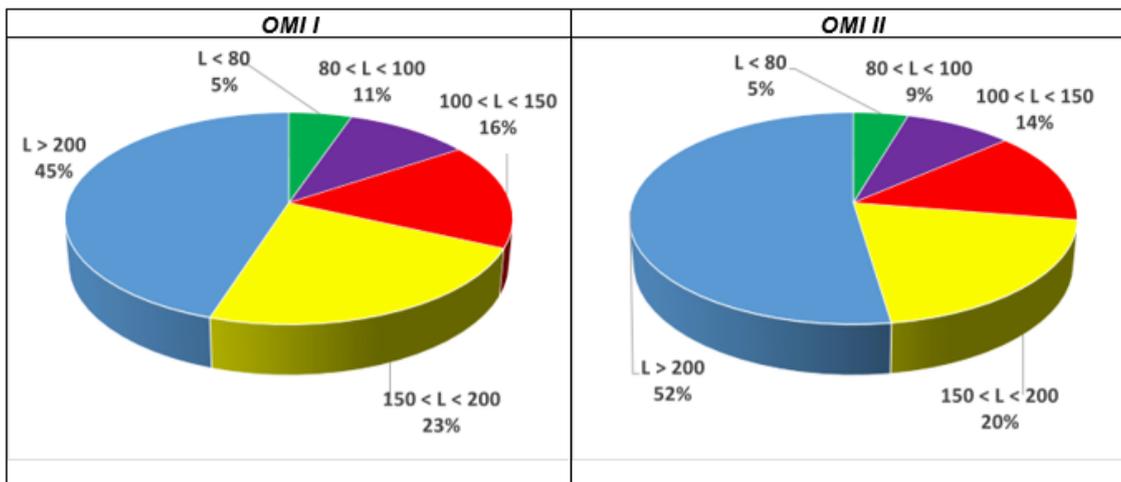
También se analiza el porcentaje de consumo de cada tipo de combustible (residual, destilado y LNG) de los motores principales de los buques LPG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (gráficas 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36 y 37), teniendo el mismo porcentaje ya sea combustible residual o destilado. Hay que recordar que los buques LPG en este trabajo de investigación se asumen que no consumen LNG, por lo tanto, los resultados de este tipo de combustible van a ser cero.

Tabla 141 Consumo anual de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de eslora.

| Grupo de esloras (L) | OMI I     |         |     | OMI II    |           |     |
|----------------------|-----------|---------|-----|-----------|-----------|-----|
|                      | RO        | DO      | LNG | RO        | DO        | LNG |
| L < 80               | 297.683   | 90.431  | 0   | 388.337   | 111.984   | 0   |
| 80 ≤ L < 100         | 589.630   | 179.118 | 0   | 768.967   | 220.925   | 0   |
| 100 ≤ L < 150        | 920.689   | 279.688 | 0   | 1.200.718 | 344.511   | 0   |
| 150 ≤ L < 200        | 1.315.063 | 399.491 | 0   | 1.714.233 | 491.327   | 0   |
| L ≥ 200              | 2.560.987 | 777.979 | 0   | 4.471.636 | 1.281.348 | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 30 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de esloras para buques LPG.



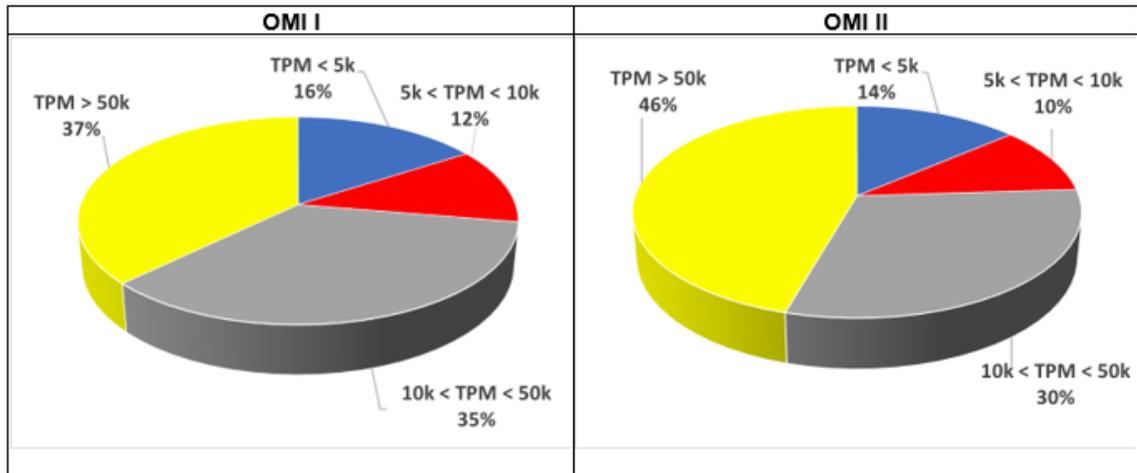
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 142 Consumo de combustible en motores principales en buques LPG según grupos de peso muerto.

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I     |         |     | OMI II    |           |     |
|---|-----------|---------|-----|-----------|-----------|-----|
|   | RO        | DO      | LNG | RO        | DO        | LNG |
| TPM < 5.000                             | 899.697   | 273.311 | 0   | 1.173.454 | 337.629   | 0   |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                    | 673.013   | 204.449 | 0   | 877.711   | 251.781   | 0   |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                   | 1.994.569 | 605.912 | 0   | 2.600.413 | 745.476   | 0   |
| TPM ≥ 50.000                            | 2.116.773 | 643.035 | 0   | 3.892.314 | 1.115.209 | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 31 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de peso muerto para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 143 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de capacidad de carga.

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I     |         |     | OMI II    |           |     |
|--|-----------|---------|-----|-----------|-----------|-----|
|  | RO        | DO      | LNG | RO        | DO        | LNG |
| CC < 5.000                             | 972.187   | 295.332 | 0   | 1.267.992 | 364.714   | 0   |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                    | 868.790   | 263.922 | 0   | 1.133.034 | 325.051   | 0   |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                   | 1.263.910 | 383.952 | 0   | 1.647.522 | 472.193   | 0   |
| CC ≥ 50.000                            | 2.579.165 | 783.501 | 0   | 4.495.343 | 1.288.139 | 0   |

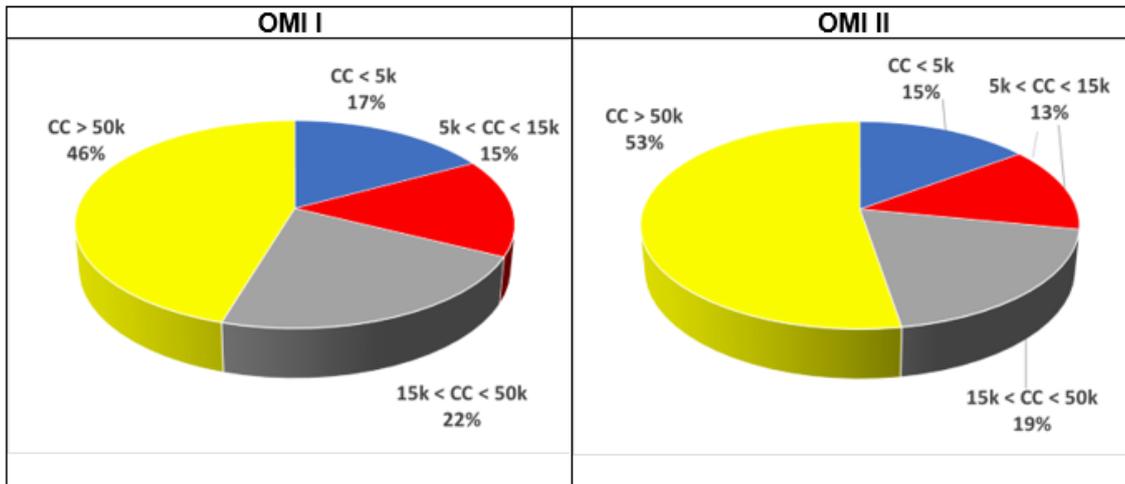
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 144 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de arqueado bruto.

| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | OMI I     |           |     | OMI II    |           |     |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|
|                                | RO        | DO        | LNG | RO        | DO        | LNG |
| GT < 3.000                     | 451.675   | 137.210   | 0   | 589.165   | 169.759   | 0   |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 528.843   | 160.652   | 0   | 689.692   | 198.106   | 0   |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 930.821   | 282.766   | 0   | 1.213.932 | 348.206   | 0   |
| GT ≥ 15.000                    | 3.772.713 | 1.146.078 | 0   | 6.051.102 | 1.734.024 | 0   |

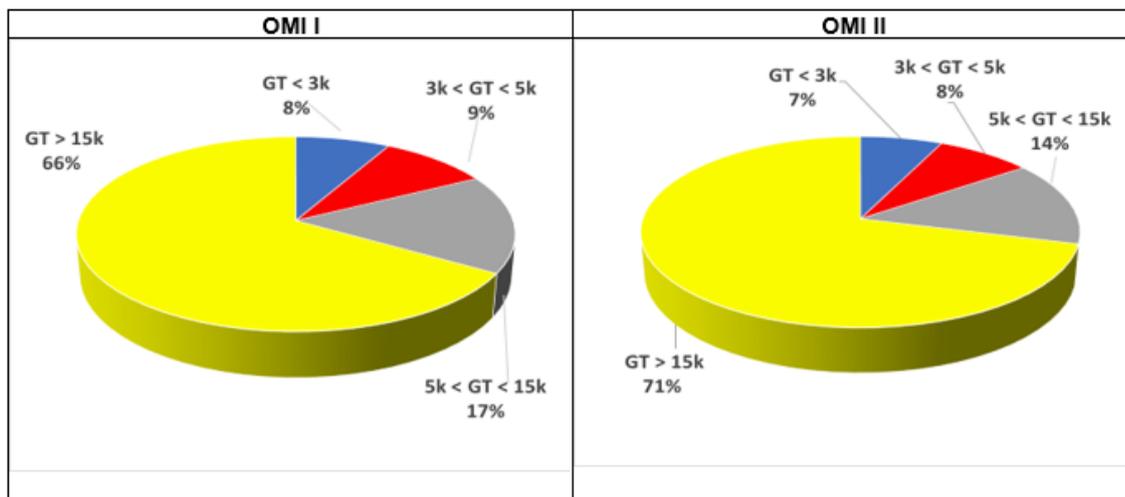
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 32 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de capacidad de carga para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 33 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de arqueo bruto para buques LPG.



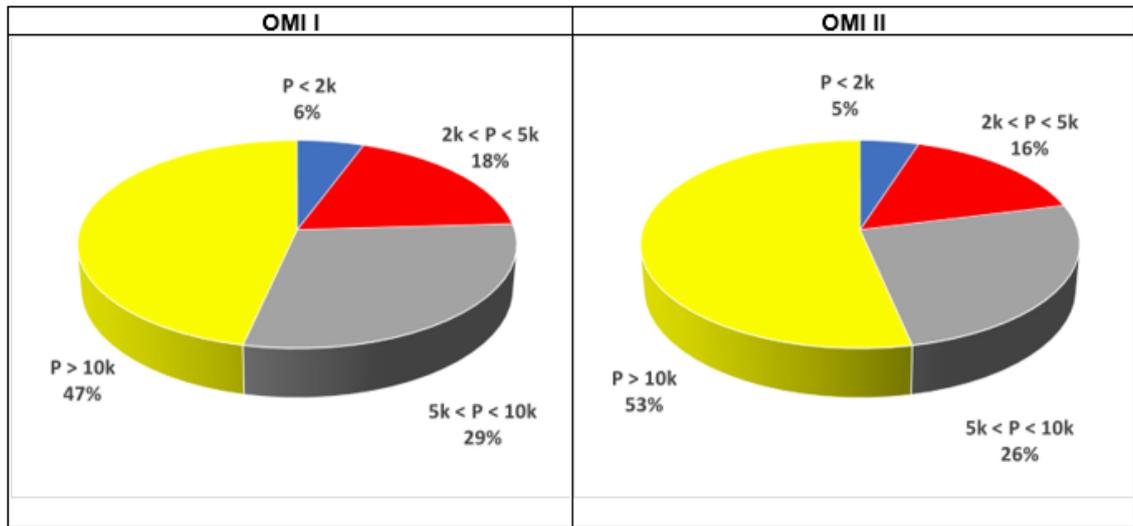
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 145 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de potencia propulsora instalada.

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I     |         |     | OMI II    |           |     |
|--------------------------------------|-----------|---------|-----|-----------|-----------|-----|
|                                      | RO        | DO      | LNG | RO        | DO        | LNG |
| P < 2.000                            | 318.922   | 96.882  | 0   | 419.213   | 120.885   | 0   |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 1.048.353 | 318.470 | 0   | 1.373.132 | 394.318   | 0   |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 1.670.947 | 507.602 | 0   | 2.192.263 | 628.399   | 0   |
| P ≥ 10.000                           | 2.645.830 | 803.753 | 0   | 4.559.284 | 1.306.493 | 0   |

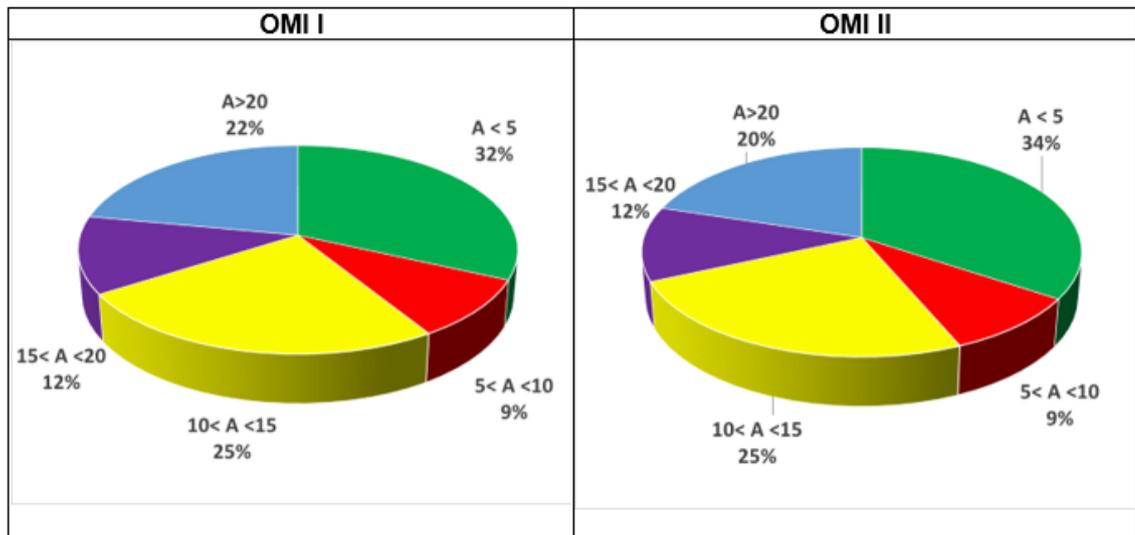
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 34 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 35 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de edad para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 146 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupos de edad.

| Grupo de Edad (A) | OMI I     |         |     | OMI II    |         |     |
|-------------------|-----------|---------|-----|-----------|---------|-----|
|                   | RO        | DO      | LNG | RO        | DO      | LNG |
| A ≤ 5             | 1.807.919 | 549.211 | 0   | 2.935.109 | 840.753 | 0   |
| 5 < A ≤ 10        | 529.076   | 160.723 | 0   | 787.730   | 225.748 | 0   |
| 10 < A ≤ 15       | 1.413.636 | 429.436 | 0   | 2.115.541 | 606.194 | 0   |
| 15 < A ≤ 20       | 682.003   | 207.179 | 0   | 981.907   | 281.359 | 0   |
| A > 20            | 1.251.418 | 380.157 | 0   | 1.723.604 | 496.041 | 0   |

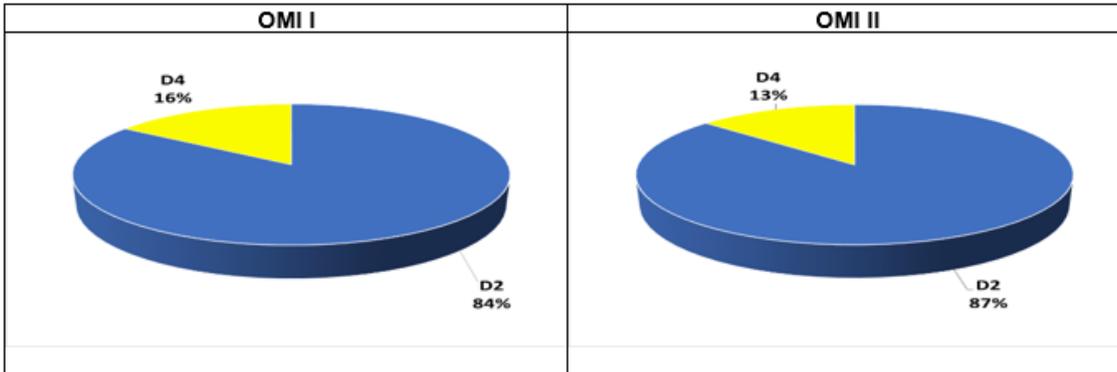
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 147 Consumo de combustible de motores principales para buques LPG según tipo de motor principal.

| Tipo de motor | OMI I     |           |     | OMI II    |           |     |
|---------------|-----------|-----------|-----|-----------|-----------|-----|
|               | RO        | DO        | LNG | RO        | DO        | LNG |
| D2            | 4.801.915 | 1.458.730 | 0   | 7.393.339 | 2.118.832 | 0   |
| D4            | 882.136   | 267.976   | 0   | 1.150.552 | 331.263   | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 36 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada tipo de motor principal para buques LPG.



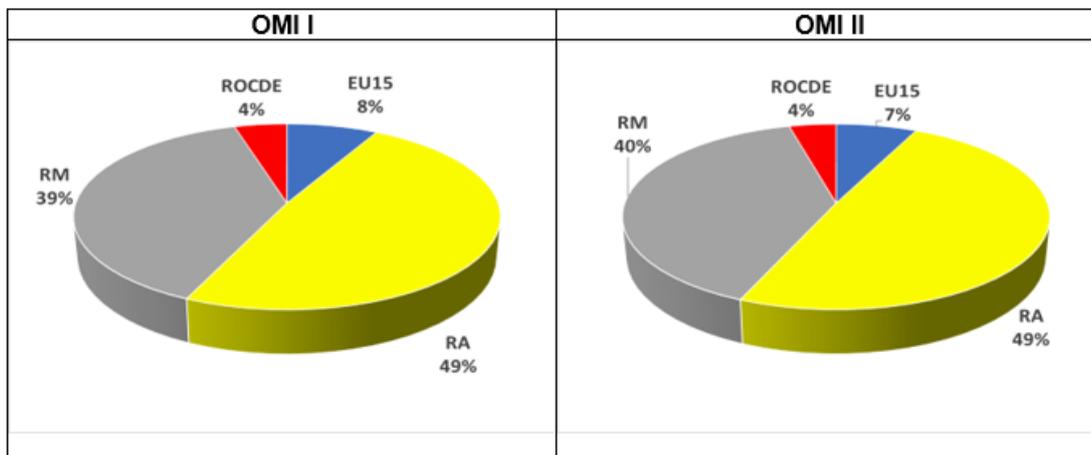
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 148 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LPG según grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | OMI I     |         |     | OMI II    |           |     |
|-------------------|-----------|---------|-----|-----------|-----------|-----|
|                   | RO        | DO      | LNG | RO        | DO        | LNG |
| EU15              | 449.799   | 136.640 | 0   | 600.053   | 172.083   | 0   |
| RA                | 2.775.572 | 843.166 | 0   | 4.219.070 | 1.209.539 | 0   |
| RM                | 2.199.248 | 668.090 | 0   | 3.377.271 | 968.545   | 0   |
| ROCDE             | 259.432   | 78.811  | 0   | 347.497   | 99.929    | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 37 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada grupo de bandera para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

### 9.1.2. Consumo de combustible de los motores principales en buques LNG

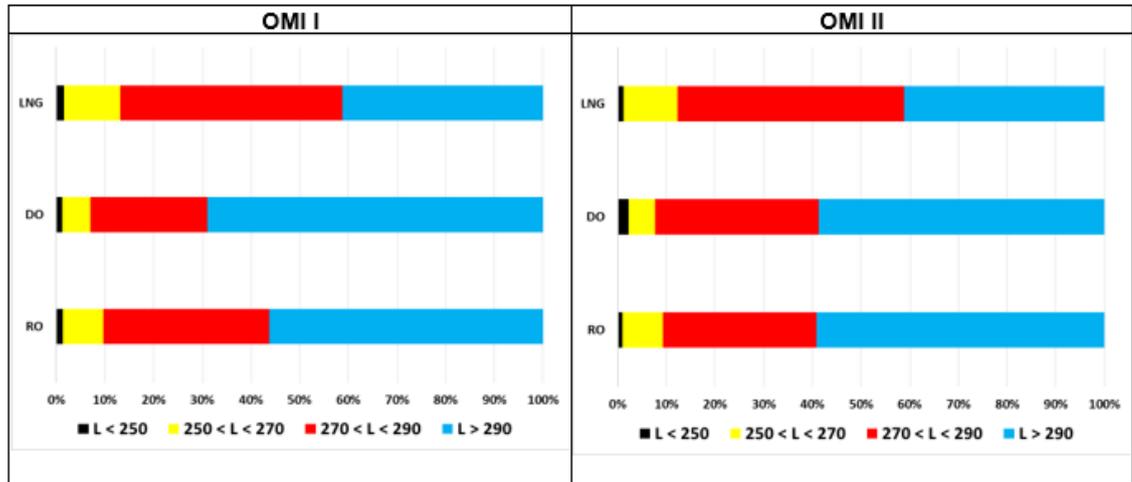
De igual manera que para los buques LPG, a continuación, se analiza el consumo anual para el año 2019 de los motores principales de los buques LNG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (tablas 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155 y 156). También se analiza el porcentaje de consumo de cada tipo de combustible (residual, destilado y LNG) de los motores principales de los buques LNG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (gráficas 38, 39, 40, 41, 43, 44 y 45).

Tabla 149 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupos de eslora.

| Grupo de esloras (L) | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|----------------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|                      | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| L < 250              | 62.687    | 8.819   | 189.350   | 33.624    | 2.726  | 101.861   |
| 250 ≤ L < 270        | 374.211   | 42.267  | 1.350.787 | 291.732   | 6.786  | 1.003.416 |
| 270 ≤ L < 290        | 1.543.047 | 175.344 | 5.387.181 | 1.114.800 | 41.736 | 4.203.232 |
| L ≥ 290              | 2.541.612 | 503.332 | 4.857.459 | 2.086.980 | 73.093 | 3.722.743 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 38 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de esloras para buques LNG.



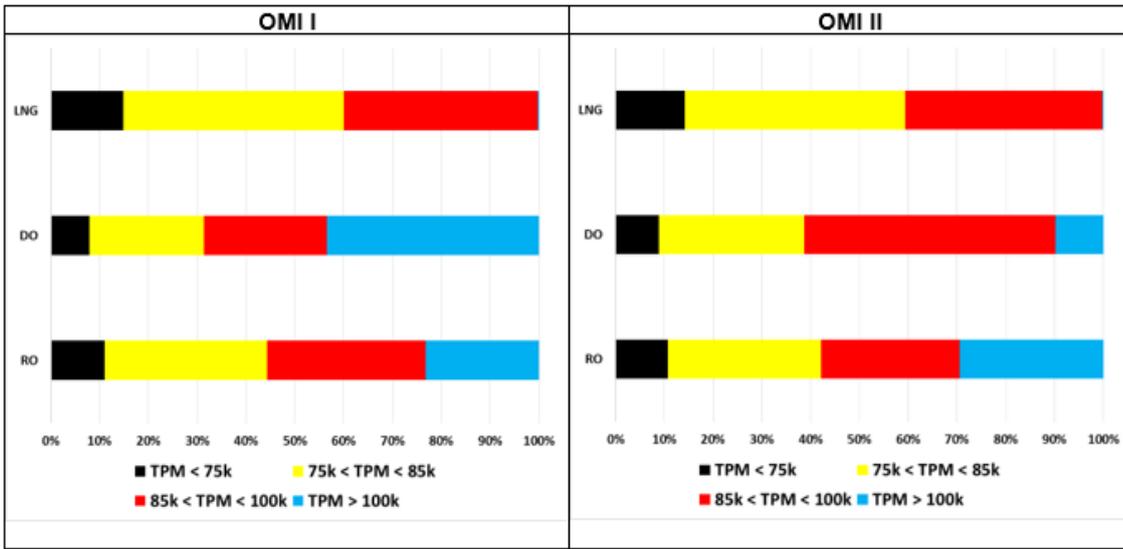
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 150 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupos de peso muerto.

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|---|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|   | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| TPM < 75.000                            | 496.117   | 57.800  | 1.749.595 | 377.556   | 11.096 | 1.287.314 |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 1.509.009 | 171.191 | 5.316.427 | 1.109.818 | 36.966 | 4.078.032 |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 1.467.631 | 183.693 | 4.690.714 | 1.002.989 | 64.111 | 3.647.820 |
| TPM ≥ 100.000                           | 1.048.801 | 317.078 | 28.042    | 1.036.774 | 12.167 | 18.085    |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 39 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de TPM para buques LNG.



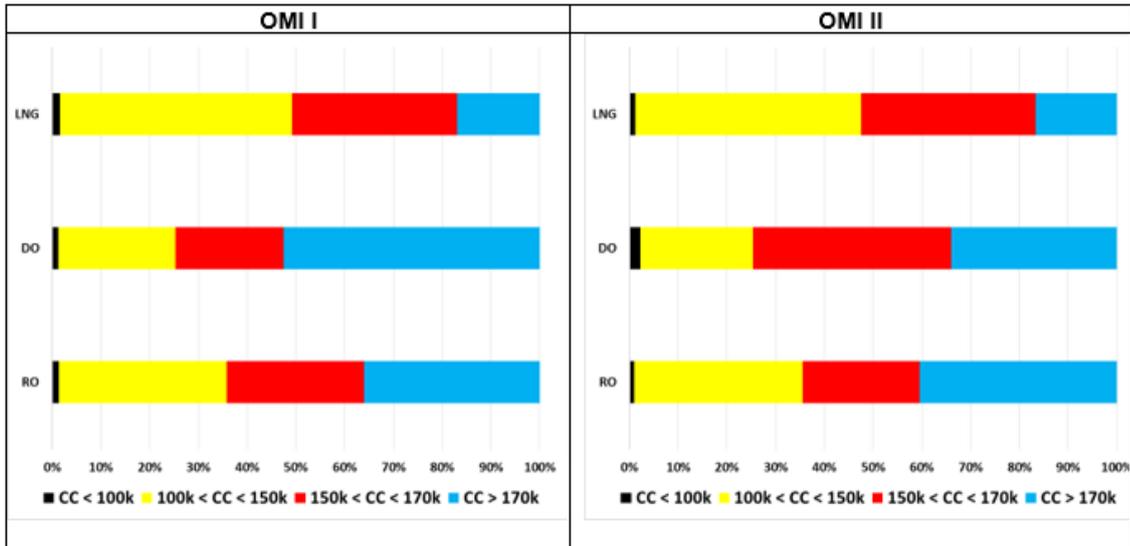
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 151 Consumo de combustible de motores principales para los buques LNG según grupos de capacidad de carga.

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|--|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|  | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| CC < 100.000                           | 62.687    | 8.819   | 189.350   | 33.624    | 2.726  | 101.861   |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 1.553.286 | 175.468 | 5.602.586 | 1.218.143 | 28.707 | 4.187.554 |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 1.275.324 | 161.746 | 3.995.323 | 845.393   | 50.543 | 3.233.635 |
| CC ≥ 170.000                           | 1.630.260 | 383.729 | 1.997.517 | 1.429.976 | 42.366 | 1.508.201 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 40 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de capacidad de carga para buques LNG.



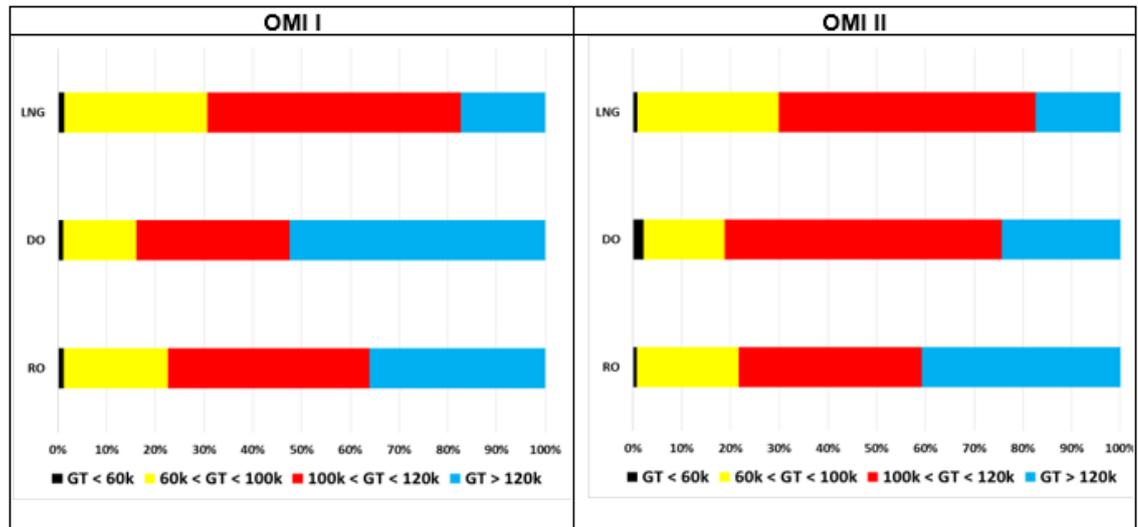
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 152 Consumo de combustible de motores principales para los buques LNG según grupos de arqueado bruto.

| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|--------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|                                | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| GT < 60.000                    | 53.213    | 7.749   | 155.152   | 28.415    | 2.605  | 83.927    |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 967.794   | 109.561 | 3.450.000 | 734.217   | 20.787 | 2.610.307 |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 1.868.479 | 228.970 | 6.130.938 | 1.324.737 | 70.582 | 4.758.805 |
| GT ≥ 120.000                   | 1.632.072 | 383.482 | 2.048.687 | 1.439.767 | 30.367 | 1.578.212 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 41 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de arqueado bruto para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 153 Consumo de combustible de motores principales para los buques LNG según grupos de potencia propulsora instalada.

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|--------------------------------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|                                      | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| P < 20.000                           | 124.587   | 15.803  | 414.185   | 72.393    | 3.543  | 233.650   |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 1.871.714 | 211.820 | 6.723.924 | 1.353.826 | 42.694 | 4.670.050 |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 2.153.115 | 448.743 | 3.609.211 | 1.845.336 | 64.658 | 3.248.424 |
| P ≥ 40.000                           | 372.142   | 53.397  | 1.037.457 | 255.581   | 13.446 | 879.127   |

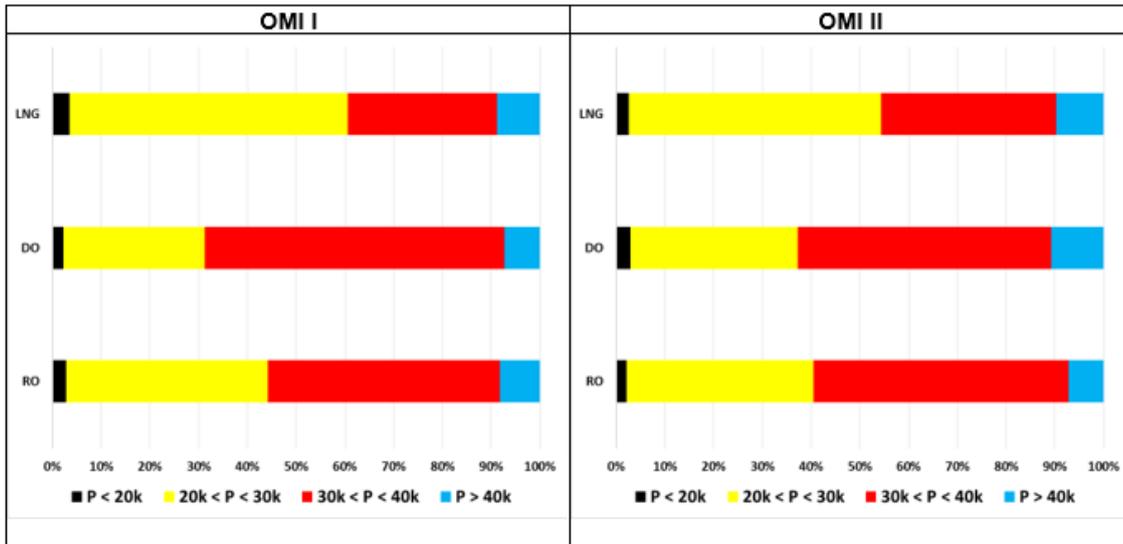
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 154 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupos de edad.

| Grupos de Edad (A) | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|--------------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|                    | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| A ≤ 5              | 1.190.198 | 152.023 | 3.747.738 | 80.8948   | 54.563 | 2.862.095 |
| 5 < A ≤ 10         | 328.144   | 37.857  | 1.088.045 | 207.646   | 12.626 | 898.840   |
| 10 < A ≤ 15        | 1.872.886 | 411.650 | 2.883.070 | 1.628.773 | 35.721 | 2.245.442 |
| 15 < A ≤ 20        | 690.254   | 78.526  | 2.477.388 | 539.480   | 13.468 | 1.851.665 |
| A > 20             | 440.075   | 49.706  | 1.588.537 | 342.289   | 7.963  | 1.173.209 |

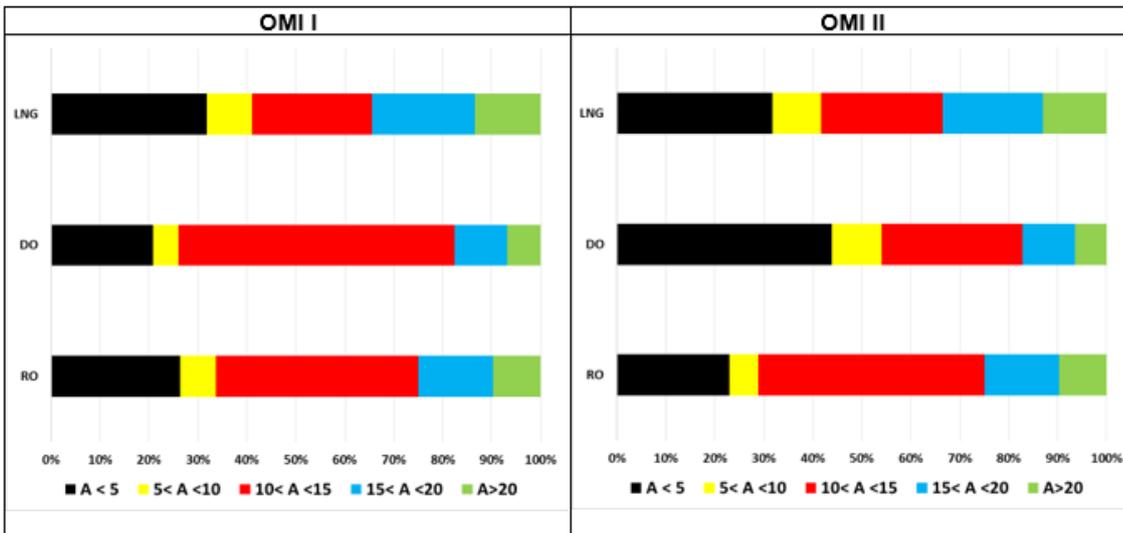
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 42 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LNG



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 43 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada tipo de motor principal para buques LNG.



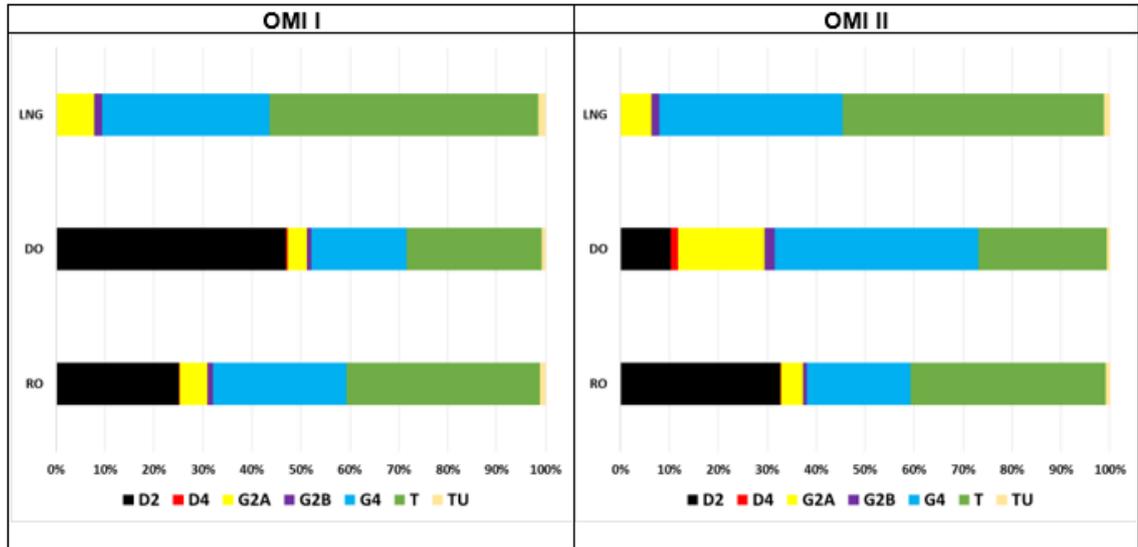
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 155 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según tipo de motor principal.

| Tipo de motor | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|---------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|               | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| D2            | 1.133.471 | 342.474 | 0         | 1.149.654 | 12.775 | 0         |
| D4            | 7.557     | 2.296   | 0         | 6.194     | 1.785  | 0         |
| G2A           | 253.708   | 29.134  | 914.073   | 157.710   | 22.062 | 567.579   |
| G2B           | 54.091    | 6.211   | 187.631   | 28.673    | 2.560  | 143.805   |
| G4            | 1.229.989 | 141.509 | 4.031.341 | 747.696   | 51.724 | 3.388.314 |
| T             | 1.790.744 | 202.265 | 6.464.038 | 1.403.097 | 32.642 | 4.813.896 |
| TU            | 51.997    | 5.873   | 187.694   | 34.113    | 793    | 117.657   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 44 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada tipo de motor principal para buques LNG.



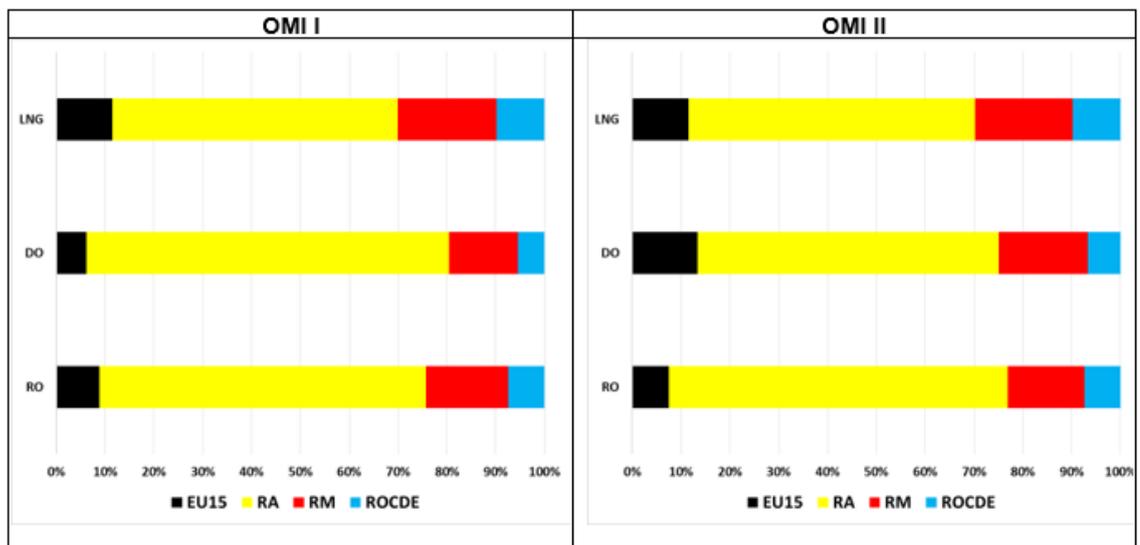
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 156 Consumo de combustibles de motores principales para los buques LNG según grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | OMI I     |         |           | OMI II    |        |           |
|-------------------|-----------|---------|-----------|-----------|--------|-----------|
|                   | RO        | DO      | LNG       | RO        | DO     | LNG       |
| EU15              | 395.121   | 45.140  | 1.350.195 | 261.700   | 16.600 | 1.042.899 |
| RA                | 3.025.682 | 542.117 | 6.892.117 | 2.451.332 | 76.725 | 5.294.344 |
| RM                | 765.665   | 102.902 | 2.372.987 | 554.396   | 22.670 | 1.809.382 |
| ROCDE             | 335.089   | 39.604  | 1.169.478 | 259.708   | 8.346  | 884.627   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 45 Porcentaje de consumo de combustible de motores principales para cada grupo de bandera para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

## 9.2. Consumo de combustible de los motores auxiliares

Los motores auxiliares son los segundos mayores consumidores de combustible a bordo de los buques des pues de los motores principales. En la Tabla 157 se muestra el porcentaje de cada tipo de combustible consumido por los motores auxiliares aplicando la metodología OMI I y OMI II.

Tabla 157 Porcentaje de combustible consumido por los motores auxiliares

| Tipo de combustible | Buques LPG |        | Buques LNG |        |
|---------------------|------------|--------|------------|--------|
|                     | OMI I      | OMI II | OMI I      | OMI II |
| Combustible RO      | 6,1%       | 6,7%   | 11,1%      | 16,7%  |
| Combustible DO      | 6,1%       | 6,7%   | 7,8%       | 38,5%  |
| Combustible LNG     | 0          | 0      | 6,3%       | 11%    |

Fuente: Elaboración propia.

### 9.2.1. Consumo de combustible de los motores auxiliares en buques LPG

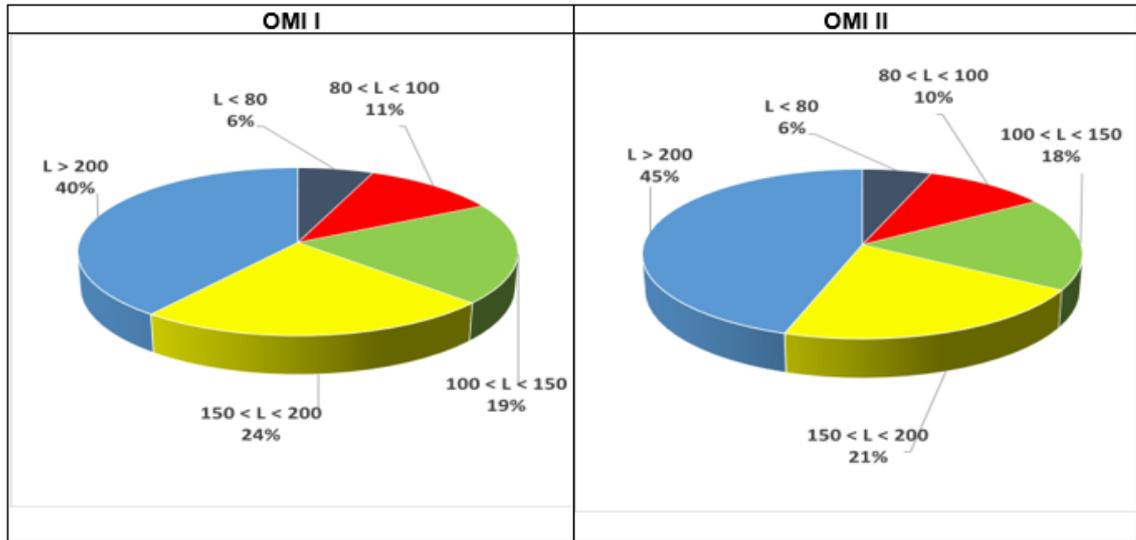
A continuación, se analiza el consumo anual para el año 2019 de los motores auxiliares de los buques LPG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (tablas 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164 y 165). También se analiza el porcentaje de consumo de cada tipo de combustible (residual, destilado y LNG) de los motores auxiliares de los buques LPG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (gráficas 46, 47, 48, 49, 51, 52, 53, 54 y 55), teniendo el mismo porcentaje ya sea combustible residual o destilado. Hay que recordar que los buques LPG en esta tesis se asumen que no consumen LNG, por lo tanto, los resultados de este tipo de combustible van a ser cero.

Tabla 158 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para buques LPG según grupos de eslora.

| Grupo de esloras (L) | OMI I   |        |     | OMI II  |        |     |
|----------------------|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|                      | RO      | DO     | LNG | RO      | DO     | LNG |
| L < 80               | 23.672  | 7.191  | 0   | 35.833  | 10.402 | 0   |
| 80 ≤ L < 100         | 42.834  | 13.012 | 0   | 64.840  | 18.822 | 0   |
| 100 ≤ L < 150        | 74.836  | 22.734 | 0   | 113.282 | 32.883 | 0   |
| 150 ≤ L < 200        | 90.847  | 27.598 | 0   | 137.518 | 39.919 | 0   |
| L ≥ 200              | 151.703 | 46.085 | 0   | 285.863 | 82.980 | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 46 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de esloras para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 159 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de peso muerto.

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I   |        |     | OMI II  |        |     |
|---|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|   | RO      | DO     | LNG | RO      | DO     | LNG |
| TPM < 5.000                             | 67.351  | 20.460 | 0   | 101.952 | 29.594 | 0   |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                    | 51.134  | 15.534 | 0   | 77.403  | 22.469 | 0   |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                   | 137.819 | 41.867 | 0   | 208.621 | 60.558 | 0   |
| TPM ≥ 50.000                            | 127.589 | 38.759 | 0   | 249.359 | 72.384 | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 160 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de capacidad de carga.

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I   |        |     | OMI II  |        |     |
|--|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|  | RO      | DO     | LNG | RO      | DO     | LNG |
| CC < 5.000                             | 72.639  | 22.066 | 0   | 109.956 | 31.918 | 0   |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                    | 71.694  | 21.779 | 0   | 108.526 | 31.503 | 0   |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                   | 86.031  | 26.135 | 0   | 130.228 | 37.803 | 0   |
| CC ≥ 50.000                            | 153.528 | 46.639 | 0   | 288.625 | 83.782 | 0   |

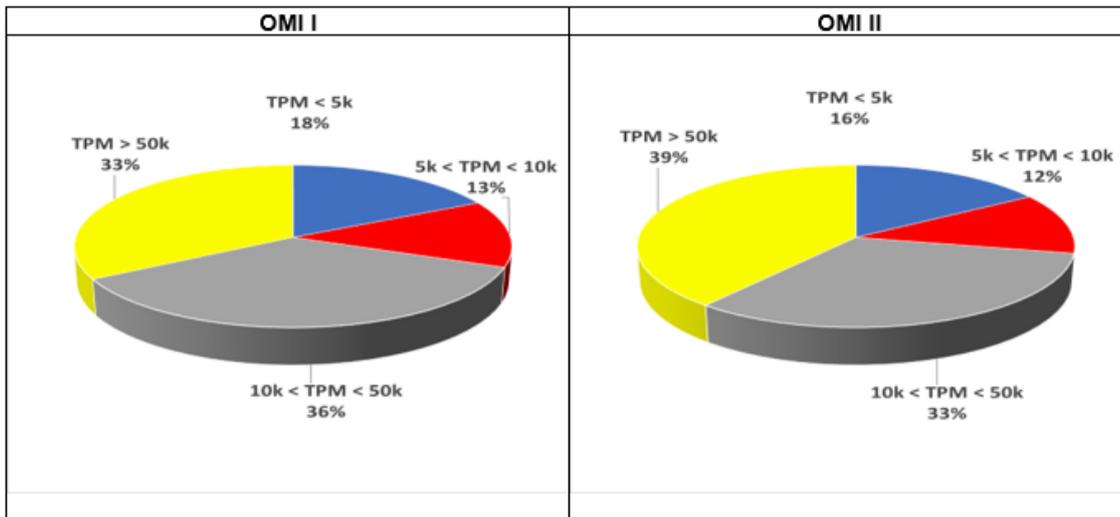
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 161 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de arqueado bruto.

| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | OMI I   |        |     | OMI II  |         |     |
|--------------------------------|---------|--------|-----|---------|---------|-----|
|                                | RO      | DO     | LNG | RO      | DO      | LNG |
| GT < 3.000                     | 33.403  | 10.147 | 0   | 50.564  | 14.678  | 0   |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 38.849  | 11.801 | 0   | 58.806  | 17.070  | 0   |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 76.177  | 23.141 | 0   | 115.312 | 33.473  | 0   |
| GT ≥ 15.000                    | 235.463 | 71.529 | 0   | 412.653 | 119.785 | 0   |

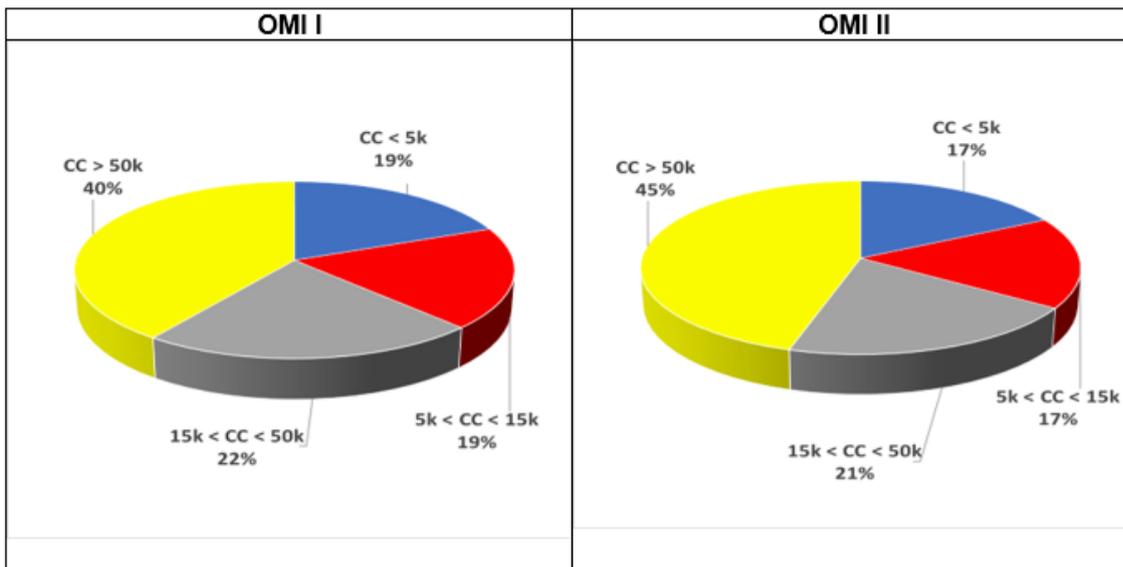
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 47 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LPG



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 48 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LPG



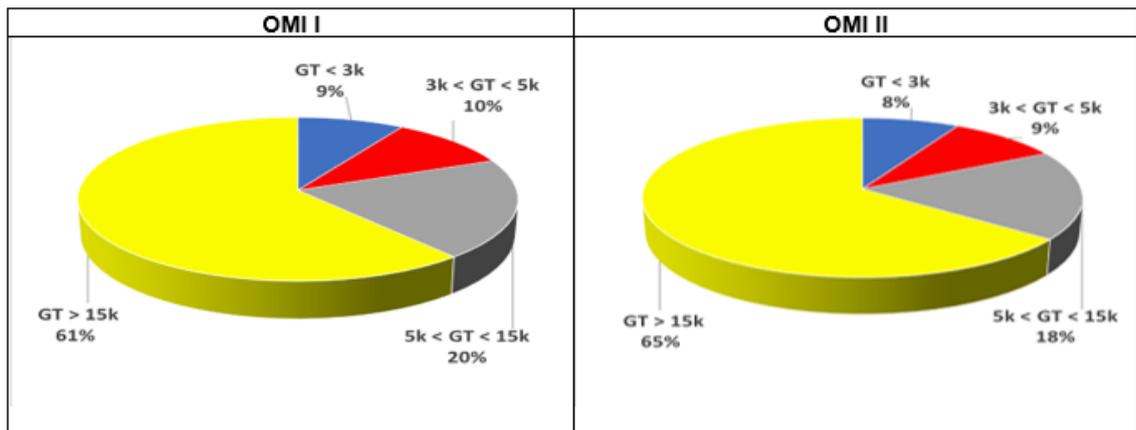
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 162 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de potencia propulsora instalada.

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I   |        |     | OMI II  |        |     |
|--------------------------------------|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|                                      | RO      | DO     | LNG | RO      | DO     | LNG |
| P < 2.000                            | 26.413  | 8.024  | 0   | 40.154  | 11.656 | 0   |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 76.842  | 23.343 | 0   | 117.282 | 34.044 | 0   |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 125.474 | 38.117 | 0   | 188.908 | 54.836 | 0   |
| P ≥ 10.000                           | 155.164 | 47.136 | 0   | 290.991 | 84.469 | 0   |

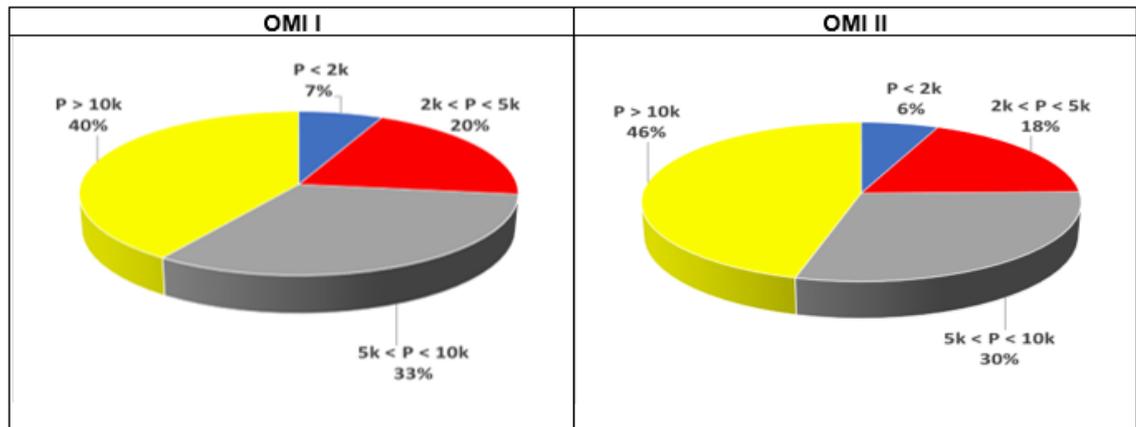
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 49 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LPG



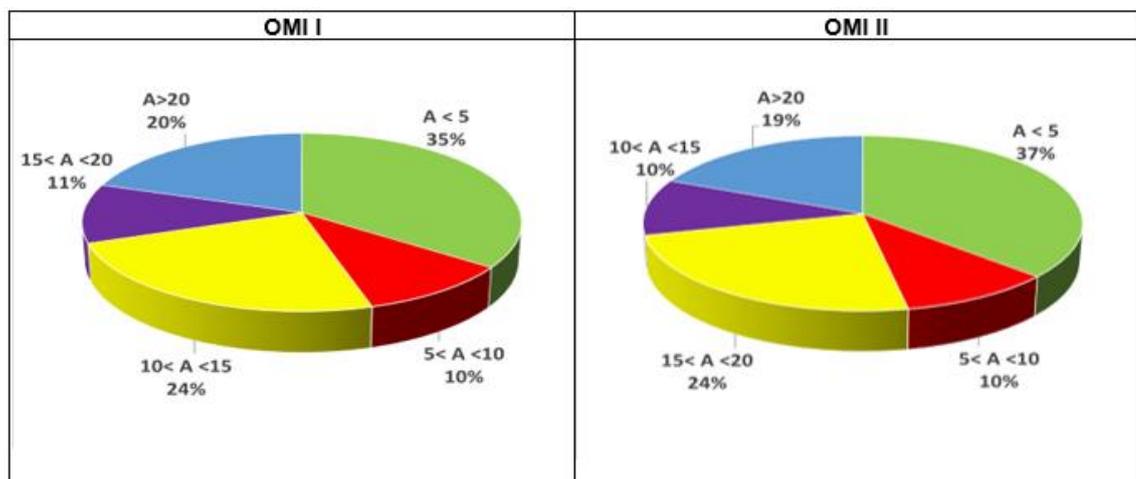
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 50 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 51 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de edad para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 163 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupos de edad.

| Grupo de Edad (A) | OMI I   |        |     | OMI II  |        |     |
|-------------------|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|                   | RO      | DO     | LNG | RO      | DO     | LNG |
| A ≤ 5             | 134.242 | 40.780 | 0   | 234.337 | 68.023 | 0   |
| 5 < A ≤ 10        | 39.881  | 12.115 | 0   | 65.339  | 18.967 | 0   |
| 10 < A ≤ 15       | 92.737  | 28.172 | 0   | 153.437 | 44.540 | 0   |
| 15 < A ≤ 20       | 41.147  | 12.500 | 0   | 66.290  | 19.243 | 0   |
| A > 20            | 75.887  | 23.053 | 0   | 117.931 | 34.233 | 0   |

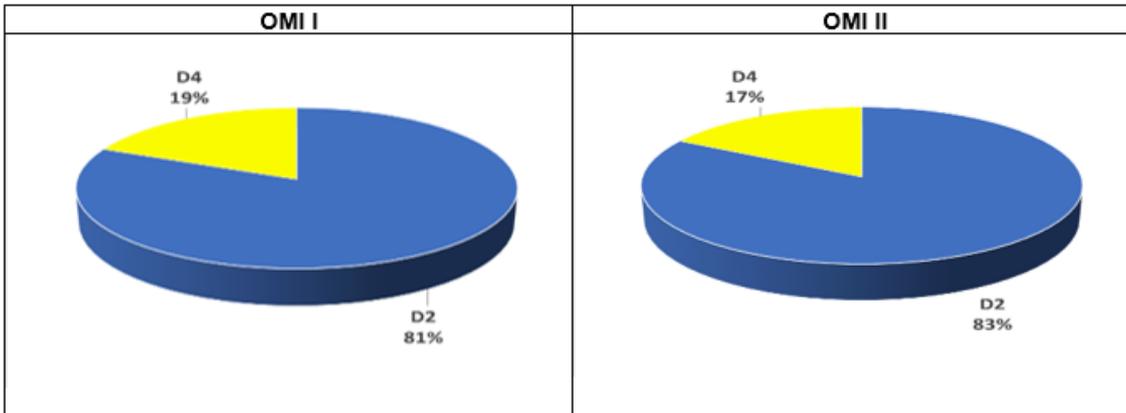
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 164 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según tipo de motor principal.

| Tipo de motor | OMI I   |        |     | OMI II  |         |     |
|---------------|---------|--------|-----|---------|---------|-----|
|               | RO      | DO     | LNG | RO      | DO      | LNG |
| D2            | 312.735 | 95.003 | 0   | 529.621 | 153.738 | 0   |
| D4            | 71.158  | 21.616 | 0   | 107.714 | 31.267  | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 52 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LPG.



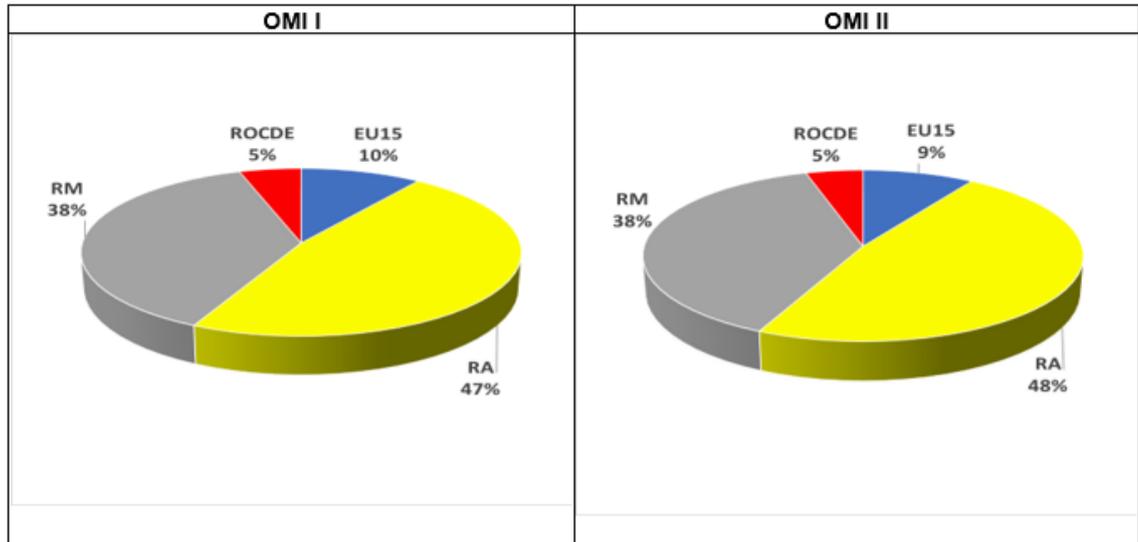
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 165 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LPG según grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | OMI I   |        |     | OMI II  |        |     |
|-------------------|---------|--------|-----|---------|--------|-----|
|                   | RO      | DO     | LNG | RO      | DO     | LNG |
| EU15              | 37.765  | 11.472 | 0   | 57.948  | 16.821 | 0   |
| RA                | 182.106 | 55.320 | 0   | 305.371 | 88.643 | 0   |
| RM                | 144.726 | 43.965 | 0   | 244.409 | 70.947 | 0   |
| ROCDE             | 19.296  | 5.862  | 0   | 29.606  | 8.594  | 0   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 53 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares para cada grupo de bandera para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

### 9.2.2. Consumo de combustible de los motores auxiliares en buques LNG

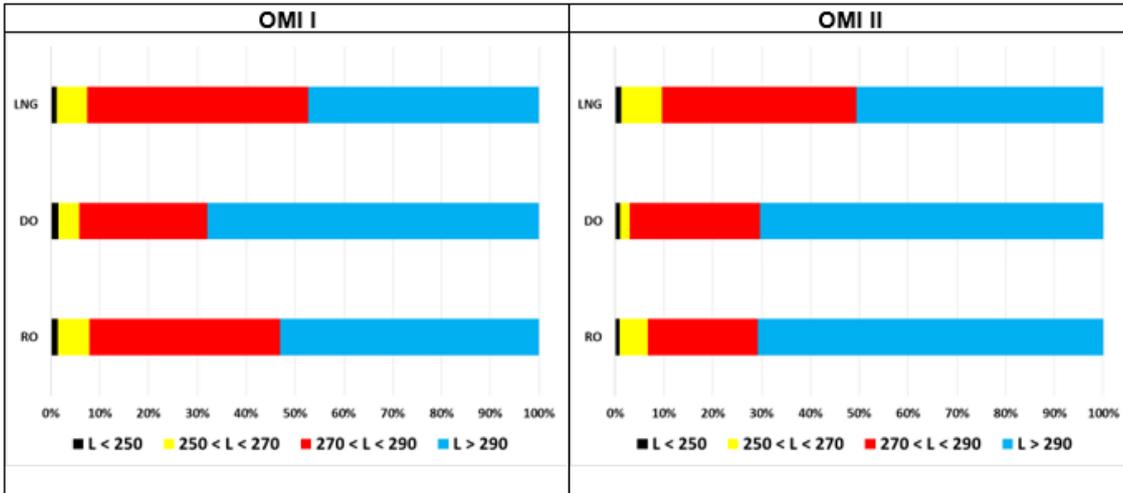
De igual manera que para los buques LPG, a continuación, se analiza el consumo anual para el año 2019 de los motores auxiliares de los buques LNG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueado bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (tablas 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172 y 173). También se analiza el porcentaje de consumo de cada tipo de combustible (residual, destilado y LNG) de los motores auxiliares de los buques LNG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueado bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (gráficas 54, 55, 56, 57, 59, 60 y 54).

Tabla 166 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LNG según grupos de eslora. .

| Grupo de esloras (L) | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|----------------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|                      | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| L < 250              | 7.680   | 960    | 9.337   | 6.515   | 859    | 13.715  |
| 250 ≤ L < 270        | 37.217  | 2.733  | 48.997  | 41.373  | 1.773  | 97.340  |
| 270 ≤ L < 290        | 223.151 | 16.544 | 357.439 | 161.242 | 23.494 | 460.515 |
| L ≥ 290              | 303.770 | 42.931 | 373.295 | 506.165 | 61.848 | 585.521 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 55 Porcentaje de consumo de los motores auxiliares de cada grupo de esloras para buques LNG.



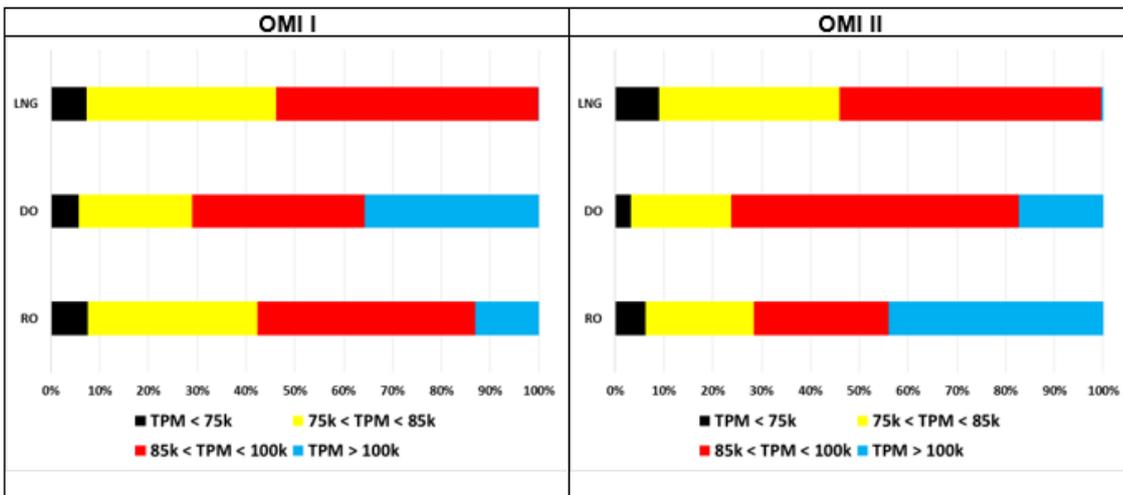
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 167 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LNG según grupos de peso muerto.

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|---|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|   | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| TPM < 75.000                            | 43.291  | 3.579  | 57.742  | 44.001  | 2.849  | 103.756 |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 198.427 | 14.681 | 305.770 | 159.135 | 18.012 | 428.369 |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 255.167 | 22.329 | 424.128 | 196.995 | 51.926 | 619.261 |
| TPM ≥ 100.000                           | 74.932  | 22.580 | 1.427   | 315.164 | 15.188 | 5.705   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 56 Porcentaje de consumo de combustible de los motores auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LNG.



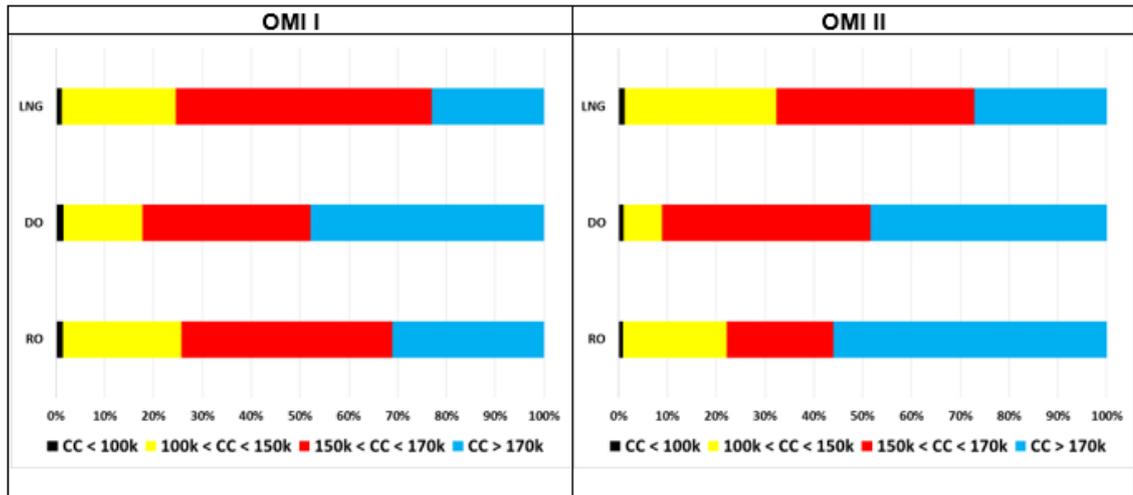
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 168 Consumo de combustibles de los motores auxiliares para los buques LNG según grupos de capacidad de carga.

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|--|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|  | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| CC < 100.000                           | 7.680   | 960    | 9.337   | 6.515   | 859    | 13.715  |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 138.836 | 10.199 | 184.302 | 152.237 | 6.907  | 360.020 |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 247.550 | 21.768 | 413.519 | 155.578 | 37.668 | 469.366 |
| CC ≥ 170.000                           | 177.751 | 30.241 | 181.909 | 400.966 | 42.540 | 313.990 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 57 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 169 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupos de arqueado bruto.

| Toneladas de Arqueado bruto (GT) | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|----------------------------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|                                  | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| GT < 60.000                      | 6.794   | 895    | 8.170   | 5.530   | 804    | 11.640  |
| 60.000 ≤ GT < 100.000            | 111.093 | 8.196  | 161.627 | 102.289 | 8.259  | 259.042 |
| 100.000 ≤ GT < 120.000           | 307.133 | 26.169 | 502.245 | 237.943 | 54.102 | 713.553 |
| GT ≥ 120.000                     | 146.798 | 27.909 | 117.026 | 369.533 | 24.809 | 172.856 |

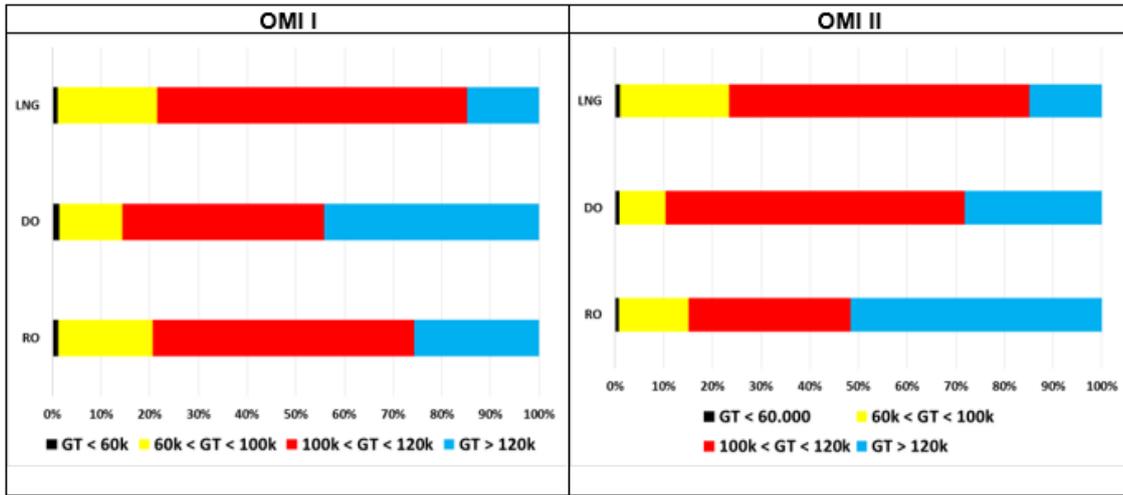
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 170 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupos de potencia propulsora

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|--------------------------------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|                                      | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| P < 20.000                           | 15.248  | 1.276  | 19.901  | 12.875  | 1.079  | 28.583  |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 177.486 | 13.311 | 248.363 | 198.208 | 23.112 | 519.890 |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 316.573 | 43.044 | 416.166 | 460.186 | 55.578 | 512.080 |
| P ≥ 40.000                           | 62.511  | 5.537  | 104.636 | 44.026  | 8.206  | 96.537  |

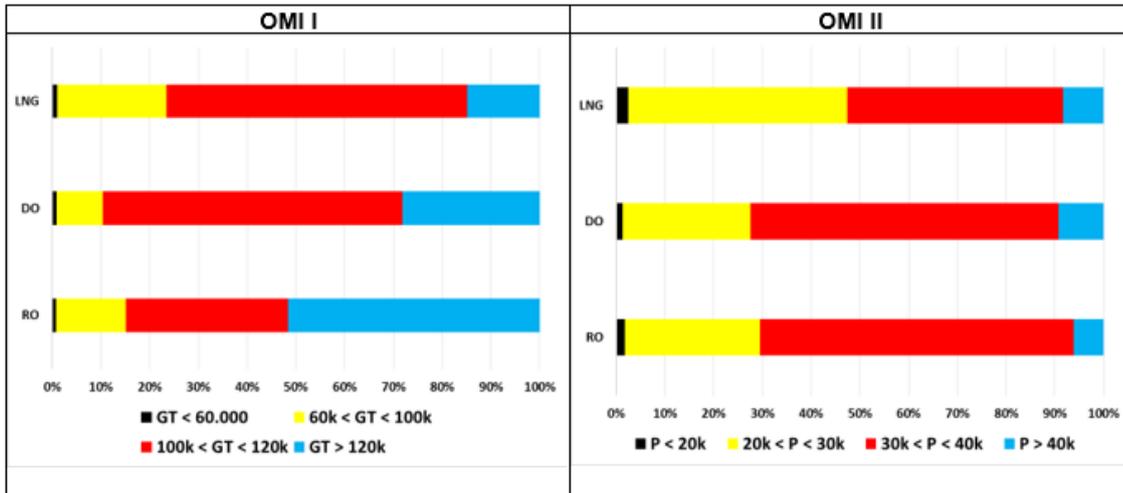
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 58 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares de cada grupo de arque bruto para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 59 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LNG.



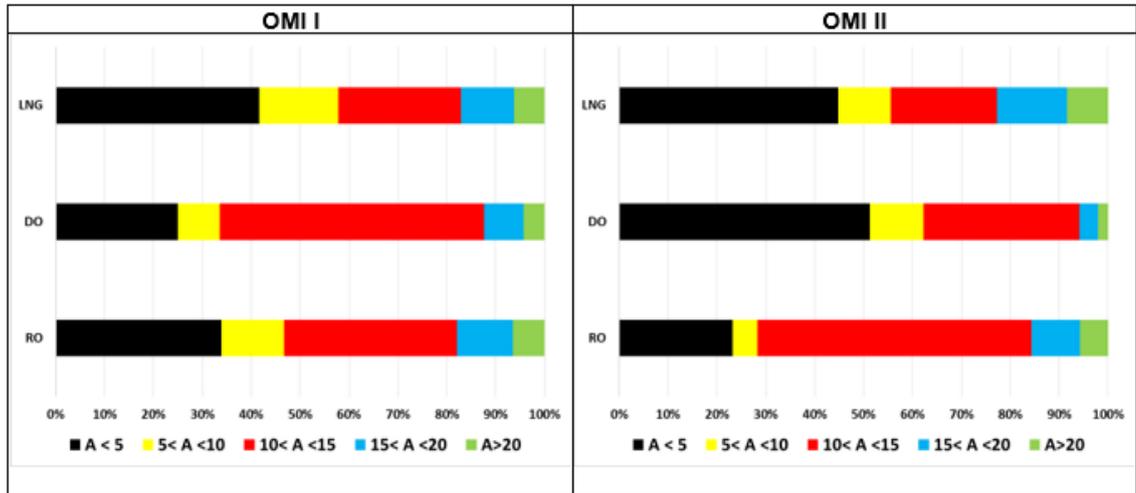
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 171 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupos de edad.

| Grupos de Edad (A) | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|--------------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|                    | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| A ≤ 5              | 193.941 | 15.743 | 328.129 | 165.456 | 45.109 | 518.123 |
| 5 < A ≤ 10         | 72.795  | 5.447  | 127.955 | 36.360  | 9.674  | 124.576 |
| 10 < A ≤ 15        | 202.116 | 34.122 | 197.436 | 401.279 | 28.002 | 250.628 |
| 15 < A ≤ 20        | 65.538  | 5.107  | 86.274  | 70.595  | 3.361  | 166.726 |
| A > 20             | 37.428  | 2.749  | 49.274  | 41.605  | 1.828  | 97.037  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 60 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.



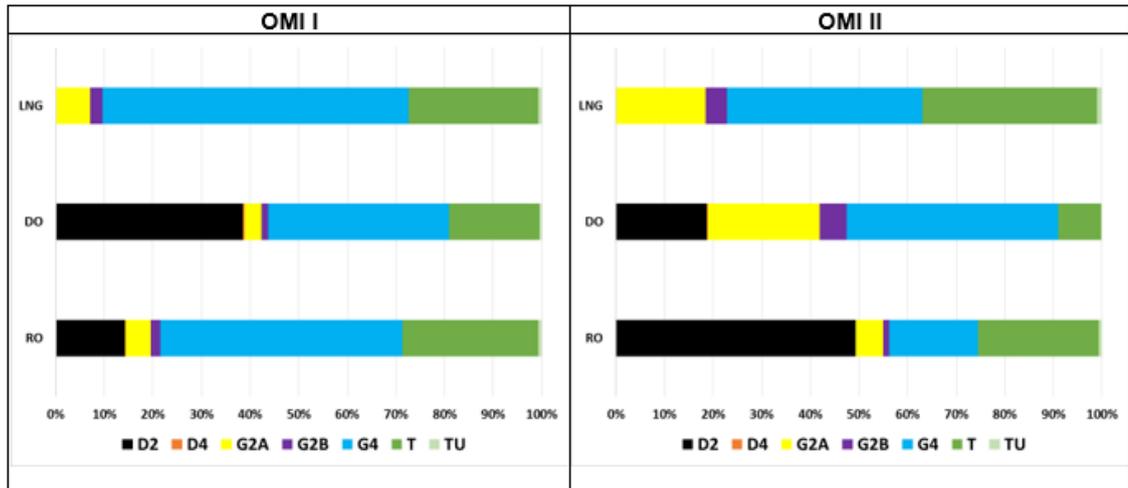
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 172 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según tipo de motor principal.

| Tipo de motor | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|---------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|               | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| D2            | 81.207  | 24.345 | 0       | 352.374 | 16.431 | 0       |
| D4            | 577     | 175    | 0       | 558     | 169    | 0       |
| G2A           | 29.980  | 2.236  | 55.967  | 39.734  | 20.303 | 213.700 |
| G2B           | 11.083  | 827    | 19.758  | 9.424   | 4.836  | 50.673  |
| G4            | 284.795 | 23.529 | 497.202 | 130.700 | 38.348 | 464.550 |
| T             | 159.617 | 11.722 | 210.138 | 177.437 | 7.669  | 416.243 |
| TU            | 4.560   | 335    | 6.003   | 5.069   | 217    | 11.925  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 61 Porcentaje de consumo de combustible de motores auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.



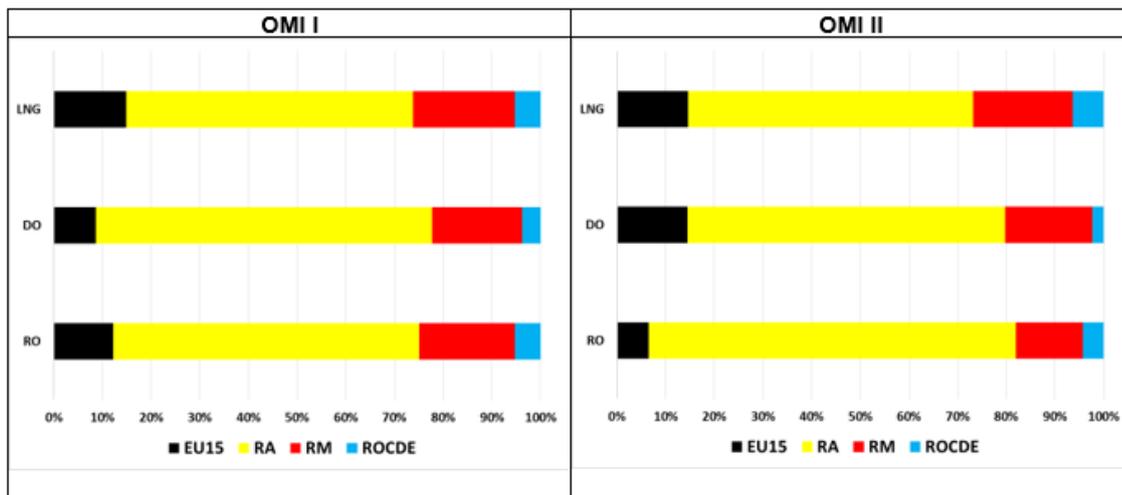
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 173 Consumo de combustibles de motores auxiliares para los buques LNG según grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | OMI I   |        |         | OMI II  |        |         |
|-------------------|---------|--------|---------|---------|--------|---------|
|                   | RO      | DO     | LNG     | RO      | DO     | LNG     |
| EU15              | 69.580  | 5.414  | 117.474 | 46.644  | 12.714 | 169.162 |
| RA                | 359.487 | 43.695 | 465.016 | 539.939 | 57.434 | 677.753 |
| RM                | 112.180 | 11.654 | 165.053 | 97.880  | 15.811 | 236.341 |
| ROCDE             | 30.571  | 2.405  | 41.524  | 30.832  | 2.016  | 73.834  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 62 Porcentaje de consumo de combustible para cada grupo de bandera para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

### 9.3. Consumo de combustible de las calderas auxiliares

Las calderas auxiliares son la tercera de emisiones que se analiza en este trabajo de investigación. Su consumo a nivel anual es inferior a motores principales y auxiliares. En este proyecto de investigación, se ha asumido que todos los buques gaseros con calderas auxiliares solo van a emplear o bien combustibles residuales o destilados.

En la Tabla 174 se muestra el porcentaje de cada tipo de combustible consumido por las calderas auxiliares aplicando la metodología OMI I y OMI II.

Tabla 174 Porcentaje de combustible consumido por las calderas auxiliares

| Tipo de combustible | Buques LPG |        | Buques LNG |        |
|---------------------|------------|--------|------------|--------|
|                     | OMI I      | OMI II | OMI I      | OMI II |
| Combustible RO      | 3,9%       | 4,0%   | 1,4%       | 1,0%   |
| Combustible DO      | 3,9%       | 4,1%   | 1,8%       | 7,0%   |
| Combustible LNG     | 0          | 0      | 0          | 0      |

Fuente: Elaboración propia.

### 9.3.1. Consumo de combustible de las calderas auxiliares en buques LPG

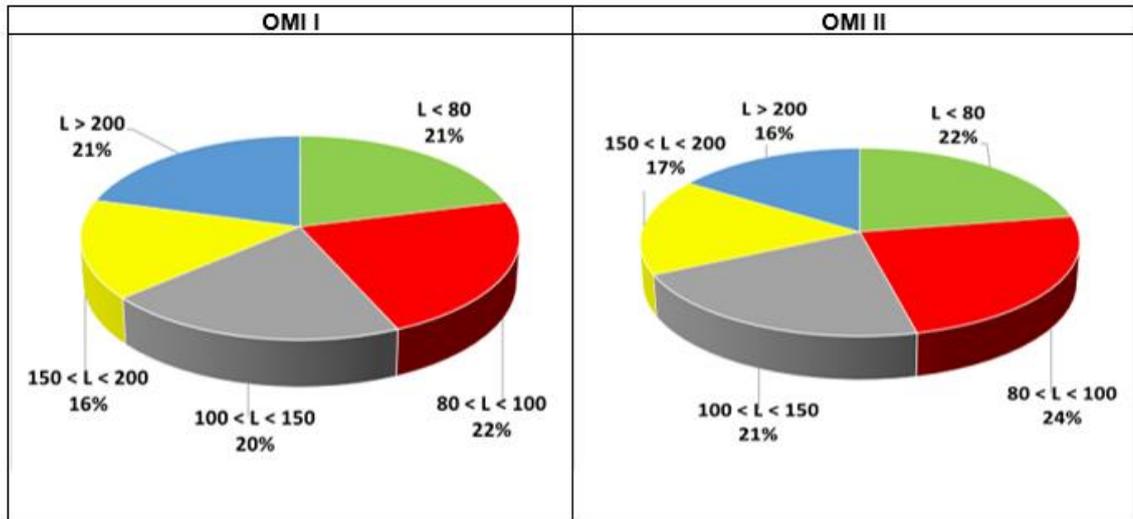
A continuación, se analizan los consumos anuales para el año 2019 de las calderas auxiliares de los buques LPG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (tablas 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181 y 182). También se analiza el porcentaje de cada tipo de combustible consumido en las calderas auxiliares en estos buques para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (gráficas 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68 y 69). En este trabajo de investigación se asume que las calderas auxiliares solo consumen combustibles residuales o destilados.

Tabla 175 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de eslora.

| Grupo de esloras (L) | OMI I  |        | OMI II |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
|                      | RO     | DO     | RO     | DO     |
| L < 80               | 51.054 | 15.509 | 85.080 | 24.998 |
| 80 ≤ L < 100         | 54.842 | 16.660 | 91.393 | 26.853 |
| 100 ≤ L < 150        | 49.242 | 14.959 | 82.061 | 24.111 |
| 150 ≤ L < 200        | 38.538 | 11.707 | 63.648 | 18.989 |
| L ≥ 200              | 50.395 | 15.309 | 59.526 | 17.521 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 63 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de esloras para buques LPG.



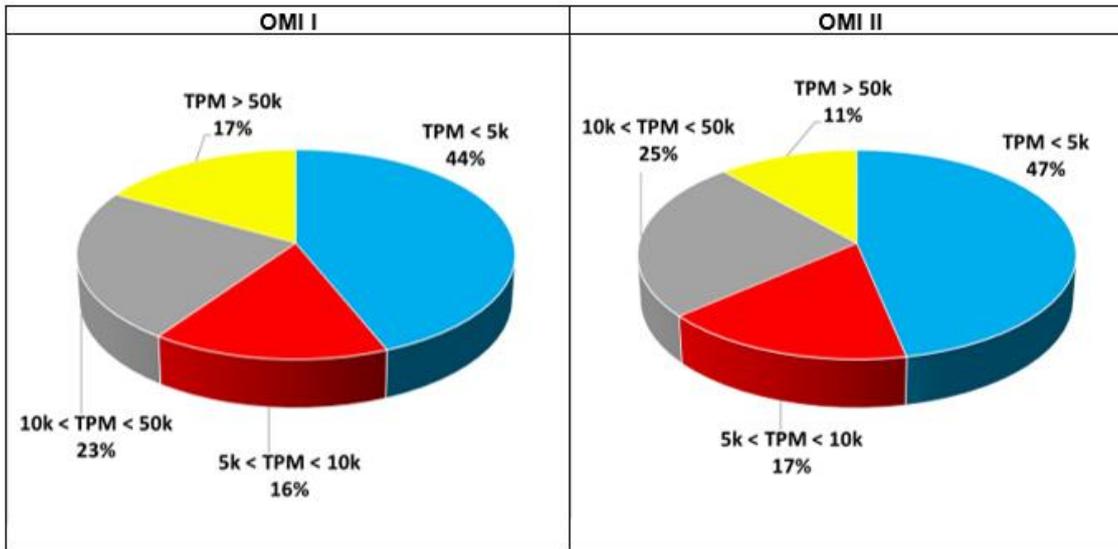
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 176 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de peso muerto.

| Grupo de Toneladas de<br>Peso muerto (TPM) | OMI I   |        | OMI II  |        |
|--|---------|--------|---------|--------|
|  | RO      | DO     | RO      | DO     |
| TPM < 5.000                                | 107.049 | 32.519 | 178.394 | 52.416 |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                       | 38.702  | 11.757 | 64.496  | 18.950 |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                      | 57.312  | 17.410 | 94.936  | 28.182 |
| TPM ≥ 50.000                               | 41.008  | 12.457 | 43.882  | 12.924 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 64 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LPG.



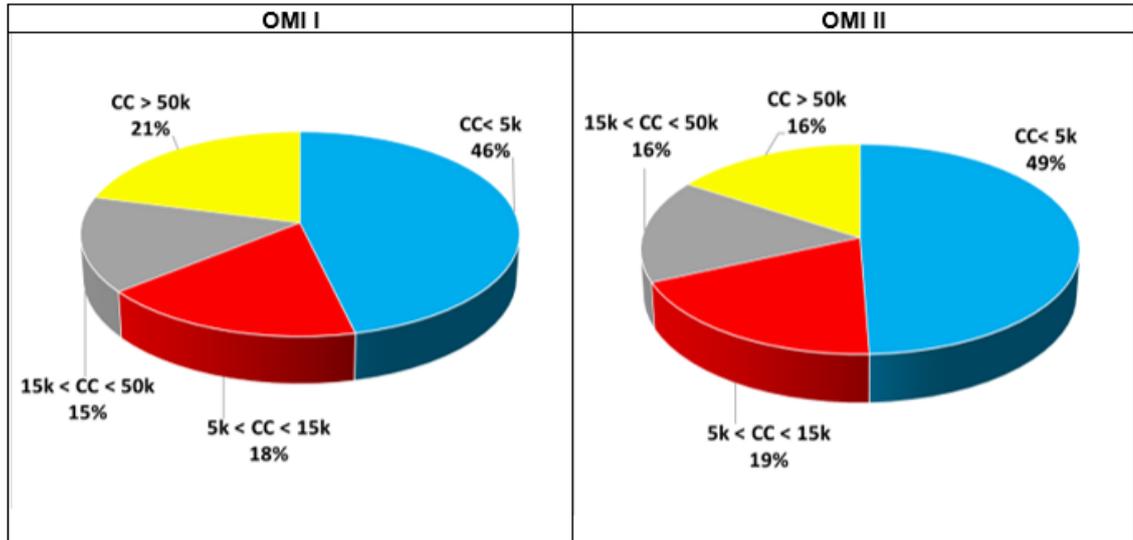
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 177 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de capacidad de carga.

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga<br>(CC) | OMI I   |        | OMI II  |        |
|---|---------|--------|---------|--------|
|   | RO      | DO     | RO      | DO     |
| CC < 5.000                                | 113.142 | 34.370 | 188.549 | 55.400 |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                       | 43.149  | 13.108 | 71.907  | 21.128 |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                      | 36.891  | 11.207 | 60.904  | 18.183 |
| CC ≥ 50.000                               | 50.889  | 15.459 | 60.349  | 17.763 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 65 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LPG.



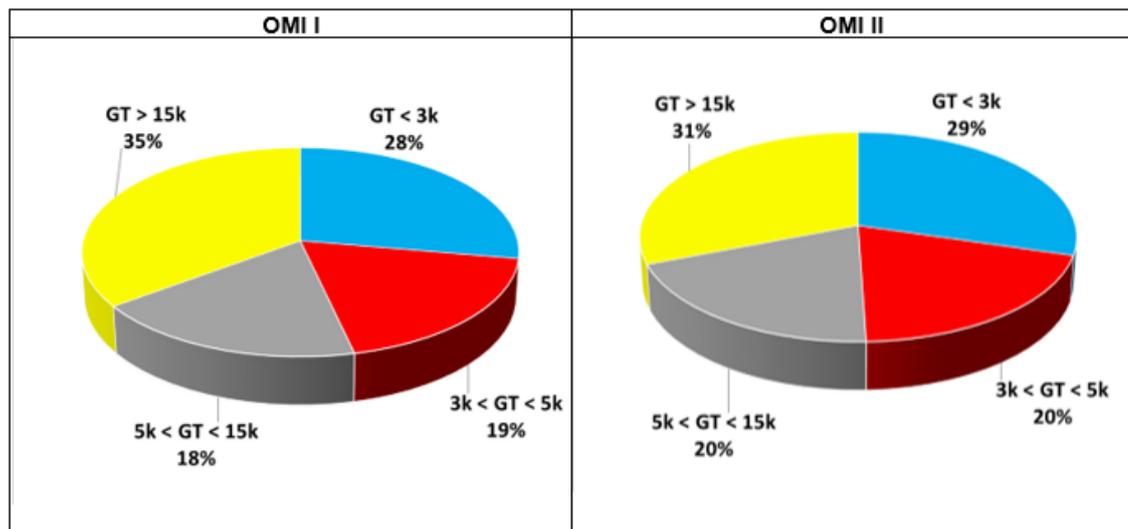
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 178 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de arqueo bruto.

| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | OMI I  |        | OMI II  |        |
|--------------------------------|--------|--------|---------|--------|
|                                | RO     | DO     | RO      | DO     |
| GT < 3.000                     | 67.688 | 20.562 | 112.800 | 33.143 |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 45.619 | 13.858 | 76.023  | 22.337 |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 44.960 | 13.658 | 74.926  | 22.015 |
| GT ≥ 15.000                    | 85.804 | 26.066 | 117.960 | 34.978 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 66 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LPG



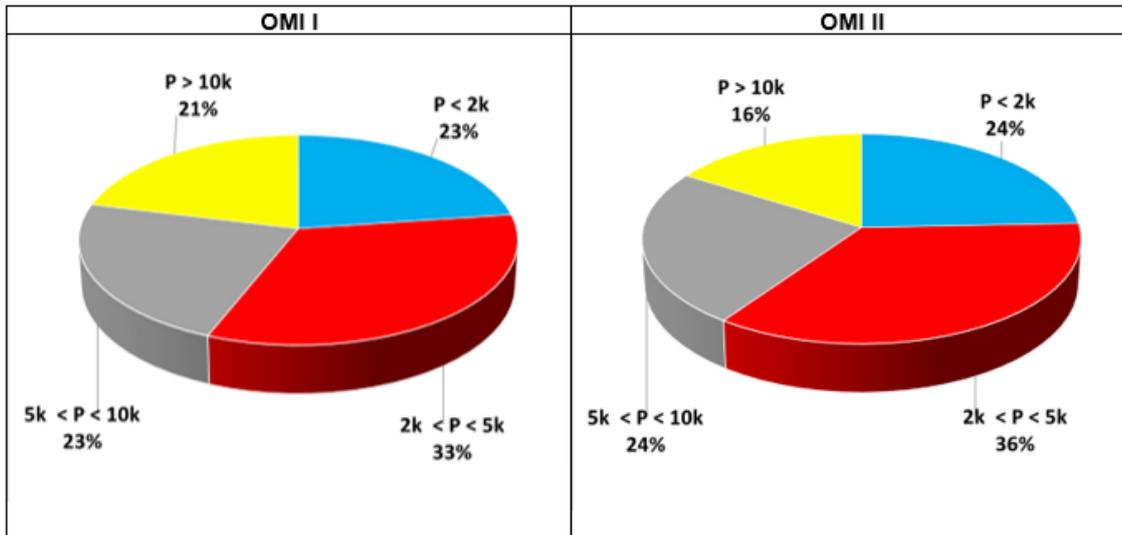
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 179 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de potencia propulsora instalada.

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I  |        | OMI II  |        |
|--------------------------------------|--------|--------|---------|--------|
|                                      | RO     | DO     | RO      | DO     |
| $P < 2.000$                          | 55.665 | 16.910 | 93.039  | 27.337 |
| $2.000 \leq P < 5.000$               | 81.192 | 24.665 | 135.031 | 39.675 |
| $5.000 \leq P < 10.000$              | 55.501 | 16.860 | 92.010  | 27.227 |
| $P \geq 10.000$                      | 51.713 | 15.709 | 61.628  | 18.235 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 67 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de potencia propulsora instalada para buques LPG.



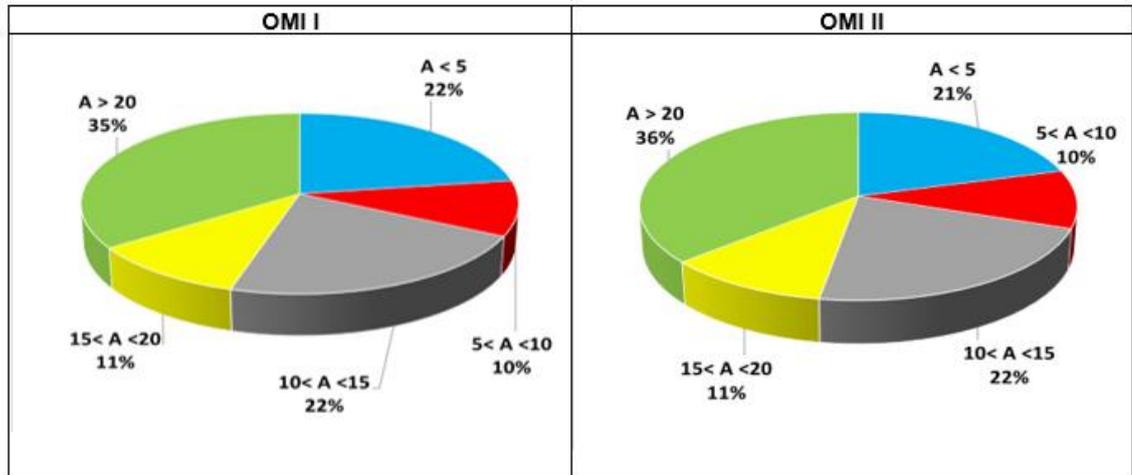
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 180 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupos de edad.

| Grupo de Edad (A) | OMI I  |        | OMI II  |        |
|-------------------|--------|--------|---------|--------|
|                   | RO     | DO     | RO      | DO     |
| $A \leq 5$        | 55.171 | 16.760 | 78.276  | 23.318 |
| $5 < A \leq 10$   | 24.209 | 7.354  | 38.189  | 11.221 |
| $10 < A \leq 15$  | 53.854 | 16.360 | 84.162  | 24.728 |
| $15 < A \leq 20$  | 26.186 | 7.955  | 41.776  | 12.275 |
| $A > 20$          | 84.651 | 25.715 | 139.305 | 40.931 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 68 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de edad para buques LPG.



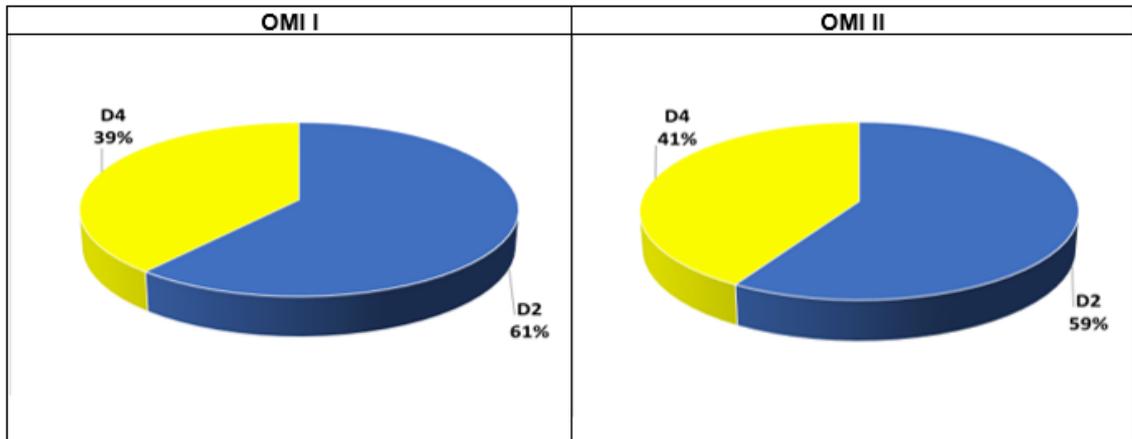
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 181 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según tipo de motor principal.

| Tipo de motor | OMI I   |        | OMI II  |        |
|---------------|---------|--------|---------|--------|
|               | RO      | DO     | RO      | DO     |
| D2            | 149.209 | 45.327 | 223.624 | 66.024 |
| D4            | 94.862  | 28.817 | 158.085 | 46.449 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 69 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LPG.



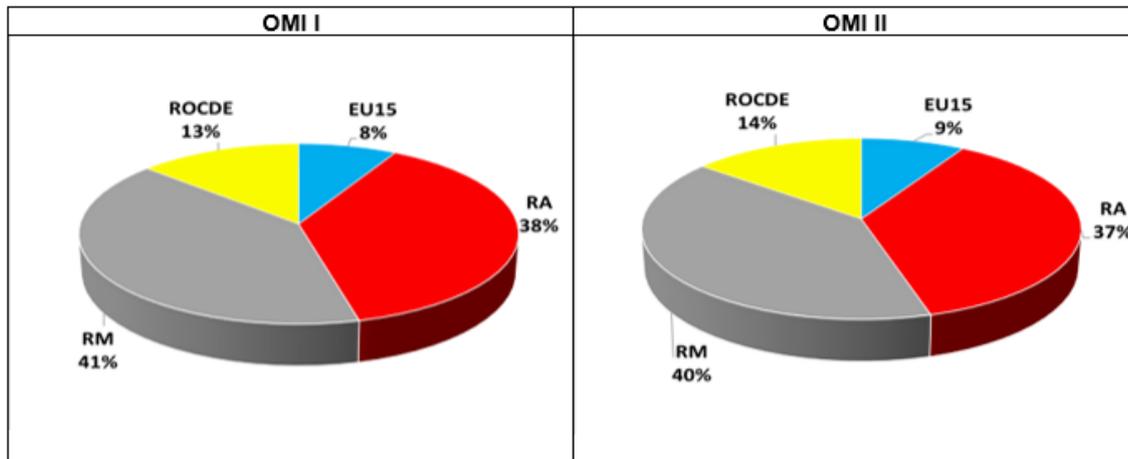
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 182 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LPG según grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | OMI I  |        | OMI II  |        |
|-------------------|--------|--------|---------|--------|
|                   | RO     | DO     | RO      | DO     |
| EU15              | 19.598 | 5.954  | 32.366  | 9.510  |
| RA                | 92.721 | 28.167 | 140.950 | 41.733 |
| RM                | 99.144 | 30.118 | 154.248 | 45.321 |
| ROCDE             | 32.609 | 9.906  | 54.146  | 15.909 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 70 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada grupo de bandera para buques LPG.



Fuente: Elaboración propia.

### 9.3.2. Consumo de combustible en calderas auxiliares en buques LNG

A continuación, se analizan los consumos anuales para el año 2019 de las calderas auxiliares de los buques LNG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (tablas 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189 y 190). También se analiza el porcentaje de consumo de cada tipo de combustible (residual, destilado y LNG) de los motores auxiliares de los buques LNG para cada grupo de esloras, de peso muerto, de capacidad de carga, de arqueo bruto, de potencia propulsora instalada, de edad y según el tipo de motor principal instalado (gráficas 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76 y 77).

Tabla 183 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de eslora.

| Grupo de esloras (L) | OMI I  |       | OMI II |        |
|----------------------|--------|-------|--------|--------|
|                      | RO     | DO    | RO     | DO     |
| L < 250              | 2.717  | 700   | 3.656  | 855    |
| 250 ≤ L < 270        | 0      | 0     | 0      | 0      |
| 270 ≤ L < 290        | 19.269 | 3.902 | 14.264 | 1.743  |
| L ≥ 290              | 48.172 | 9.756 | 26.166 | 13.473 |

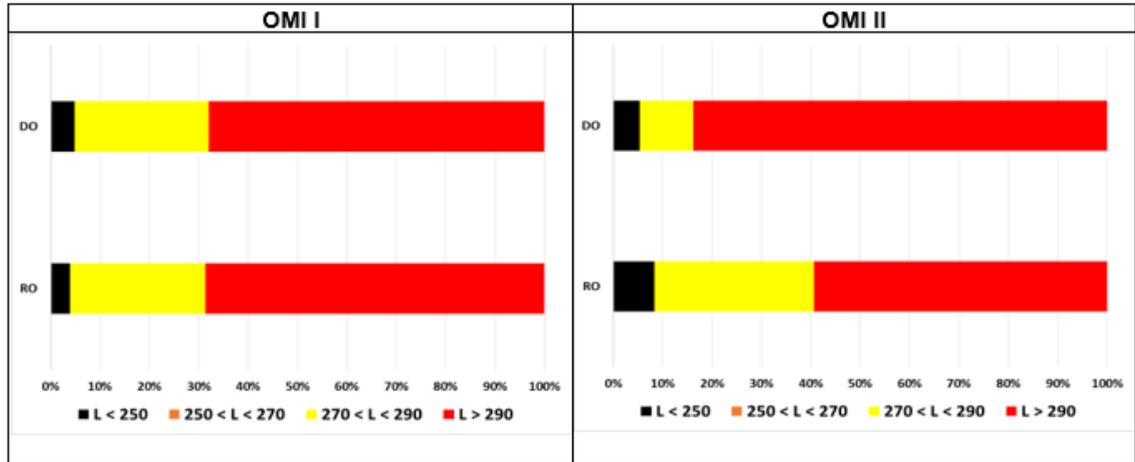
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 184 Consumo de combustibles de calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de peso muerto.

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I  |       | OMI II |        |
|---|--------|-------|--------|--------|
|   | RO     | DO    | RO     | DO     |
| 75.000 < TPM                            | 3.211  | 800   | 4.027  | 894    |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 13.587 | 2.752 | 10.214 | 1.079  |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 42.243 | 8.555 | 24.602 | 10.231 |
| TPM ≥ 100.000                           | 11.117 | 2.251 | 5.242  | 3.866  |

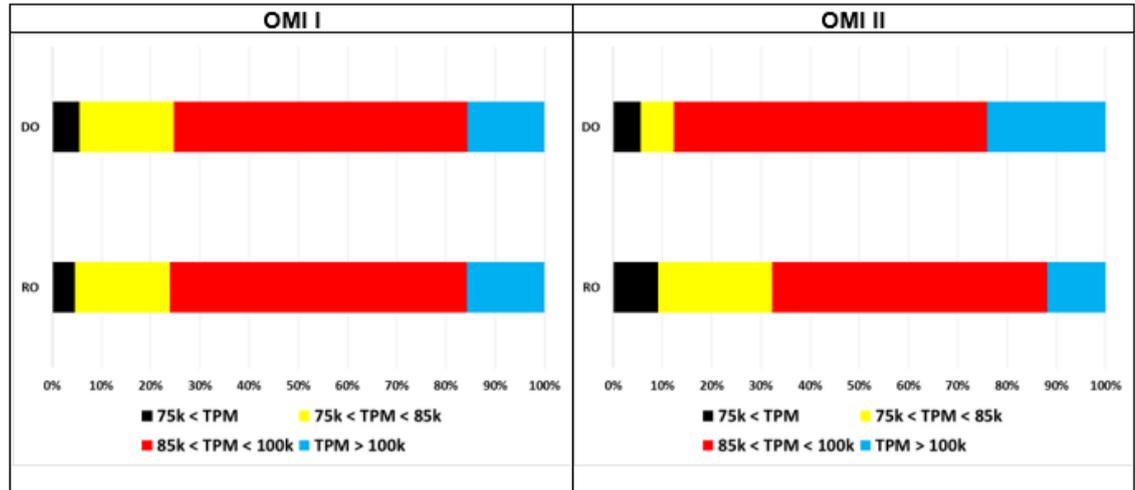
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 71 Porcentaje de consumo de combustible de calderas auxiliares de cada grupo de esloras para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 72 Porcentaje de consumo de las calderas auxiliares de cada grupo de peso muerto para buques LNG.



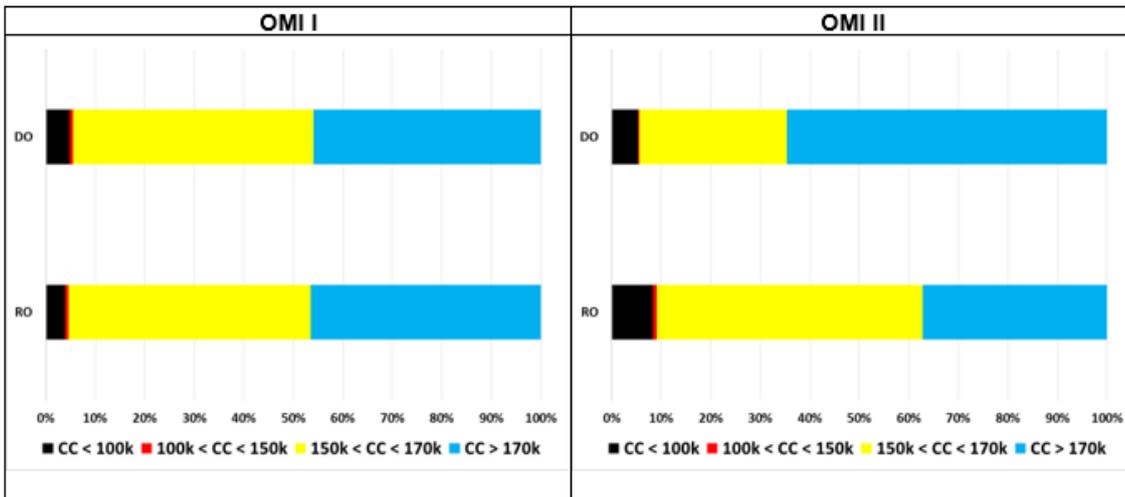
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 185 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de capacidad de carga.

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I  |       | OMI II |        |
|--|--------|-------|--------|--------|
|  | RO     | DO    | RO     | DO     |
| CC < 100.000                           | 2.717  | 700   | 3.656  | 855    |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 494    | 100   | 371    | 39     |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 34.338 | 6.954 | 23.661 | 4.796  |
| CC ≥ 170.000                           | 32.609 | 6.604 | 16.397 | 10.381 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 73 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de capacidad de carga para buques LNG.



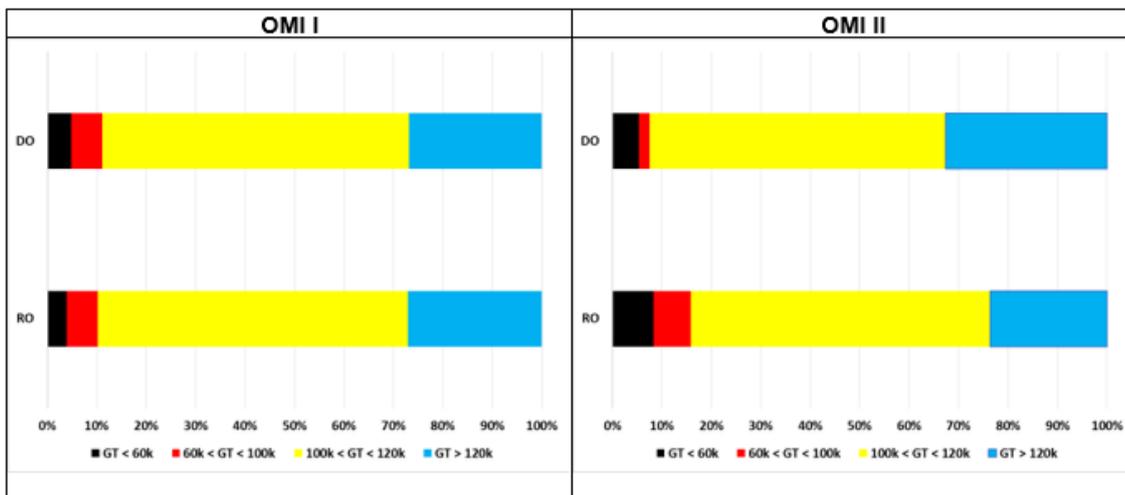
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 186 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de arqueo bruto.

| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | OMI I  |       | OMI II |       |
|--------------------------------|--------|-------|--------|-------|
|                                | RO     | DO    | RO     | DO    |
| GT < 60.000                    | 2.717  | 700   | 3.656  | 855   |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 4.447  | 901   | 3.343  | 353   |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 43.972 | 8.905 | 26.676 | 9.625 |
| GT ≥ 120.000                   | 19.022 | 3.852 | 10.411 | 5.238 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 74 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de arqueo bruto para buques LNG.



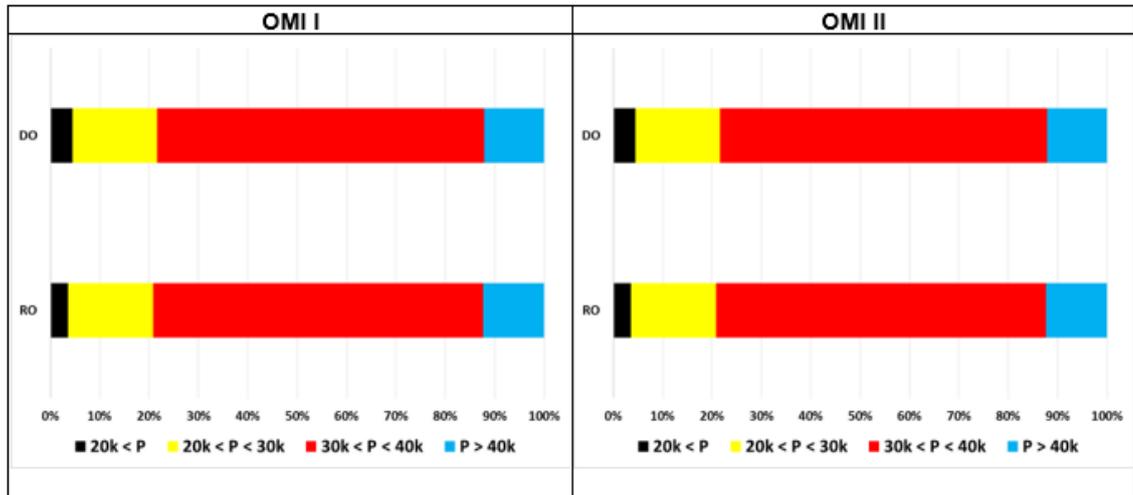
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 187 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de potencia propulsora instalada.

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I  |       | OMI II |       |
|--------------------------------------|--------|-------|--------|-------|
|                                      | RO     | DO    | RO     | DO    |
| 20.000 < P                           | 2.553  | 650   | 3367   | 825   |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 12.022 | 2.451 | 6.417  | 4245  |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 46.937 | 9.506 | 28.792 | 10157 |
| P ≥ 40.000                           | 8.646  | 1.751 | 5510   | 845   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 75 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares de cada grupo de arqueado bruto para buques LNG



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 188 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupos de edad.

| Grupos de Edad (A) | OMI I  |       | OMI II |        |
|--------------------|--------|-------|--------|--------|
|                    | RO     | DO    | RO     | DO     |
| A ≤ 5              | 36.973 | 7.504 | 21.045 | 10.039 |
| 5 < A ≤ 10         | 10.293 | 2.101 | 8.006  | 846    |
| 10 < A ≤ 15        | 21.986 | 4.503 | 13.953 | 4.958  |
| 15 < A ≤ 20        | 906    | 250   | 1.082  | 229    |
| A > 20             | 0      | 0     | 0      | 0      |

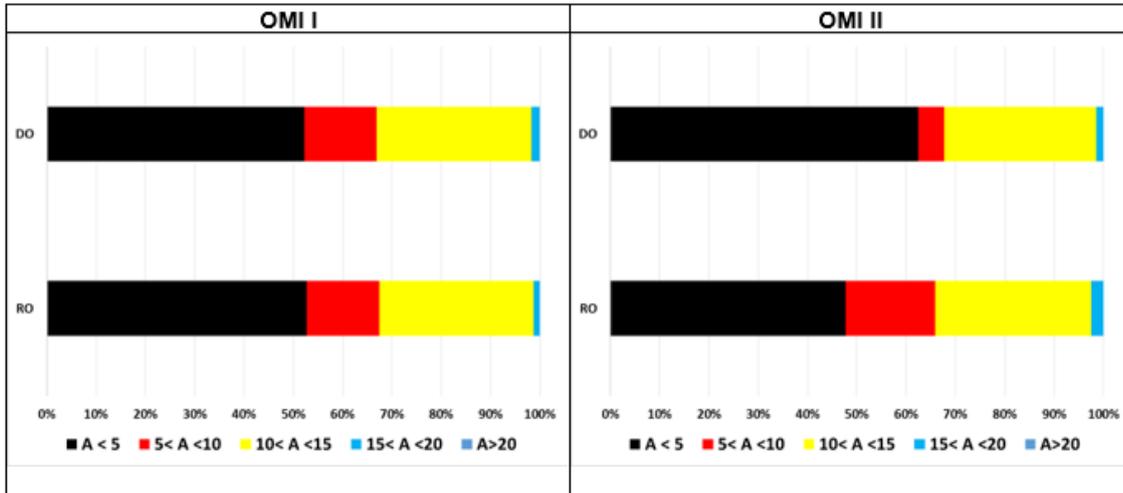
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 189 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según tipo de motor principal.

| Tipo de motor | OMI I  |       | OMI II |       |
|---------------|--------|-------|--------|-------|
|               | RO     | DO    | RO     | DO    |
| D2            | 12.352 | 2.501 | 5.872  | 4.250 |
| D4            | 823    | 250   | 1.518  | 446   |
| G2A           | 12.352 | 2.501 | 3.757  | 6.296 |
| G2B           | 3.129  | 650   | 1.018  | 1.707 |
| G4            | 41.502 | 8.455 | 31.920 | 3.372 |
| T             | 0      | 0     | 0      | 0     |
| TU            | 0      | 0     | 0      | 0     |

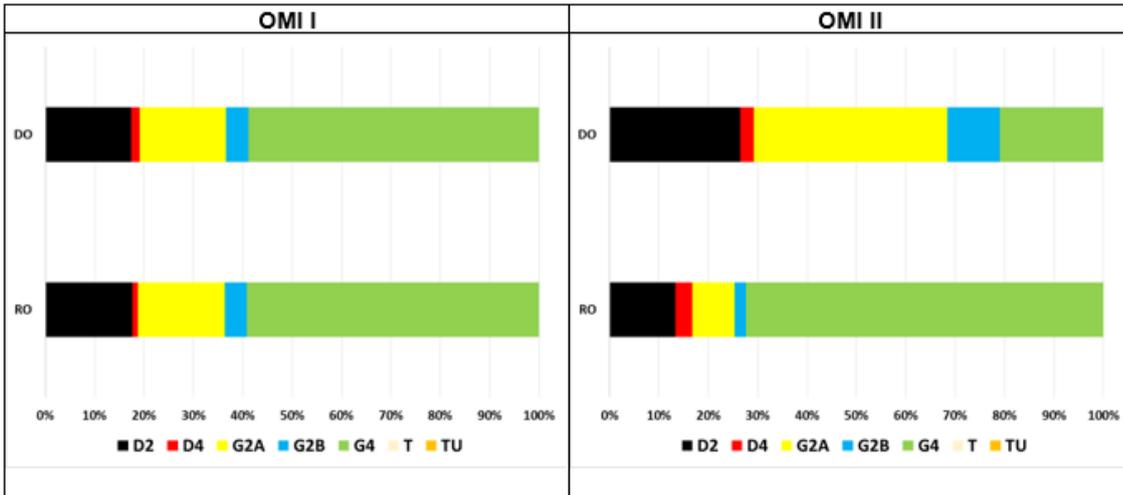
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 76 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 77 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada tipo de motor principal para buques LNG.



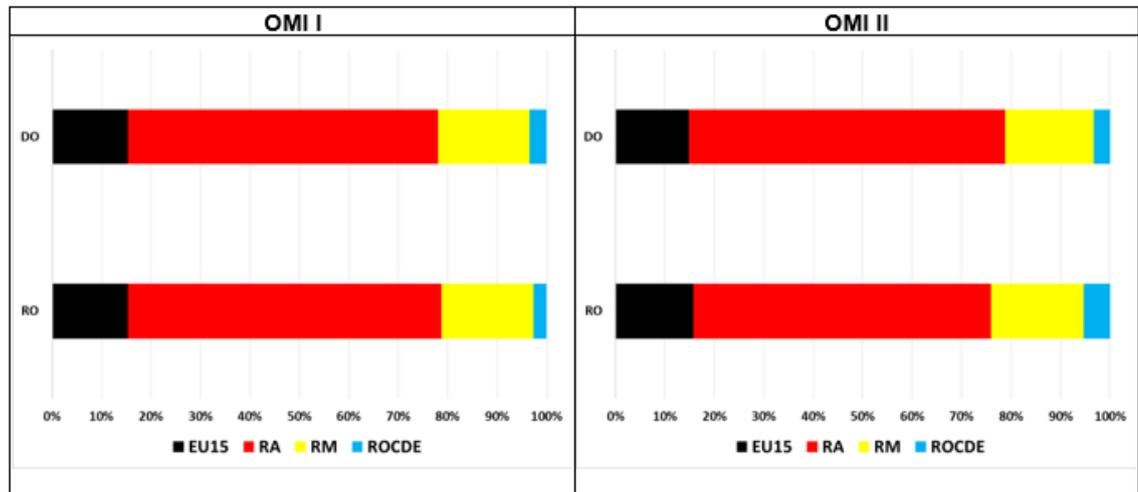
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 190 Consumo de combustibles de las calderas auxiliares para los buques LNG según grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | RO     | DO    | RO     | DO     |
|-------------------|--------|-------|--------|--------|
| EU15              | 10.787 | 2.201 | 6.932  | 2.384  |
| RA                | 44.466 | 9.005 | 26.520 | 10.271 |
| RM                | 13.011 | 2.652 | 8.269  | 2.881  |
| ROCDE             | 1.894  | 500   | 2.364  | 535    |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Gráfica 78 Porcentaje de consumo de combustible de las calderas auxiliares para cada grupo de bandera para buques LNG.



Fuente: Elaboración propia.

## 9.4. Consumo de LNG en los GCU

El consumo de LNG en los GCU solo se considera en la metodología OMI II, y únicamente para los buques que tienen como sistema de propulsión motores duales de cuatro tiempos y motores duales de dos tiempos. La cantidad de LNG consumido en los buques LNG con GCU a bordo se muestra en la Tabla 191.

Tabla 191 Porcentaje del LNG total consumido por buques LNG con GCU a bordo

| Sistema de propulsión | LNG consumido |
|-----------------------|---------------|
| G4                    | 7%            |
| G2A                   | 7,3%          |
| G2B                   | 6,7%          |

Fuente: Elaboración propia.

El objetivo de los operadores de los buques LNG es reducir al máximo el uso de GCU ya que el LNG quemado en estas unidades no producen ningún trabajo en las plantas propulsoras o auxiliares de los buques.

Un total de 351.041 toneladas de LNG fueron quemadas en los GCU de los buques LNG, el 3,3% del total del consumo de LNG de la flota de buques LNG.

## 9.5. Comparación de resultados OMI I vs. OMI II

Este trabajo de investigación evalúa la sostenibilidad socioeconómica y medioambiental de los buques gaseros partiendo del cálculo de las emisiones atmosféricas de la flota de gaseros. Dos métodos han sido empleados en esta tesis. Uno basado en el Tercer Estudio de Gases

Invernadero realizado por OMI en el año 2014, y otro basado en una metodología bottom-up actualizada con datos operacionales empíricos del año 2019, así como otras consideraciones explicadas en el capítulo de *Metodología* de esta tesis. Estos métodos se han aplicado a la flota de gaseros obtenida de *Fairplay Database* a 1 de enero de 2020, por lo tanto, la flota de gaseros considerada está actualizada hasta esa fecha.

Una primera comprobación se realiza comparando los resultados de las emisiones de CO<sub>2</sub> reportadas en el Tercer Informe de GEI de OMI en 2014 aplicando la metodología Bottom-up con los resultados obtenidos en esta tesis al aplicar la metodología OMI I y OMI II para el mismo año de referencia (2012). OMI en 2014 reportó para la flota de gaseros 46 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>, las metodologías OMI I y OMI II dan como resultado 47,5 y 47,8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> para el año 2012. Son resultados que se aproximan bastante a lo reportado por OMI, siendo un 3,3% y un 3,9% superior los resultados obtenidos por las metodologías empleadas en esta tesis OMI I y OMI II respectivamente. La diferencia en los resultados radica principalmente en los buques considerados, los datos técnicos que había para los barcos en el 2012 y en 2020 y en las asunciones tomadas acerca del perfil operacional; aun así, los resultados están dentro del error asumido del 5% aceptado en esta tesis.

Al emplear estas dos metodologías, es importante saber cuál de las dos refleja con mayor precisión la realidad de los buques gaseros, es decir, comparar los resultados obtenidos al aplicar las dos metodologías con datos reales medidos en buques gaseros en servicio, y comparar cuál de los dos modelos se aproxima más a los datos reales reportados por los buques (Van Nieuwkoop *et al.*, 2013).

Esta comparación de los modelos se va a hacer empleando el estadístico "t-student", que es un tipo de estadística deductiva. Esta prueba se emplea para determinar si hay una diferencia significativa entre las medias de dos muestras, en nuestro caso es cada uno de los modelos obtenidos aplicando las dos metodologías para estimar los consumos de combustibles y emisiones asociadas, y la otra muestra son los datos reales medidos a bordo de buques gaseros.

En el método "t-student" se asume que las variables dependientes tienen una distribución normal cuando tiene tamaños de muestra pequeños. Es decir, cuando se representa gráficamente como un histograma, la forma se aproxima a una curva de campana.

Se va a emplear el método "t-student" de dos muestras o dos colas (grupos independientes), ya que es una prueba robusta frente a desviaciones moderadas del supuesto de normalidad y varianza. Al igual que con cualquier versión de este método, al realizar una prueba de dos muestras, puede o no tener una suposición preconcebida sobre la dirección de sus hallazgos, en este trabajo de investigación no se supone de antemano la dirección de los resultados (sobreestimación o subestimación).

La prueba "t-student" de dos muestras determina si las medias desconocidas de dos poblaciones son diferentes entre sí en base a muestras independientes de cada población. Si las medias de dos muestras son suficientemente diferentes entre sí, entonces las medias de

población se declaran diferentes. En esta prueba, se desea comparar medias de una variable cuantitativa como altura, peso, cantidad gastada o en este caso, consumo de combustible residual, destilado y LNG, conociéndose como variable "respuesta" o "resultado".

Por otro lado, esta prueba no depende de los juicios de expertos y presenta resultados más aceptados (Habibnia, A. *et al.*, 2020), esto hace que sea un método válido y reconocido para la comparación de muestras en experimentos científicos.

En esta tesis, para realizar la comparación de las bases de datos obtenidas a partir de la aplicación de la metodología basada en el Tercer Estudio de Gases Invernadero realizado por OMI ("OMI I") y la metodología bottom-up actualizada con datos operacionales empíricos del año 2019 ("OMI II 2"), se han comparado las variables de consumos de combustibles y emisiones de CO<sub>2</sub> de cada una de ellas con los datos de consumos anuales medidos en 75 buques LNG y LPG, obteniendo y analizando el coeficiente de correlación de Pearson ("p") (Peña-Troncoso *et al.*, 2019).

$$p_{X,Y} = \frac{\sigma_{XY}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \quad 82$$

Donde

$\sigma_{XY}$  es la covarianza de (X, Y)

$\sigma_X$  es la desviación estándar de la variable X

$\sigma_Y$  es la desviación estándar de la variable Y

Los buques de los que se han obtenido datos de consumo anuales contabilizan exclusivamente el consumo de los motores principales, motores auxiliares, calderas auxiliares y GCU (donde sea aplicable).

Tabla 192 Categorización de los 75 buques reales que sirven de referencia en la comparación de metodologías.

| Tipo de propulsión | Número de buques |
|--------------------|------------------|
| M2                 | 9                |
| T                  | 46               |
| G2                 | 2                |
| G4                 | 18               |

Fuente: Elaboración propia.

**M2:** Motores diésel de dos tiempos. **T:** Plantas de vapor. **G2:** Motores duales de tiempos con inyección de gas, **G4:** Motores duales de cuatro tiempos con inyección de gas.

Los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 193 son con 1 grado de libertad y son evaluados aplicando el concepto de máxima verosimilitud y prueba de hipótesis del valor p (Montenegro *et al.*, 2001; Lubiano *et al.*, 2017; Trede, 2020). Cuanto menor sea el valor de p, se puede asegurar que los resultados del modelo evaluado difieren de los datos reales. Y, en contraposición, a mayor valor p, los resultados del modelo evaluado son más próximos a los

datos reales medidos. Por lo tanto, el modelo que tenga mayores valores de p es el más próximo a la realidad, y, por consiguiente, se puede asumir que es más preciso.

Tabla 193 Resultados del coeficiente de Correlación de Pearson de las dos metodologías aplicadas

| Variables | OMI I (p)            | OMI II (p) |
|-----------|----------------------|------------|
| CA_FO     | 0,0000301            | 0,1932     |
| CA_DO     | 0,008                | 0,008      |
| CA_GAS    | 0,000563             | 0,7524     |
| ECO2      | $2,51 \cdot 10^{-9}$ | 0,7978     |

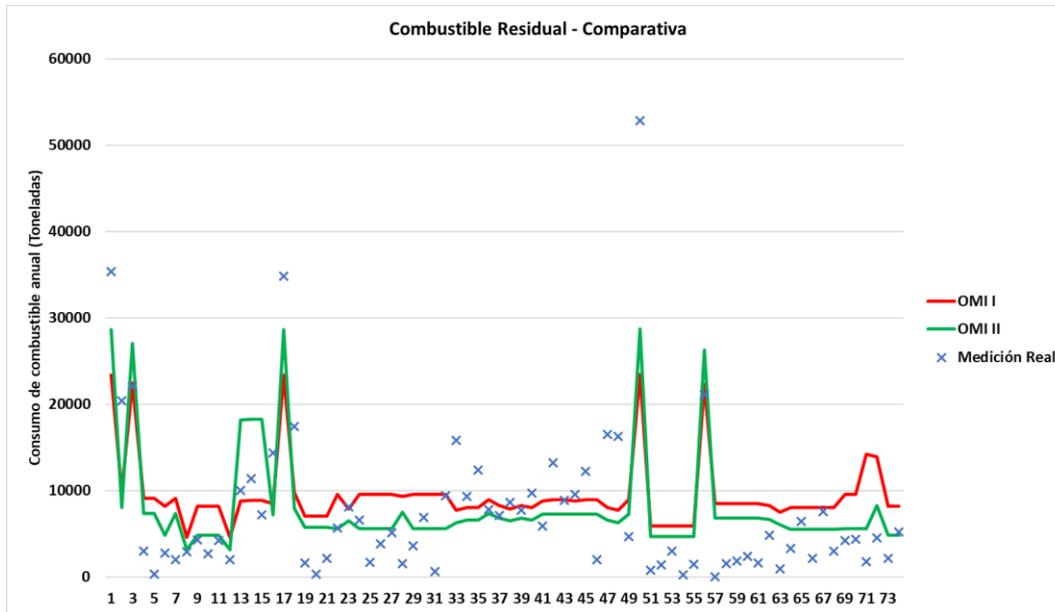
Fuente: Elaboración propia.

**\_FO**: Consumo Anual de combustible residual, **CA\_DO**: Consumo Anual de combustible destilado, **CA\_GAS**: Consumo Anual de combustible LNG, **ECO2**: Emisiones Anuales de CO<sub>2</sub>

La Tabla 193 muestra también que OMI II es más cercano a la realidad en la estimación de consumo de combustibles residuales, de combustible LNG y de emisiones de CO<sub>2</sub>, habiendo un valor p idéntico en ambos modelos para el consumo de combustible destilado.

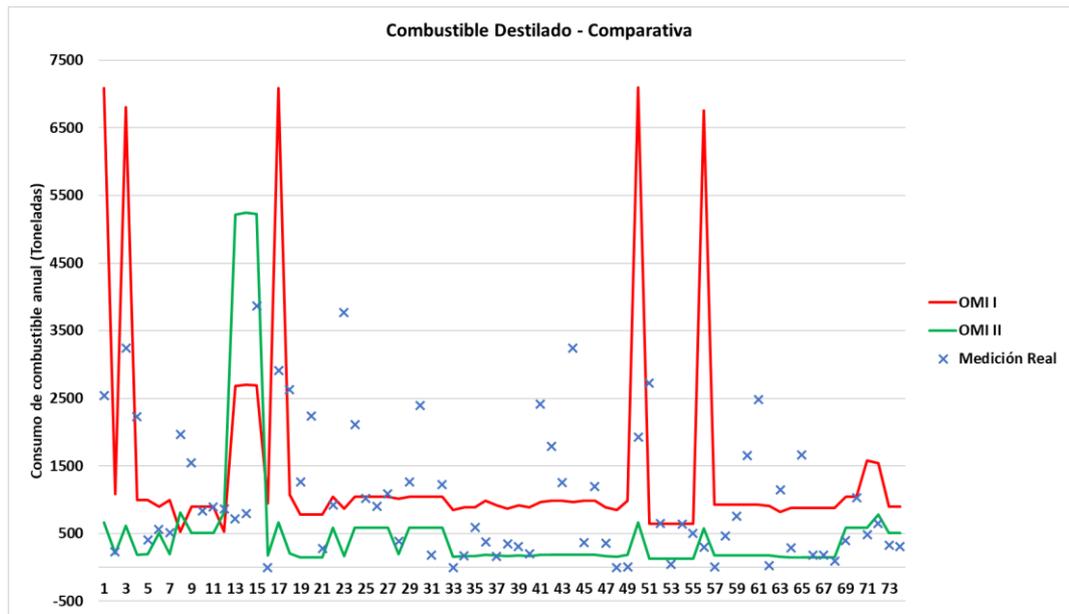
De manera gráfica, los resultados obtenidos a partir de cada modelo con los valores medidos reales en cada buque son mostrados a continuación en las gráficas 78, 79, 80 y 81 correspondientes a cada variable.

Gráfica 79 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable consumo anual combustible residual



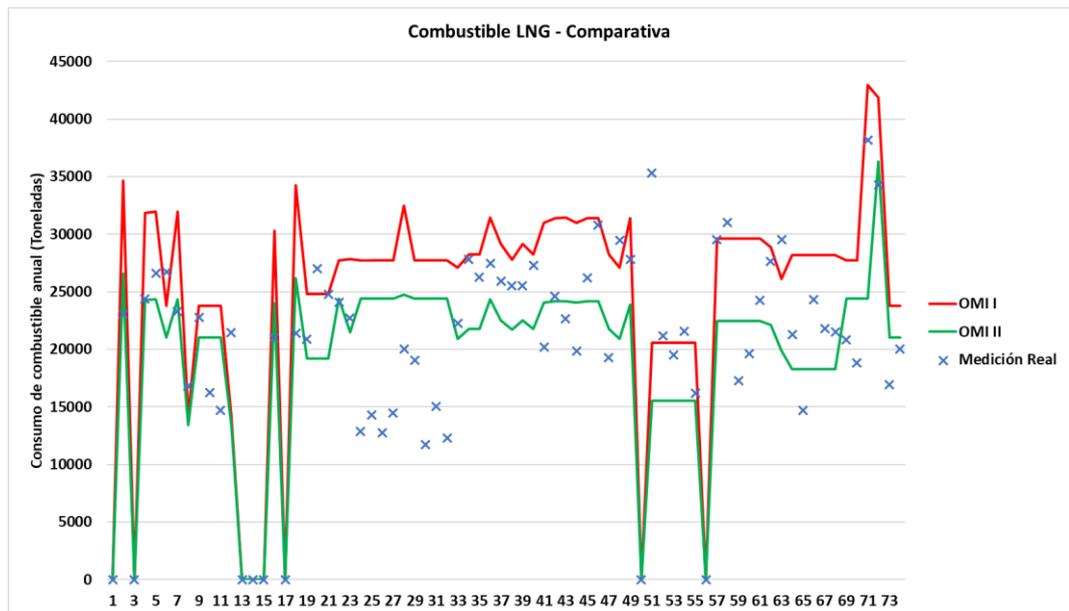
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 80 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable consumo anual combustible destilado



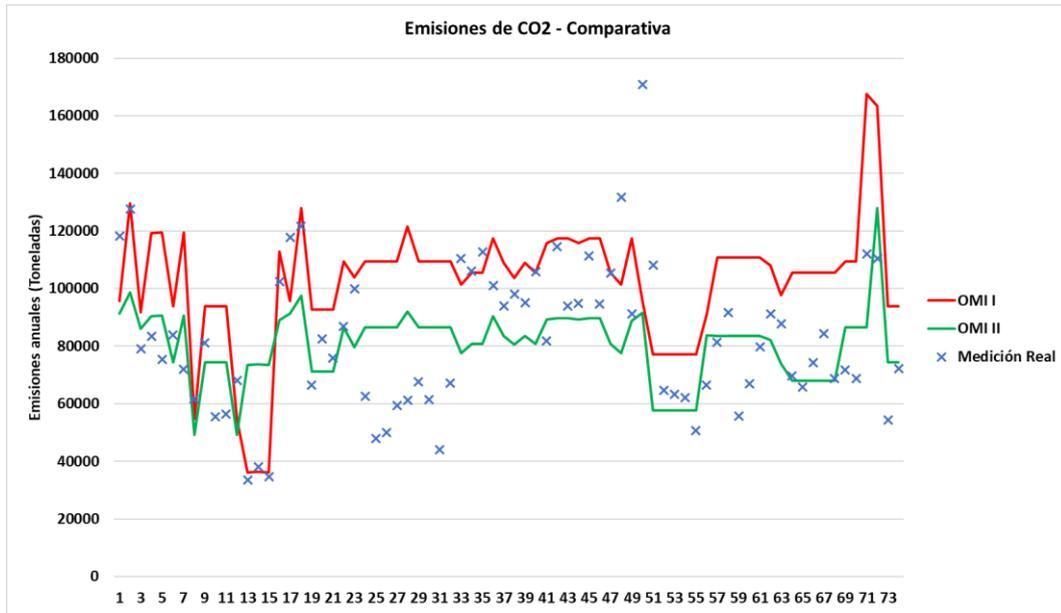
Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 81 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable consumo anual de LNG



Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 82 Comparación de OMI I y OMI II con los datos medidos reales para la variable de emisiones de CO<sub>2</sub>



Fuente: Elaboración propia.

## **10. EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE LA FLOTA DE GASEROS**

Se van a analizar las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques gaseros empleando 8 estructuras o grupos:

- Grupo de banderas
- Grupo de esloras
- Grupo de peso muerto
- Grupo de capacidad de carga
- Grupo de arqueo bruto
- Grupo de potencia instalada
- Grupo de edades
- Grupo de sistemas de propulsión

Se va a diferencia entre los resultados obtenidos para buques LPG y LNG, además de mostrar los valores totales para la flota total de buques gaseros.

Se parte de la hipótesis de que buques tipológicamente similares en diseño, tamaño, sistema de propulsión y desarrollo operativo de su actividad producirán una cantidad de emisiones similares.

También, al haberse empleado dos metodologías para calcular los consumos de combustibles de los buques (OMI I y OMI II), se van a mostrar los resultados de emisiones de la flota de buques gaseros según cada una de las metodologías de cálculo de combustible empleadas en esta tesis.

### **10.1. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero**

En este capítulo, aplicando la metodología mostrada en el capítulo 0 se van a analizar las siguientes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI):

- Emisiones de Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Emisiones de Metano (CH<sub>4</sub>)
- Emisiones de Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Emisiones de carbón negro (BC) → Solamente calculado en la metodología OMI II

Los valores anuales para el año 2019 de estas emisiones de la flota de buques gaseros de manera global y expresado en millones de toneladas se muestran en la Tabla 194.

Tabla 194 Emisiones anuales de GEI totales de la flota de buques gaseros.

| Tipo de gasero | Método | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC            |            |
|----------------|--------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|---------------|------------|
|                |        | (MMt)           | %tot       | (MMt)           | %tot       | (MMt)            | %tot       | (MMt)         | %tot       |
| LPG            | OMI I  | 25,803          | 32,6       | 0,0005          | 0,1        | 0,0013           | 35,8       | -             | -          |
|                | OMI II | 38,588          | 47,3       | 0,0007          | 0,1        | 0,0019           | 50,8       | 0.0019        | 47.6       |
| LNG            | OMI I  | 53,245          | 67,4       | 0,6441          | 99,9       | 0,0023           | 64,2       | -             | -          |
|                | OMI II | 43,064          | 52,7       | 0,5399          | 99,9       | 0,0019           | 49,2       | 0.0021        | 52.4       |
| Total          | OMI I  | <b>79,049</b>   | <b>100</b> | <b>0,6446</b>   | <b>100</b> | <b>0,0036</b>    | <b>100</b> | -             | -          |
|                | OMI II | <b>81,651</b>   | <b>100</b> | <b>0,5406</b>   | <b>100</b> | <b>0,0038</b>    | <b>100</b> | <b>0.0040</b> | <b>100</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "%tot" =porcentaje del total

En esa tabla se observa una gran diferencia entre las flotas de buques LPG y LNG sobre todo en cuanto las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>). Esto se debe principalmente al uso de LNG como combustible en los motores duales y el efecto conocido como *Methane slip*, donde una parte del LNG empelado como combustible no se quema en el proceso de combustión y es libreado a la atmósfera con los gases de escape.

Los buques LNG son responsables de la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y BC, sin embargo, para las emisiones N<sub>2</sub>O, si se aplica OMI II, la mayoría de las emisiones son causadas por los buques LPG, aunque bien es cierto que la diferencia es pequeña.

### 10.1.1. Emisiones de GEI por grupo de banderas

Se han realizado cuatro grupos de banderas para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI que tienen cada uno de los grupos de banderas analizados.

Para los buques LNG (Tabla 195), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de banderas RA. Mientras que la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de banderas ROCDE.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones por cada grupo de bandera. Así pues, el buque LNG con mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de bandera RA, teniendo la menor cantidad de estos dos contaminantes, por buque, en el grupo de banderas ROCDE.

Para las emisiones de CH<sub>4</sub>, el buque LNG con mayor cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub> por buque está en el grupo de bandera EU15, teniendo la menor cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub> por buque en el grupo de banderas RA.

Y en cuanto a las emisiones de BC, el buque LNG con mayor cantidad de emisiones de BC por buque está en el grupo de bandera EU15, teniendo la menor cantidad de emisiones de BC por buque en el grupo de banderas ROCDE.

Tabla 195 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de bandera

| Grupo de banderas         | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |               |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|---------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |               |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC            |            |
|                           | MMt                                 | %          | MMt             | %          | MMt              | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | MMt              | %          | MMt           | %          |
| EU15                      | 5,69                                | 10,7       | 0,075           | 11,7       | 0,0002           | 10,5       | 4,60            | 10,7       | 0,065           | 12,1       | 0,0002           | 10,4       | 0,0003        | 13,1       |
| RA                        | 32,82                               | 61,6       | 0,377           | 58,5       | 0,0014           | 62,1       | 26,84           | 62,3       | 0,316           | 58,6       | 0,0012           | 63,0       | 0,0013        | 59,9       |
| RM                        | 10,13                               | 19,0       | 0,130           | 20,2       | 0,0004           | 18,8       | 8,02            | 18,6       | 0,109           | 20,1       | 0,0003           | 18,4       | 0,0004        | 19,7       |
| ROCDE                     | 4,61                                | 8,7        | 0,062           | 9,6        | 0,0002           | 8,5        | 3,61            | 8,4        | 0,050           | 9,2        | 0,0002           | 8,2        | 0,0002        | 7,3        |
| <b>Total</b>              | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,644</b>    | <b>100</b> | <b>0,0023</b>    | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,540</b>    | <b>100</b> | <b>0,0019</b>    | <b>100</b> | <b>0,0021</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |               |            |
| EU15                      | 96.371                              |            | 1.274           |            | 4,2              |            | 77.923          |            | 1.109           |            | 3,3              |            | 4,7           |            |
| RA                        | 105.527                             |            | 1.212           |            | 4,7              |            | 86.308          |            | 1.017           |            | 3,8              |            | 4,1           |            |
| RM                        | 98.345                              |            | 1.262           |            | 4,3              |            | 77.851          |            | 1.054           |            | 3,4              |            | 4,0           |            |
| ROCDE                     | 94.104                              |            | 1.266           |            | 4,0              |            | 73.589          |            | 1.011           |            | 3,2              |            | 3,2           |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "t" =toneladas

Tabla 196 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de bandera

| Grupo de banderas         | Valores para la flota de buques LPG |            |                      |            |                  |            |                 |            |                      |            |                  |            |               |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|----------------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|----------------------|------------|------------------|------------|---------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                      |            |                  |            | OMI II          |            |                      |            |                  |            |               |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub>      |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub>      |            | N <sub>2</sub> O |            | BC            |            |
|                           | MMt                                 | %          | MMt                  | %          | MMt              | %          | MMt             | %          | MMt                  | %          | MMt              | %          | MMt           | %          |
| EU15                      | 2,07                                | 8,0        | 4·10 <sup>-5</sup>   | 8,1        | 0,0001           | 8,0        | 2,79            | 7,2        | 5,3·10 <sup>-5</sup> | 7,2        | 0,0001           | 7,2        | 0,0002        | 7,9        |
| RA                        | 12,47                               | 48,3       | 0,0002               | 48,4       | 0,0006           | 48,3       | 18,82           | 48,8       | 0,0004               | 48,8       | 0,0009           | 48,8       | 0,0007        | 36,5       |
| RM                        | 9,99                                | 38,7       | 0,0002               | 38,7       | 0,0005           | 38,7       | 15,24           | 39,5       | 0,0003               | 39,6       | 0,0008           | 39,5       | 0,0008        | 41,1       |
| ROCDE                     | 1,27                                | 4,9        | 2,4·10 <sup>-5</sup> | 4,9        | 0,0001           | 4,9        | 1,74            | 4,5        | 3,3·10 <sup>-5</sup> | 4,5        | 0,0001           | 4,5        | 0,0003        | 14,5       |
| <b>Total</b>              | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,0005</b>        | <b>100</b> | <b>0,0013</b>    | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,0007</b>        | <b>100</b> | <b>0,0019</b>    | <b>100</b> | <b>0,0019</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t) |                                     |            |                      |            |                  |            |                 |            |                      |            |                  |            |               |            |
| EU15                      | 17.422                              |            | 0,3                  |            | 0,9              |            | 23.411          |            | 0,4                  |            | 1,2              |            | 1,3           |            |
| RA                        | 22.149                              |            | 0,4                  |            | 1,1              |            | 33.435          |            | 0,6                  |            | 1,7              |            | 1,2           |            |
| RM                        | 16.590                              |            | 0,3                  |            | 0,8              |            | 25.309          |            | 0,5                  |            | 1,3              |            | 1,3           |            |
| ROCDE                     | 6.428                               |            | 0,1                  |            | 0,3              |            | 8.797           |            | 0,2                  |            | 0,4              |            | 1,4           |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "t" =toneladas

Analizando los buques LPG (Tabla 196), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de banderas RA. Mientras que la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de banderas ROCDE. Para las emisiones de BC, nos encontramos la mayoría de estas emisiones en el grupo de banderas RM, y la menor cantidad en banderas EU15.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones por cada grupo de bandera. Así pues, el buque LPG con mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de bandera RA, teniendo la menor cantidad de estos dos contaminantes, por buque, en el grupo de banderas ROCDE.

Y en cuanto a las emisiones de BC, el buque LPG con mayor cantidad de emisiones de BC por buque está en el grupo de bandera ROCDE, teniendo la menor cantidad de emisiones de BC por buque en el grupo de banderas RA.

### **10.1.2. Emisiones de GEI por grupo de esloras**

Se han realizado diferentes grupos de esloras según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI. Para la flota de buques de LPG se han hecho 5 grupos de esloras que corresponden a buques con esloras menores a 80 metros, entre 80 y 100 metros, entre 100 y 150 metros, entre 150 y 200 metros y esloras iguales o superiores a 200 metros. Para la flota de buques de LNG se han hecho 4 grupos de esloras que corresponden a buques con esloras menores a 250 metros, entre 250 y 270 metros, entre 270 y 290 metros y esloras iguales o superiores a 290 metros.

Para los buques LNG (Tabla 197), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de esloras superiores a 290 metros. Mientras que la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de esloras inferiores a 250 metros.

Para las emisiones de CH<sub>4</sub>, su valor máximo está en el grupo de esloras entre 270 y 290 metros, mientras que el valor mínimo está en el grupo de esloras inferior a 250 metros.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones por cada grupo de esloras. Así pues, el buque LNG con mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O y BC por buque está en el grupo de esloras entre 270 y 290 metros, teniendo la menor cantidad de estos tres contaminantes, por buque, en el grupo de esloras inferior a 250 metros.

Para las emisiones de CH<sub>4</sub>, el buque LNG con mayor cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub> por buque está en el grupo de esloras entre 270 y 290 metros (OMI I) y en el grupo de esloras entre 270 y 290 metros (OMI II), teniendo la menor cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub> por buque en el grupo de esloras inferior a 250 metros.

Para los buques LPG (Tabla 198), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de esloras superiores a 200 metros. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones se encuentran en el grupo de esloras inferiores a 80 metros, excepto para las emisiones de BC que se encuentran en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones por cada grupo de esloras. Así pues, el buque LPG con mayor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por buque está en el grupo de esloras superiores a 200 metros,

teniendo la menor cantidad de estos tres contaminantes, por buque, en el grupo de esloras inferior a 80 metros.

Para las emisiones de BC, el buque LPG con mayor cantidad de emisiones de BC por buque está en el grupo de esloras inferiores a 80 metros, teniendo la menor cantidad de emisiones de BC por buque en el grupo de esloras entre 100 y 150 metros y en el grupo de esloras entre 150 y 200 metros.

Tabla 197 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de esloras

| Grupo de esloras (L)      | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |             |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC          |            |
|                           | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | kton             | %          | kton        | %          |
| L < 250                   | 0,81                                | 1,5        | 0,010           | 1,6        | 0,04             | 1,5        | 0,51            | 1,2        | 0,007           | 1,2        | 0,02             | 1,2        | 0,03        | 1,4        |
| 250 ≤ L < 270             | 5,27                                | 9,9        | 0,072           | 11,1       | 0,23             | 9,7        | 4,09            | 9,5        | 0,056           | 10,4       | 0,17             | 9,4        | 0,16        | 7,5        |
| 270 ≤ L < 290             | 21,99                               | 41,3       | 0,294           | 45,7       | 0,95             | 40,6       | 17,41           | 40,4       | 0,245           | 45,4       | 0,75             | 39,5       | 0,90        | 42,5       |
| L ≥ 290                   | 25,18                               | 47,3       | 0,268           | 41,6       | 1,12             | 48,1       | 21,06           | 48,9       | 0,232           | 42,9       | 0,94             | 49,9       | 1,02        | 48,6       |
| <b>Total</b>              | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,644</b>    | <b>100</b> | <b>2,34</b>      | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,540</b>    | <b>100</b> | <b>1,98</b>      | <b>100</b> | <b>2,11</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
| L < 250                   | 31.060                              |            | 392             |            | 1,4              |            | 19.628          |            | 258             |            | 0,8              |            | 1,1         |            |
| 250 ≤ L < 270             | 109.893                             |            | 1.494           |            | 4,7              |            | 85.246          |            | 1.175           |            | 3,7              |            | 3,3         |            |
| 270 ≤ L < 290             | 111.037                             |            | 1.486           |            | 4,8              |            | 87.908          |            | 1.239           |            | 3,8              |            | 4,5         |            |
| L ≥ 290                   | 100.711                             |            | 1.072           |            | 4,5              |            | 84.223          |            | 926             |            | 3,8              |            | 4,1         |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" =millones de toneladas, "kton" =miles de toneladas, "t" =toneladas

Tabla 198 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de esloras

| Grupo de esloras (L)      | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |             |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC          |            |
|                           | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton        | %          |
| L < 80                    | 1,52                                | 5,9        | 0,03            | 5,9        | 0,08             | 5,9        | 2,06            | 5,3        | 0,04            | 5,3        | 0,10             | 5,4        | 0,45        | 23,3       |
| 80 ≤ L < 100              | 2,81                                | 10,9       | 0,05            | 10,9       | 0,14             | 10,9       | 3,74            | 9,7        | 0,07            | 9,7        | 0,19             | 9,7        | 0,43        | 22,7       |
| 100 ≤ L < 150             | 4,27                                | 16,6       | 0,08            | 16,6       | 0,22             | 16,6       | 5,63            | 14,6       | 0,11            | 14,6       | 0,28             | 14,6       | 0,36        | 18,9       |
| 150 ≤ L < 200             | 5,90                                | 22,9       | 0,11            | 22,9       | 0,30             | 22,9       | 7,73            | 20,0       | 0,15            | 20,0       | 0,39             | 20,0       | 0,27        | 14,1       |
| L ≥ 200                   | 11,30                               | 43,8       | 0,22            | 43,7       | 0,57             | 43,8       | 19,43           | 50,4       | 0,37            | 50,3       | 0,98             | 50,3       | 0,40        | 21,0       |
| <b>Total</b>              | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,49</b>     | <b>100</b> | <b>1,30</b>      | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,74</b>     | <b>100</b> | <b>1,94</b>      | <b>100</b> | <b>1,92</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
| L < 80                    | 4.911                               |            | 0,1             |            | 0,2              |            | 6.640           |            | 0,1             |            | 0,3              |            | 1,4         |            |
| 80 ≤ L < 100              | 8.437                               |            | 0,2             |            | 0,4              |            | 11.219          |            | 0,2             |            | 0,6              |            | 1,3         |            |
| 100 ≤ L < 150             | 14.284                              |            | 0,3             |            | 0,7              |            | 18.845          |            | 0,4             |            | 0,9              |            | 1,2         |            |
| 150 ≤ L < 200             | 25.234                              |            | 0,5             |            | 1,3              |            | 33.028          |            | 0,6             |            | 1,7              |            | 1,2         |            |
| L ≥ 200                   | 36.913                              |            | 0,7             |            | 1,9              |            | 63.498          |            | 1,2             |            | 3,2              |            | 1,3         |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" =toneladas

### 10.1.3. Emisiones de GEI por grupo de peso muerto

Se han realizado diferentes grupos de toneladas de peso muerto (TPM) según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos que corresponden a buques con TPM menores a 5.000 toneladas, entre 5.000 y 10.000 toneladas, entre 10.000 y 50.000 toneladas, y, TPM igual o superior a 50.000 toneladas. Para la flota de buques de LNG se han hecho 4 grupos de TPM que corresponden a buques con toneladas de TPM menores a 75.000 toneladas, entre 75.000 y 85.000 toneladas, entre 85.000 y 100.000 toneladas, y, TPM igual o superior a 100.000 toneladas.

Analizando los buques LNG (Tabla 199), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de TPM entre 75.000 y 85.000 toneladas. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones (también de BC) se encuentra en el grupo de TPM superiores a 100.000 toneladas. Para las emisiones de BC, su valor máximo está en el grupo entre 85.000 y 100.000 toneladas.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para cada grupo de TPM. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> por buque están en el grupo de TPM entre 75.000 y 85.000 toneladas. Para el N<sub>2</sub>O, el valor máximo por buque está en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas y para las emisiones de BC está en el grupo de TPM entre 85.000 y 100.000 toneladas. Las menores emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de TPM inferiores a 75.000 toneladas. Para el CH<sub>4</sub> y las emisiones de BC, el valor mínimo por buque está en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas.

Tabla 199 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de peso muerto

| Grupo toneladas peso muerto (miles de TPM) | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|--|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|  | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|  | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|  | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| TPM < 75                                   | 6,86                                | 12,9       | 0,093           | 14,4       | 0,295            | 12,7       | 5,25            | 12,2       | 0,072           | 13,4       | 0,225            | 12,0       | 0,218        | 10,4       |
| 75 ≤ TPM < 85                              | 21,43                               | 40,2       | 0,288           | 44,7       | 0,922            | 39,6       | 16,80           | 39,0       | 0,235           | 43,6       | 0,719            | 38,2       | 0,807        | 38,3       |
| 85 ≤ TPM < 100                             | 20,25                               | 38,0       | 0,262           | 40,7       | 0,877            | 37,6       | 16,62           | 38,6       | 0,231           | 42,8       | 0,711            | 37,8       | 1,018        | 48,3       |
| TPM ≥ 100                                  | 4,71                                | 8,8        | 0,002           | 0,2        | 0,236            | 10,1       | 4,40            | 10,2       | 0,001           | 0,3        | 0,225            | 12,0       | 0,063        | 3,0        |
| <b>Total</b>                               | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,644</b>    | <b>100</b> | <b>2,330</b>     | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,540</b>    | <b>100</b> | <b>1,880</b>     | <b>100</b> | <b>2,106</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t)                  |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| TPM < 75                                   | 82.641                              |            | 1.115           |            | 3,6              |            | 63.243          |            | 870             |            | 2,7              |            | 2,6          |            |
| 75 ≤ TPM < 85                              | 112.173                             |            | 1.508           |            | 4,8              |            | 87.972          |            | 1.233           |            | 3,8              |            | 4,2          |            |
| 85 ≤ TPM < 100                             | 99.754                              |            | 1.291           |            | 4,3              |            | 81.857          |            | 1.138           |            | 3,5              |            | 5,0          |            |
| TPM ≥ 100                                  | 104.692                             |            | 36              |            | 5,2              |            | 97.667          |            | 30              |            | 5,0              |            | 1,4          |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a los buques LPG (Tabla 200), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de más de 50.000 toneladas. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones (también de BC) se encuentra en el grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas. Para las emisiones de BC, su valor máximo está en el grupo de menos de 5.000 toneladas.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones y para cada grupo de TPM. Las mayores emisiones de todos los GEI por buque están en el grupo de más de 50.000 toneladas. Las menores emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de menos de 5.000 toneladas. Para las emisiones de BC, el valor mínimo por buque está en los grupos entre 5.000 y 10.000 y entre 10.000 y 50.000 toneladas.

Se puede analizar otra relación en cuanto a cuantas toneladas de contaminante que emite los buques por tonelada de peso muerto construida, esto ayuda a identificar que rango de TPM es el buque es el que mayor eficiencia energética tiene.

Para buques LPG (Tabla 201), los buques de mayor tamaño (TPM>50.000 toneladas) son los que menor tasa de emisión por TPM construido tienen, es decir son los más eficientes. Los buques LPG menos eficientes son los buques más pequeños, con TPM inferiores a 5.000 toneladas.

En cuanto a los buques LNG (Tabla 202), los buques de mayor tamaño (TPM> 100.000 toneladas) son los que menor tasa de emisión por TPM construido tienen, es decir son los más eficientes. Los buques LNG menos eficientes son los buques más pequeños, con TPM inferiores a 75.000 toneladas.

Tabla 200 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de peso muerto

| Grupo toneladas peso muerto (miles de TPM) | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|--|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|  | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|  | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|  | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| TPM < 5                                    | 4,39                                | 17,0       | 0,084           | 17,0       | 0,221            | 17,0       | 5,87            | 15,2       | 0,112           | 15,2       | 0,296            | 15,2       | 0,894        | 46,7       |
| 5 < TPM < 10                               | 3,12                                | 12,1       | 0,060           | 12,1       | 0,157            | 12,1       | 4,12            | 10,7       | 0,079           | 10,7       | 0,207            | 10,7       | 0,281        | 14,7       |
| 10 < TPM < 50                              | 8,95                                | 34,7       | 0,171           | 34,6       | 0,450            | 34,7       | 11,72           | 30,4       | 0,224           | 30,4       | 0,590            | 30,4       | 0,402        | 21,0       |
| TPM > 50                                   | 9,34                                | 36,2       | 0,179           | 36,2       | 0,470            | 36,2       | 16,88           | 43,8       | 0,323           | 43,8       | 0,850            | 43,7       | 0,338        | 17,7       |
| <b>Total</b>                               | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,494</b>    | <b>100</b> | <b>1,298</b>     | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,738</b>    | <b>100</b> | <b>1,943</b>     | <b>100</b> | <b>1,915</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (ton)                |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| TPM < 5                                    | 6.755                               |            | 0,1             |            | 0,3              |            | 9.035           |            | 0,2             |            | 0,5              |            | 1,4          |            |
| 5 < TPM < 10                               | 13.270                              |            | 0,3             |            | 0,7              |            | 17.511          |            | 0,3             |            | 0,9              |            | 1,2          |            |
| 10 < TPM < 50                              | 25.722                              |            | 0,5             |            | 1,3              |            | 33.671          |            | 0,6             |            | 1,7              |            | 1,2          |            |
| TPM > 50                                   | 37.520                              |            | 0,7             |            | 1,9              |            | 67.802          |            | 1,3             |            | 3,4              |            | 1,4          |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 201 Toneladas de GEI por tonelada de peso muerto para buques LPG.

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I           |                         |                         | OMI II          |                         |                         |                         |
|---|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| TPM < 5.000                             | 2,848           | 5,45 · 10 <sup>-5</sup> | 1,43 · 10 <sup>-4</sup> | 3,809           | 7,29 · 10 <sup>-5</sup> | 1,92 · 10 <sup>-4</sup> | 5,80 · 10 <sup>-4</sup> |
| 5.000 < TPM < 10.000                    | 1,875           | 3,59 · 10 <sup>-5</sup> | 9,43 · 10 <sup>-5</sup> | 2,474           | 4,74 · 10 <sup>-5</sup> | 1,25 · 10 <sup>-4</sup> | 1,69 · 10 <sup>-4</sup> |
| 10.000 < TPM < 50.000                   | 0,992           | 1,90 · 10 <sup>-5</sup> | 4,99 · 10 <sup>-5</sup> | 1,298           | 2,49 · 10 <sup>-5</sup> | 6,54 · 10 <sup>-5</sup> | 4,46 · 10 <sup>-5</sup> |
| TPM > 50.000                            | 0,686           | 1,31 · 10 <sup>-5</sup> | 3,45 · 10 <sup>-5</sup> | 1,240           | 2,37 · 10 <sup>-5</sup> | 6,24 · 10 <sup>-5</sup> | 2,49 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 202 Toneladas de GEI por tonelada de peso muerto para buques LNG

| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | OMI I           |                         |                         | OMI II          |                         |                         |                         |
|---|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| TPM < 75.000                            | 1,503           | 0,020                   | 6,46 · 10 <sup>-5</sup> | 1,150           | 0,016                   | 4,94 · 10 <sup>-5</sup> | 4,77 · 10 <sup>-5</sup> |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 1,389           | 0,019                   | 5,98 · 10 <sup>-5</sup> | 1,090           | 0,015                   | 4,66 · 10 <sup>-5</sup> | 5,23 · 10 <sup>-5</sup> |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 1,082           | 0,014                   | 4,69 · 10 <sup>-5</sup> | 0,888           | 0,012                   | 3,80 · 10 <sup>-5</sup> | 5,44 · 10 <sup>-5</sup> |
| TPM ≥ 100.000                           | 0,863           | 2,93 · 10 <sup>-4</sup> | 4,33 · 10 <sup>-5</sup> | 0,805           | 2,49 · 10 <sup>-4</sup> | 4,11 · 10 <sup>-5</sup> | 1,16 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

#### 10.1.4. Emisiones de GEI por grupo de capacidad de carga

Se han realizado diferentes grupos de toneladas de capacidad de carga según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos de m<sup>3</sup> de capacidad de carga que corresponden a buques con volúmenes menores de 5.000 m<sup>3</sup>, entre 5.000 y 15.000 m<sup>3</sup>, entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>, y capacidad de carga igual o superior a 50.000 m<sup>3</sup>. Para la flota de buques de LNG se han hecho 4 grupos de m<sup>3</sup> de capacidad de carga que corresponden a buques con un volumen de carga menores de 100.000 m<sup>3</sup>, entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>, entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup>, y capacidad de carga igual o superior a 170.000 m<sup>3</sup>.

Analizando los buques LNG (Tabla 203), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones (también de BC) se encuentra en el grupo de CC inferior a 100.000 m<sup>3</sup>.

Para las emisiones de BC, su valor máximo está en el grupo CC entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup>.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para cada grupo de CC. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> por buque están en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup> (entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup> aplicando OMI II). Para el N<sub>2</sub>O, el valor máximo por buque está en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup> (superior a 170.000 m<sup>3</sup> aplicando OMI II) y para las emisiones de BC, el valor máximo está en el grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup> (entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup> aplicando OMI II).

Las menores emisiones todos los GEI por buque están en el grupo de menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

Para los buques LPG (Tabla 204), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup>. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones se encuentra en el grupo de CC inferior a 5.000 m<sup>3</sup>.

Para las emisiones de BC, su valor máximo está en el grupo de CC inferior a 5.000 m<sup>3</sup>, teniendo la menor cantidad de emisiones de BC en el grupo de CC entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones y para cada grupo de CC. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de CC superior a 50.000 m<sup>3</sup>. Para las emisiones de BC, el valor máximo por buque está en el grupo de CC inferior a 5.000 m<sup>3</sup>.

Las menores emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de CC inferiores a 5.000 m<sup>3</sup>. Para las emisiones de BC, la menor cantidad por buque se encuentra en los grupos de CC entre 5.000 y 15.000 m<sup>3</sup> y entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>.

Tabla 203 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de capacidad de carga

| Grupo de miles de m <sup>3</sup> de Capacidad de Carga (CC) | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|---|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|   | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|   | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|   | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| CC < 100  | 0,81                                | 1,5        | 0,010           | 2,3        | 0,035            | 1,5        | 0,51            | 1,2        | 0,007           | 0          | 0,022            | 1,2        | 0,030        | 1,4        |
| 100 ≤ CC < 150  | 21,78                               | 40,9       | 0,296           | 67,2       | 0,935            | 40,1       | 16,90           | 39,2       | 233,1           | 99,9       | 0,725            | 38,6       | 0,658        | 31,2       |
| 150 ≤ CC < 170  | 17,58                               | 33,0       | 0,023           | 5,1        | 0,763            | 32,7       | 14,26           | 33,1       | 0,201           | 0,1        | 0,609            | 32,4       | 0,921        | 43,7       |
| CC ≥ 170  | 13,07                               | 24,6       | 0,112           | 25,3       | 0,597            | 25,6       | 11,40           | 26,5       | 0,100           | 0          | 0,523            | 27,8       | 0,498        | 23,6       |
| <b>Total</b>  | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,441</b>    | <b>100</b> | <b>2,330</b>     | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>233,4</b>    | <b>100</b> | <b>1,879</b>     | <b>100</b> | <b>2,107</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (ton)                                 |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| CC < 100  | 31.060                              |            | 392             |            | 1,4              |            | 19.628          |            | 258             |            | 0,8              |            | 1,1          |            |
| 100 ≤ CC < 150  | 112.270                             |            | 1.528           |            | 4,8              |            | 87.101          |            | 1.202           |            | 3,7              |            | 3,4          |            |
| 150 ≤ CC < 170  | 107.878                             |            | 1.386           |            | 4,7              |            | 87.466          |            | 1.230           |            | 3,7              |            | 5,7          |            |
| CC ≥ 170  | 94.054                              |            | 804             |            | 4,3              |            | 82.005          |            | 716             |            | 3,8              |            | 3,6          |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la relación de cuantas toneladas de contaminante son emitidas por los buques por metro cubico de volumen de carga construido, las tablas 205 y 206 muestras que buques son los más y menos eficientes.

Para buques LPG (Tabla 205), los buques de mayor capacidad de carga (CC>50.000 m<sup>3</sup>) son los que menor tasa de emisión por CC construido tienen, siendo los más eficientes. Los buques LPG menos eficientes son los buques más pequeños, con CC inferiores a 5.000 m<sup>3</sup>. Respecto a los buques LNG (Tabla 206), los buques de mayor capacidad de carga (CC>170.000 m<sup>3</sup>) son los que menor tasa de emisión por CC construido tienen, siendo los más eficientes. Los buques LNG menos eficientes son los buques más pequeños, con CC inferiores a 100.000 m<sup>3</sup>.

Tabla 204 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de capacidad de carga

| Grupo de miles de m <sup>3</sup> de Capacidad de Carga (CC) | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|---|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|   | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|   | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|   | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| CC < 5  | 4,73                                | 18,3       | 0,091           | 18,4       | 0,238            | 18,4       | 6,33            | 16,4       | 0,121           | 16,4       | 0,318            | 16,4       | 0,935        | 48,9       |
| 5 ≤ CC < 15   | 4,02                                | 15,6       | 0,077           | 15,6       | 0,202            | 15,6       | 5,30            | 13,7       | 0,100           | 13,7       | 0,267            | 13,7       | 0,315        | 16,5       |
| 15 ≤ CC < 50  | 5,67                                | 22,0       | 0,108           | 21,9       | 0,285            | 22,0       | 7,42            | 19,2       | 0,142           | 19,2       | 0,373            | 19,2       | 0,258        | 13,5       |
| CC ≥ 50   | 11,38                               | 44,1       | 0,218           | 44,1       | 0,572            | 44,1       | 19,54           | 50,6       | 0,374           | 50,7       | 0,984            | 50,7       | 0,406        | 21,2       |
| <b>Total</b>  | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,494</b>    | <b>100</b> | <b>1,297</b>     | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,738</b>    | <b>100</b> | <b>1,942</b>     | <b>100</b> | <b>1,914</b> | <b>100</b> |

| Valores por buque LPG (ton) |        |     |     |        |     |     |     |
|-----------------------------|--------|-----|-----|--------|-----|-----|-----|
| CC < 5                      | 6.890  | 0,1 | 0,3 | 9.210  | 0,2 | 0,5 | 1,4 |
| 5 ≤ CC < 15                 | 15.347 | 0,3 | 0,8 | 20.233 | 0,4 | 1,0 | 1,2 |
| 15 ≤ CC < 50                | 25.309 | 0,5 | 1,3 | 33.120 | 0,6 | 1,7 | 1,2 |
| CC ≥ 50                     | 36.825 | 0,7 | 1,9 | 63.238 | 1,2 | 3,2 | 1,3 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 205 Toneladas de GEI por m<sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LPG

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I           |                         |                         | OMI II          |                         |                         |                         |
|--|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| CC < 5.000                             | 2,619           | 5,01 · 10 <sup>-5</sup> | 1,32 · 10 <sup>-4</sup> | 3,501           | 6,70 · 10 <sup>-5</sup> | 1,76 · 10 <sup>-4</sup> | 5,18 · 10 <sup>-4</sup> |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                    | 1,827           | 3,50 · 10 <sup>-5</sup> | 9,19 · 10 <sup>-5</sup> | 2,408           | 4,61 · 10 <sup>-5</sup> | 1,21 · 10 <sup>-4</sup> | 1,43 · 10 <sup>-4</sup> |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                   | 0,908           | 1,74 · 10 <sup>-5</sup> | 4,56 · 10 <sup>-5</sup> | 1,188           | 2,27 · 10 <sup>-5</sup> | 5,98 · 10 <sup>-5</sup> | 4,14 · 10 <sup>-5</sup> |
| CC ≥ 50.000                            | 0,466           | 8,92 · 10 <sup>-6</sup> | 2,34 · 10 <sup>-5</sup> | 0,801           | 1,53 · 10 <sup>-5</sup> | 4,03 · 10 <sup>-5</sup> | 1,66 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 206 Toneladas de GEI por m<sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LNG

| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | OMI I           |                 |                         | OMI II          |                 |                         |                         |
|--|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
|  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| CC < 100.000                           | 0,997           | 0,013           | 4,34 · 10 <sup>-5</sup> | 0,630           | 0,008           | 2,72 · 10 <sup>-5</sup> | 3,69 · 10 <sup>-5</sup> |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 0,808           | 0,011           | 3,47 · 10 <sup>-5</sup> | 0,627           | 0,009           | 2,69 · 10 <sup>-5</sup> | 2,44 · 10 <sup>-5</sup> |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 0,675           | 0,009           | 2,93 · 10 <sup>-5</sup> | 0,547           | 0,008           | 2,34 · 10 <sup>-5</sup> | 3,54 · 10 <sup>-5</sup> |
| CC ≥ 170.000                           | 0,497           | 0,004           | 2,27 · 10 <sup>-5</sup> | 0,433           | 0,004           | 1,99 · 10 <sup>-5</sup> | 1,89 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.1.5. Emisiones de GEI por grupo de arqueo bruto

Se han realizado diferentes grupos de toneladas de arqueo bruto según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos que corresponden a buques con toneladas de arqueo bruto menores a 3.000 toneladas, entre 3.000 y 5.000 toneladas, entre 5.000 y 15.000 toneladas, y, arqueo bruto igual o superior a 15.000 toneladas. Para la flota de buques de LNG se han hecho también 4 grupos de arqueo bruto correspondientes a buques con menos de

60.000 toneladas, entre 60.000 y 100.000 toneladas, entre 100.000 y 120.000 toneladas, y, arqueado bruto igual o superior a 120.000 toneladas.

Analizando los buques LNG (Tabla 207), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas. Mientras que la menor cantidad de todas estas emisiones se encuentra en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para cada grupo de GT. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> por buque están en el grupo de GT entre 60.000 y 100.000 toneladas. Para el N<sub>2</sub>O, el valor máximo por buque está en el grupo de GT superior a 120.000 toneladas y para las emisiones de BC, el valor máximo está en el grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas. Las menores emisiones todos los GEI por buque están en el grupo de GT inferiores a 60.000 toneladas.

En cuanto a los buques LPG (Tabla 208), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y BC se encuentran en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones se encuentra en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas excepto para las emisiones de BC que se encuentra en el grupo de GT entre 5.000 y 15.000 toneladas.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones y para cada grupo de GT. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de GT superior a 15.000 toneladas. Para el BC, el valor máximo por buque está en el grupo de GT inferior a 3.000 toneladas.

Las menores emisiones de todos los GEI, excepto para el BC, por buque están en el grupo de GT inferiores a 3.000 toneladas. Para las emisiones de BC, las menores emisiones por buque se encuentran en los grupos entre 3.000 y 5.000 toneladas y entre 5.000 y 15.000 toneladas.

Tabla 207 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de arqueado bruto

| Grupo de Arqueo bruto en miles de toneladas (GT) | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
|--|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-------------|------------|
|  | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |             |            |
|  | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC          |            |
|  | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | kton             | %          | kton        | %          |
| GT < 60  | 0,67                                | 1,3        | 0,01            | 1,3        | 0,03             | 1,2        | 0,44            | 1,0        | 0,01            | 1,1        | 0,02             | 1,0        | 0,03        | 1,3        |
| 60 ≤ GT < 100                                    | 13,69                               | 25,7       | 0,19            | 28,7       | 0,59             | 25,2       | 10,68           | 24,8       | 0,15            | 27,5       | 0,46             | 24,4       | 0,47        | 22,1       |
| 100 ≤ GT < 120                                   | 26,00                               | 48,8       | 0,34            | 52,7       | 1,12             | 48,3       | 21,13           | 49,1       | 0,29            | 54,3       | 0,91             | 48,1       | 1,21        | 57,4       |
| GT ≥ 120   | 12,89                               | 24,2       | 0,11            | 17,2       | 0,59             | 25,2       | 10,81           | 25,1       | 0,09            | 17,1       | 0,50             | 26,5       | 0,41        | 19,2       |
| <b>Total</b>                                     | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,64</b>     | <b>100</b> | <b>2,33</b>      | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,54</b>     | <b>100</b> | <b>1,88</b>      | <b>100</b> | <b>2,11</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (ton)                      |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
| GT < 60  | 28.101                              |            | 349             |            | 1,2              |            | 18.144          |            | 237             |            | 0,8              |            | 1,1         |            |
| 60 ≤ GT < 100                                    | 115.007                             |            | 1.555           |            | 4,9              |            | 89.757          |            | 1.248           |            | 3,8              |            | 3,9         |            |
| 100 ≤ GT < 120                                   | 98.483                              |            | 1.287           |            | 4,3              |            | 80.051          |            | 1.111           |            | 3,4              |            | 4,6         |            |
| GT ≥ 120   | 112.049                             |            | 965             |            | 5,1              |            | 94.033          |            | 803             |            | 4,3              |            | 3,5         |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la relación de cuántas toneladas de contaminante son emitidas por los buques por toneladas de arqueo bruto construido, las tablas 209 y 210 muestran que buques son los más y los menos eficientes.

Para buques LPG (Tabla 209), los buques de mayor tonelaje de arqueo bruto (GT>15.000 toneladas) son los que menor tasa de emisión por GT construido tienen, siendo los más eficientes. Los buques LPG menos eficientes son los buques más pequeños, con GT inferiores a 3.000 toneladas.

Para buques LNG (Tabla 210), los buques de mayor tonelaje de arqueo bruto (GT>120.000 toneladas) son los que menor tasa de emisión por GT construido tienen, siendo los más eficientes. Los buques LNG menos eficientes son los buques más pequeños, con GT inferiores a 60.000 toneladas de acuerdo con OMI I. En OMI II, el buque LNG menos eficiente se encuentra en el grupo de GT entre 60.000 y 100.000 toneladas, excepto para las emisiones de BC, donde el buque menos eficiente está en el grupo de GT inferior a 60.000 toneladas.

Tabla 208 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de arqueo bruto

| Grupo de Arqueo bruto en miles de toneladas (GT) | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|--|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|  | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|  | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|  | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| GT < 3   | 2,26                                | 8,8        | 0,043           | 8,7        | 0,114            | 8,8        | 3,04            | 7,9        | 0,058           | 7,9        | 0,153            | 7,9        | 0,587        | 30,6       |
| 3 ≤ GT < 5                                       | 2,51                                | 9,7        | 0,048           | 9,7        | 0,126            | 9,7        | 3,33            | 8,6        | 0,064           | 8,7        | 0,168            | 8,7        | 0,350        | 18,3       |
| 5 ≤ GT < 15                                      | 4,30                                | 16,7       | 0,082           | 16,6       | 0,216            | 1,6        | 5,67            | 14,7       | 0,108           | 14,6       | 0,285            | 14,7       | 0,328        | 17,1       |
| GT ≥ 15  | 16,74                               | 64,9       | 0,320           | 64,9       | 0,842            | 64,9       | 26,55           | 68,8       | 0,508           | 68,8       | 1,336            | 68,8       | 0,651        | 34,0       |
| <b>Total</b>                                     | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,493</b>    | <b>100</b> | <b>1,298</b>     | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,738</b>    | <b>100</b> | <b>1,942</b>     | <b>100</b> | <b>1,916</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (ton)                      |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| GT < 3   | 5.498                               |            | 0,1             |            | 0,3              |            | 7.399           |            | 0,1             |            | 0,4              |            | 1,4          |            |
| 3 ≤ GT < 5                                       | 9.051                               |            | 0,2             |            | 0,5              |            | 12.018          |            | 0,2             |            | 0,6              |            | 1,3          |            |
| 5 ≤ GT < 15                                      | 15.752                              |            | 0,3             |            | 0,8              |            | 20.758          |            | 0,4             |            | 1                |            | 1,2          |            |
| GT ≥ 15  | 32.123                              |            | 0,6             |            | 1,6              |            | 50.961          |            | 1               |            | 2,6              |            | 1,2          |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 209 Toneladas de GEI por tonelada de arqueo bruto para buques LPG

| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | OMI I           |                         |                         | OMI II          |                         |                         |                         |
|--------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| GT < 3.000                     | 3,989           | 7,63 · 10 <sup>-5</sup> | 2,01 · 10 <sup>-4</sup> | 5,368           | 1,03 · 10 <sup>-4</sup> | 2,70 · 10 <sup>-4</sup> | 0,001                   |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 2,339           | 4,48 · 10 <sup>-5</sup> | 1,18 · 10 <sup>-4</sup> | 3,105           | 5,94 · 10 <sup>-5</sup> | 1,56 · 10 <sup>-4</sup> | 3,26 · 10 <sup>-4</sup> |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 1,955           | 3,74 · 10 <sup>-5</sup> | 9,83 · 10 <sup>-5</sup> | 2,576           | 4,93 · 10 <sup>-5</sup> | 1,30 · 10 <sup>-4</sup> | 1,49 · 10 <sup>-4</sup> |
| GT ≥ 15.000                    | 0,888           | 1,70 · 10 <sup>-5</sup> | 4,46 · 10 <sup>-5</sup> | 1,409           | 2,70 · 10 <sup>-5</sup> | 7,09 · 10 <sup>-5</sup> | 3,45 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 210 Toneladas de GEI por tonelada de arqueo bruto para buques LNG

| Toneladas de Arqueo<br>bruto (GT) | OMI I           |                 |                         | OMI II          |                 |                         |                         |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
|                                   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| GT < 60.000                       | 1,335           | 0,017           | 5,82 · 10 <sup>-5</sup> | 0,862           | 0,011           | 3,73 · 10 <sup>-5</sup> | 5,33 · 10 <sup>-5</sup> |
| 60.000 ≤ GT < 100.000             | 1,211           | 0,016           | 5,21 · 10 <sup>-5</sup> | 0,945           | 0,013           | 4,05 · 10 <sup>-5</sup> | 4,12 · 10 <sup>-5</sup> |
| 100.000 ≤ GT < 120.000            | 0,895           | 0,012           | 3,87 · 10 <sup>-5</sup> | 0,727           | 0,010           | 3,11 · 10 <sup>-5</sup> | 4,16 · 10 <sup>-5</sup> |
| GT ≥ 120.000                      | 0,822           | 0,007           | 3,75 · 10 <sup>-5</sup> | 0,690           | 0,006           | 3,18 · 10 <sup>-5</sup> | 2,59 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.1.6. Emisiones de GEI por grupo de potencia instalada

Se han realizado diferentes grupos de kilovatios de potencia instalada para propulsión de los buques, según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos que corresponden a buques con potencias instaladas menores a 2.000 kW, entre 2.000 y 5.000 kW, entre 5.000 y 10.000 kW, y, potencia instalada igual o superior a 10.000 kW. Para la flota de buques de LNG se han hecho también 4 grupos de kilovatios de potencia instalada correspondientes a buques con menos de 20.000 kW, entre 20.000 y 30.000 kW, entre 30.000 y 40.000 kW, y, potencia instalada igual o superior a 40.000 kW.

En cuanto a los buques LNG (

Tabla 211), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW excepto para las emisiones de BC que se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones está en el grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para cada grupo de potencia propulsora. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y BC por buque están en el grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW.

Las menores emisiones de todos los GEI, por buque están en el grupo de potencia propulsora inferiores a 20.000 kW.

Tabla 211 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de potencia propulsora

| Grupo de potencia propulsora en MW (P) | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
|--|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-------------|------------|
|  | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |             |            |
|  | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC          |            |
|  | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | kton             | %          | kton        | %          |
| P < 20                                 | 1,69                                | 3,2        | 0,02            | 3,5        | 0,07             | 3,1        | 1,20            | 2,8        | 0,02            | 3,0        | 0,05             | 2,8        | 0,06        | 2,7        |
| 20 ≤ P < 30                            | 26,32                               | 49,4       | 0,36            | 55,4       | 1,13             | 48,5       | 20,78           | 48,3       | 0,29            | 52,9       | 0,89             | 47,5       | 0,85        | 40,4       |
| 30 ≤ P < 40                            | 20,51                               | 38,5       | 0,21            | 32,0       | 0,92             | 39,5       | 17,25           | 40,1       | 0,19            | 34,4       | 0,77             | 41,0       | 0,94        | 44,8       |
| P ≥ 40                                 | 4,72                                | 8,9        | 0,06            | 9,1        | 0,21             | 8,8        | 3,83            | 8,9        | 0,05            | 9,7        | 0,16             | 8,7        | 0,26        | 12,2       |
| <b>Total</b>                           | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,65</b>     | <b>100</b> | <b>2,33</b>      | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,55</b>     | <b>100</b> | <b>1,87</b>      | <b>100</b> | <b>2,11</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t)              |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
| P < 20                                 | 45.783                              |            | 601             |            | 2                |            | 32.432          |            | 437             |            | 1,4              |            | 1,5         |            |
| 20 ≤ P < 30                            | 104.869                             |            | 1.423           |            | 4,5              |            | 82.801          |            | 1.137           |            | 3,6              |            | 3,4         |            |
| 30 ≤ P < 40                            | 103.084                             |            | 1.037           |            | 4,6              |            | 86.695          |            | 934             |            | 3,9              |            | 4,7         |            |
| P ≥ 40                                 | 134.735                             |            | 1.672           |            | 5,9              |            | 109.383         |            | 1.500           |            | 4,7              |            | 7,3         |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a los buques LPG (Tabla 212), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW excepto para las emisiones de BC que se encuentra en el grupo de potencia propulsora entre 2.000 y 5.000 kW. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW, excepto para las emisiones de BC, que tienen el mínimo valor en el grupo de potencia propulsora entre 5.000 y 10.000 kW.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones y para cada grupo de potencia propulsora. Las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O por buque están en el grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW. Para las emisiones de BC, este máximo valor por buque se encuentra en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW.

Las menores emisiones de los GEI, por buque están en el grupo de potencia propulsora inferiores a 2.000 kW excepto para las emisiones de BC, que se encuentra en el grupo entre 5.000 y 10.000 kW.

Tabla 212 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de potencia propulsora

| Grupo de potencia propulsora en MW (P) | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |             |            |
|--|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-------------|------------|
|  | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |             |            |
|  | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC          |            |
|  | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton        | %          |
| P < 2                                  | 1,64                                | 6,4        | 0,03            | 6,3        | 0,08             | 6,3        | 2,22            | 5,7        | 0,04            | 5,7        | 0,11             | 5,8        | 0,49        | 25,4       |
| 2 ≤ P < 5                              | 4,93                                | 19,1       | 0,09            | 19,1       | 0,25             | 19,1       | 6,54            | 16,9       | 0,13            | 16,9       | 0,33             | 16,9       | 0,62        | 32,6       |
| 5 ≤ P < 10                             | 7,57                                | 29,3       | 0,15            | 29,4       | 0,38             | 29,4       | 9,95            | 25,8       | 0,19            | 25,8       | 0,50             | 25,8       | 0,39        | 20,5       |
| P ≥ 10                                 | 11,66                               | 45,2       | 0,22            | 45,2       | 0,59             | 45,2       | 19,88           | 51,5       | 0,38            | 51,6       | 1,00             | 51,5       | 0,41        | 21,5       |
| <b>Total</b>                           | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,49</b>     | <b>100</b> | <b>1,30</b>      | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,74</b>     | <b>100</b> | <b>1,94</b>      | <b>100</b> | <b>1,92</b> | <b>100</b> |

|            | Valores por buque LPG (t) |  |                 |  |                  |  |        |  |
|------------|---------------------------|--|-----------------|--|------------------|--|--------|--|
|            | CO <sub>2</sub>           |  | CH <sub>4</sub> |  | N <sub>2</sub> O |  | BC     |  |
| P < 2      | 4.850                     |  | 0,1             |  | 0,2              |  | 6.562  |  |
| 2 ≤ P < 5  | 10.003                    |  | 0,2             |  | 0,5              |  | 13.257 |  |
| 5 ≤ P < 10 | 22.464                    |  | 0,4             |  | 1,1              |  | 29.540 |  |
| P ≥ 10     | 37.139                    |  | 0,7             |  | 1,9              |  | 63.310 |  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a la relación de cuantas toneladas de contaminante son emitidas por los buques por cada kW de potencia propulsora instalado, las tablas 213 y 214 muestran que buques son los más y menos eficientes.

Para buques LPG (Tabla 213), en OMI I, los buques de mayor potencia propulsora (P>10.000 kW) son los que menor tasa de emisión por kW instalado tienen. Sin embargo, aplicando OMI II, son los buques en el grupo entre 5.000 y 10.000 kW los más eficientes. Los buques LPG menos eficientes son los buques en el grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW.

Tabla 213 Toneladas de GEI por kilovatio de potencia instalada para buques LPG

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I           |                         |                         | OMI II          |                         |                         |                         |
|--------------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                      | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| P < 2.000                            | 3,747           | 7,17 · 10 <sup>-5</sup> | 1,88 · 10 <sup>-4</sup> | 5,069           | 9,70 · 10 <sup>-5</sup> | 2,55 · 10 <sup>-4</sup> | 0,001                   |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 3,188           | 6,10 · 10 <sup>-5</sup> | 1,60 · 10 <sup>-4</sup> | 4,225           | 8,09 · 10 <sup>-5</sup> | 2,13 · 10 <sup>-4</sup> | 4,03 · 10 <sup>-4</sup> |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 2,974           | 5,69 · 10 <sup>-5</sup> | 1,50 · 10 <sup>-4</sup> | 3,910           | 7,49 · 10 <sup>-5</sup> | 1,97 · 10 <sup>-4</sup> | 1,54 · 10 <sup>-4</sup> |
| P ≥ 10.000                           | 2,882           | 5,52 · 10 <sup>-5</sup> | 1,45 · 10 <sup>-4</sup> | 4,913           | 9,40 · 10 <sup>-5</sup> | 2,47 · 10 <sup>-4</sup> | 1,02 · 10 <sup>-4</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Para buques LNG (Tabla 214), los buques de mayor potencia propulsora (P>40.000) son los que menor tasa de emisión por kW instalado tienen, siendo los más eficientes, excepto para las emisiones BC, donde los más eficientes son los buques dentro de los grupos de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW y entre 30.000 y 40.000 kW.

Los buques LNG menos eficientes son los buques con menor potencia propulsora instalada, con P inferiores a 20.000 kW de acuerdo con OMI I. En OMI II, el buque LNG menos eficiente se

encuentra en el grupo de potencias entre 20.000 y 30.000 kW, excepto para las emisiones de BC, donde el buque menos eficiente está en el grupo de potencias superior a 40.000 kW.

Tabla 214 Toneladas de GEI por kilovatio de potencia instalada para buques LNG

| Kilovatios de Potencia instalada (P) | OMI I               |                     |                         | OMI II              |                     |                         |                         |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                      | CO <sub>2</sub> (t) | CH <sub>4</sub> (t) | N <sub>2</sub> O (t)    | CO <sub>2</sub> (t) | CH <sub>4</sub> (t) | N <sub>2</sub> O (t)    | BC (t)                  |
| P < 20.000                           | 4,113               | 0,044               | 1,45 · 10 <sup>-4</sup> | 2,913               | 0,039               | 1,26 · 10 <sup>-4</sup> | 1,35 · 10 <sup>-4</sup> |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 3,974               | 0,032               | 1,00 · 10 <sup>-4</sup> | 3,138               | 0,043               | 1,35 · 10 <sup>-4</sup> | 1,29 · 10 <sup>-4</sup> |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 2,803               | 0,007               | 3,17 · 10 <sup>-5</sup> | 2,357               | 0,025               | 1,05 · 10 <sup>-4</sup> | 1,29 · 10 <sup>-4</sup> |
| P ≥ 40.000                           | 2,648               | 0,004               | 1,31 · 10 <sup>-5</sup> | 2,150               | 0,029               | 9,23 · 10 <sup>-5</sup> | 1,44 · 10 <sup>-4</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "t" =toneladas

### 10.1.7. Emisiones de GEI por grupo de edad

Se han realizado 5 grupos de edades con el fin de estructurar la flota de buques LPG y buques LNG. Los grupos corresponden a buques entre 0 y 5 años, entre 6 y 10, entre 11 y 15, entre 16 y 20 y mayores de 20 años.

En cuanto a los buques LNG (Tabla 215), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de edades entre 10 y 15 años. Para las emisiones CH<sub>4</sub> y de BC la mayoría de estas emisiones se encuentra en el grupo de edades menores de 5 años. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años, excepto para las emisiones de BC está en el grupo de edades superiores a 20 años.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para cada grupo de edad. Para las emisiones de CO<sub>2</sub>, las mayores emisiones por buque están en el grupo entre 15 y 20 años para OMI I, y en el grupo entre 10 y 15 años para OMI II, teniendo la menor cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> en el grupo de edad de menos de 5 años en OMI I, y en el grupo de más de 20 años en OMI II.

Para las emisiones de CH<sub>4</sub>, las mayores emisiones por buque están en el grupo entre 15 y 20 años para OMI I, y en el grupo entre 5 y 10 años para OMI II, teniendo la menor cantidad de emisiones de CH<sub>4</sub> en el grupo de edad de entre 10 y 15 años.

Para las emisiones de N<sub>2</sub>O, las mayores emisiones por buque están en el grupo entre 10 y 15 años, teniendo la menor cantidad de emisiones de N<sub>2</sub>O en el grupo de edad de menos de 5 años.

Respecto a las emisiones de BC, las mayores emisiones por buque están en el grupo entre 5 y 10 años, teniendo la menor cantidad de emisiones de BC en el grupo de edad superior a 5 años.

Tabla 215 Emisiones de GEI para los buques LNG por grupo de edades

| Grupo de Edad (A)         | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|                           | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| A ≤ 5                     | 16,20                               | 30,4       | 0,209           | 32,4       | 0,702            | 30,1       | 13,32           | 30,9       | 0,184           | 34,0       | 0,570            | 30,3       | 0,815        | 38,7       |
| 5 < A ≤ 10                | 4,77                                | 9,0        | 0,062           | 9,7        | 0,206            | 8,8        | 3,86            | 9,0        | 0,056           | 10,4       | 0,164            | 8,7        | 0,261        | 12,4       |
| 10 < A ≤ 15               | 16,44                               | 30,9       | 0,158           | 24,5       | 0,742            | 31,8       | 13,64           | 31,7       | 0,132           | 24,4       | 0,620            | 33,0       | 0,550        | 26,1       |
| 15 < A ≤ 20               | 9,68                                | 18,2       | 0,131           | 20,4       | 0,416            | 17,9       | 7,52            | 17,5       | 0,104           | 19,2       | 0,323            | 17,2       | 0,297        | 14,1       |
| A > 20                    | 6,16                                | 11,6       | 0,084           | 13,0       | 0,264            | 11,3       | 4,72            | 11,0       | 0,065           | 12,1       | 0,203            | 10,8       | 0,182        | 8,6        |
| <b>Total</b>              | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,645</b>    | <b>100</b> | <b>2,330</b>     | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,541</b>    | <b>100</b> | <b>1,880</b>     | <b>100</b> | <b>2,105</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| A ≤ 5                     | 94.713                              |            | 1.222           |            | 4,1              |            | 77.880          |            | 1.076           |            | 3,3              |            | 4,8          |            |
| 5 < A ≤ 10                | 99.378                              |            | 1.299           |            | 4,3              |            | 80.470          |            | 1.167           |            | 3,4              |            | 5,4          |            |
| 10 < A ≤ 15               | 107.484                             |            | 1.033           |            | 4,8              |            | 89.159          |            | 861             |            | 4                |            | 3,6          |            |
| 15 < A ≤ 20               | 108.712                             |            | 1.476           |            | 4,7              |            | 84.522          |            | 1.166           |            | 3,6              |            | 3,3          |            |
| A > 20                    | 100.969                             |            | 1.377           |            | 4,3              |            | 77.377          |            | 1.069           |            | 3,3              |            | 3            |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a los buques LPG (Tabla 216), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en el grupo de edades menos de 5 años. Par las emisiones de BC la mayoría de estas emisiones se encuentra en el grupo de edades superiores a 20 años. Mientras que la menor cantidad de estas emisiones se encuentra en el grupo de edades entre 5 y 10 años.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LPG de cada una de las emisiones y para cada grupo de edad. Para las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O las mayores emisiones por buque están en el grupo de menos de 5, teniendo la menor cantidad de estas emisiones en el grupo de más de 20 años en OMI II.

Respecto a las emisiones de BC, las mayores emisiones por buque están en el grupo superiores a 20 años, teniendo la menor cantidad de emisiones de BC en el grupo de edad superior a 5 años y en el grupo entre 15 y 20 años.

El análisis de las tasas de emisión por edad de los buques puede tener un sesgo debido al hecho de que los tamaños y las potencias de los buques a lo largo de los años varían en línea con la necesidad del mercado durante cada periodo. Esto se observa al analizar los resultados de las tablas 215 y 216, donde sorpresivamente, los buques más modernos dan tasas de contaminación más altas (sobre todo prestando atención a las emisiones de CO<sub>2</sub>) que los buques más antiguos, chocando con la hipótesis de que los buques más modernos deben ser más eficientes que buques más antiguos. Por lo tanto, con el fin de analizar si esos resultados tienen un sesgo, se analizan las tasas de emisión para los grupos de edades en función de las toneladas de peso muerto (indicador del tamaño de los buques) para cada grupo de edad y tipo de buque gasero.

Tabla 216 Emisiones de GEI para los buques LPG por grupo de edades

| Grupo de Edad (A)         | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|                           | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| A ≤ 5                     | 8,16                                | 31,6       | 0,156           | 31,6       | 0,411            | 31,7       | 13,10           | 34,0       | 0,251           | 34,0       | 0,659            | 33,9       | 0,422        | 22,0       |
| 5 < A ≤ 10                | 2,42                                | 9,4        | 0,046           | 9,3        | 0,122            | 9,4        | 3,60            | 9,3        | 0,069           | 9,3        | 0,181            | 9,3        | 0,188        | 9,8        |
| 10 < A ≤ 15               | 6,38                                | 24,7       | 0,122           | 24,7       | 0,321            | 24,7       | 9,49            | 24,6       | 0,182           | 24,6       | 0,478            | 24,6       | 0,420        | 21,9       |
| 15 < A ≤ 20               | 3,06                                | 11,9       | 0,059           | 12,0       | 0,154            | 11,9       | 4,40            | 11,4       | 0,084           | 11,4       | 0,221            | 11,4       | 0,200        | 10,4       |
| A > 20                    | 5,77                                | 22,4       | 0,110           | 22,3       | 0,290            | 22,3       | 8,00            | 20,7       | 0,153           | 20,7       | 0,403            | 20,8       | 0,684        | 35,7       |
| <b>Total</b>              | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,493</b>    | <b>100</b> | <b>1,298</b>     | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,739</b>    | <b>100</b> | <b>1,942</b>     | <b>100</b> | <b>1,914</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (t) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| A ≤ 5                     | 24.373                              |            | 0,5             |            | 1,2              |            | 39.110          |            | 0,7             |            | 2                |            | 1,26         |            |
| 5 < A ≤ 10                | 16.495                              |            | 0,3             |            | 0,8              |            | 24.462          |            | 0,5             |            | 1,2              |            | 1,28         |            |
| 10 < A ≤ 15               | 19.505                              |            | 0,4             |            | 1                |            | 29.031          |            | 0,6             |            | 1,5              |            | 1,29         |            |
| 15 < A ≤ 20               | 19.266                              |            | 0,4             |            | 1                |            | 27.656          |            | 0,5             |            | 1,4              |            | 1,26         |            |
| A > 20                    | 11.229                              |            | 0,2             |            | 0,6              |            | 15.563          |            | 0,3             |            | 0,8              |            | 1,33         |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

Analizando la tasa de emisión de GEI por tonelada de peso muerto y grupo de edad, según la metodología OMI I para el cálculo de combustibles (Tabla 217), que los buques más modernos tienen las tasas de emisión más bajas por tonelada de peso muerto construido, tanto para buques LPG y como LNG.

Tabla 217 Toneladas de GEI por TPM y grupo de edad para buques LPG y LNG a partir de la metodología OMI I

| Grupo de Edad (A) | Buques LPG      |                         |                         | Buques LNG      |                 |                         |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|
|                   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O        |
| A ≤ 5             | 0,797           | 1,53 · 10 <sup>-5</sup> | 4,01 · 10 <sup>-5</sup> | 1,055           | 0,014           | 4,57 · 10 <sup>-5</sup> |
| 5 < A ≤ 10        | 1,064           | 2,04 · 10 <sup>-5</sup> | 5,35 · 10 <sup>-5</sup> | 1,208           | 0,016           | 5,22 · 10 <sup>-5</sup> |
| 10 < A ≤ 15       | 1,044           | 2 · 10 <sup>-5</sup>    | 5,25 · 10 <sup>-5</sup> | 1,165           | 0,011           | 5,25 · 10 <sup>-5</sup> |
| 15 < A ≤ 20       | 1,020           | 1,95 · 10 <sup>-5</sup> | 5,13 · 10 <sup>-5</sup> | 1,440           | 0,020           | 6,19 · 10 <sup>-5</sup> |
| A > 20            | 1,373           | 2,63 · 10 <sup>-5</sup> | 6,91 · 10 <sup>-5</sup> | 1,532           | 0,021           | 6,58 · 10 <sup>-5</sup> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Analizando la tasa de emisión de GEI por tonelada de peso muerto y grupo de edad, según la metodología OMI II (Tabla 218), que los buques más modernos tienen las tasas de emisión más bajas por tonelada de peso muerto construido para buques LPG. Para los buques LNG se observa que las tasas de emisión más bajas de CO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O se encuentran en los buques más modernos (edades iguales o menores de 5 años), pero la menor tasa de emisión de CH<sub>4</sub> y BC se encuentran en el grupo de edad de 10 a 15 años y en el grupo de edad entre 15 y 20 años respectivamente.

Tabla 218 Toneladas de GEI por TPM y grupo de edad para buques LPG y LNG a partir de la metodología OMI II.

| Grupo de Edad (A) | Buques LPG      |                         |                         |                         | Buques LNG      |                 |                         |                         |
|-------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
|                   | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>         | N <sub>2</sub> O        | BC                      | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | N <sub>2</sub> O        | BC                      |
| A ≤ 5             | 1,279           | 2,45 · 10 <sup>-5</sup> | 6,44 · 10 <sup>-5</sup> | 4,12 · 10 <sup>-5</sup> | 0,868           | 0,012           | 3,72 · 10 <sup>-5</sup> | 5,31 · 10 <sup>-5</sup> |
| 5 < A ≤ 10        | 1,578           | 3,02 · 10 <sup>-5</sup> | 7,94 · 10 <sup>-5</sup> | 8,27 · 10 <sup>-5</sup> | 0,978           | 0,014           | 4,15 · 10 <sup>-5</sup> | 6,62 · 10 <sup>-5</sup> |
| 10 < A ≤ 15       | 1,554           | 2,97 · 10 <sup>-5</sup> | 7,82 · 10 <sup>-5</sup> | 6,88 · 10 <sup>-5</sup> | 0,966           | 0,009           | 4,39 · 10 <sup>-5</sup> | 3,90 · 10 <sup>-5</sup> |
| 15 < A ≤ 20       | 1,464           | 2,80 · 10 <sup>-5</sup> | 7,37 · 10 <sup>-5</sup> | 6,67 · 10 <sup>-5</sup> | 1,120           | 0,015           | 4,81 · 10 <sup>-5</sup> | 4,42 · 10 <sup>-5</sup> |
| A > 20            | 1,903           | 3,64 · 10 <sup>-5</sup> | 9,58 · 10 <sup>-5</sup> | 1,63 · 10 <sup>-4</sup> | 1,174           | 0,016           | 5,04 · 10 <sup>-5</sup> | 4,53 · 10 <sup>-5</sup> |

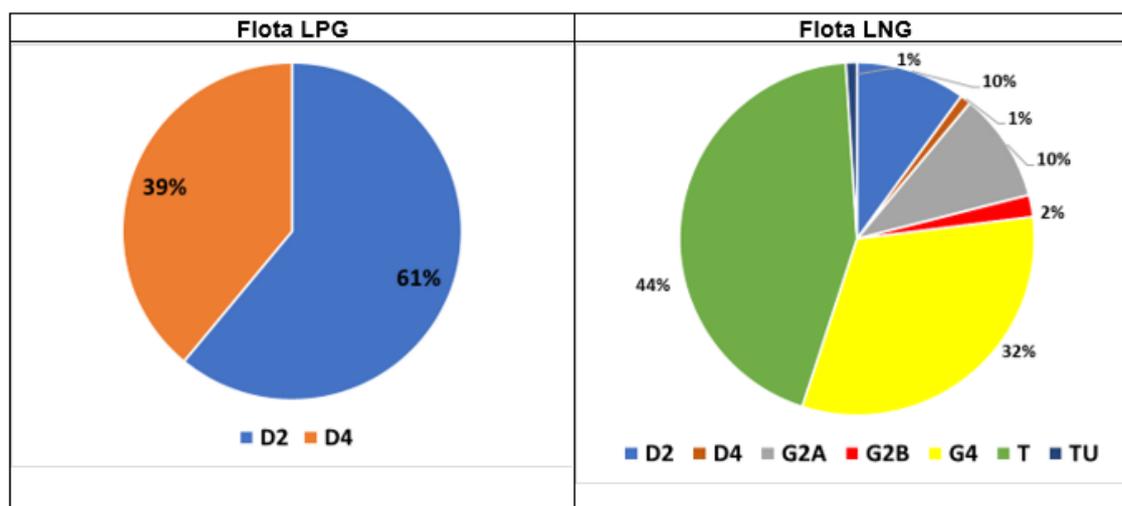
Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.1.8. Emisiones de GEI por tipos de motor principal

Hay una gran diferencia en cuanto a los sistemas de propulsión que hay instalados en los buques LPG y en los buques LNG. En este trabajo de investigación nos centramos en el tipo de motor como elemento definitorio del sistema de propulsión, por lo tanto, no se analiza el sistema de propulsión desde el punto de vista del tipo de hélice (paso fijo, paso variable, azimutal, etc.), ni desde el punto del número de hélices instaladas a bordo.

En la Gráfica 82 se muestra el porcentaje de cada sistema de propulsión instalado en los buques gaseros.

Gráfica 83 Sistemas de propulsión a bordo de los buques gaseros



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los buques LNG (Tabla 219), la mayoría de las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O están en el tipo de motor T. Para las emisiones y de BC la mayoría de las emisiones se encuentra en el tipo de motor G4. Mientras que la menor cantidad de todas estas emisiones se encuentra en tipo motor D4.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para tipo de motor. En general, las plantas de vapor son las que más emisiones causan, excepto para las emisiones de BC, donde el tipo de motor D2 es el que mayor cantidad de emisiones BC causan. Las menores emisiones por buque se encuentran en el tipo de motor D4.

Tabla 219 Emisiones de GEI para los buques LNG por tipo de motor propulsor

| Tipo de motor             | Valores para la flota de buques LNG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|---------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|                           | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|                           | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|                           | MMt                                 | %          | MMt             | %          | kton             | %          | MMt             | %          | MMt             | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| D2                        | 5,11                                | 9,6        | 0,002           | 0,3        | 0,256            | 11,0       | 4,80            | 11,2       | 0,000           | 0          | 0,246            | 13,1       | 0,066        | 4,6        |
| D4                        | 0,04                                | 0,1        | 0               | 0          | 0,002            | 0,1        | 0,03            | 0,1        | 0               | 0          | 0,002            | 0,1        | 0,008        | 0,6        |
| G2A                       | 3,60                                | 6,8        | 0,048           | 7,4        | 0,155            | 6,7        | 3,09            | 7,2        | 0,004           | 0,9        | 0,132            | 7,0        | 0,188        | 13,1       |
| G2B                       | 0,81                                | 1,5        | 0,011           | 1,6        | 0,035            | 1,5        | 0,73            | 1,7        | 0,011           | 2,1        | 0,031            | 1,6        | 0,038        | 2,7        |
| G4                        | 17,86                               | 33,5       | 0,232           | 36,0       | 0,773            | 33,2       | 14,49           | 33,7       | 0,212           | 42,2       | 0,614            | 32,7       | 1,037        | 72,5       |
| T                         | 25,11                               | 47,2       | 0,342           | 53,1       | 1,078            | 46,3       | 19,43           | 45,1       | 0,268           | 53,5       | 0,834            | 44,4       | 0,075        | 5,2        |
| TU                        | 0,73                                | 1,4        | 0,010           | 1,5        | 0,031            | 1,3        | 0,48            | 1,1        | 0,007           | 1,3        | 0,021            | 1,1        | 0,019        | 1,3        |
| <b>Total</b>              | <b>53,25</b>                        | <b>100</b> | <b>0,644</b>    | <b>100</b> | <b>2,330</b>     | <b>100</b> | <b>43,06</b>    | <b>100</b> | <b>0,501</b>    | <b>100</b> | <b>1,880</b>     | <b>100</b> | <b>1,431</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LNG (t) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| D2                        | 102.109                             |            | 39,3            |            | 5,1              |            | 96.057          |            | 1,8             |            | 4,9              |            | 1,3          |            |
| D4                        | 7.323                               |            | 0,1             |            | 0,4              |            | 6.689           |            | 0,1             |            | 0,3              |            | 1,6          |            |
| G2A                       | 71.952                              |            | 956             |            | 3,1              |            | 61.855          |            | 861             |            | 2,6              |            | 3,8          |            |
| G2B                       | 62.128                              |            | 817             |            | 2,7              |            | 56.014          |            | 827             |            | 2,4              |            | 3            |            |
| G4                        | 105.657                             |            | 1.373           |            | 4,6              |            | 85.745          |            | 1.253           |            | 3,6              |            | 6,1          |            |
| T                         | 110.147                             |            | 1.499           |            | 4,7              |            | 85.236          |            | 1.175           |            | 3,7              |            | 3,3          |            |
| TU                        | 104.098                             |            | 1.417           |            | 4,5              |            | 68.800          |            | 948             |            | 3                |            | 2,7          |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

En cuanto a los buques LPG (Tabla 220), el tipo de motor D2 es el responsable de la mayoría de las emisiones de GEI.

En la misma tabla se puede observar también los valores por cada buque LNG de cada una de las emisiones y para tipo de motor. Los motores D4 son los que menos tasa de emisión de GEI tienen por buque.

Los resultados por buque en las tablas 219 y 220 pueden tener un sesgo al estar influenciado por la potencia instalada por buque ya que también depende del tamaño del buque y de su velocidad de diseño. Para realizar un análisis más conciso sobre qué tipo de motor es más o menos eficiente, a continuación, se analiza la tasa de emisión de cada tipo de motor por cada kilovatio instalado, con el fin de saber cuál es el tipo de motor con mayor y menor eficiencia.

Para los buques LPG (Tabla 218), los motores D2 son los más eficiente en cuanto a cada tonelada de GEI por kW instalado para la propulsión.

Para los buques LNG (Tabla 222), los motores G2A son los más eficientes en cuanto a las emisiones de CO<sub>2</sub> y de N<sub>2</sub>O. Los motores D2 y D4 son los más eficientes en cuanto a las emisiones de CH<sub>4</sub>, teniendo la menor tasa de emisión CH<sub>4</sub> para cada GEI por kW instalado para la propulsión. Las TU son las eficientes para las emisiones de BC por kW instalado para la propulsión. En general, el tipo motor T, es el menos eficiente.

Tabla 220 Emisiones de GEI para los buques LPG por tipo de motor propulsor

| Tipo de motor               | Valores para la flota de buques LPG |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
|-----------------------------|-------------------------------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|-----------------|------------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|------------|
|                             | OMI I                               |            |                 |            |                  |            | OMI II          |            |                 |            |                  |            |              |            |
|                             | CO <sub>2</sub>                     |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | CO <sub>2</sub> |            | CH <sub>4</sub> |            | N <sub>2</sub> O |            | BC           |            |
|                             | MMt                                 | %          | kton            | %          | kton             | %          | MMt             | %          | kton            | %          | kton             | %          | kton         | %          |
| D2                          | 21,52                               | 83,4       | 0,412           | 83,4       | 1,082            | 83,4       | 32,87           | 85,2       | 0,629           | 85,1       | 1,654            | 85,2       | 1,086        | 56,7       |
| D4                          | 4,28                                | 16,6       | 0,082           | 16,6       | 0,215            | 16,6       | 5,72            | 14,8       | 0,110           | 14,9       | 0,288            | 14,8       | 0,829        | 43,3       |
| <b>Total</b>                | <b>25,80</b>                        | <b>100</b> | <b>0,494</b>    | <b>100</b> | <b>1,297</b>     | <b>100</b> | <b>38,59</b>    | <b>100</b> | <b>0,739</b>    | <b>100</b> | <b>1,942</b>     | <b>100</b> | <b>1,915</b> | <b>100</b> |
| Valores por buque LPG (ton) |                                     |            |                 |            |                  |            |                 |            |                 |            |                  |            |              |            |
| D2                          | 23.751                              |            | 0,5             |            | 1,2              |            | 36.276          |            | 0,7             |            | 1,8              |            | 1,2          |            |
| D4                          | 7.439                               |            | 0,1             |            | 0,4              |            | 9.934           |            | 0,2             |            | 0,5              |            | 1,4          |            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "kton" = miles de toneladas, "t" = toneladas

Tabla 221 Toneladas de GEI por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LPG

| Tipo de motor | OMI I           |                      |                      | OMI II          |                      |                      |                      |
|---------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|               | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>      | N <sub>2</sub> O     | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>      | N <sub>2</sub> O     | BC                   |
| D2            | 2,935           | $5,62 \cdot 10^{-5}$ | $1,48 \cdot 10^{-4}$ | 4,482           | $8,58 \cdot 10^{-5}$ | $2,26 \cdot 10^{-4}$ | $1,48 \cdot 10^{-4}$ |
| D4            | 3,445           | $6,59 \cdot 10^{-5}$ | $1,73 \cdot 10^{-4}$ | 4,600           | $8,80 \cdot 10^{-5}$ | $2,32 \cdot 10^{-4}$ | $6,67 \cdot 10^{-4}$ |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "t" = toneladas

Tabla 222 Toneladas de GEI por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LNG

| Tipo de motor | OMI I           |                      |                      | OMI II          |                      |                      |                      |
|---------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|               | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>      | N <sub>2</sub> O     | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>      | N <sub>2</sub> O     | BC                   |
| D2            | 2,853           | 0,001                | $1,43 \cdot 10^{-4}$ | 2,684           | $5,17 \cdot 10^{-5}$ | $1,38 \cdot 10^{-4}$ | $3,67 \cdot 10^{-5}$ |
| D4            | 3,319           | $6,35 \cdot 10^{-5}$ | $1,67 \cdot 10^{-4}$ | 3,032           | $5,80 \cdot 10^{-5}$ | $1,53 \cdot 10^{-4}$ | $7,23 \cdot 10^{-4}$ |
| G2A           | 2,504           | 0,033                | $1,08 \cdot 10^{-4}$ | 2,153           | 0,030                | $9,18 \cdot 10^{-5}$ | $1,31 \cdot 10^{-4}$ |
| G2B           | 2,637           | 0,035                | $1,14 \cdot 10^{-4}$ | 2,377           | 0,035                | $1,00 \cdot 10^{-4}$ | $1,25 \cdot 10^{-4}$ |
| G4            | 2,712           | 0,035                | $1,17 \cdot 10^{-4}$ | 2,201           | 0,032                | $9,33 \cdot 10^{-5}$ | $1,58 \cdot 10^{-4}$ |
| T             | 4,301           | 0,059                | $1,85 \cdot 10^{-4}$ | 3,328           | 0,046                | $1,43 \cdot 10^{-4}$ | $1,29 \cdot 10^{-4}$ |
| TU            | 4,298           | 0,059                | $1,85 \cdot 10^{-4}$ | 2,840           | 0,039                | $1,22 \cdot 10^{-4}$ | $1,10 \cdot 10^{-4}$ |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "t" = toneladas

## 10.2. Emisiones de contaminantes aéreos

En este capítulo, para cada estructura empleada, se van a analizar las emisiones de los siguientes contaminantes aéreos:

- Emisiones de Monóxido de Carbono (CO)
- Emisiones de Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Emisiones de Óxidos de Azufre (SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub>)
- Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles distintos al metano (NMVOC)
- Emisiones de Materia Particulada (PM)

Los valores totales de cada uno de estos contaminantes se muestran en la Tabla 223. Los buques LNG emiten la mayoría de las emisiones de CO y NMVOC. Los buques LPG son los que más emisiones de NO<sub>x</sub>; mientras que para las emisiones de SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub> y PM, ambos tipos de buques emiten una similar cantidad de emisiones.

*Tabla 223 Emisiones de contaminantes aéreos totales de la flota de buques gaseros.*

| Flota | Método | CO      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM      | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
|-------|--------|---------|-----------------|-----------------|---------|--------|-----------------|
| LPG   | OMI I  | 22.796  | 156.523         | 3.194           | 53.346  | 25.347 | 649.891         |
|       | OMI II | 34.100  | 236.985         | 4.836           | 74.423  | 37.916 | 971.685         |
| LNG   | OMI I  | 114.992 | 127.298         | 2.598           | 53.913  | 56.237 | 511.331         |
|       | OMI II | 95.030  | 105.243         | 2.148           | 40.266  | 45.629 | 388.886         |
| Total | OMI I  | 137.788 | 283.821         | 5.792           | 107.260 | 81.584 | 1.161.223       |
|       | OMI II | 129.130 | 342.228         | 6.984           | 114.689 | 83.546 | 1.360.571       |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.2.1. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de banderas

Se han realizado cuatro grupos de banderas para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de contaminantes aéreos que tienen cada uno de los grupos de banderas analizados.

La Tabla 224 muestra los valores anuales calculados para el año 2019 de cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada grupo de banderas. Los buques LPG dentro del grupo de banderas RA son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LPG dentro del grupo de banderas ROCDE.

Tabla 224 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de bandera

| OMI I             |        |                 |                 |        |        |                 |
|-------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de banderas | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 1.832  | 12.576          | 257             | 4.332  | 2.037  | 50.508          |
| RA                | 11.016 | 75.643          | 1.544           | 25.715 | 12.249 | 322.571         |
| RM                | 8.823  | 60.584          | 1.236           | 20.719 | 9.811  | 250.647         |
| ROCDE             | 1.124  | 7.720           | 158             | 2.580  | 1.250  | 26.166          |
| OMI II            |        |                 |                 |        |        |                 |
| Grupo de banderas | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 2.462  | 17.108          | 349             | 5.373  | 2.737  | 67.278          |
| RA                | 16.635 | 115.615         | 2.359           | 36.322 | 18.496 | 485.590         |
| RM                | 13.464 | 93.573          | 1.910           | 29.383 | 14.971 | 383.580         |
| ROCDE             | 1.539  | 10.688          | 218             | 3.345  | 1.711  | 35.237          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

En la Tabla 225 se ven los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de banderas. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de banderas RA son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de banderas ROCDE son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

Tabla 225 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de bandera

| Grupo de banderas | OMI I  |                 |                 |      |       |                 |
|-------------------|--------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
|                   | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 15,4   | 106             | 2,2             | 36,4 | 17,1  | 424             |
| RA                | 19,6   | 134             | 2,7             | 45,7 | 21,8  | 573             |
| RM                | 14,7   | 101             | 2,1             | 34,4 | 16,3  | 416             |
| ROCDE             | 5,7    | 39              | 0,8             | 13   | 6,3   | 132             |
| Grupo de banderas | OMI II |                 |                 |      |       |                 |
|                   | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 21     | 144             | 2,9             | 45,1 | 23    | 21              |
| RA                | 140    | 205             | 4,2             | 64,5 | 32,9  | 140             |
| RM                | 113    | 155             | 3,2             | 48,8 | 24,9  | 113             |
| ROCDE             | 13     | 54              | 1,1             | 16,9 | 8,6   | 13              |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

En la Tabla 226 se ven los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de banderas. Los buques LNG dentro del grupo de banderas RA son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LNG dentro del grupo de banderas ROCDE.

Tabla 226 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de bandera

| OMI I             |        |                 |                 |        |        |                 |
|-------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de banderas | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NM VOC | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 12.955 | 11.701          | 239             | 5.342  | 6.045  | 45.232          |
| RA                | 68.754 | 84.609          | 1.727           | 35.169 | 34.540 | 349.684         |
| RM                | 22.665 | 21.941          | 448             | 9.563  | 10.744 | 84.758          |
| ROCDE             | 10.618 | 9.047           | 185             | 3.839  | 4.908  | 31.657          |
| OMI II            |        |                 |                 |        |        |                 |
| Grupo de banderas | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NM VOC | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 10.967 | 7.755           | 158             | 3.536  | 4.915  | 30.855          |
| RA                | 57.110 | 74.077          | 1.512           | 27.857 | 28.326 | 272.726         |
| RM                | 18.541 | 16.224          | 331             | 6.461  | 8.542  | 59.923          |
| ROCDE             | 8.412  | 7.187           | 147             | 2.412  | 3.846  | 25.382          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

En la Tabla 227 se ven los valores de las emisiones para cada buque LNG registrado en cada grupo de banderas. Para las emisiones de CO, los buques que menos contaminan están registrados en banderas ROCDE, mientras que los buques en los otros tres grupos de banderas son los que más emisiones por buque tienen. Para el resto de las emisiones, los buques en el grupo RA son las mayores emisiones por buque presentan, y en general, los buques en el grupo de banderas ROCDE son los que menor emisiones por buques muestran.

Tabla 227 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de bandera

| OMI I             |     |                 |                 |      |        |                 |
|-------------------|-----|-----------------|-----------------|------|--------|-----------------|
| Grupo de banderas | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NM VOC | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 220 | 198             | 4               | 90,5 | 103    | 767             |
| RA                | 221 | 272             | 5,6             | 113  | 111    | 1.124           |
| RM                | 220 | 213             | 4,3             | 92,8 | 104    | 823             |
| ROCDE             | 217 | 185             | 3,8             | 78,4 | 100    | 646             |
| OMI II            |     |                 |                 |      |        |                 |
| Grupo de banderas | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NM VOC | NO <sub>x</sub> |
| EU15              | 186 | 131             | 2,7             | 59,9 | 83,3   | 523             |
| RA                | 184 | 238             | 4,9             | 89,6 | 91,1   | 877             |
| RM                | 180 | 158             | 3,2             | 62,7 | 82,9   | 582             |
| ROCDE             | 171 | 147             | 3               | 49,2 | 78,5   | 518             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.2.2. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de esloras

Se han realizado diferentes grupos de esloras según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de contaminantes aéreos. Para la flota de buques de LPG se han hecho 5 grupos de esloras que corresponden a buques con esloras menores a 80 metros, entre 80 y 100 metros, entre 100 y 150 metros, entre 150 y 200 metros y esloras iguales o superiores a 200 metros. Para la flota de buques de LNG se han hecho 4 grupos

de esloras que corresponden a buques con esloras menores a 250 metros, entre 250 y 270 metros, entre 270 y 290 metros y esloras iguales o superiores a 290 metros.

La Tabla 228 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada grupo de esloras. Los buques LPG dentro del grupo de esloras superiores a 200 metros son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LPG dentro del grupo de esloras inferiores a 80 metros.

En la Tabla 229 se ven los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de esloras. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de esloras superiores a 200 metros son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de esloras inferiores a 80 metros son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

*Tabla 228 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de eslora*

| Grupo de esloras<br>(L) | OMI I |                 |                 |        |        |                 |
|-------------------------|-------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
|                         | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| L < 80                  | 1.345 | 9.235           | 188             | 3.091  | 1.495  | 27.839          |
| 80 ≤ L < 100            | 2.482 | 17.044          | 348             | 5.809  | 2.760  | 62.814          |
| 100 ≤ L < 150           | 3.773 | 25.908          | 529             | 8847   | 4.195  | 104.835         |
| 150 ≤ L < 200           | 5.217 | 35.819          | 731             | 12.227 | 5.800  | 154.569         |
| L ≥ 200                 | 9.979 | 68.518          | 1.398           | 23.373 | 11.096 | 299.835         |

| Grupo de esloras<br>(L) | OMI II |                 |                 |        |        |                 |
|-------------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
|                         | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| L < 80                  | 1.819  | 12.621          | 258             | 3.941  | 2.022  | 36.796          |
| 80 ≤ L < 100            | 3.301  | 22.929          | 468             | 7.184  | 3.671  | 82.097          |
| 100 ≤ L < 150           | 4.979  | 34.597          | 706             | 10.859 | 5.537  | 136.692         |
| 150 ≤ L < 200           | 6.830  | 47.467          | 969             | 14.914 | 7.594  | 199.977         |
| L ≥ 200                 | 17.171 | 119.371         | 2.436           | 37.524 | 19.093 | 516.123         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 230 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de esloras. Los buques LNG dentro del grupo de esloras superiores a 290 metros son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LNG están en el grupo de esloras inferiores a 250 metros.

Tabla 229 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de eslora

| Grupo de esloras (L) | OMI I |                 |                 |      |       |                 |
|----------------------|-------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
|                      | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| L < 80               | 4,3   | 29,8            | 0,6             | 10   | 4,8   | 89,8            |
| 80 ≤ L < 100         | 7,5   | 51,2            | 1               | 17,4 | 8,3   | 189             |
| 100 ≤ L < 150        | 12,6  | 86,6            | 1,8             | 29,6 | 14    | 351             |
| 150 ≤ L < 200        | 22,3  | 153             | 3,1             | 52,3 | 24,8  | 661             |
| L ≥ 200              | 32,6  | 224             | 4,6             | 76,4 | 36,3  | 980             |

| Grupo de esloras (L) | OMI II |                 |                 |      |       |                 |
|----------------------|--------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
|                      | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| L < 80               | 5,9    | 40,7            | 0,8             | 12,7 | 6,5   | 119             |
| 80 ≤ L < 100         | 9,9    | 68,9            | 1,4             | 21,6 | 11    | 247             |
| 100 ≤ L < 150        | 16,7   | 116             | 2,4             | 36,3 | 18,5  | 457             |
| 150 ≤ L < 200        | 29,2   | 203             | 4,1             | 63,7 | 32,5  | 855             |
| L ≥ 200              | 56,1   | 390             | 8               | 123  | 62,4  | 1.687           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 230 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de eslora

| Grupo de esloras (L) | OMI I  |                 |                 |        |        |                 |
|----------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
|                      | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| L < 250              | 1.787  | 1.801           | 37              | 750    | 855    | 6.295           |
| 250 ≤ L < 270        | 12.225 | 10.124          | 207             | 4.276  | 5.619  | 40.562          |
| 270 ≤ L < 290        | 50.468 | 43.936          | 897             | 19.377 | 23.394 | 175.274         |
| L ≥ 290              | 50.512 | 71.437          | 1.458           | 29.511 | 26.369 | 289.200         |

| Grupo de esloras (L) | OMI II |                 |                 |        |        |                 |
|----------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
|                      | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| L < 250              | 1.158  | 1.077           | 22              | 388    | 542    | 3.693           |
| 250 ≤ L < 270        | 9.565  | 8.169           | 167             | 2.631  | 4.366  | 28.848          |
| 270 ≤ L < 290        | 41.267 | 31.678          | 646             | 12.616 | 18.599 | 117.929         |
| L ≥ 290              | 43.040 | 64.319          | 1.313           | 24.631 | 22.123 | 238.416         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

En la Tabla 231 se ven los valores de las emisiones para cada buque LNG registrado en cada grupo de esloras. Para cada uno de los contaminantes, los buques LNG dentro de los grupos de esloras entre 250 y 270 metros y entre 270 metros y 290 metros son los que mayores emisiones por buque producen, excepto para las emisiones de NO<sub>x</sub>, donde las mayores emisiones por buque están en el grupo de esloras superiores a 290 metros.

Por otro lado, los buques LNG dentro del grupo de esloras inferiores a 250 metros son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

Tabla 231 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de eslora

| Grupo de esloras<br>(L) | OMI I  |                 |                 |      |       |                 |
|-------------------------|--------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
|                         | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| L < 250                 | 68,7   | 69,3            | 1,4             | 28,9 | 32,9  | 242             |
| 250 ≤ L < 270           | 255    | 211             | 4,3             | 89,1 | 117   | 845             |
| 270 ≤ L < 290           | 255    | 222             | 4,5             | 97,9 | 118   | 885             |
| L ≥ 290                 | 202    | 286             | 5,8             | 118  | 106   | 1.157           |
| Grupo de esloras<br>(L) | OMI II |                 |                 |      |       |                 |
|                         | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| L < 250                 | 44,5   | 41,4            | 0,8             | 14,9 | 20,9  | 142             |
| 250 ≤ L < 270           | 199    | 170             | 3,5             | 54,8 | 91    | 601             |
| 270 ≤ L < 290           | 208    | 160             | 3,3             | 63,7 | 93,9  | 596             |
| L ≥ 290                 | 172    | 257             | 5,3             | 98,5 | 88,5  | 954             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.2.3. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de peso muerto

Se han realizado diferentes grupos de toneladas de peso muerto según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de contaminantes aéreos. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos que corresponden a buques con TPM menores a 5.000 toneladas, entre 5.000 y 10.000 toneladas, entre 10.000 y 50.000 toneladas, y, TPM igual o superior a 50.000 toneladas. Para la flota de buques de LNG se han hecho 4 grupos de TPM que corresponden a buques con TPM menores a 75.000 toneladas, entre 75.000 y 85.000 toneladas, entre 85.000 y 100.000 toneladas, y, TPM igual o superior a 100.000 toneladas.

La Tabla 232 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada grupo de TPM. Los buques LPG dentro del grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LPG dentro del grupo de TPM entre 5.000 y 10.000 toneladas.

En la Tabla 233 se ven los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de TPM. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de TPM superiores a 50.000 toneladas son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de TPM inferiores a 5.000 toneladas son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

Tabla 232 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de TPM

| OMI I                                   |        |                 |                 |        |        |                 |
|---|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 5.000                             | 3.879  | 26.635          | 544             | 9.028  | 4.313  | 91.085          |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                    | 2.755  | 18.917          | 386             | 6.477  | 3.063  | 77.660          |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                   | 7.908  | 54.300          | 1.108           | 18.524 | 8.793  | 236.270         |
| TPM ≥ 50.000                            | 8.254  | 56.672          | 1.157           | 19.318 | 9.177  | 244.876         |
| OMI II                                  |        |                 |                 |        |        |                 |
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 5.000                             | 5.189  | 36.029          | 735             | 11.274 | 5.770  | 119.392         |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                    | 3.636  | 25.268          | 516             | 7.930  | 4.043  | 101.295         |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                   | 10.355 | 71.965          | 1.469           | 22.610 | 11.514 | 306.167         |
| TPM ≥ 50.000                            | 14.919 | 103.723         | 2.117           | 32.608 | 16.589 | 444.831         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 234 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de TPM. Los buques LNG dentro del grupo de TPM entre 75.000 y 85.000 toneladas son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas.

En cuanto a los que emiten menos, para las emisiones de CO y NMVOC los que menos emisiones aportan son los buques LNG dentro del grupo de TPM superiores a 100.000 toneladas. Para el resto de las emisiones, la menor cantidad lo aportan los buques LNG dentro del grupo de TPM inferior a 75.000 toneladas.

Tabla 233 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo TPM

| OMI I                                   |      |                 |                 |      |       |                 |
|---|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 5.000                             | 6    | 41              | 0,8             | 13,9 | 6,6   | 140             |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                    | 11,7 | 80,5            | 1,6             | 27,6 | 13    | 331             |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                   | 22,7 | 156             | 3,2             | 53,2 | 25,3  | 679             |
| TPM ≥ 50.000                            | 33,1 | 228             | 4,6             | 77,6 | 36,9  | 983             |
| OMI II                                  |      |                 |                 |      |       |                 |
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 5.000                             | 8    | 55,4            | 1,1             | 17,3 | 8,9   | 184             |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                    | 15,5 | 108             | 2,2             | 33,7 | 17,2  | 431             |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                   | 29,8 | 207             | 4,2             | 65   | 33,1  | 880             |
| TPM ≥ 50.000                            | 59,9 | 417             | 8,5             | 131  | 66,6  | 1.787           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 234 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de TPM

| OMI I                                   |        |                 |                 |        |        |                 |
|---|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 75.000                            | 15.827 | 13.355          | 273             | 5.660  | 7.303  | 45.134          |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 49.312 | 42.350          | 864             | 18.468 | 22.805 | 171.384         |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 45.533 | 43.454          | 887             | 19.865 | 21.493 | 163.093         |
| TPM ≥ 100.000                           | 4.321  | 28.139          | 574             | 9.920  | 4.637  | 131.720         |

| OMI II                                  |        |                 |                 |        |        |                 |
|---|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 75.000                            | 12.257 | 10.441          | 213             | 3.462  | 5.599  | 36.987          |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 39.687 | 31.395          | 641             | 11.818 | 17.947 | 115.137         |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 39.044 | 30.126          | 615             | 13.848 | 17.732 | 117.685         |
| TPM ≥ 100.000                           | 4.041  | 33.282          | 679             | 11.139 | 4.351  | 119.077         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 235 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo TPM

| OMI I                                   |     |                 |                 |     |       |                 |
|---|-----|-----------------|-----------------|-----|-------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 75.000                            | 191 | 161             | 3,3             | 68  | 88    | 544             |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 258 | 222             | 4,5             | 97  | 119   | 897             |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 224 | 214             | 4,4             | 98  | 106   | 803             |
| TPM ≥ 100.000                           | 96  | 625             | 12,8            | 221 | 103   | 2.927           |

| OMI II                                  |     |                 |                 |     |       |                 |
|---|-----|-----------------|-----------------|-----|-------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 75.000                            | 148 | 126             | 2,6             | 42  | 67,5  | 446             |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                   | 208 | 164             | 3,4             | 62  | 94    | 603             |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                  | 192 | 148             | 3               | 68  | 87    | 580             |
| TPM ≥ 100.000                           | 90  | 740             | 15              | 248 | 97    | 2.646           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

En la Tabla 235 se ven los valores de las emisiones para cada buque LNG registrado en cada grupo de TPM. Los mayores valores de emisiones para cada buque se encuentran en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas, excepto para los contaminantes CO y NMVOC, los cuales tienen su valor máximo en el grupo de TPM entre 75.000 y 85.000 toneladas. En cambio, los buques LNG dentro del grupo de TPM inferiores a 75.000 toneladas son los que menos emisiones por buque producen para los contaminantes aéreos, excepto para el CO, el cual tiene su valor mínimo en el grupo de TPM superior a 100.000 toneladas.

Analizando la relación de toneladas de contaminante emitidas por la flota de gaseros por tonelada de peso muerto construida, se obtiene un indicador de que buque es más eficiente desde un punto de vista de los contaminantes aéreos. Para buques LPG, la Tabla 236 muestra de manera general que los buques LPG de mayor tamaño son los más eficientes. Por el contrario,

los buques más pequeños son los menos eficientes, con las menores tasas de emisión por toneladas de peso muerto construido. Sin embargo, los buques LNG más o menos eficientes, varían según su tamaño, pero también influyen los sistemas de propulsión predominantes, entre otros factores, como se ve en la Tabla 237.

Tabla 236 Toneladas de contaminantes aéreos por TPM para buques LPG

| OMI I                                   |                      |                 |                      |       |                      |                 |
|---|----------------------|-----------------|----------------------|-------|----------------------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO                   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM    | NMVOC                | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 5.000                             | 0,003                | 0,017           | $3,53 \cdot 10^{-4}$ | 0,006 | 0,003                | 0,059           |
| $5.000 \leq \text{TPM} < 10.000$        | 0,002                | 0,011           | $2,32 \cdot 10^{-4}$ | 0,004 | 0,002                | 0,047           |
| $10.000 \leq \text{TPM} < 50.000$       | $8,76 \cdot 10^{-4}$ | 0,006           | $1,23 \cdot 10^{-4}$ | 0,002 | $9,74 \cdot 10^{-4}$ | 0,026           |
| $\text{TPM} \geq 50.000$                | $6,06 \cdot 10^{-4}$ | 0,004           | $8,50 \cdot 10^{-5}$ | 0,001 | $6,74 \cdot 10^{-4}$ | 0,018           |
| OMI II                                  |                      |                 |                      |       |                      |                 |
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO                   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM    | NMVOC                | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 5.000                             | 0,003                | 0,023           | $4,77 \cdot 10^{-4}$ | 0,007 | 0,004                | 0,077           |
| $5.000 \leq \text{TPM} < 10.000$        | 0,002                | 0,015           | $3,10 \cdot 10^{-4}$ | 0,005 | 0,002                | 0,061           |
| $10.000 \leq \text{TPM} < 50.000$       | 0,001                | 0,008           | $1,63 \cdot 10^{-4}$ | 0,003 | 0,013                | 0,034           |
| $\text{TPM} \geq 50.000$                | 0,001                | 0,0076          | $1,56 \cdot 10^{-4}$ | 0,002 | 0,012                | 0,033           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 237 Toneladas de contaminantes aéreos por TPM para buques LNG

| OMI I                                   |                      |                 |                      |                      |                      |                 |
|---|----------------------|-----------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO                   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM                   | NMVOC                | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 75.000                            | 0,0035               | 0,0029          | $5,97 \cdot 10^{-5}$ | 0,0012               | 0,0016               | 0,010           |
| $75.000 \leq \text{TPM} < 85.000$       | 0,0032               | 0,0027          | $5,60 \cdot 10^{-5}$ | 0,0012               | 0,0015               | 0,011           |
| $85.000 \leq \text{TPM} < 100.000$      | 0,0024               | 0,0023          | $4,74 \cdot 10^{-5}$ | 0,0011               | 0,0011               | 0,009           |
| $\text{TPM} \geq 100.000$               | $7,92 \cdot 10^{-4}$ | 0,0052          | $1,05 \cdot 10^{-5}$ | 0,0018               | 0,0008               | 0,024           |
| OMI II                                  |                      |                 |                      |                      |                      |                 |
| Grupo de Toneladas de Peso muerto (TPM) | CO                   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM                   | NMVOC                | NO <sub>x</sub> |
| TPM < 75.000                            | 0,003                | 0,002           | $4,67 \cdot 10^{-5}$ | $7,58 \cdot 10^{-4}$ | 0,001                | 0,008           |
| $75.000 \leq \text{TPM} < 85.000$       | 0,003                | 0,002           | $4,15 \cdot 10^{-5}$ | $7,66 \cdot 10^{-4}$ | 0,001                | 0,007           |
| $85.000 \leq \text{TPM} < 100.000$      | 0,002                | 0,002           | $3,29 \cdot 10^{-5}$ | $7,40 \cdot 10^{-4}$ | $9,47 \cdot 10^{-4}$ | 0,006           |
| $\text{TPM} \geq 100.000$               | 0,001                | 0,006           | $1,24 \cdot 10^{-4}$ | 0,002                | $7,97 \cdot 10^{-4}$ | 0,022           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

#### 10.2.4. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de capacidad de carga

Se han realizado diferentes grupos de toneladas de capacidad de carga (CC) según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de contaminantes aéreos. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos de metros cúbicos de capacidad de carga que corresponden a buques con volúmenes menores de 5.000 m<sup>3</sup>, entre

5.000 y 15.000 m<sup>3</sup>, entre 15.000 y 50.000 m<sup>3</sup>, y capacidad de carga igual o superior a 50.000 m<sup>3</sup>. Para la flota de buques de LNG se han hecho 4 grupos de metros cúbicos de capacidad de carga que corresponden a buques con un volumen de carga menores de 100.000 m<sup>3</sup>, entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup>, entre 150.000 y 170.000 m<sup>3</sup>, y capacidad de carga igual o superior a 170.000 m<sup>3</sup>.

La Tabla 238 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, en cada grupo de CC. Los buques LPG dentro del grupo de más de 50.000 m<sup>3</sup> son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LPG dentro del grupo de menos de 5.000 m<sup>3</sup>, excepto para las emisiones de NO<sub>x</sub> donde el valor mínimo está entre 5.000 y 15.000 m<sup>3</sup>.

En la Tabla 239 se ven los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de CC. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de CC superiores a 50.000 m<sup>3</sup> son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de CC inferiores a 5.000 m<sup>3</sup> son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

La Tabla 240 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de CC. Los buques LNG dentro del grupo de CC superiores a 170.000 m<sup>3</sup> son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LNG de menos de 100.000 m<sup>3</sup>.

*Tabla 238 Emisiones de contaminantes aéreos para buques LPG según grupo de capacidad de carga*

| <b>OMI I</b>                                 |           |                       |                       |           |              |                       |
|--|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------------------|
| <b>M<sup>3</sup> Capacidad de carga (CC)</b> | <b>CO</b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>SO<sub>4</sub></b> | <b>PM</b> | <b>NMVOC</b> | <b>NO<sub>x</sub></b> |
| CC < 5.000                                   | 4.182     | 28.715                | 586                   | 9.731     | 4.650        | 100.210               |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                          | 3.552     | 24.392                | 498                   | 8.331     | 3.950        | 99.409                |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                         | 5.009     | 34.390                | 702                   | 11.733    | 5569         | 148.245               |
| CC ≥ 50.000                                  | 10.053    | 69.026                | 1.409                 | 23.552    | 11.178       | 302.027               |
| <b>OMI II</b>                                |           |                       |                       |           |              |                       |
| <b>M<sup>3</sup> Capacidad de carga (CC)</b> | <b>CO</b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>SO<sub>4</sub></b> | <b>PM</b> | <b>NMVOC</b> | <b>NO<sub>x</sub></b> |
| CC < 5.000                                   | 5.591     | 38.822                | 792                   | 12.151    | 6.217        | 131.289               |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                          | 4.684     | 32.550                | 664                   | 10.218    | 5.209        | 129.681               |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                         | 6.556     | 45.565                | 930                   | 14,317    | 7.290        | 191.735               |
| CC ≥ 50.000                                  | 17.268    | 120.048               | 2.450                 | 37.737    | 19.201       | 518.980               |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 239 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de capacidad de carga

| OMI I                                  |      |                 |                 |      |       |                 |
|--|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| CC < 5.000                             | 6,1  | 41,8            | 0,9             | 14,2 | 6,8   | 146             |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                    | 13,6 | 93,1            | 1,9             | 31,8 | 15,1  | 379             |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                   | 22,4 | 154             | 3,1             | 52,4 | 24,9  | 662             |
| CC ≥ 50.000                            | 32,5 | 223             | 4,6             | 76,2 | 36,2  | 977             |
| OMI II                                 |      |                 |                 |      |       |                 |
| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| CC < 5.000                             | 8,1  | 56,5            | 1,2             | 17,7 | 9     | 191             |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                    | 17,9 | 124             | 2,5             | 39   | 19,9  | 495             |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                   | 29,3 | 203             | 4,2             | 63,9 | 32,5  | 856             |
| CC ≥ 50.000                            | 55,9 | 389             | 7,9             | 122  | 62,1  | 1.680           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

En la Tabla 241 se ven los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de CC. Para cada uno de los contaminantes, los buques LNG dentro del grupo de CC entre 100.000 y 150.000 m<sup>3</sup> son los que mayores emisiones por buque producen, excepto para el NO<sub>x</sub>, donde los mayores valores por buque están en el grupo de CC superior a 170.000 m<sup>3</sup>. Por otro lado, los buques LNG dentro del grupo de CC inferiores a 75.000 m<sup>3</sup> son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

Tabla 240 Emisiones de contaminantes aéreos para buques LNG según grupo de capacidad de carga

| OMI I                                  |        |                 |                 |        |        |                 |
|--|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| CC < 100.000                           | 1.787  | 1.801           | 37              | 750    | 855    | 6.295           |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 50.514 | 41.651          | 850             | 17.630 | 23.204 | 166.210         |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 39.362 | 38.338          | 782             | 17.478 | 18.653 | 142.158         |
| CC ≥ 170.000                           | 23.328 | 45.507          | 929             | 18.055 | 13.525 | 196.669         |
| OMI II                                 |        |                 |                 |        |        |                 |
| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| CC < 100.000                           | 1.158  | 1.077           | 22              | 388    | 542    | 3.693           |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 39.529 | 33.618          | 686             | 10.887 | 18.030 | 119.020         |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 33.756 | 25.195          | 514             | 12.175 | 15.229 | 98.533          |
| CC ≥ 170.000                           | 20.587 | 45.353          | 926             | 16.816 | 11.829 | 167.640         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Analizando la tasa de emisión de cada contaminante por cada metro cubico de carga disponible, se vuelve a cumplir de manera general que, tanto buques LPG (Tabla 242) como buques LNG (Tabla 243), los buques con más capacidad de carga, por lo tanto, de mayores dimensiones, son los más eficientes desde el punto de vista de toneladas de emisiones por m<sup>3</sup>

de volumen de carga transporta; siendo los buques menos eficientes los de menor tamaño, es decir, los que menor capacidad de carga tienen.

Tabla 241 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de capacidad de carga

| <b>M<sup>3</sup> Capacidad de carga (CC)</b> | <b>CO</b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>SO<sub>4</sub></b> | <b>PM</b> | <b>NMVOC</b> | <b>NO<sub>x</sub></b> |
|--|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------------------|
| CC < 100.000                                 | 68,7      | 69,3                  | 1,4                   | 28,9      | 32,9         | 242                   |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                       | 260       | 215                   | 4,4                   | 90,9      | 120          | 857                   |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                       | 242       | 235                   | 4,8                   | 107       | 114          | 872                   |
| CC ≥ 170.000                                 | 168       | 327                   | 6,7                   | 130       | 97,3         | 1.415                 |

| <b>OMI II</b>                                |           |                       |                       |           |              |                       |
|--|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------|--------------|-----------------------|
| <b>M<sup>3</sup> Capacidad de carga (CC)</b> | <b>CO</b> | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>SO<sub>4</sub></b> | <b>PM</b> | <b>NMVOC</b> | <b>NO<sub>x</sub></b> |
| CC < 100.000                                 | 44,5      | 41,4                  | 0,8                   | 14,9      | 20,9         | 142                   |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                       | 204       | 173                   | 3,5                   | 56,1      | 92,9         | 614                   |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                       | 207       | 155                   | 3,2                   | 74,7      | 93,4         | 604                   |
| CC ≥ 170.000                                 | 148       | 326                   | 6,7                   | 121       | 85,1         | 1.206                 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 242 Toneladas de contaminantes aéreos por m<sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LPG

| <b>OMI I</b>                                 |                         |                       |                         |           |                         |                       |
|--|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| <b>M<sup>3</sup> Capacidad de carga (CC)</b> | <b>CO</b>               | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>SO<sub>4</sub></b>   | <b>PM</b> | <b>NMVOC</b>            | <b>NO<sub>x</sub></b> |
| CC < 5.000                                   | 0,002                   | 0,016                 | 3,24 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005     | 0,003                   | 0,055                 |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                          | 0,002                   | 0,011                 | 2,26 · 10 <sup>-4</sup> | 0,004     | 0,002                   | 0,045                 |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                         | 0,001                   | 0,006                 | 1,12 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002     | 0,001                   | 0,024                 |
| CC ≥ 50.000                                  | 4,12 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003                 | 5,77 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001     | 4,58 · 10 <sup>-4</sup> | 0,012                 |

| <b>OMI II</b>                                |                         |                       |                         |           |                         |                       |
|--|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------|-------------------------|-----------------------|
| <b>M<sup>3</sup> Capacidad de carga (CC)</b> | <b>CO</b>               | <b>SO<sub>2</sub></b> | <b>SO<sub>4</sub></b>   | <b>PM</b> | <b>NMVOC</b>            | <b>NO<sub>x</sub></b> |
| CC < 5.000                                   | 0,003                   | 0,021                 | 4,38 · 10 <sup>-4</sup> | 0,007     | 0,003                   | 0,07                  |
| 5.000 ≤ CC < 15.000                          | 0,002                   | 0,015                 | 3,02 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005     | 0,002                   | 0,06                  |
| 15.000 ≤ CC < 50.000                         | 0,001                   | 0,007                 | 1,49 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0023    | 0,001                   | 0,03                  |
| CC ≥ 50.000                                  | 7,08 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005                 | 1 · 10 <sup>-4</sup>    | 0,0015    | 7,87 · 10 <sup>-4</sup> | 0,02                  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 243 Toneladas de contaminantes aéreos por m<sup>3</sup> de capacidad de carga para buques LNG

| OMI I                                  |                         |                 |                         |                         |                         |                 |
|--|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | CO                      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| CC < 100.000                           | 0,0022                  | 0,0022          | 4,54 · 10 <sup>-5</sup> | 9,26 · 10 <sup>-4</sup> | 0,001                   | 0,008           |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 0,0019                  | 0,0015          | 3,15 · 10 <sup>-5</sup> | 6,54 · 10 <sup>-4</sup> | 8,61 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006           |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 0,0015                  | 0,001           | 3 · 10 <sup>-5</sup>    | 6,71 · 10 <sup>-4</sup> | 7,16 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005           |
| CC ≥ 170.000                           | 8,87 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0017          | 3,53 · 10 <sup>-5</sup> | 6,87 · 10 <sup>-4</sup> | 5,14 · 10 <sup>-4</sup> | 0,007           |
| OMI II                                 |                         |                 |                         |                         |                         |                 |
| M <sup>3</sup> Capacidad de carga (CC) | CO                      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| CC < 100.000                           | 0,001                   | 0,001           | 2,71 · 10 <sup>-5</sup> | 4,79 · 10 <sup>-4</sup> | 6,69 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005           |
| 100.000 ≤ CC < 150.000                 | 0,002                   | 0,001           | 2,55 · 10 <sup>-5</sup> | 4,04 · 10 <sup>-4</sup> | 6,69 · 10 <sup>-4</sup> | 0,004           |
| 150.000 ≤ CC < 170.000                 | 0,001                   | 0,001           | 1,97 · 10 <sup>-5</sup> | 4,67 · 10 <sup>-4</sup> | 5,85 · 10 <sup>-4</sup> | 0,004           |
| CC ≥ 170.000                           | 7,83 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002           | 3,52 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001                   | 4,50 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.2.5. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de arqueo bruto

Se han realizado diferentes grupos de toneladas de arqueo bruto (GT) según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de contaminantes aéreos. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos que corresponden a buques con GT menores a 3.000 toneladas, entre 3.000 y 5.000 toneladas, entre 5.000 y 15.000 toneladas, y, GT igual o superior a 15.000 toneladas. Para la flota de buques de LNG se han hecho también 4 grupos de GT correspondientes a buques con menos de 60.000 toneladas, entre 60.000 y 100.000 toneladas, entre 100.000 y 120.000 toneladas, y, GT igual o superior a 120.000 toneladas.

La Tabla 244 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada grupo de GT. Los buques LPG dentro del grupo de GT superiores a 15.000 toneladas son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LPG dentro del grupo de GT inferiores a 3.000 toneladas.

En la Tabla 245 se ven los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de GT. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de GT superiores a 15.000 toneladas son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de GT inferiores a 3.000 toneladas son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

Tabla 244 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG por grupo GT

| OMI I                          |        |                 |                 |        |        |                 |
|--------------------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| GT < 3.000                     | 1.996  | 13.707          | 280             | 4.603  | 2.220  | 42.633          |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 2.215  | 15.209          | 310             | 5.200  | 2.463  | 58.502          |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 3.799  | 26.086          | 532             | 8.916  | 4.224  | 10.273          |
| GT ≥ 15.000                    | 14.785 | 101.521         | 2.072           | 34.627 | 16.440 | 441.482         |
| OMI II                         |        |                 |                 |        |        |                 |
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| GT < 3.000                     | 2.687  | 18.650          | 381             | 5.828  | 2.988  | 56.193          |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 2.942  | 20.434          | 417             | 6.404  | 3.271  | 76.288          |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 5.008  | 34.798          | 710             | 10.925 | 5.568  | 139.900         |
| GT ≥ 15.000                    | 23.463 | 163.103         | 3.329           | 51.265 | 26.089 | 699.303         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 245 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG por grupo GT

| OMI I                          |      |                 |                 |      |       |                 |
|--------------------------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| GT < 3.000                     | 4,9  | 33,4            | 0,7             | 11,2 | 5,4   | 104             |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 8    | 54,9            | 1,1             | 18,8 | 8,9   | 211             |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 13,9 | 95,6            | 2               | 32,7 | 15,5  | 393             |
| GT ≥ 15.000                    | 28,4 | 195             | 4               | 66,5 | 31,6  | 847             |
| OMI II                         |      |                 |                 |      |       |                 |
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| GT < 3.000                     | 6,5  | 45,4            | 0,9             | 14,2 | 7,3   | 137             |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 10,6 | 73,8            | 1,5             | 23,1 | 11,8  | 275             |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 18,3 | 128             | 2,6             | 40   | 20,4  | 513             |
| GT ≥ 15.000                    | 45   | 313             | 6,4             | 98,4 | 50,1  | 1.342           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 246 muestra los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de GT. Analizando los buques LNG holísticamente, son los buques dentro del grupo de GT entre 100.000 y 120.000 toneladas los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LNG dentro del grupo de GT inferiores a 60.000 toneladas.

En la Tabla 247 se ven los valores de las emisiones para cada buque LNG registrado en cada grupo de GT. Para cada uno de los contaminantes, los buques LNG dentro del grupo de GT superior a 120.000 toneladas son los que mayores emisiones por buque produce, excepto para las emisiones de CO, el cual tiene su valor en el grupo de GT entre 60.000 y 100.000 toneladas. En cambio, los buques LNG dentro del grupo de GT inferiores a 60.000 toneladas son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos

Tabla 246 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG por grupo GT

| OMI I                          |        |                 |                 |        |        |                 |
|--------------------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| GT < 60.000                    | 1.478  | 1.546           | 32              | 643    | 714    | 5.358           |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 31.609 | 26.658          | 544             | 11.456 | 14.573 | 109.662         |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 58.817 | 54.639          | 1.115           | 24.579 | 27.615 | 204.641         |
| GT ≥ 120.000                   | 23.088 | 44.455          | 907             | 17.236 | 13.335 | 191.671         |
| OMI II                         |        |                 |                 |        |        |                 |
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| GT < 60.000                    | 984    | 925             | 19              | 339    | 462    | 3.165           |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 25.105 | 20.605          | 421             | 7.213  | 11.402 | 74.367          |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 49.629 | 39.071          | 797             | 16.912 | 22.552 | 150.549         |
| GT ≥ 120.000                   | 19.312 | 44.642          | 911             | 15.802 | 11.213 | 160.806         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 247 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG por grupo GT

| OMI I                          |      |                 |                 |      |       |                 |
|--------------------------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| GT < 60.000                    | 61,6 | 64,4            | 1,3             | 26,8 | 29,7  | 223             |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 266  | 224             | 4,6             | 96,3 | 123   | 922             |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 222  | 207             | 4,2             | 93,1 | 105   | 775             |
| GT ≥ 120.000                   | 201  | 387             | 7,9             | 150  | 116   | 1.667           |
| OMI II                         |      |                 |                 |      |       |                 |
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| GT < 60.000                    | 41   | 38,6            | 0,8             | 14,1 | 19,3  | 132             |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 211  | 173             | 3,5             | 60,6 | 95,8  | 625             |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 188  | 148             | 3               | 64,1 | 85,4  | 570             |
| GT ≥ 120.000                   | 168  | 388             | 7,9             | 137  | 97,5  | 1.398           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Analizando la tasa de emisión de cada contaminante por cada tonelada de arqueo bruto construido, se vuelve a cumplir de manera general que, los buques LPG (Tabla 248), los buques con más GT son los más eficientes desde el punto de vista de toneladas de emisiones por tonelada de arqueo bruto construido; siendo los buques menos eficientes los de menor tamaño, es decir, los que menor GT tienen.

Para los buques LNG (Tabla 249) los buques con GT entre 100.000 y 120.000 GT son los más eficientes desde el punto de vista de toneladas de emisiones por tonelada de arqueo bruto construido; siendo los buques menos eficientes los de menor tamaño, es decir, los que menor GT tienen, excepto para las emisiones de NO<sub>x</sub>, donde los buques menos eficientes están en el grupo GT superior a 120.000 toneladas.

Tabla 248 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG por grupo GT

| OMI I                          |                         |                 |                         |       |                         |                 |
|--------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-------|-------------------------|-----------------|
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO                      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM    | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| GT < 3.000                     | 0,004                   | 0,024           | 4,94 · 10 <sup>-4</sup> | 0,008 | 0,004                   | 0,075           |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 0,002                   | 0,014           | 2,90 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005 | 0,002                   | 0,055           |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 0,002                   | 0,012           | 2,42 · 10 <sup>-4</sup> | 0,004 | 0,002                   | 0,049           |
| GT ≥ 15.000                    | 7,84 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005           | 1,10 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002 | 8,72 · 10 <sup>-4</sup> | 0,023           |
| OMI II                         |                         |                 |                         |       |                         |                 |
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO                      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM    | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| GT < 3.000                     | 0,005                   | 0,033           | 0,001                   | 0,01  | 0,005                   | 0,099           |
| 3.000 ≤ GT < 5.000             | 0,003                   | 0,019           | 3,89 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006 | 0,003                   | 0,071           |
| 5.000 ≤ GT < 15.000            | 0,002                   | 0,016           | 3,23 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005 | 0,003                   | 0,064           |
| GT ≥ 15.000                    | 0,001                   | 0,009           | 1,77 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003 | 0,001                   | 0,037           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 249 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG por grupo GT

| OMI I                          |       |                 |                         |                         |                         |                 |
|--------------------------------|-------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| GT < 60.000                    | 0,003 | 0,003           | 6,24 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001                   | 0,001                   | 0,011           |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 0,003 | 0,002           | 4,81 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001                   | 0,001                   | 0,010           |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 0,002 | 0,002           | 3,84 · 10 <sup>-5</sup> | 8,46 · 10 <sup>-4</sup> | 9,51 · 10 <sup>-4</sup> | 0,007           |
| GT ≥ 120.000                   | 0,001 | 0,003           | 5,79 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001                   | 8,51 · 10 <sup>-4</sup> | 0,012           |
| OMI II                         |       |                 |                         |                         |                         |                 |
| Toneladas de Arqueo bruto (GT) | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| GT < 60.000                    | 0,002 | 0,002           | 3,74 · 10 <sup>-5</sup> | 6,72 · 10 <sup>-4</sup> | 9,15 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006           |
| 60.000 ≤ GT < 100.000          | 0,002 | 0,002           | 3,72 · 10 <sup>-5</sup> | 6,38 · 10 <sup>-4</sup> | 0,001                   | 0,007           |
| 100.000 ≤ GT < 120.000         | 0,002 | 0,001           | 2,74 · 10 <sup>-5</sup> | 5,82 · 10 <sup>-4</sup> | 7,76 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005           |
| GT ≥ 120.000                   | 0,001 | 0,003           | 5,81 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001                   | 7,15 · 10 <sup>-4</sup> | 0,010           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.2.6. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de potencia instalada

Se han realizado diferentes grupos de kilovatios de potencia instalada para propulsión de los buques, según el tipo de buque gasero (LPG o LNG), para analizar la flota mundial de gaseros y las emisiones de GEI. Para la flota de buques de LPG se han hecho 4 grupos que corresponden a buques con potencias propulsoras menores a 2.000 kW, entre 2.000 y 5.000 kW, entre 5.000 y 10.000 kW, y, potencia propulsora igual o superior a 10.000 kW. Para la flota de buques de LNG se han hecho también 4 grupos de potencia propulsora correspondientes a buques con menos de 20.000 kW, entre 20.000 y 30.000 kW, entre 30.000 y 40.000 kW, y, potencia propulsora igual o superior a 40.000 kW.

En la Tabla 250 se muestran los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada grupo de potencia propulsora. Los buques LPG dentro del grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LPG dentro del grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW.

Tabla 250 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de potencia propulsora

| OMI I                                |        |                 |                 |        |        |                 |
|--------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| P < 2.000                            | 1,448  | 9,944           | 203             | 3,330  | 1,610  | 29,943          |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 4,357  | 29,916          | 611             | 10,206 | 4,844  | 115,319         |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 6,688  | 45,923          | 937             | 15,676 | 7,437  | 195,458         |
| P ≥ 10.000                           | 10,302 | 70,741          | 1,444           | 24,134 | 11,455 | 309,171         |
| OMI II                               |        |                 |                 |        |        |                 |
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| P < 2.000                            | 1,960  | 13,601          | 278             | 4,247  | 2,179  | 39,599          |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 5,775  | 40,118          | 819             | 12,577 | 6,422  | 150,314         |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 8,797  | 61,139          | 1,248           | 19,209 | 9,782  | 254,305         |
| P ≥ 10.000                           | 17,567 | 122,126         | 2,492           | 38,389 | 19,534 | 527,466         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 251 muestra los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de potencia propulsora. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de potencia propulsora superior a 10.000 kW son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de potencia propulsora inferior a 2.000 kW son los que menos emisiones por buque producen para cada contaminante aéreo.

En la Tabla 252 se muestran los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de potencia propulsora. Para las emisiones de CO y NMVOC, los buques LNG dentro del grupo de potencia propulsora entre 20.000 y 30.000 kW son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas; para el resto de las emisiones, los buques LNG que más cantidad de emisiones producen están en el grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW. Por el contrario, los que menos emisiones aportan son los buques LNG dentro del grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW.

Tabla 251 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de potencia propulsora

| OMI I                                |      |                 |                 |     |       |                 |
|--------------------------------------|------|-----------------|-----------------|-----|-------|-----------------|
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| P < 2.000                            | 4.3  | 29              | 0,6             | 9,9 | 4.8   | 89              |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 8.8  | 61              | 1,2             | 21  | 9.8   | 234             |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 19.8 | 136             | 2,8             | 47  | 22    | 580             |
| P ≥ 10.000                           | 32.8 | 225             | 4,6             | 77  | 37    | 985             |
| OMI II                               |      |                 |                 |     |       |                 |
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| P < 2.000                            | 5,8  | 40              | 0,8             | 13  | 6,4   | 117             |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 12   | 81              | 1,7             | 26  | 13    | 305             |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 26   | 181             | 3,7             | 57  | 29    | 755             |
| P ≥ 10.000                           | 56   | 389             | 7,9             | 122 | 62    | 1.680           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "t" =toneladas

Tabla 252 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de potencia propulsora

| OMI I                                |        |                 |                 |        |        |                 |
|--------------------------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| P < 20.000                           | 3,842  | 3,506           | 72              | 1,468  | 1,800  | 12,715          |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 60,933 | 50,723          | 1,035           | 21,802 | 28,036 | 205,083         |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 39,878 | 62,149          | 1,268           | 25,670 | 21,412 | 254,755         |
| P ≥ 40.000                           | 10,339 | 10,920          | 223             | 4,973  | 4,990  | 38,779          |
| OMI II                               |        |                 |                 |        |        |                 |
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| P < 20.000                           | 2,765  | 2,477           | 51              | 829    | 1,278  | 8,583           |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 48,479 | 41,079          | 838             | 13,798 | 22,165 | 149,329         |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 34,866 | 54,330          | 1,109           | 22,027 | 18,105 | 203,219         |
| P ≥ 40.000                           | 8,920  | 7,358           | 150             | 3,612  | 4,082  | 27,755          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 253 muestra los valores de las emisiones para cada buque LNG registrado en cada grupo de potencia propulsora. Para cada uno de los contaminantes, los buques LNG dentro del grupo de potencia propulsora superior a 40.000 kW son los que mayores emisiones de CO y NMVOC por buque producen; para el resto de las emisiones, los buques LNG dentro del grupo de potencia propulsora entre 30.000 y 40.000 kW son los que más emisiones producen. Por otro lado, los buques LNG dentro del grupo de potencia propulsora inferior a 20.000 kW son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos

Tabla 253 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de propulsora

| OMI I                                |     |                 |                 |     |       |                 |
|--------------------------------------|-----|-----------------|-----------------|-----|-------|-----------------|
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| P < 20.000                           | 104 | 95              | 1,9             | 40  | 49    | 344             |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 243 | 202             | 4,1             | 87  | 112   | 817             |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 200 | 312             | 6,4             | 129 | 108   | 1.280           |
| P ≥ 40.000                           | 295 | 312             | 6,4             | 142 | 143   | 1.108           |
| OMI II                               |     |                 |                 |     |       |                 |
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| P < 20.000                           | 75  | 67              | 1,4             | 22  | 35    | 232             |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 193 | 164             | 3,3             | 55  | 88    | 595             |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 175 | 273             | 5,6             | 111 | 91    | 1.021           |
| P ≥ 40.000                           | 255 | 210             | 4,3             | 103 | 117   | 793             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Analizando la tasa de emisión de cada contaminante por cada kilovatio de potencia propulsora instalado, de manera general, los buques LPG (Tabla 254), los buques con más potencia propulsora son los más eficientes desde el punto de vista de toneladas de emisiones por kW potencia propulsora instalado; siendo los buques menos eficientes los que menor potencia propulsora tienen. Esto es debido al hecho de que la potencia propulsora va en función del tamaño del buque y del perfil operacional para el que este es diseñado.

Para los buques LNG (Tabla 255) los buques con potencia propulsor superior a 40.000 kW son los más eficientes; siendo los buques menos eficientes los que menos potencia propulsora tienen instalada.

Tabla 254 Toneladas de contaminantes aéreos por kilovatio de potencia instalada para buques LPG

| OMI I                                |        |                 |                      |        |        |                 |
|--------------------------------------|--------|-----------------|----------------------|--------|--------|-----------------|
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| P < 2.000                            | 0,0033 | 0,023           | $4,64 \cdot 10^{-4}$ | 0,0076 | 0,0037 | 0,068           |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 0,0028 | 0,019           | $3,95 \cdot 10^{-4}$ | 0,0066 | 0,0031 | 0,075           |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 0,0026 | 0,018           | $3,68 \cdot 10^{-4}$ | 0,0062 | 0,0029 | 0,077           |
| P ≥ 10.000                           | 0,0025 | 0,017           | $3,57 \cdot 10^{-4}$ | 0,0060 | 0,0028 | 0,076           |
| OMI II                               |        |                 |                      |        |        |                 |
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| P < 2.000                            | 0,004  | 0,031           | $6,34 \cdot 10^{-4}$ | 0,010  | 0,005  | 0,091           |
| 2.000 ≤ P < 5.000                    | 0,004  | 0,026           | $5,29 \cdot 10^{-4}$ | 0,008  | 0,004  | 0,097           |
| 5.000 ≤ P < 10.000                   | 0,003  | 0,024           | $4,9 \cdot 10^{-4}$  | 0,008  | 0,004  | 0,1             |
| P ≥ 10.000                           | 0,004  | 0,030           | $6,16 \cdot 10^{-4}$ | 0,009  | 0,005  | 0,130           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 255 Toneladas de contaminantes aéreos por kilovatio de potencia instalada para buques LNG

| OMI I                                |                        |                 |                         |                         |                         |                 |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO                     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| P < 20.000                           | 0,008                  | 0,007           | 1,42 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003                   | 0,004                   | 0,025           |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 0,005                  | 0,004           | 9,16 · 10 <sup>-5</sup> | 0,002                   | 0,002                   | 0,018           |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 0,001                  | 0,002           | 4,37 · 10 <sup>-5</sup> | 8,84 · 10 <sup>-4</sup> | 7,37 · 10 <sup>-4</sup> | 0,009           |
| P ≥ 40.000                           | 6,6 · 10 <sup>-4</sup> | 0,001           | 1,42 · 10 <sup>-5</sup> | 3,17 · 10 <sup>-4</sup> | 3,18 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002           |
| OMI II                               |                        |                 |                         |                         |                         |                 |
| Kilovatios de Potencia instalada (P) | CO                     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| P < 20.000                           | 0,007                  | 0,006           | 1,23 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002                   | 0,003                   | 0,021           |
| 20.000 ≤ P < 30.000                  | 0,007                  | 0,006           | 1,27 · 10 <sup>-4</sup> | 0,002                   | 0,003                   | 0,023           |
| 30.000 ≤ P < 40.000                  | 0,005                  | 0,007           | 1,51 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003                   | 0,002                   | 0,028           |
| P ≥ 40.000                           | 0,005                  | 0,004           | 8,43 · 10 <sup>-5</sup> | 0,002                   | 0,002                   | 0,016           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

### 10.2.7. Emisiones de contaminantes aéreos por grupo de edades

Se han realizado 5 grupos de edades con el fin de estructurar la flota de buques LPG y LNG. Los grupos corresponden a buques entre 0 y 5 años, entre 6 y 10, entre 11 y 15, entre 16 y 20 y mayores de 20 años.

En la Tabla 256 se muestran los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada grupo de edad. Los buques LPG dentro del grupo de edad inferior a 5 años son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Mientras que los que menos emisiones aportan son los que están en el grupo entre 5 y 10 años. La Tabla 257 muestra los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de edad. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG dentro del grupo de edad inferior a 5 años son los que mayores emisiones por buque producen. En cambio, los buques LPG dentro del grupo de edad superior a 20 años son los que menos emisiones por buque producen para cada uno de los contaminantes aéreos.

En la Tabla 258 se muestran los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada grupo de edad. Los buques LNG dentro del grupo de edad inferior a 5 años son los que más cantidad de emisiones CO; los buques LNG dentro del grupo entre 10 y 15 años son los mayores emisores de SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub> y NO<sub>x</sub>; para las emisiones de NMVOC, los máximos valores se encuentran en los grupos entre 10 y 15 años y de menos de 5 años. Los buques LNG que menos emisiones aportan son los que están en el grupo entre 5 y 10 años.

Tabla 256 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según grupo de edad

| OMI I             |       |                 |                 |        |       |                 |
|-------------------|-------|-----------------|-----------------|--------|-------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 7.213 | 49.529          | 1.011           | 16.765 | 8.021 | 195.326         |
| 5 < A ≤ 10        | 2.142 | 14.709          | 300             | 4.971  | 2.382 | 59.540          |
| 10 < A ≤ 15       | 5.635 | 38.690          | 790             | 13.216 | 6.265 | 168.966         |
| 15 < A ≤ 20       | 2.706 | 18.582          | 379             | 6.407  | 3.009 | 82.031          |
| A > 20            | 5.099 | 35.013          | 715             | 11.987 | 5.670 | 144.034         |

| OMI II            |        |                 |                 |        |        |                 |
|-------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 11.578 | 80.483          | 1.643           | 25.298 | 12.874 | 314.736         |
| 5 < A ≤ 10        | 3.178  | 22.087          | 451             | 6.938  | 3.533  | 88.699          |
| 10 < A ≤ 15       | 8.389  | 58.314          | 1.190           | 18.321 | 9.328  | 251.599         |
| 15 < A ≤ 20       | 3.886  | 27.011          | 551             | 8.485  | 4.321  | 117.761         |
| A > 20            | 7.069  | 49.090          | 1.002           | 15.380 | 7.860  | 198.889         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 257 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de edad

| OMI I             |      |                 |                 |      |       |                 |
|-------------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 21.5 | 148             | 3.0             | 50.0 | 23.9  | 583             |
| 5 < A ≤ 10        | 14.6 | 100             | 2.0             | 33.8 | 16.2  | 405             |
| 10 < A ≤ 15       | 17.2 | 118             | 2.4             | 40.4 | 19.2  | 517             |
| 15 < A ≤ 20       | 17.0 | 117             | 2.4             | 40.3 | 18.9  | 516             |
| A > 20            | 9.9  | 68.1            | 1.4             | 23.3 | 11.0  | 280             |

| OMI II            |      |                 |                 |      |       |                 |
|-------------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 34,6 | 240             | 4,9             | 75,5 | 38,4  | 940             |
| 5 < A ≤ 10        | 21,6 | 150             | 3,1             | 47,2 | 24    | 603             |
| 10 < A ≤ 15       | 25,7 | 178             | 3,6             | 56   | 28,5  | 769             |
| 15 < A ≤ 20       | 24,4 | 170             | 3,5             | 53,4 | 27,2  | 741             |
| A > 20            | 13,8 | 95,5            | 1,9             | 29,9 | 15,3  | 387             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 259 muestra los valores de las emisiones para cada buque LNG en cada grupo de edad. En general, los buques LNG dentro del grupo de menos de 5 años son los que menos emisiones por buque producen. En cambio, y de manera global, los buques LNG dentro del grupo entre 10 y 15 años son los que más emisiones por buque producen.

Como ocurre en el capítulo 10.1.7 para los GEI, el análisis de las tasas de emisión de los contaminantes aéreos por edad de los buques puede tener un sesgo debido al hecho de que los tamaños y las potencias de los buques a lo largo de los años varían en línea con la necesidad del mercado durante cada periodo. Por lo tanto, con el fin de analizar si esos resultados tienen

un sesgo a la hora de interpretarlos, se analizan las tasas de emisión para los grupos de edades en función de las toneladas de peso muerto (como indicador del tamaño de los buques) para cada grupo de edad y tipo de buque gasero.

Tabla 258 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según grupo de edad

| OMI I             |        |                 |                 |        |        |                 |
|-------------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 36,336 | 34,989          | 714             | 16,048 | 17,185 | 128,822         |
| 5 < A ≤ 10        | 10,786 | 10,120          | 207             | 4,665  | 5,067  | 36,599          |
| 10 < A ≤ 15       | 31,176 | 51,817          | 1,057           | 20,357 | 17,118 | 229,002         |
| 15 < A ≤ 20       | 22,402 | 18,621          | 380             | 7,874  | 10,306 | 77,698          |
| A > 20            | 14,292 | 11,750          | 240             | 4,970  | 6,562  | 39,209          |
| OMI II            |        |                 |                 |        |        |                 |
| Grupo de Edad (A) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 31,152 | 24,496          | 500             | 11,229 | 14,203 | 95,097          |
| 5 < A ≤ 10        | 9,314  | 6,197           | 126             | 3,206  | 4,135  | 24,710          |
| 10 < A ≤ 15       | 25,943 | 50,145          | 1,023           | 17,925 | 14,230 | 182,714         |
| 15 < A ≤ 20       | 17,584 | 14,990          | 306             | 4,874  | 8,026  | 53,086          |
| A > 20            | 11,037 | 9,415           | 192             | 3,033  | 5,036  | 33,279          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 259 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de edad

| OMI I             |     |                 |                 |     |       |                 |
|-------------------|-----|-----------------|-----------------|-----|-------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 212 | 205             | 4.2             | 94  | 100   | 753             |
| 5 < A ≤ 10        | 225 | 211             | 4.3             | 97  | 106   | 762             |
| 10 < A ≤ 15       | 204 | 339             | 6.9             | 133 | 112   | 1.497           |
| 15 < A ≤ 20       | 252 | 209             | 4.3             | 89  | 116   | 873             |
| A > 20            | 234 | 193             | 3.9             | 82  | 108   | 643             |
| OMI II            |     |                 |                 |     |       |                 |
| Grupo de Edad (A) | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 182 | 143             | 2,9             | 656 | 83    | 556             |
| 5 < A ≤ 10        | 194 | 129             | 2,6             | 67  | 86    | 515             |
| 10 < A ≤ 15       | 170 | 328             | 6,7             | 117 | 93    | 1.194           |
| 15 < A ≤ 20       | 198 | 168             | 3,4             | 55  | 90    | 596             |
| A > 20            | 181 | 154             | 3,1             | 50  | 83    | 546             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 260 Toneladas de contaminantes aéreos por TPM y grupo de edad para buques LPG

| OMI I             |                         |                 |                         |        |                         |                 |
|-------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|--------|-------------------------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO                      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM     | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 7,04 · 10 <sup>-4</sup> | 0,005           | 9,87 · 10 <sup>-5</sup> | 0,0016 | 7,83 · 10 <sup>-4</sup> | 0,019           |
| 5 < A ≤ 10        | 9,40 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006           | 1,32 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0022 | 0,001                   | 0,026           |
| 10 < A ≤ 15       | 9,22 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006           | 1,29 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0022 | 0,001                   | 0,028           |
| 15 < A ≤ 20       | 9,01 · 10 <sup>-4</sup> | 0,006           | 1,26 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0021 | 0,001                   | 0,027           |
| A > 20            | 0,001                   | 0,008           | 1,7 · 10 <sup>-4</sup>  | 0,0029 | 0,0013                  | 0,034           |
| OMI II            |                         |                 |                         |        |                         |                 |
| Grupo de Edad (A) | CO                      | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM     | NMVOC                   | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 0,0011                  | 0,008           | 1,6 · 10 <sup>-4</sup>  | 0,002  | 0,0013                  | 0,031           |
| 5 < A ≤ 10        | 0,0014                  | 0,010           | 1,98 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003  | 0,0016                  | 0,039           |
| 10 < A ≤ 15       | 0,0014                  | 0,010           | 1,95 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003  | 0,0015                  | 0,041           |
| 15 < A ≤ 20       | 0,0013                  | 0,009           | 1,84 · 10 <sup>-4</sup> | 0,003  | 0,0014                  | 0,039           |
| A > 20            | 0,0017                  | 0,012           | 2,38 · 10 <sup>-4</sup> | 0,004  | 0,0019                  | 0,047           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 261 Toneladas de contaminantes aéreos por toneladas de peso muerto y grupo de edad para buques LNG

| OMI I             |        |                 |                         |                         |        |                 |
|-------------------|--------|-----------------|-------------------------|-------------------------|--------|-----------------|
| Grupo de Edad (A) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 0,0024 | 0,002           | 4,65 · 10 <sup>-5</sup> | 0,001                   | 0,0011 | 0,008           |
| 5 < A ≤ 10        | 0,0027 | 0,003           | 5,23 · 10 <sup>-5</sup> | 0,0012                  | 0,0013 | 0,009           |
| 10 < A ≤ 15       | 0,0022 | 0,004           | 7,49 · 10 <sup>-5</sup> | 0,0014                  | 0,0012 | 0,016           |
| 15 < A ≤ 20       | 0,0033 | 0,003           | 5,66 · 10 <sup>-5</sup> | 0,0012                  | 0,0015 | 0,012           |
| A > 20            | 0,0036 | 0,003           | 5,96 · 10 <sup>-5</sup> | 0,0012                  | 0,0016 | 0,010           |
| OMI II            |        |                 |                         |                         |        |                 |
| Grupo de Edad (A) | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>         | PM                      | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| A ≤ 5             | 0,0020 | 0,0016          | 3,26 · 10 <sup>-5</sup> | 7,31 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0009 | 0,0062          |
| 5 < A ≤ 10        | 0,0024 | 0,0016          | 3,20 · 10 <sup>-5</sup> | 8,12 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0010 | 0,0063          |
| 10 < A ≤ 15       | 0,0018 | 0,0036          | 7,25 · 10 <sup>-5</sup> | 0,0013                  | 0,0010 | 0,013           |
| 15 < A ≤ 20       | 0,0026 | 0,0022          | 4,55 · 10 <sup>-5</sup> | 7,25 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0012 | 0,008           |
| A > 20            | 0,0027 | 0,0023          | 4,78 · 10 <sup>-5</sup> | 7,54 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0013 | 0,008           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Las tablas 260 y 261 muestran los valores para cada tonelada de peso muerto construido por grupo de edad para los buques LPG y LNG. Los resultados que muestran estas tablas indican de manera general, que las toneladas más “jóvenes”, es decir buques más nuevos, son los más eficientes, es decir, los que menos contaminantes aéreos emiten.

### 10.2.8. Emisiones de contaminantes aéreos por tipos de motor principal

Como se hizo para las emisiones de gases de efecto invernadero, para los buques LPG se consideran dos sistemas de propulsión, los motores diésel de dos tiempos (D2) y motores diésel de cuatro tiempos (D4), mientras que en los buques LNG, además de estos dos tipos de sistemas de propulsión, se consideran otros 5 sistemas diferentes. Las plantas de vapor convencionales (T), las plantas de vapor de muy altas presiones y temperaturas conocidas como *Ultra Steam Plants* (TU), sistemas de propulsión diésel – eléctricos (G4), motores diésel de dos tiempos con inyección de gas a alta presión (G2A) y motores diésel de dos tiempos con inyección de gas a baja presión (G2B).

En la Tabla 262 se muestran los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LPG, para cada tipo de motor. Los buques LPG con tipo de motor D2 son los que más cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas.

Tabla 262 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LPG según tipo de motor principal

| OMI I         |        |                 |                 |        |        |                 |
|---------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Tipo de motor | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 19.010 | 130.532         | 2.664           | 44.569 | 21.138 | 569.854         |
| D4            | 3.785  | 25.992          | 530             | 8.777  | 4.209  | 80.037          |
| OMI II        |        |                 |                 |        |        |                 |
| Tipo de motor | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 29.044 | 201.883         | 4.120           | 63.437 | 32.294 | 865.864         |
| D4            | 5.056  | 35.101          | 716             | 10.985 | 5.622  | 105.820         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Tabla 263 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LPG según grupo de edad

| OMI I         |      |                 |                 |      |       |                 |
|---------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Tipo de motor | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 21   | 144             | 2,9             | 49,2 | 23,3  | 629             |
| D4            | 6,6  | 45,1            | 0,9             | 15,2 | 7,3   | 139             |
| OMI II        |      |                 |                 |      |       |                 |
| Tipo de motor | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 32,1 | 223             | 4,5             | 70   | 35,6  | 956             |
| D4            | 8,8  | 60,9            | 1,2             | 19,1 | 9,8   | 184             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

La Tabla 263 muestra los valores de las emisiones para cada buque LPG registrado en cada grupo de edad. Para cada uno de los contaminantes, los buques LPG con tipo de motor D2 son los que mayores emisiones por buque producen.

En la Tabla 264 se muestran los valores cada uno de los contaminantes aéreos para los buques LNG, para cada tipo de motor. Los buques LNG con tipo de motor T son los que más

cantidad de emisiones aportan para cada una de las emisiones aéreas. Los buques LNG con tipo de motor D4 son los que menos emisiones causan.

La Tabla 264 muestra los valores de las emisiones para cada buque LNG registrado en cada grupo de edad. Los buques LNG con motores D2 son los que más emisiones causan en un análisis global, excepto para las emisiones de CO, donde son los buques con tipo de motor T y G4 los que más emisiones causan por buque.

Los buques LNG con tipo de motor D4 son los que menos emisiones por buque producen.

Tabla 264 Emisiones de contaminantes aéreos de la flota de buques LNG según tipo de motor principal

| OMI I         |        |                 |                 |        |        |                 |
|---------------|--------|-----------------|-----------------|--------|--------|-----------------|
| Tipo de motor | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 4,708  | 30,424          | 621             | 10,730 | 5,027  | 141,106         |
| D4            | 32     | 222             | 5               | 77     | 36     | 690             |
| G2A           | 8,223  | 7,286           | 149             | 3,511  | 3,826  | 31,417          |
| G2B           | 1,834  | 1,681           | 34              | 798    | 858    | 7,019           |
| G4            | 40,250 | 38,299          | 782             | 17,917 | 18,959 | 133,985         |
| T             | 58,254 | 47,994          | 979             | 20,292 | 26,755 | 192,065         |
| TU            | 1,691  | 1,392           | 28              | 589    | 776    | 5,050           |
| OMI II        |        |                 |                 |        |        |                 |
| Tipo de motor | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 4,270  | 36,976          | 755             | 12,356 | 4,747  | 130,447         |
| D4            | 30     | 205             | 4               | 69     | 33     | 588             |
| G2A           | 7,270  | 4,977           | 102             | 2,239  | 3,298  | 23,446          |
| G2B           | 1,777  | 967             | 20              | 457    | 780    | 4,743           |
| G4            | 35,116 | 22,394          | 457             | 12,350 | 15,522 | 89,247          |
| T             | 45,442 | 38,763          | 791             | 12,487 | 20,735 | 137,020         |
| TU            | 1,126  | 961             | 20              | 310    | 514    | 3,395           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Los resultados por buque en las tablas 264 y 265 pueden tener un sesgo al estar influenciado por la potencia instalada por buque ya que también depende del tamaño del buque y de su velocidad de diseño. A continuación, se analiza la tasa de emisión de cada tipo de motor por cada kilovatio instalado, con el fin de saber cuál es el tipo de motor con mayor y menor eficiencia.

Tabla 265 Emisiones de contaminantes aéreos por buque LNG según grupo de edad

| OMI I         |     |                 |                 |     |       |                 |
|---------------|-----|-----------------|-----------------|-----|-------|-----------------|
| Tipo de motor | CO  | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM  | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 94  | 608             | 12.4            | 215 | 101   | 2.822           |
| D4            | 6.5 | 44.4            | 0.9             | 15  | 7,2   | 138             |
| G2A           | 164 | 146             | 3.0             | 70  | 77    | 628             |
| G2B           | 141 | 129             | 2.6             | 61  | 66    | 540             |
| G4            | 238 | 227             | 4.6             | 106 | 112   | 793             |
| T             | 256 | 210             | 4.3             | 89  | 117   | 842             |
| TU            | 242 | 199             | 4.1             | 84  | 111   | 721             |

| OMI II        |      |                 |                 |      |       |                 |
|---------------|------|-----------------|-----------------|------|-------|-----------------|
| Tipo de motor | CO   | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub> | PM   | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 85.4 | 740             | 15.1            | 247  | 94.9  | 2.609           |
| D4            | 5.9  | 41.0            | 0.8             | 13.8 | 6.6   | 118             |
| G2A           | 145  | 99.5            | 2.0             | 44.8 | 66.0  | 469             |
| G2B           | 137  | 74.4            | 1.5             | 35.1 | 60.0  | 365             |
| G4            | 208  | 133             | 2.7             | 73.1 | 91.8  | 528             |
| T             | 199  | 170             | 3.5             | 54.8 | 90.9  | 601             |
| TU            | 161  | 137             | 2.8             | 44.2 | 73.4  | 485             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Para los buques LPG (Tabla 266), los motores D2 son los más eficiente en cuanto a cada tonelada de GEI por kW instalado para la propulsión, excepto para las emisiones de NO<sub>x</sub>.

Tabla 266 Toneladas de contaminante aéreo por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LPG

| OMI I         |        |                 |                      |       |        |                 |
|---------------|--------|-----------------|----------------------|-------|--------|-----------------|
| Tipo de motor | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM    | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 0,0026 | 0,018           | $3,63 \cdot 10^{-4}$ | 0,006 | 0,0029 | 0,078           |
| D4            | 0,0030 | 0,021           | $4,26 \cdot 10^{-4}$ | 0,007 | 0,0034 | 0,064           |

| OMI II        |       |                 |                      |       |       |                 |
|---------------|-------|-----------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| Tipo de motor | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM    | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 0,004 | 0,0275          | $5,62 \cdot 10^{-4}$ | 0,009 | 0,004 | 0,118           |
| D4            | 0,004 | 0,0282          | $5,76 \cdot 10^{-4}$ | 0,009 | 0,005 | 0,085           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas

Para los buques LNG (Tabla 267), Los motores D2 son los más eficientes para las emisiones de CO. Los motores G2A son los más eficientes en cuanto a las emisiones de SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub> y PM (en OMI II son más eficientes los G2B) y NMVOC, mientras que para las emisiones de NO<sub>x</sub>, los buques LNG con motores G4 son los más eficientes.

Tabla 267 Toneladas de contaminante aéreo por kilovatio instalado para la propulsión y tipo de motor para buques LNG

| OMI I         |        |                 |                      |        |        |                 |
|---------------|--------|-----------------|----------------------|--------|--------|-----------------|
| Tipo de motor | CO     | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM     | NMVOC  | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 0,0026 | 0,017           | $3,47 \cdot 10^{-4}$ | 0,006  | 0,0028 | 0,079           |
| D4            | 0,0029 | 0,0201          | $4,11 \cdot 10^{-4}$ | 0,007  | 0,0033 | 0,063           |
| G2A           | 0,0057 | 0,0051          | $1,03 \cdot 10^{-4}$ | 0,0024 | 0,0027 | 0,022           |
| G2B           | 0,0060 | 0,0055          | $1,12 \cdot 10^{-4}$ | 0,0026 | 0,0028 | 0,023           |
| G4            | 0,0061 | 0,0058          | $1,19 \cdot 10^{-4}$ | 0,0027 | 0,0029 | 0,020           |
| T             | 0,01   | 0,0082          | $1,68 \cdot 10^{-4}$ | 0,0035 | 0,0046 | 0,033           |
| TU            | 0,01   | 0,0082          | $1,68 \cdot 10^{-4}$ | 0,0035 | 0,0046 | 0,030           |

| OMI II        |       |                 |                      |       |       |                 |
|---------------|-------|-----------------|----------------------|-------|-------|-----------------|
| Tipo de motor | CO    | SO <sub>2</sub> | SO <sub>4</sub>      | PM    | NMVOC | NO <sub>x</sub> |
| D2            | 0,002 | 0,021           | $4,22 \cdot 10^{-4}$ | 0,007 | 0,003 | 0,073           |
| D4            | 0,003 | 0,019           | $3,79 \cdot 10^{-4}$ | 0,006 | 0,003 | 0,053           |
| G2A           | 0,005 | 0,003           | $7,07 \cdot 10^{-5}$ | 0,002 | 0,002 | 0,016           |
| G2B           | 0,006 | 0,003           | $6,44 \cdot 10^{-5}$ | 0,001 | 0,003 | 0,015           |
| G4            | 0,005 | 0,003           | $6,94 \cdot 10^{-5}$ | 0,002 | 0,002 | 0,014           |
| T             | 0,008 | 0,007           | $1,35 \cdot 10^{-4}$ | 0,002 | 0,004 | 0,023           |
| TU            | 0,007 | 0,006           | $1,16 \cdot 10^{-4}$ | 0,002 | 0,003 | 0,020           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "t" =toneladas

# 11. EFICIENCIA ENERGÉTICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA FLOTA DE GASEROS

Con la finalidad de analizar el nivel de eficiencia medioambiental y energética de la flota de gaseros, se ha aplicado la metodología detallada en el capítulo 7.

Cuatro enfoques se analizan en la flota de gaseros con el fin de tener un conocimiento de la sostenibilidad medioambiental del sector marítimo del transporte de gaseros:

- Huella de carbono de la flota de gaseros
- Huella ecológica de la flota de gaseros
- Parámetros definidos en informes de *Environmental, Social and Governance* (ESG) para el estudio del impacto medioambiental
- Indicadores de eficiencia energética

Se parte de la hipótesis de que buques tipológicamente similares en diseño, tamaño, sistema de propulsión y desarrollo operativo de su actividad tendrán eficiencias energéticas similares dando huellas de carbono y ecológicas también similares.

La sostenibilidad medioambiental en este trabajo de investigación se centra únicamente en las emisiones atmosféricas. Las emisiones atmosféricas son causadas mayoritariamente por procesos de combustión, y, por lo tanto, como se ha explicado en el capítulo de Metodología de esta tesis, dos métodos se emplean aquí para cuantificar las emisiones, ergo la huella de carbono, huella ecológica y algunos indicadores (EEOI y AER) son calculados a partir de ambos métodos de cuantificación de emisiones.

Además de la huella de carbono, huella ecológica y los indicadores de eficiencia energética, y como se menciona en el capítulo 7, la industria marítima emplea indicadores que están recogidos en los informes ESG (*Environmental, Social and Governance*) como herramienta para mostrar sus medidas y planes acerca del desarrollo sostenible de la actividad del transporte marítimo que realizan.

## 11.1. Huella de carbono de la flota de buques gaseros

La huella de carbono es el resultado de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente de un producto a lo largo de su ciclo de vida, desde la producción de las materias primas empleadas en su producción hasta la eliminación del producto acabado.

Se aplica la metodología detallada en el capítulo 7.1, sobre la flota de gaseros en servicio a fecha de 1 enero de 2020. Se calculan los resultados de la huella de carbono aplicando las

metodologías OMI I y OMI II para cuantificar el consumo de combustible, debido a que, según el método empleado para cuantificar el consumo de combustible, variaran el resultado de las emisiones atmosféricas obtenidas.

La huella de carbono en este trabajo de investigación considera las siguientes emisiones GEI.

- CO<sub>2</sub>
- CH<sub>4</sub>
- N<sub>2</sub>O
- BC
- R-22
- R134a
- R404a

Las emisiones de carbono negro (BC) no son calculadas en la metodología OMI I, por lo tanto, la huella de carbono calculada a partir de la OMI I no incluye las BC dentro de la HC.

Tabla 268 Resultados de la HC flota de gaseros flota en servicio en 2019.

| Tipo de gasero | OMI I       |            | OMI II       |            |
|----------------|-------------|------------|--------------|------------|
|                | MMt         | %          | MMt          | %          |
| LNG            | 71,9        | 73,2       | 60,1         | 59,7       |
| LPG            | 26,3        | 26,8       | 40,6         | 40,3       |
| <b>Total</b>   | <b>98,2</b> | <b>100</b> | <b>100,7</b> | <b>100</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas

Como muestra la Tabla 268, los buques LNG son los que hacen una mayor contribución a la huella de carbono total de la flota de gaseros.

En cuanto a la contribución de cada gas de efecto invernadero sobre la huella de carbono total de los buques gaseros, esto se muestra en la Tabla 269. Las emisiones de CO<sub>2</sub> son los mayores contribuidores seguido de las BC para buques LPG y CH<sub>4</sub> para buques LNG.

Tabla 269 Contribucion de cada GEI en la HC total de los buques gaseros

| Contaminante        | Buques LPG |        | Buques LNG |        |
|---------------------|------------|--------|------------|--------|
|                     | OMI I      | OMI II | OMI I      | OMI II |
| CO <sub>2</sub>     | 98%        | 95%    | 74%        | 72%    |
| CH <sub>4</sub>     | 0,1%       | 0,1%   | 25,1%      | 25%    |
| N <sub>2</sub> O    | 1,3%       | 1,3%   | 0,9%       | 0,8%   |
| BC                  | -          | 3,2%   | -          | 2,2%   |
| Gases refrigerantes | 0,6%       | 0,3%   | >0,1%      | >0,1%  |

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se realiza un análisis de la huella de carbono de manera más desagregada con el fin de comparar ambas flotas, analizando los resultados según la edad de los buques, el tamaño (peso muerto) y el tipo de motor propulsor y la bandera de registro.

En la Tabla 270 se analiza la huella de carbono para cada grupo de edad. Los buques LNG dentro del grupo de edad de igual o menos de 5 años son los que mayor huella de carbono producen. Los buques menor huella de carbono generan están en el grupo entre 5 y 10 años.

Para la flota de LPG los buques dentro del grupo de edad de igual o menos de 5 años son los buques que tienen la huella de carbono más elevada. La menor huella de carbono está en el grupo de edad entre 5 y 10 años.

*Tabla 270 HC de la flota de gaseros según tipo de buque y año de construcción.*

| Grupo de Edad (A)               | Huella de Carbono Total |                |               |               |
|---------------------------------|-------------------------|----------------|---------------|---------------|
|                                 | Buques LNG              |                | Buques LPG    |               |
|                                 | OMI I (MMt)             | OMI II (MMt)   | OMI I (MMt)   | OMI II (MMt)  |
| A ≤ 5                           | 22,241                  | 19,182         | 8,305         | 13,597        |
| 5 < A ≤ 10                      | 6,573                   | 5,654          | 2,470         | 3,786         |
| 10 < A ≤ 15                     | 21,074                  | 17,874         | 6,493         | 9,937         |
| 15 < A ≤ 20                     | 13,469                  | 10,719         | 3,118         | 4,607         |
| A > 20                          | 8,583                   | 6,725          | 5,899         | 8,625         |
| <b>Total</b>                    | <b>71,940</b>           | <b>60,154</b>  | <b>26,285</b> | <b>40,553</b> |
| Huella de Carbono por buque (t) |                         |                |               |               |
| A ≤ 5                           | 130.067                 | 112.174        | 24.790        | 40.589        |
| 5 < A ≤ 10                      | 136.931                 | 117.788        | 16.804        | 25.752        |
| 10 < A ≤ 15                     | 137.740                 | 116.822        | 19.855        | 30.388        |
| 15 < A ≤ 20                     | 151.340                 | 120.439        | 19.612        | 28.976        |
| A > 20                          | 140.699                 | 110.251        | 11.477        | 16.781        |
| <b>Media</b>                    | <b>139.355</b>          | <b>115.495</b> | <b>18.508</b> | <b>28.497</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" =millones de toneladas, "t" = toneladas

En la Tabla 270 también se muestra la huella de carbono media por buque, en la flota de buques LNG, los buques con edades de 5 o menos años son los que menos huella de carbono generan en la base de datos OMI I, aunque aplicando la metodología OMI II la menor huella de carbono por buque se encuentra en el grupo de edad de más de 20 años. La mayor huella de carbono por buque LNG se encuentra en el grupo de edad entre 15 y 20 años. En la flota de LPG, los buques más antiguos son los que menos huella de carbono por buque tiene.

En la Tabla 271 se observa la huella de carbono por cada tonelada de peso muerto y grupo de edad. Los buques más modernos son los más eficientes al tener la menor huella de carbono por tonelada de peso muerto y, por el contrario, los buques más antiguos son los que mayor huella de carbono por tonelada de peso muerto tienen.

Realizando el análisis según el tamaño de los buques (Tabla 272), dentro de la flota de buques LNG, los buques que tienen un peso muerto entre 75.000 y 85.000 toneladas son los buques que tienen una mayor huella de carbono. La menor huella de carbono de la flota de buques LNG se encuentra en los buques con un tamaño igual o superior a 100.000 toneladas.

En cuanto a la flota de buques LPG, los buques que tienen un peso muerto entre 5.000 y 10.000 toneladas son los buques que tienen una menor huella de carbono. La mayor huella de carbono de la flota de buques LPG se encuentra en los buques con un tamaño igual o superior a 50.000 toneladas.

Tabla 271 HC por tonelada de peso muerto para cada grupo de edad

| Grupo de edad (A) | Huella de Carbono por cada buque LNG |              | Huella de Carbono por cada buque LPG |              |
|-------------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|--------------|
|                   | OMI I                                | OMI II       | OMI I                                | OMI II       |
| A ≤ 5             | 1,449                                | 1,250        | 0,811                                | 1,327        |
| 5 < A ≤ 10        | 1,664                                | 1,431        | 1,084                                | 1,661        |
| 10 < A ≤ 15       | 1,492                                | 1,266        | 1,063                                | 1,626        |
| 15 < A ≤ 20       | 2,005                                | 1,595        | 1,038                                | 1,534        |
| A > 20            | 2,134                                | 1,672        | 1,404                                | 2,052        |
| <b>Media</b>      | <b>1,749</b>                         | <b>1,443</b> | <b>1,080</b>                         | <b>1,640</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas HC / tonelada peso muerto

Analizando la huella de carbono por buque LNG (Tabla 272), los buques de mayor tamaño tienen la menor huella de carbono aplicando la metodología OMI I; sin embargo, en la metodología OMI II, la menor huella de carbono por buque se encuentra en el grupo de peso muerto de menos de 75.000 toneladas.

En cuanto a la huella de carbono por cada buque LPG, los buques de mayor tamaño tienen la mayor huella de carbono. Siendo los buques más pequeños los que menor huella de carbono por buque tienen.

Tabla 272 HC de la flota de buques gaseros según su peso muerto.

| Grupo de Peso muerto (TPM)      | Huella de Carbono total (MMt) |                |               |               |
|---------------------------------|-------------------------------|----------------|---------------|---------------|
|                                 | Buques LNG                    |                | Buques LPG    |               |
|                                 | OMI I                         | OMI II         | OMI I         | OMI II        |
| TPM < 75.000                    | 9,537                         | 7,486          | 4,509         | 6,620         |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000           | 29,747                        | 24,149         | 3,181         | 4,383         |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000          | 27,835                        | 23,979         | 9,104         | 12,182        |
| TPM ≥ 100.000                   | 4,822                         | 4,539          | 9,492         | 17,367        |
| <b>Total</b>                    | <b>71,940</b>                 | <b>60,154</b>  | <b>26,285</b> | <b>40,553</b> |
| Huella de carbono por buque (t) |                               |                |               |               |
| TPM < 75.000                    | 114.899                       | 90.193         | 6.937         | 10.185        |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000           | 155.744                       | 126.434        | 13.535        | 18.650        |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000          | 137.117                       | 118.125        | 26.160        | 35.007        |
| TPM ≥ 100.000                   | 107.156                       | 100.876        | 38.120        | 69.748        |
| <b>Media</b>                    | <b>128.729</b>                | <b>108.907</b> | <b>21.188</b> | <b>33.397</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" = millones de toneladas, "t" = toneladas

Respecto a los sistemas de propulsión (Tabla 273), hay que tener en cuenta que este trabajo de investigación se asume que la flota de buques LPG sólo tienen motores diésel de dos o de cuatro tiempos como motor(es) principal(es). Para la flota de buques LPG, los buques con motores diésel de dos tiempos son los que mayor huella de carbono tienen. Para los buques LNG, los buques tienen plantas de vapor (turbinas) como sistemas de propulsión (T y TU), son los buques que tienen una mayor huella de carbono.

Tabla 273 HC de la flota de gaseros según tipo de buque y tipo motor.

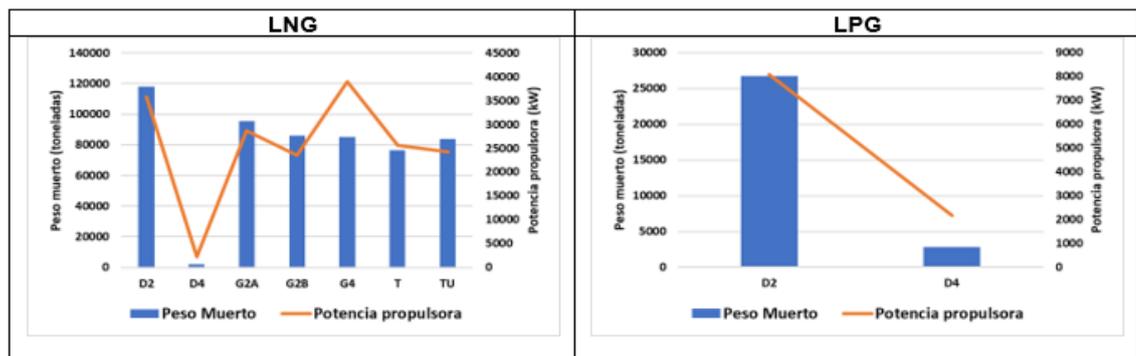
| Tipo de motor                   | Huella de Carbono total (MMt) |         |            |        |
|---------------------------------|-------------------------------|---------|------------|--------|
|                                 | Buques LNG                    |         | Buques LPG |        |
|                                 | OMI I                         | OMI II  | OMI I      | OMI II |
| D2                              | 5,232                         | 4,919   | 21,890     | 34,136 |
| D4                              | 0,038                         | 0,040   | 4,395      | 6,417  |
| G2A                             | 4,982                         | 4,464   | -          | -      |
| G2B                             | 1,115                         | 1,064   | -          | -      |
| G4                              | 24,569                        | 21,295  | -          | -      |
| T                               | 34,989                        | 27,685  | -          | -      |
| TU                              | 1,015                         | 0,686   | -          | -      |
| Huella de carbono por buque (t) |                               |         |            |        |
| D2                              | 104.646                       | 98.386  | 24.161     | 37.678 |
| D4                              | 7.504                         | 7.946   | 7.630      | 11.140 |
| G2A                             | 99.631                        | 89.287  | -          | -      |
| G2B                             | 85.799                        | 81.878  | -          | -      |
| G4                              | 145.381                       | 126.003 | -          | -      |
| T                               | 153.460                       | 121.426 | -          | -      |
| TU                              | 145.046                       | 98.018  | -          | -      |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" =millones de toneladas, "t" = toneladas

En la Tabla 273 también se muestra la huella de carbono por buque, estando la menor huella de carbono, tanto para buques LPG como LNG, en buques con motores D4.

Los buques gaseros con sistemas de propulsión diésel de cuatro tiempos con los que menor huella de carbono por buque y total tienen, esto principalmente debido a la potencia que tienen estos motores, es sensiblemente inferior que los otros tipos de propulsión además de ser los buques de menor tamaño, como se ve en la Gráfica 83.

Gráfica 84 Peso muerto promedio y potencia media del motor principal en buques gaseros.



Fuente: Elaboración propia.

Estudiando la huella de carbono por kilovatio de potencia instalada para la propulsión (Tabla 274), se ve que el sistema de propulsión con menor huella de carbono por kW instalado son los motores diésel de dos tiempos (D2) para buques LNG y LPG.

Tabla 274 HC por kilovatio de potencia propulsora para cada tipo de motor.

| Tipo de motor | Huella de Carbono buques LNG |        | Huella de Carbono buques LPG |        |
|---------------|------------------------------|--------|------------------------------|--------|
|               | OMI I                        | OMI II | OMI I                        | OMI II |
| D2            | 2,924                        | 2,749  | 2,985                        | 4,656  |
| D4            | 3,402                        | 3,602  | 3,533                        | 5,159  |
| G2A           | 3,467                        | 3,107  | -                            | -      |
| G2B           | 3,641                        | 3,475  | -                            | -      |
| G4            | 3,732                        | 3,235  | -                            | -      |
| T             | 5,992                        | 4,741  | -                            | -      |
| TU            | 5,988                        | 4,047  | -                            | -      |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: toneladas HC / kilovatio

A continuación, se analiza la huella de carbono de la flota para cada grupo de bandera de registro (ver Tabla 275). El número de barcos registrado en cada grupo de bandera tiene una gran influencia en la huella de carbono, ya que cuantos más barcos, más emisiones acumuladas. Para la flota de buques LNG, los buques con bandera de registro abierto acumulan la mayor parte de la huella de carbono. Para la flota de buques LPG ocurre igual, los barcos registrados en el grupo RA suman la mayor cantidad de huella de carbono.

En cuanto a la huella de carbono por buque según la bandera del buque (Tabla 275), los buques LNG con menor huella de carbono por buque son aquellos registrados en banderas ROCDE. Para los buques LPG ocurre lo mismo, los buques pertenecientes al grupo de ROCDE son los que menor huella de carbono por buque tienen.

Tabla 275 HC según grupo de bandera para la flota de buques gaseros.

| Bandera                         | Huella de Carbono total (MMt) |         |            |        |
|---------------------------------|-------------------------------|---------|------------|--------|
|                                 | Buques LNG                    |         | Buques LPG |        |
|                                 | OMI I                         | OMI II  | OMI I      | OMI II |
| EU15                            | 7,861                         | 6,674   | 2,111      | 2,937  |
| RA                              | 43,781                        | 36,896  | 12,688     | 19,608 |
| RM                              | 13,894                        | 11,440  | 10,178     | 16,035 |
| ROCDE                           | 6,404                         | 5,143   | 1,308      | 1,972  |
| Huella de Carbono por buque (t) |                               |         |            |        |
| EU15                            | 133.230                       | 113.125 | 17.744     | 24.680 |
| RA                              | 140.775                       | 118.638 | 22.537     | 34.828 |
| RM                              | 134.898                       | 111.068 | 16.906     | 26.637 |
| ROCDE                           | 130.700                       | 104.957 | 6.604      | 9.962  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" =millones de toneladas, "t" = toneladas

De manera agregada (Tabla 276), de los buques gaseros registrados en banderas de registro abierto aportan la mayor parte de la huella de carbono de la flota de buques gaseros.

Tabla 276 HC por grupo de bandera para la flota de gaseros.

| Grupo de Banderas | Huella de Carbono total |            |                |            |
|-------------------|-------------------------|------------|----------------|------------|
|                   | OMI I                   |            | OMI II         |            |
|                   | MMt                     | %          | MMt            | %          |
| EU15              | 9,972                   | 10,2       | 9,611          | 9,5        |
| RA                | 56,469                  | 57,5       | 56,504         | 56,1       |
| RM                | 24,072                  | 24,5       | 27,475         | 27,3       |
| ROCDE             | 7,712                   | 7,9        | 7,115          | 7,1        |
| <b>Total</b>      | <b>98,226</b>           | <b>100</b> | <b>100,706</b> | <b>100</b> |

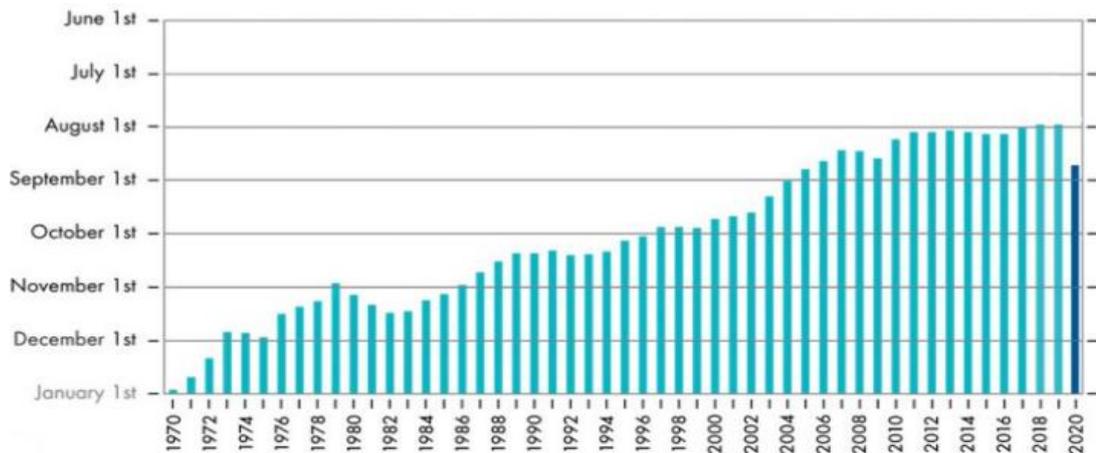
Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMt" =millones de toneladas

## 11.2. Huella de ecológica de la flota de buques gaseros

En términos globales, la capacidad de carga del planeta es limitada, ya que la superficie disponible para el uso humano es finita, unos 11.200 millones de hectáreas de superficie bio productiva.

Cada año, se produce el Día del Sobregiro de la Tierra que establece la fecha en que la humanidad ha utilizado todos los recursos biológicos que la Tierra puede renovar durante todo el año. La humanidad actualmente usa un 60% más de lo que puede renovarse, es decir, es lo equivalente a si viviéramos en 1,6 Tierras. Desde el Día del Sobregiro de la Tierra hasta el final del año, la humanidad aumenta el déficit ecológico que ha ido aumentando constantemente a partir de que el mundo cayó en el sobregiro ecológico a principios de la década de 1970, según las Cuentas Nacionales de Huella y Biocapacidad (Global Footprint Network, 2019). Se produce un cambio en la tendencia en 2020, esto se explica por los efectos del Covid-19 a nivel global.

Figura 22 Día de sobregiro de la Tierra, evolución desde 1970 hasta 2020.



Fuente: Earth Overshoot Day, (2020)

Al igual que se ha hecho con el análisis de la huella de carbono, para analizar la huella ecológica, se muestran los resultados obtenidos aplicando las metodologías OMI I y OMI II para el cálculo de combustible.

La Tabla 277 muestra los millones de hectáreas de bosques necesarias para absorber las emisiones de GEI de la flota de gaseros.

Tabla 277 HE de superficie de bosques de la flota de gaseros en servicio 2019.

| Tipo de Gasero | OMI I                   | OMI II                  |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
|                | Huella ecológica (MMHb) | Huella ecológica (MMHb) |
| LNG            | 45,5                    | 38,1                    |
| LPG            | 16,7                    | 25,7                    |
| <b>Total</b>   | <b>62,2</b>             | <b>63,8</b>             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMHb" = millones de hectáreas de bosque

Existen unos 3.700 millones de hectáreas de bosque en el mundo, que es la superficie biológicamente productiva que absorbe las emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles. La flota de gaseros necesitaría consumir alrededor del 1,7% de la superficie bio productiva de los bosques para asimilar las emisiones atmosféricas causadas por la flota de gaseros en servicio a fecha del 1 de enero de 2020. Es decir, de media, cada buque LPG gasta los recursos de 11.226 a 17.319 hectáreas de bosques, y cada buque LNG, gasta los recursos de 72.935 a 87.226 hectáreas de bosque por año.

La Tabla 278 muestra la conversión de las hectáreas de bosques necesarias para absorber las emisiones atmosféricas causadas por los buques gaseros a hectáreas globales de superficie bio productiva.

Tabla 278 HE de superficie bio-productiva (SBP) global de la flota de gaseros en servicio 2019.

| Tipo de Gasero | OMI I                   | OMI II                  |
|----------------|-------------------------|-------------------------|
|                | Huella ecológica (MMHG) | Huella ecológica (MMHG) |
| LNG            | 61,0                    | 51,1                    |
| LPG            | 22,4                    | 34,5                    |
| <b>Total</b>   | <b>83,4</b>             | <b>85,6</b>             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "MMHG" = millones de hectáreas globales

Se cuentan unos 11.200 millones de hectáreas de superficie bio productiva en el mundo. La flota de gaseros necesitaría consumir alrededor del 0,8% de la superficie bio productiva global para asimilar las emisiones atmosféricas causadas por la flota de gaseros en servicio a fecha del 1 de enero de 2020.

### 11.3. Energía auxiliar y propulsora anual de la flota de gaseros

Una de las métricas que se consideran necesarias para evaluar la sostenibilidad medioambiental y que se recoge dentro de los informes ESG es la energía producida anualmente a bordo de los buques para satisfacer la demanda de energía auxiliar para la operativa de los buques y que es producida por los motores auxiliares, y la energía necesaria para propulsar el buque, producida por el motor principal.

La potencia de los motores principales es un parámetro de diseño de los buques que dependen principalmente de la velocidad de diseño para la que sea construido el buque.

Por otro lado, la potencia de los motores auxiliares también es un parámetro de diseño de los buques que dependerá de los requerimientos de servicios auxiliares y balances eléctricos que los buques vayan a tener, como, por ejemplo, dimensiones de los compresores, bombas, alumbrado, sistemas adicionales como plantas de licuefacción, etc.

Se van a comparar los resultados obtenidos al aplicar las dos metodologías detalladas en el capítulo 6 ya que van a dar resultados distintos, debido a que la cantidad de energía anual producida por los motores auxiliares y principales depende de los perfiles operacionales, regímenes de carga asumidos para cada una de las fases del viaje consideradas, así como del número de horas operativas consideradas para cada fase del viaje de cada buque gasero.

Se parte primero de un análisis para saber cuál es la potencia media auxiliar y la potencia media para la propulsión según el tamaño y tipo de buque como muestra las tablas 279 y 280.

*Tabla 279 Potencia auxiliar y para la propulsión instalada y velocidad de diseño de la flota de buques LNG según grupos de tamaño.*

| <b>Toneladas de peso muerto (TPM)</b> | <b>Potencia auxiliar media Instalada (kW)</b> | <b>Potencia propulsión media Instalada (kW)</b> | <b>Velocidad de diseño (nudos)</b> |
|---------------------------------------|---|---|------------------------------------|
| TPM < 75.000                          | 7.506   | 19.997  | 18,2                               |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000                 | 17.559  | 30.127  | 19,6                               |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000                | 27.375  | 34.827  | 18,3                               |
| TPM ≥ 100.000                         | 16.177  | 36.705  | 19,3                               |

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla 280 Potencia auxiliar y para la propulsión instalada y velocidad de diseño de la flota de buques LPG según grupos de tamaño.*

| <b>Toneladas de peso muerto (TPM)</b> | <b>Potencia auxiliar media Instalada (kW)</b> | <b>Potencia propulsión media Instalada (kW)</b> | <b>Velocidad de diseño (nudos)</b> |
|---------------------------------------|---|---|------------------------------------|
| TPM < 5.000                           | 678   | 1.976   | 12,2                               |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000                  | 1.644   | 4.307   | 14,8                               |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000                 | 3.146   | 8.711   | 15,9                               |
| TPM ≥ 50.000                          | 3.554   | 13.046  | 16,3                               |

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que los buques a medida que aumenta su peso muerto, la potencia auxiliar y propulsora aumentan de manera progresiva. Hay una excepción en los buques LNG con un peso muerto entre 85.000 y 100.000 toneladas, que tienen la mayor potencia auxiliar instalada a bordo. Esto se puede explicar por el tipo de propulsión dominante en este grupo (motores duales de cuatro tiempos), haciendo que haya algo de incertidumbre en los datos técnicos reportados por IHS Farplay. En la Tabla 281 se muestra de manera agregada la energía auxiliar y propulsora generada por la flota de gaseros.

Tabla 281 Energía auxiliar y propulsora de la flota de gaseros en el año 2019.

| Tipo de buque | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|---------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|               | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| LNG           | 23.689                      | 279.462                       | 35.851                      | 219.130                       |
| LPG           | 8.008                       | 148.537                       | 7.481                       | 110.528                       |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

La Tabla 282 muestra la energía auxiliar y propulsora generadas anualmente por la flota de buques LNG, total y por buque.

Tabla 282 Energía auxiliar y para propulsión anual de la flota de buques LNG según grupos de tamaño.

| Peso muerto (toneladas) | Valores totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                         | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                         | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| TPM < 75.000            | 1.625                       | 28.746                        | 2.353                       | 23.104                        |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000   | 8.528                       | 99.663                        | 10.675                      | 80.989                        |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000  | 11.950                      | 122.446                       | 17.347                      | 93.740                        |
| TPM ≥ 100.000           | 1.586                       | 28.607                        | 5.475                       | 21.297                        |
|                         | Valores por buque (TJ)      |                               |                             |                               |
| TPM < 75.000            | 20                          | 346                           | 28                          | 278                           |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000   | 45                          | 522                           | 56                          | 424                           |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000  | 59                          | 603                           | 85                          | 462                           |
| TPM ≥ 100.000           | 35                          | 636                           | 122                         | 473                           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Los buques LNG según la metodología OMI I que menos energía auxiliar generan al año son los buques con pesos muerto igual o superior a 100.000 toneladas. Según el método OMI II, la menor energía auxiliar es generada por buques LNG dentro del grupo de peso muerto de menos de 75.000 toneladas, los buques LNG dentro del grupo de peso muerto igual o superior a 100.000 toneladas son los que menor energía propulsora producen.

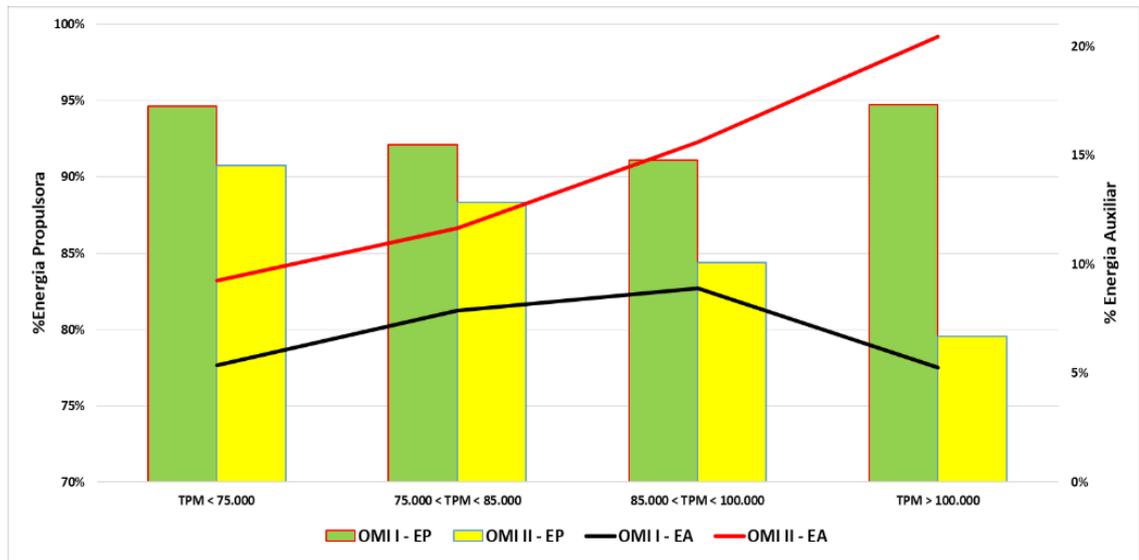
Analizando la energía auxiliar y propulsora por buque, se observa que, aplicando OMI I, los buques que más energía auxiliar por buque generan son los que se encuentran dentro del grupo de peso muerto entre 85.000 y 100.000, mientras que los buques de peso muerto igual o superior a 100.000 toneladas son los que mayor energía propulsora por buque generan por buque al año.

En esta misma metodología, los buques LNG de menor tamaño son los que menor energía propulsora y auxiliar por buque generan.

Aplicando la metodología OMI II, los buques que generan menor cantidad de energía auxiliar y propulsora son los buques LNG más pequeños, siendo los buques de igual o superior 100.000 toneladas de peso muerto los que mayor cantidad de energía auxiliar y propulsora por buque generan al año.

La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada grupo de peso muerto para la flota de buques LNG se muestra en la *Gráfica 84*.

Gráfica 85 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LNG según grupo de peso muerto.



Fuente: Elaboración propia.

La flota de LPG (Tabla 283) genera una menor cantidad de energía auxiliar y propulsora por año comparándolo con los buques LNG debido a que el tamaño medio por buque también es inferior.

Los buques LPG entre 5.000 y 10.000 TPM son los que menos energía auxiliar y propulsora generan al año. Los buques LPG que más energía auxiliar generan, con OMI I estos se encuentran en el grupo entre 10.000 y 50.000 TPM mientras que con OMI II, los buques LPG que más energía auxiliar anual generan están en el grupo de igual o mayor a 50.000 TPM. Mientras que los buques LPG de peso muerto igual o superior 50.000 TPM son los que más energía propulsora generan al año.

Evaluando los resultados por buque, los buques LPG de menor tamaño generan la menor cantidad de energía auxiliar y propulsora por buque como se muestra en la Tabla 283, siendo los buques más grandes los que mayor energía auxiliar y propulsora generan por buque.

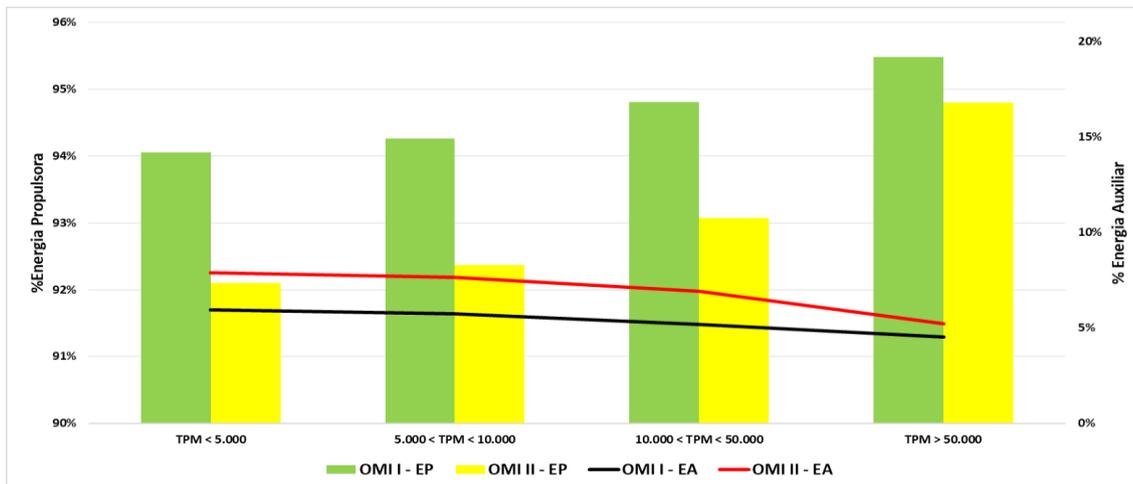
Tabla 283 Energía auxiliar y para propulsión anual para buques LPG según grupos de TPM.

| Peso muerto<br>(toneladas) | Valores totales (TJ)              |                                     |                                   |                                     |
|----------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
|                            | OMI I                             |                                     | OMI II                            |                                     |
|                            | Energía<br>Auxiliar anual<br>(TJ) | Energía<br>propulsión<br>anual (TJ) | Energía<br>Auxiliar anual<br>(TJ) | Energía<br>propulsión<br>anual (TJ) |
| TPM < 5.000                | 1.405                             | 22.242                              | 1.229                             | 14.329                              |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000       | 1.067                             | 17.532                              | 933                               | 11.294                              |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000      | 2.875                             | 52.503                              | 2.516                             | 33.823                              |
| TPM ≥ 50.000               | 2.662                             | 56.260                              | 2.803                             | 51.081                              |
| Valores por buque (TJ)     |                                   |                                     |                                   |                                     |
| TPM < 5.000                | 2                                 | 34                                  | 2                                 | 22                                  |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000       | 5                                 | 75                                  | 4                                 | 48                                  |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000      | 8                                 | 151                                 | 7                                 | 97                                  |
| TPM ≥ 50.000               | 11                                | 226                                 | 11                                | 205                                 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Comparando los resultados obtenidos aplicando las metodologías para el cálculo de combustible, donde se consideran distintos perfiles operacionales, según sea la metodología OMI I u OMI II, se obtiene que, para la energía auxiliar anual, la metodología OMI I da valores superiores a la OMI II excepto en los buques con un tamaño superior a las 50.000 toneladas de peso muerto. Para la energía propulsora, los resultados obtenidos a partir de OMI I son superiores a los de OMI II para todos los tamaños. Para la energía auxiliar y propulsora por cada buque LPG, también se observa que los resultados por buque aplicando la metodología OMI II son superiores a los obtenidos por OMI I. La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada grupo de peso muerto para la flota de buques LPG se muestra en la Gráfica 85.

Gráfica 86 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LPG según grupo de peso muerto.



Fuente: Elaboración propia.

Respecto la producción de energía según el año de construcción, los buques LNG que generan más energía auxiliar y propulsora son los buques LNG dentro del grupo de edad de igual o inferior a 5 años. Los buques LNG que generan menos cantidad de energía auxiliar y propulsora son los buques de más de 20 años (Tabla 284).

En cuanto a las energía auxiliar y propulsora por buque LNG para cada grupo de edad, los resultados se muestran también en la *Tabla 284*. Aplicando el método OMI I, los buques LNG con edades entre 5 y 10 años son los que mayor energía auxiliar y propulsora por buque generan. Aplicando la metodología OMI II, son los buques LNG de igual o menor a 5 años los que mayor energía auxiliar tienen, siendo los buques LNG del grupo de edad entre 5 y 10 años los que mayor energía propulsora por buque genera. Los buques más antiguos son los que menos energía auxiliar y propulsora por buque producen.

Tabla 284 Energía auxiliar y para propulsión anual de buques LNG según su año de construcción.

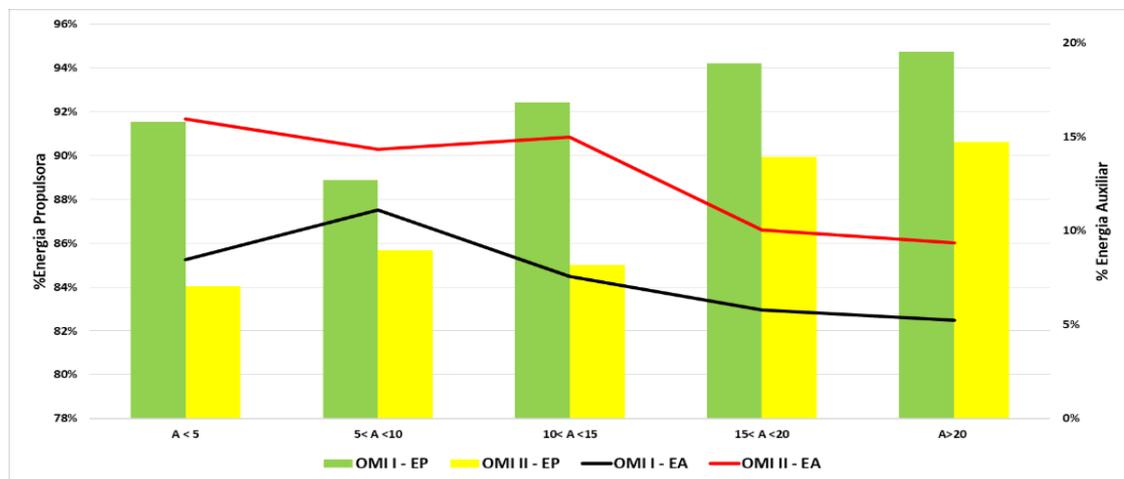
| Grupo de Edad (A) | Valores totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                   | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                   | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| A ≤ 5             | 9.270                       | 100.342                       | 14.477                      | 76.253                        |
| 5 < A ≤ 10        | 3.571                       | 28.588                        | 3.681                       | 21.998                        |
| 10 < A ≤ 15       | 7.063                       | 86.339                        | 11.899                      | 67.430                        |
| 15 < A ≤ 20       | 2.411                       | 39.340                        | 3.673                       | 32.909                        |
| A > 20            | 1.374                       | 24.853                        | 2.122                       | 20.540                        |
|                   | Valores por buque (TJ)      |                               |                             |                               |
| A ≤ 5             | 54                          | 587                           | 85                          | 446                           |
| 5 < A ≤ 10        | 74                          | 596                           | 77                          | 458                           |
| 10 < A ≤ 15       | 46                          | 564                           | 78                          | 441                           |
| 15 < A ≤ 20       | 27                          | 442                           | 41                          | 370                           |
| A > 20            | 23                          | 407                           | 35                          | 337                           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Comparando los resultados de las metodologías OMI I y OMI II para los buques LNG según el grupo de edad, para la energía auxiliar, OMI II da para todos los grupos edad mayor valores que OMI I, ocurriendo lo contrario para los valores de la energía propulsora.

La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada grupo de edad para la flota de buques LNG se muestra en la Gráfica 86.

Gráfica 87 Distribución de la energía auxiliar y propulsora para los buques LNG según grupo de edad.



Fuente: Elaboración propia.

Para los buques LPG, los que generan más energía auxiliar y propulsora son los buques en el grupo de edad de igual o inferior a 5 años para ambas metodologías (Tabla 285).

En cuanto a las energía auxiliar y propulsora por buque LPG para cada grupo de edad, los resultados se muestran en la Tabla 285. Los buques LPG con edades iguales o inferiores a 5 años son los que mayor energía auxiliar y propulsora por buque generan, siendo los buques más antiguos los que menos energía auxiliar y propulsora por buque generan.

Tabla 285 Energía auxiliar y propulsora anual de la flota de buques LPG según su año de construcción.

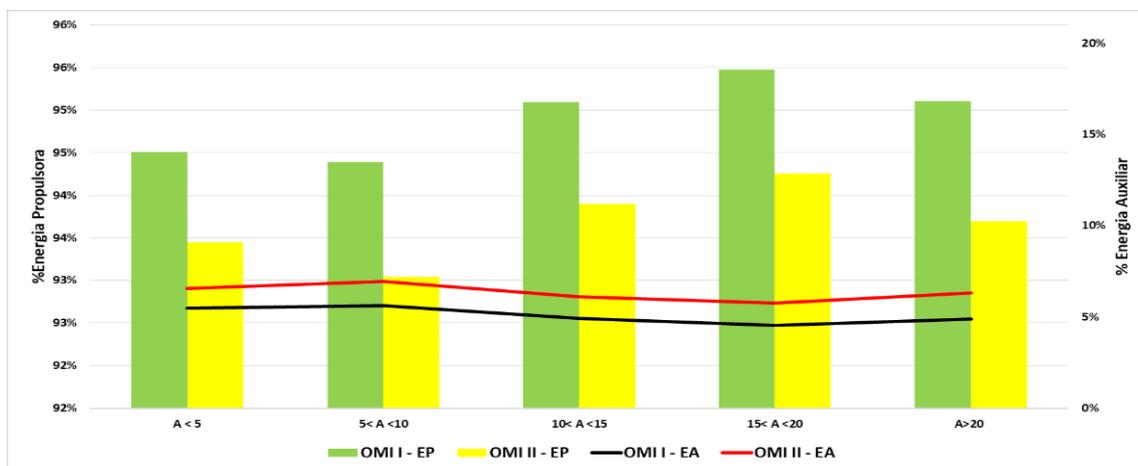
| Grupo de Edad (A)      | Valores totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                        | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                        | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| A ≤ 5                  | 2.800                       | 48.198                        | 2.713                       | 38.674                        |
| 5 < A ≤ 10             | 832                         | 13.993                        | 770                         | 10.303                        |
| 10 < A ≤ 15            | 1.935                       | 37.476                        | 1.803                       | 27.725                        |
| 15 < A ≤ 20            | 858                         | 18.086                        | 785                         | 12.870                        |
| A > 20                 | 1.583                       | 30.784                        | 1.411                       | 20.956                        |
| Valores por buque (TJ) |                             |                               |                             |                               |
| A ≤ 5                  | 8                           | 144                           | 8                           | 115                           |
| 5 < A ≤ 10             | 6                           | 95                            | 5                           | 70                            |
| 10 < A ≤ 15            | 6                           | 115                           | 6                           | 85                            |
| 15 < A ≤ 20            | 5                           | 114                           | 5                           | 81                            |
| A > 20                 | 3                           | 60                            | 3                           | 41                            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Comparando los resultados de las metodologías OMI I y OMI II para los buques LPG según grupo de edad, para la energía auxiliar, la metodología OMI I da para todos los grupos de edad mayor valores que la OMI II, ocurriendo lo contrario atendiendo a los valores de la energía propulsora.

La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada grupo de edad para la flota de buques LPG se muestra en la Gráfica 87.

Gráfica 88 Distribución de la energía auxiliar y propulsora para los buques LPG según grupo de edad.



Fuente: Elaboración propia.

El siguiente análisis que se hace es según el tipo de motor principal instalados a bordo. En los buques LNG (Tabla 286) hay un tipo de propulsión que claramente genera una mayor de cantidad de energía auxiliar, esto son los buques con motores duales de cuatro tiempos ya que, estos motores se emplean como parte de los sistemas diésel-eléctricos en los buques, requiriendo una mayor energía auxiliar para operar todos los elementos de la planta propulsora. En cuanto a la energía propulsora, aplicando el método OMI I y OMI II, los buques diésel-eléctricos generan la mayor cantidad de energía auxiliar y propulsora.

En los buques LNG, de nuevo los buques con motores duales de cuatro tiempos son los que más energía auxiliar y propulsora generaron por buque (sistemas diésel-eléctricos) aplicando la metodología OMI I. Al Aplicar la metodología OMI II, los buques LNG con motores principales D2, son los que mayor cantidad de energía auxiliar producen por buque, esto se debe a que muchos de estos buques tienen a bordo instalados plantas de licuefacción las cuales, para su funcionamiento, tienen una mayor demanda de energía eléctrica.

Respecto a la energía propulsora por buque, en ambas metodologías, se obtiene que los buques LNG con sistemas diésel-eléctricos con motores duales de cuatro tiempos, son los que mayor cantidad de energía propulsora generan en un año.

Tabla 286 Energía auxiliar y propulsora de la flota de buques LNG según el tipo de motor principal instalado.

| Tipo de motor principal | Valores totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                         | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                         | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| D2                      | 1.735                       | 30.992                        | 5.990                       | 23.072                        |
| D4                      | 12                          | 191                           | 12                          | 126                           |
| G2A                     | 1.491                       | 24.884                        | 5.243                       | 18.265                        |
| G2B                     | 551                         | 5.305                         | 1.244                       | 3.872                         |
| G4                      | 13.872                      | 114.021                       | 14.014                      | 86.748                        |
| T                       | 5.861                       | 101.132                       | 9.088                       | 84.575                        |
| TU                      | 167                         | 2.937                         | 260                         | 2.472                         |
|                         | Valor por buque (TJ)        |                               |                             |                               |
| D2                      | 35                          | 620                           | 120                         | 461                           |
| D4                      | 2                           | 38                            | 2                           | 25                            |
| G2A                     | 30                          | 498                           | 105                         | 365                           |
| G2B                     | 42                          | 408                           | 96                          | 298                           |
| G4                      | 82                          | 675                           | 83                          | 513                           |
| T                       | 26                          | 444                           | 40                          | 371                           |
| TU                      | 24                          | 420                           | 37                          | 353                           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Los buques LPG (Tabla 287) con motores diésel de dos tiempos como sistema de propulsión son los que más energía auxiliar y propulsora generan en un año.

En los buques LPG siguen siendo los buques con motores diésel de dos tiempos instalados como sistemas de propulsión, los que más energía auxiliar y propulsora por buque generan en un año.

Tabla 287 Energía auxiliar y propulsora de la flota de buques LPG según el tipo motor principal

| Tipo de motor principal | Valores Totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|-------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                         | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                         | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| D2                      | 6.524                       | 126.993                       | 6.182                       | 96.649                        |
| D4                      | 1.484                       | 21.544                        | 1.299                       | 13.879                        |
| Valores por buque (TJ)  |                             |                               |                             |                               |
| D2                      | 7                           | 140                           | 7                           | 107                           |
| D4                      | 3                           | 37                            | 2                           | 24                            |

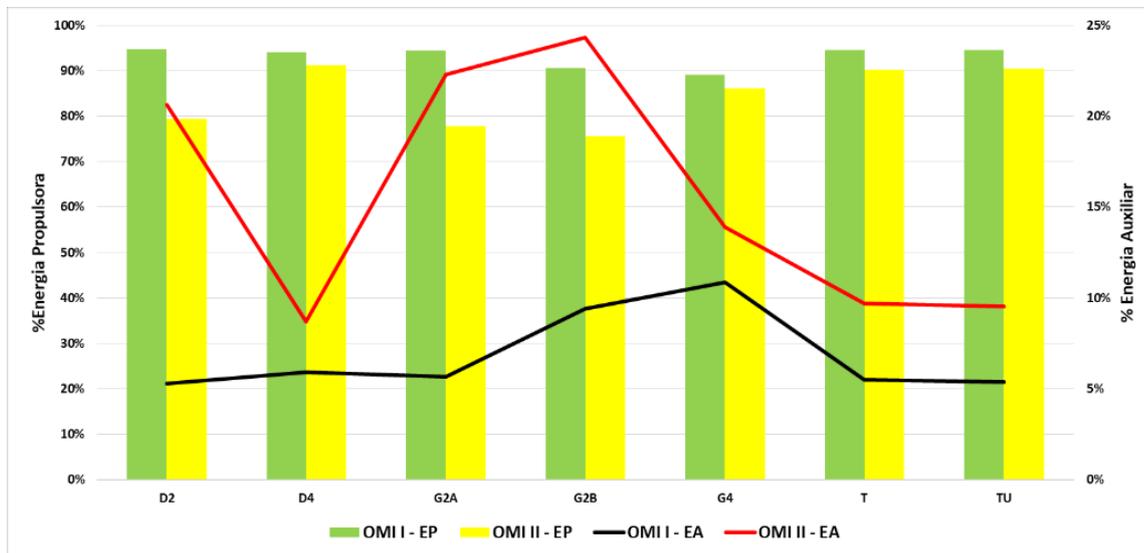
Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Comparando los resultados de ambas metodologías, se puede ver que la energía auxiliar obtenida en buques LNG por la metodología OMI II es mayor que en la obtenida aplicando la metodología OMI I, y en cuanto a la energía propulsora para los buques LNG, los resultados obtenidos aplicando la metodología OMI I son superiores a los obtenidos con OMI II.

En los buques LPG, los resultados obtenidos, tanto para la energía auxiliar como para la energía propulsora, son mayores al aplicar la metodología OMI I que al aplicar OMI II.

La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada tipo de motor principal para la flota de buques LNG se muestra en la Gráfica 88.

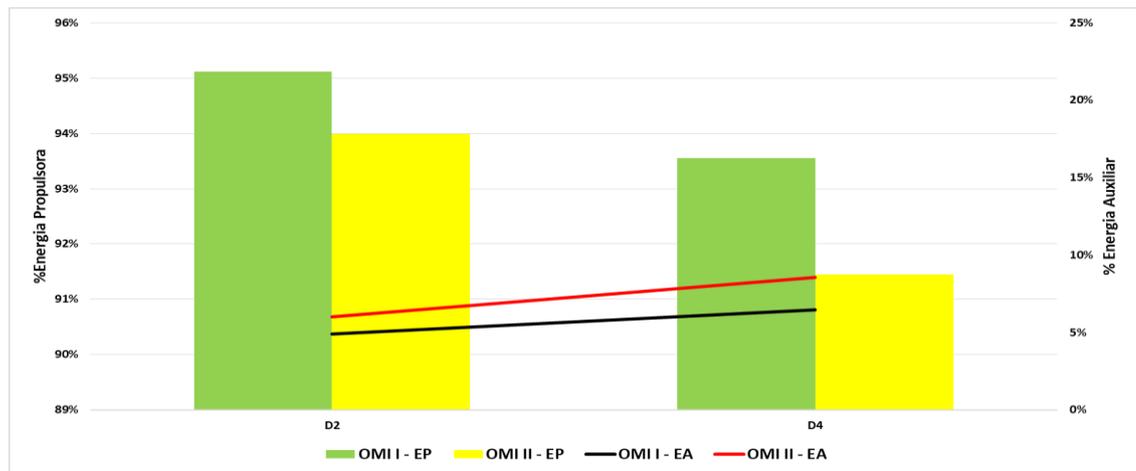
Gráfica 89 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LNG según tipo de motor principal.



Fuente: Elaboración propia.

La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada tipo de motor principal para la flota de buques LPG se muestra en la Gráfica 89.

Gráfica 90 Distribución de la energía auxiliar y para la propulsión para los buques LPG según tipo de motor principal.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando la energía auxiliar y propulsora según al grupo que pertenece la bandera de registro de cada buque, las tablas 288 y 289 muestran que las flotas de buques LNG y LPG registradas bajo el grupo de Registro Abierto (RA) son los que generan una mayor cantidad de energía auxiliar y propulsora.

Tabla 288 Energía auxiliar y propulsora para la flota de buques LNG según el grupo de bandera de registro.

| Grupo de Banderas | Valores Totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|-------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                   | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                   | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| EU15              | 3.277                       | 32.547                        | 4.528                       | 25.044                        |
| RA                | 14.516                      | 174.935                       | 23.137                      | 136.723                       |
| RM                | 4.724                       | 52.481                        | 6.499                       | 41.180                        |
| ROCDE             | 1.172                       | 19.498                        | 1.688                       | 16.182                        |
|                   | Valor por buque (TJ)        |                               |                             |                               |
| EU15              | 56                          | 552                           | 77                          | 424                           |
| RA                | 47                          | 562                           | 74                          | 440                           |
| RM                | 46                          | 510                           | 63                          | 400                           |
| ROCDE             | 24                          | 398                           | 34                          | 330                           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Analizando la energía producida anualmente por cada buque LNG (Tabla 288), los buques abanderados en banderas del grupo ROCDE son los que menor energía auxiliar y propulsora por buque generan al año, mientras que los que mayor energía auxiliar por buque al año generan se encuentran en el grupo de banderas EU15, y los que más energía propulsora por buque generan están abanderando dentro del grupo RA.

Tabla 289 Energía auxiliar y propulsora para la flota de buques LPG según el grupo de bandera de registro.

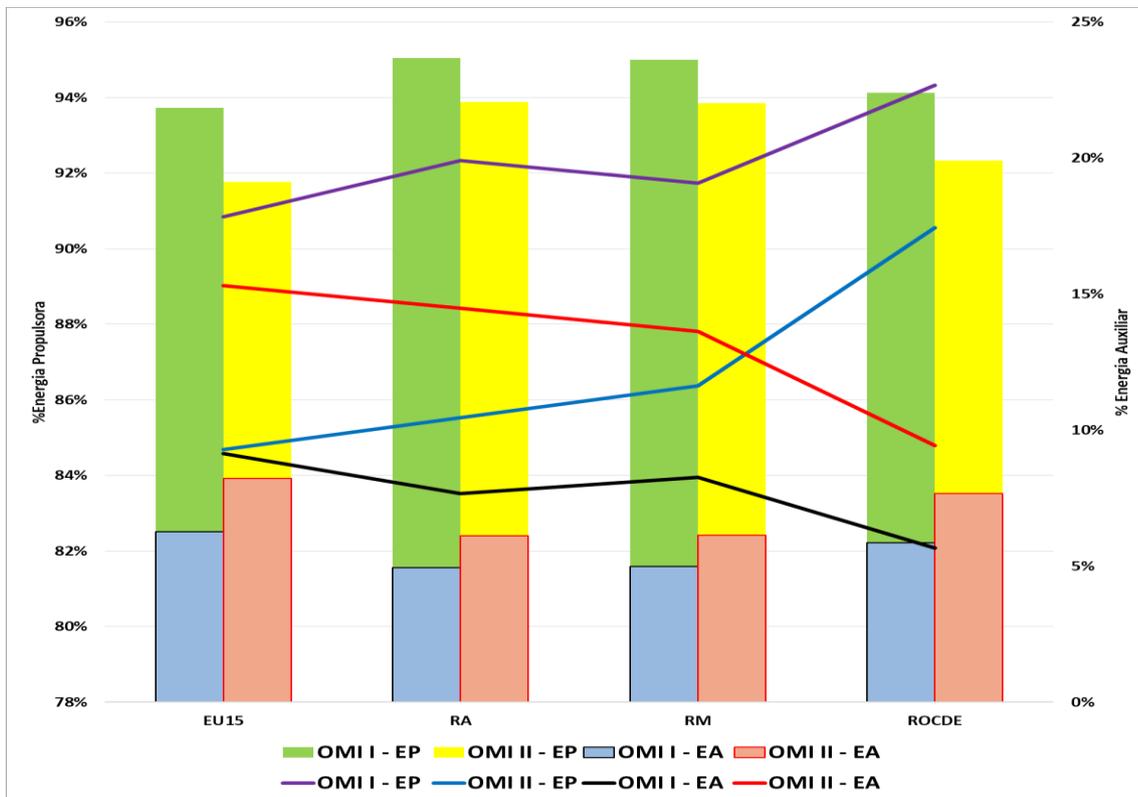
| Grupo de Banderas      | Valores Totales (TJ)        |                               |                             |                               |
|------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
|                        | OMI I                       |                               | OMI II                      |                               |
|                        | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) | Energía Auxiliar anual (TJ) | Energía propulsión anual (TJ) |
| EU15                   | 788                         | 11.768                        | 696                         | 7.759                         |
| RA                     | 3.799                       | 72.928                        | 3.574                       | 54.840                        |
| RM                     | 3.019                       | 57.379                        | 2.855                       | 43.647                        |
| ROCDE                  | 403                         | 6.462                         | 356                         | 4.282                         |
| Valores por buque (TJ) |                             |                               |                             |                               |
| EU15                   | 7                           | 99                            | 6                           | 65                            |
| RA                     | 7                           | 130                           | 6                           | 97                            |
| RM                     | 5                           | 95                            | 5                           | 73                            |
| ROCDE                  | 2                           | 33                            | 2                           | 22                            |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "TJ" = Tera julios

Analizando la energía producida anualmente por cada buque LPG (Tabla 289), los buques abanderados en banderas del grupo ROCDE son los que menor energía auxiliar y propulsora por buque generan al año, mientras que los que mayor energía auxiliar y propulsora generan por buque al están abanderados dentro del grupo RA.

La distribución de energía auxiliar y propulsora para cada grupo de bandera para la flota de buques LNG y LPG se muestra en la Gráfica 90.

Gráfica 91 Distribución de la energía auxiliar y propulsora para los buques gaseros según grupo de bandera.



Fuente: Elaboración propia.

## 11.4. Mix de combustible de la flota de gaseros

Como se ha explicado en el capítulo 6, cada tipo de combustible tiene asociado un factor de emisión para cada contaminante. Partiendo de este hecho, el uso de uno u otro combustible en los procesos de combustión, tiene un efecto directo en la cantidad de emisiones atmosféricas que emitirán dichos procesos de combustión. Este efecto es aún más notable si nos centramos en las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que una tonelada de combustible residual o de combustible destilado causaría 3,114 y 3,206 toneladas de CO<sub>2</sub> respectivamente, mientras que una tonelada de LNG causaría 2,75 toneladas de CO<sub>2</sub> (12% menos emisiones que el combustible residual).

Las corporaciones marítimas que siguen las recomendaciones de los informes ESG para reportar su sostenibilidad medioambiental, deben especificar la distribución del uso de combustible de sus buques, detallando que porcentaje de la energía producida por procesos de combustión proviene de combustibles residuales, destilados o de bajo contenido en azufre.

La distribución de combustibles que se han asumido en este trabajo de investigación se detalla en las secciones 6.1.4.1 y 6.2.5.4, para la metodología OMI I y OMI II respectivamente.

La flota de buques LPG tiene una distribución de combustibles que sale directamente de la metodología aplicada, obteniéndose que la energía producida en estos buques anualmente proviene el 77% de la quema de combustibles residuales (IFO) y el 23% de la quema de combustibles residuales (diésel o gasóleo marino).

La flota de buques LNG tiene una distribución del combustible más compleja dado que se introduce un tercer combustible, el LNG. También aumenta la complejidad en la distribución de combustibles debido a los distintivos tipos de sistemas de propulsión y de generación de energía auxiliar que nos encontramos en la flota de buques LNG.

En ese trabajo de investigación, se consideran los consumos de combustible de los motores principales, de los motores auxiliares y de las calderas auxiliares. Hay que mencionar que, en la OMI II, se considera también el consumo de LNG producido por las unidades de quema de LNG (GCU), ya que, aunque estas unidades no producen ninguna energía utilizable a bordo, sí que son responsable de una parte de las emisiones. En este trabajo de investigación se asume que sólo los buques con sistemas de propulsión G4 y G2 tienen GCU instaladas a bordo.

De manera agregada para la flota de LNG, se ha obtenido la siguiente distribución de combustible de la Tabla 290.

*Tabla 290 Distribución de combustible agregado para la flota de LNG.*

| Flota | OMI I |      |       | OMI II |      |       |
|-------|-------|------|-------|--------|------|-------|
|       | RO    | DO   | LNG   | RO     | DO   | LNG   |
| LNG   | 26,5% | 4,3% | 69,2% | 27,8%  | 1,0% | 71,2% |

Fuente: Elaboración propia.

RO: Combustible residual. DO: combustible destilado. LNG combustible LNG

Analizando la flota de buques LNG de manera más desagregada, atendiendo al tamaño de los buques y la distribución de combustible para cada grupo de tamaño se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 291.

Tabla 291 Distribución de combustible para los buques LNG según su tamaño.

| Toneladas de Peso Muerto (TPM) | OMI I |       |       | OMI II |      |       |
|--------------------------------|-------|-------|-------|--------|------|-------|
|                                | RO    | DO    | LNG   | RO     | DO   | LNG   |
| TPM < 75.000                   | 21,5% | 2,5%  | 76,0% | 22,5%  | 2,9% | 76,8% |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000          | 21,6% | 2,4%  | 76,0% | 21,2%  | 3,2% | 78,1% |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000         | 23,1% | 2,9%  | 74,0% | 21,3%  | 6,0% | 77,4% |
| TPM ≥ 100.000                  | 75,2% | 22,7% | 2,0%  | 97,2%  | 1,2% | 1,7%  |

Fuente: Elaboración propia.

RO: Combustible residual. DO: combustible destilado. LNG combustible LNG

Los buques LNG de mayor tamaño consumen un porcentaje de LNG muy reducido comparado con los otros grupos de tamaño, esto es debido a que los buques que predominan estos grupos son buques con sistemas de propulsión compuestos por motores diésel de dos tiempos, los cuales no usan LNG como combustible, aunque hay que mencionar que algunos de estos buques están en proceso de remotorización, donde convertirán los motores diésel de dos tiempos existentes a bordo en motores duales de dos tiempos con inyección de gas.

Comparando los resultados obtenidos aplicando la metodología OMI I y OMI II, se ve que hay ligeras variaciones en la distribución de combustible.

Analizando la distribución del combustible según el año de construcción de los buques LNG, se obtienen los resultados mostrados en la Tabla 292.

Tabla 292 Distribución de combustible para los buques LNG según su año de construcción.

| Grupo de Edad (A) | OMI I |      |       | OMI II |      |       |
|-------------------|-------|------|-------|--------|------|-------|
|                   | RO    | DO   | LNG   | RO     | DO   | LNG   |
| A ≤ 5             | 23,4% | 3,0% | 73,6% | 21,7%  | 6,3% | 76,8% |
| 5 < A ≤ 10        | 22,6% | 2,6% | 74,8% | 18,6%  | 5,7% | 80,3% |
| 10 < A ≤ 15       | 36,2% | 8,0% | 55,8% | 41,7%  | 2,1% | 57,4% |
| 15 < A ≤ 20       | 21,3% | 2,4% | 76,3% | 22,4%  | 2,4% | 77,0% |
| A > 20            | 21,2% | 2,4% | 76,4% | 22,5%  | 2,3% | 77,0% |

Fuente: Elaboración propia.

RO: Combustible residual. DO: combustible destilado. LNG combustible LNG

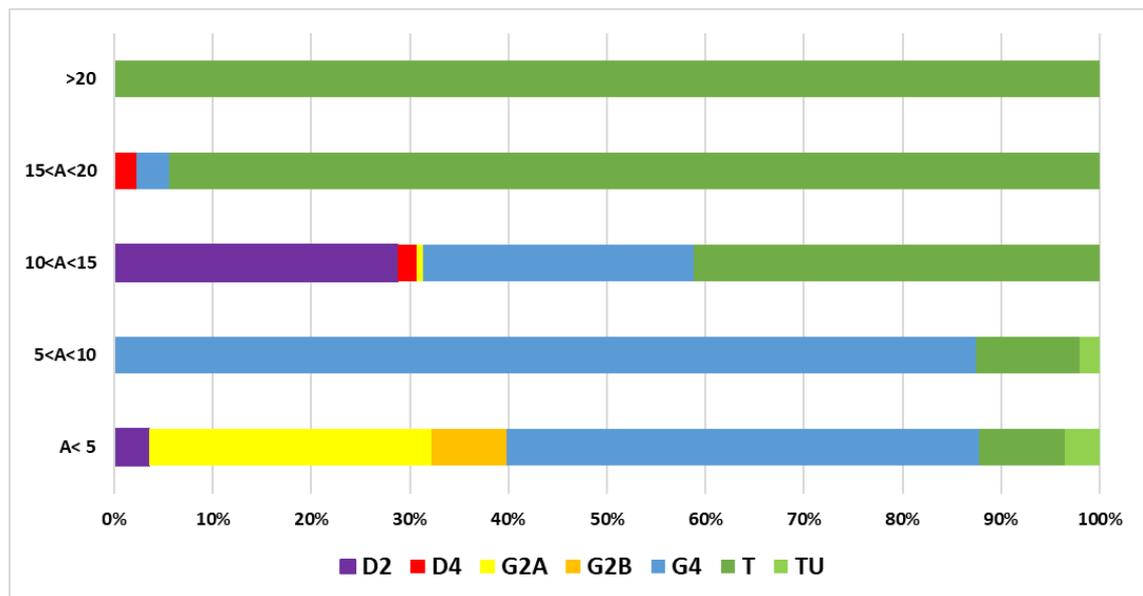
Un factor que tiene influencia en la distribución de combustible cuando se considera la edad de los buques, es la tecnología predominante para la propulsión de los buques cuando se proyectaron los buques. Los buques LNG construidos hasta 2010, la tecnología predominante como sistema de propulsión fue la planta de vapor con turbinas como motor principal. De 2005 al 2015, empieza a verse un cambio en la preferencia sistemas de propulsión, ganando importancia los buques LNG con sistemas diésel-eléctricos (con motores duales de cuatro tiempos). Y se vuelve a ver otro cambio en la preferencia de sistemas de propulsión en los buques construidos después de 2015, donde los diésel-eléctricos se contabilizan por el 41% de los

buques construidos y los motores duales de dos tiempos llegan al 44% del total de los buques construidos en los últimos 5 años.

Comparando los resultados obtenidos aplicando la metodología OMI I y OMI II, se ven pequeñas variaciones en la distribución de combustible, siendo algo más notables los buques construidos después del año 2010.

Continuando con el análisis del efecto del sistema de propulsión seleccionado en los buques LNG, se obtiene la siguiente distribución que se muestra en la Tabla 293 según el tipo de propulsión instalado a bordo.

Gráfica 92 Distribución de los tipos de sistemas de propulsión en la flota de buques LNG según grupo de edad.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 293 Distribución de combustible para los buques LNG según el tipo de motor principal instalado

| Tipo de motor | OMI I |       |       | OMI II |       |       |
|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
|               | RO    | DO    | LNG   | RO     | DO    | LNG   |
| D2            | 76,8% | 23,2% | 0,0%  | 98,9%  | 1,1%  | 0,0%  |
| D4            | 76,7% | 23,3% | 0,0%  | 77,6%  | 22,4% | 0,0%  |
| G2A           | 21,2% | 2,4%  | 76,4% | 21,1%  | 12,3% | 75,9% |
| G2B           | 21,8% | 2,5%  | 75,7% | 16,4%  | 8,2%  | 82,2% |
| G4            | 22,8% | 2,6%  | 74,6% | 17,9%  | 6,5%  | 80,9% |
| T             | 21,2% | 2,4%  | 76,4% | 22,5%  | 2,3%  | 77,0% |
| TU            | 21,2% | 2,4%  | 76,4% | 22,4%  | 2,3%  | 77,1% |

Fuente: Elaboración propia.

RO: Combustible residual. DO: combustible destilado. LNG combustible LNG

Se puede observar que en el momento en que hay disponibles sistemas a bordo (motores de combustión interna y calderas) que pueden emplear el LNG como combustible (G2A, G2B, G4, T y TU), la distribución del combustible claramente tiende a priorizar el consumo de este combustible en detrimento de combustibles residuales o destilados.

Comparando los resultados obtenidos aplicando las metodologías OMI I y OMI II, se ven pequeñas variaciones en la distribución de combustible, siendo algo más notables los buques con sistemas de propulsión compuestos de motores diésel de dos tiempos.

Como se ha mencionado anteriormente, los buques LPG se asume una distribución de combustible constante de 77% de combustibles residuales y un 23% combustibles destilados, así que la distribución de combustible para los buques LPG se mantiene 77 - 23 (RO - DO) en todos los grupos de banderas.

A continuación, se analiza la distribución de los combustibles según la bandera de registro de los buques LNG (Tabla 294).

Tabla 294 Distribución de combustible para los buques LNG según el grupo de bandera de registro.

| Grupos de Banderas | OMI I |      |       | OMI II |      |       |
|--------------------|-------|------|-------|--------|------|-------|
|                    | RO    | DO   | LNG   | RO     | DO   | LNG   |
| EU15               | 22,1% | 2,5% | 75,4% | 19,8%  | 6,0% | 78,9% |
| RA                 | 28,9% | 5,2% | 65,9% | 31,3%  | 3,0% | 67,7% |
| RM                 | 23,6% | 3,2% | 73,2% | 23,2%  | 3,9% | 75,8% |
| ROCDE              | 21,7% | 2,6% | 75,7% | 22,5%  | 3,1% | 76,7% |

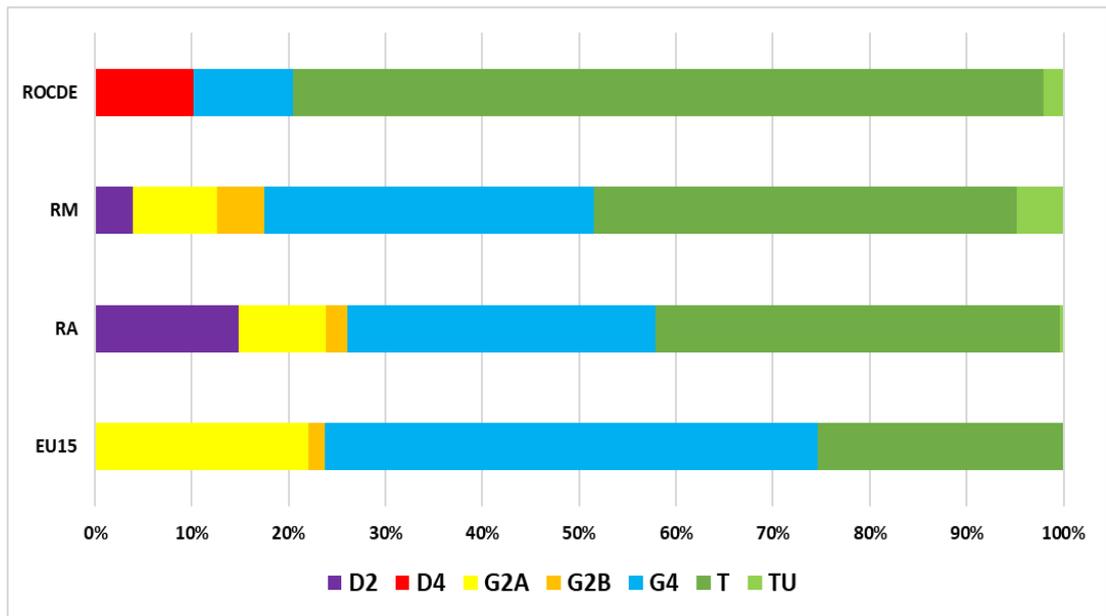
Fuente: Elaboración propia.

RO: Combustible residual. DO: combustible destilado. LNG combustible LNG

Los buques registrados en el grupo de ROCDE son los que menos combustible residual consume y más combustible LNG consume, según la metodología OMI I. Según la metodología OMI II, los buques registrados en el grupo EU15 son los que menos combustible residual consumen y más combustible LNG consumen.

La distribución de consumo de combustible según el grupo de bandera de registro, al igual que ocurre para el año de construcción de los buques, es influenciada por el tipo de propulsión que predomina en cada grupo. La distribución de cada tipo de motor principal en cada grupo de bandera se muestra en la Gráfica 92.

Gráfica 93 Porcentaje de los distintos tipos de sistemas de propulsión instalados en los buques LNG según el grupo de bandera de registro.



Fuente: Elaboración propia.

#### 11.4.1. Tiempo de navegación en zonas ECA

El impacto ecológico en los informes ESG se analiza a partir del análisis del tiempo de operación de los buques dentro de zonas ecológicamente protegidas, tales como las zonas con emisiones atmosféricas controladas.

Los buques navegan en zonas especiales donde las emisiones a la atmósfera son controladas. Las zonas de control de emisiones más comunes son las que limitan las emisiones de azufre, conocidas como zonas ECA (Zona de emisiones controladas o en inglés *Emission Control Area*), en estas zonas, los buques se ven obligados a utilizar combustibles con un bajo contenido de azufre (con un contenido menor o igual al 0,1% de azufre), esto son los combustibles destilados para motores diésel convencionales y calderas convencionales, o en caso de los buques que usen motores duales o plantas de vapor donde se consuma LNG como combustible, estos normalmente usan una distribución de combustible destilado (la mínima cantidad necesaria) y de LNG.

Otros contaminantes que son también controlados en estas zonas son las emisiones de NO<sub>x</sub> y Materia particulada.

Figura 23 Distribución de las áreas SECA alrededor del mundo, las actuales y futuras



Fuente: International Maritime Organization, (2013).

A fecha de este trabajo de investigación y como muestra la Figura 23, las principales zonas de control de emisiones en el Mundo son:

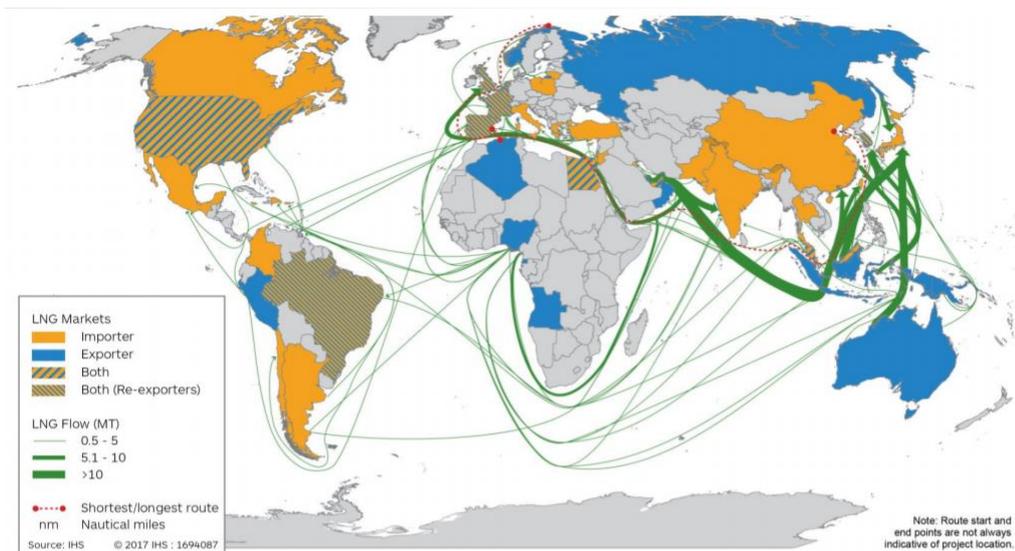
- **Mar Báltico** → Obligación de uso de combustibles con menos de 0,1% de azufre
- **Mar del Norte** → Obligación de uso de combustibles con menos de 0,1% de azufre
- **Estados Unidos de Norteamérica** → Restricción en contenido de SO<sub>x</sub>, restricción de emisiones de NO<sub>x</sub> y PM
- **Mar Caribe** → Restricción en contenido de SO<sub>x</sub> y de emisiones de NO<sub>x</sub> y PM
- **Unión Europea (incluyendo Turquía)** → Obligación de uso de combustibles con menos de 0,1% de azufre
- **China** → Tres zonas de control de emisiones: El delta del río Pearl, el delta del río Yangtze y la bahía Bohai. Restricciones en el uso de combustibles con contenidos de azufre de entre 0,1 y 0,5%
- **Taiwán** → Restricción en uso de combustibles con contenido de azufre menor al 0,5% para los buques que tengan como destino Kaohsiung.
- **Hong Kong** → Restricción en uso de combustibles con contenidos de azufre menores al 0,5%
- **Corea del Sur** → Obligación de uso de combustibles con menos de 0,1% de azufre

Para determinar el tiempo que los buques LNG y LPG navegan a través de zonas ECA, sería necesario tener información por cada buque y viaje realizado en un año. A esta información no

se ha podido tener acceso durante la realización de este trabajo de investigación de este trabajo de investigación.

Es muy complejo poder asumir el tiempo que los buques LNG y LPG navegan dentro de estas zonas de control de emisiones ya que las rutas de los buques son a través de todo el Mundo, cruzando casi todos los mares y océanos del Planeta (ver figuras 24 y 25).

Figura 24 Rutas de importación y exportación de LNG



Fuentes: IHS Markit, (2017) y IGU, (2018)

Figura 25 Rutas marítimas de buques gaseros durante el 2012.



Fuente: UCL Energy Institute, (2018)

Desafortunadamente, con la información disponible para la realización de este trabajo de investigación no se puede, de manera fiable ni aproximada, estimar el tiempo que pasa cada buque LNG o LPG navegando dentro de las zonas ECA.

## 11.5. Análisis de los indicadores energéticos de la flota de gaseros

Con el fin de determinar la eficiencia operacional de la flota de gaseros, se analizan los indicadores de que reflejan la eficiencia desde un punto de vista operativa de la flota de gaseros, donde se relaciona capacidades de carga (rendimiento operativo o comercial) con el impacto medioambiental del transporte (emisiones de CO<sub>2</sub>).

Los tres indicadores que son representativos a nivel de operacional son el EEXI y el impacto de medidas EPL, el AER y el EEOI.

Con el análisis de estos indicadores, se analiza el estado operacional de flota partiendo de las ecuaciones, parámetros y asunciones que se muestran en el capítulo 7.4.

### 11.5.1. Indicador de Eficiencia Energética Operacional

El Indicador de eficiencia energética operacional (EEOI) es una de las medidas operativas en el campo de la gestión de la eficiencia energética de los buques implementado por OMI. Junto con el SEEMP (*Ship Energy Efficiency Management Plan*), son dos parámetros importantes para optimizar y gestionar la energía a bordo en la actualidad. El índice EEOI se calcula a través de datos de viaje específicos del barco durante un periodo de tiempo, generalmente anual. El consumo de combustible a bordo de los consumidores principales, el tipo de combustible utilizado a bordo, el trabajo del transporte de la carga transportada en cada viaje y la distancia del viaje son parámetros específicos que sirven para calcular el valor EEOI, tal y como se detalla en el capítulo 7.4.1.

Se aplica la metodología detallada en el capítulo 7.4.1 sobre la base de datos de la flota de gaseros en servicio a fecha de 1 enero de 2020, y se van a mostrar los resultados del indicador EEOI aplicando OMI I y OMI II para cuantificar el consumo de combustible, debido a que, según el método empleado para cuantificar el consumo de combustible, variaran el resultado de las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, y en consecuencia, se van a comparar ambos resultados obtenidos.

Para este indicador, existe una base de datos publica donde se puede comprobar que valores de EEOI han sido reportados por los buques que operan en aguas europeas en el año 2019. Esta base de datos pertenece al organismo *European Maritime Safety Agency* (EMSA) que desarrollo la plataforma Thetis para que los buques sujetos a la Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo (regulación MRV).

Los buques gaseros que han reportado sus resultados en la plataforma Thetis tuvieron un EEOI medio anual de 16,9 gCO<sub>2</sub>/ milla y metro cúbico de carga para buques LNG, y 66,03 gCO<sub>2</sub>/milla y tonelada de carga para buques LPG.

Con el fin de poder emplear estos valores medios reportados por EMSA en 2019, el valor medio del EEOI para buques LPG se necesita convertirlo a gCO<sub>2</sub>/milla y metro cúbico de carga ya que la información que se tiene en la basa de datos de IHS Fairplay para cada buque son la capacidad de carga en metros cúbicos.

Aplicando la densidad media 0,65 kg/l de los gases licuados del petróleo más comunes (ver Tabla 8), el EEOI medio anual reportado por EMSA es de 101,6 gCO<sub>2</sub>/milla y metro cubico de carga, este valor se compara con los valores promedio de los buques LNG y LPG como se muestra en la Tabla 295.

Tabla 295 EEOI promedio de la flota de buques LPG y LNG.

| Tipo de Buque | OMI I | OMI II | EMSA  |
|---------------|-------|--------|-------|
| LNG           | 9,4   | 10,9   | 16,9  |
| LPG           | 52,8  | 65,6   | 101,6 |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub>/milla m<sup>3</sup>

Analizando el EEOI según el tamaño de los buques, la flota de buques LNG (Tabla 296) más eficiente, es decir con menor EEOI, corresponde con los buques de mayor tamaño (igual o superior a 100.000 toneladas de peso muerto).

El EEOI calculado para buques LNG de un tamaño inferior a 75.000 toneladas de peso muerto es superior al EEOI medio reportado por EMSA para los buques LNG, los demás tamaños tienen un EEOI calculado menor al promedio de EMSA.

Tabla 296 EEOI para la flota de buques LNG según el peso muerto.

| Toneladas de Peso Muerto (TPM) | EEOI  |        |
|--------------------------------|-------|--------|
|                                | OMI I | OMI II |
| TPM < 75.000                   | 17,7  | 19,7   |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000          | 9,1   | 10,5   |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000         | 7,1   | 8,6    |
| TPM ≥ 100.000                  | 5,5   | 7,0    |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub>/milla m<sup>3</sup>

Respecto a la flota de buques LPG (Tabla 297) más eficiente son los buques de mayor tamaño (igual o superior a 50.000 toneladas de peso muerto). Respecto a la flota de buques LPG, el EEOI calculado es inferior al promedio reportado por EMSA para todos los grupos de tamaños considerados (excepto para el grupo de TPM menor a 5.000 toneladas para el método OMI II).

Atendiendo al grupo de edad de los buques, es de esperar que los buques construidos más recientemente sean los más eficientes dado que tienen sistemas de propulsión más eficaces, así como cascos más optimizados y otros sistemas que ayudan a aumentar la eficiencia energética. Esto queda corroborado en la Tabla 298, donde se ve que los buques construidos después del 2015 tienen un EEOI más bajo que los buques construidos en años anteriores.

Tabla 297 EEOI para la flota de buques LPG según el peso muerto.

| Toneladas de Peso Muerto (TPM) | EEOI  |        |
|--------------------------------|-------|--------|
|                                | OMI I | OMI II |
| TPM < 5.000                    | 84,9  | 107,6  |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000           | 50,9  | 58,9   |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000          | 27,6  | 26,4   |
| TPM ≥ 50.000                   | 6,2   | 16,9   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub>/milla m<sup>3</sup>

Tabla 298 EEOI para la flota de gaseros según el año de construcción.

| Grupo de Edad (A) | EEOI       |        |            |        |
|-------------------|------------|--------|------------|--------|
|                   | Buques LNG |        | Buques LPG |        |
|                   | OMI I      | OMI II | OMI I      | OMI II |
| A ≤ 5             | 7,2        | 8,1    | 26,8       | 33,9   |
| 5 < A ≤ 10        | 9,2        | 11,6   | 45,5       | 54,5   |
| 10 < A ≤ 15       | 9,0        | 10,8   | 44,3       | 53,4   |
| 15 < A ≤ 20       | 12,4       | 15,5   | 47,5       | 58,8   |
| A > 20            | 12,0       | 11,8   | 78,9       | 99,2   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub>/milla m<sup>3</sup>

En cuanto a los sistemas de propulsión que se encuentran en los buques gaseros, en la flota de LNG son los motores duales de dos tiempos los que muestran un EEOI menor, mientras que, en la flota de LPG, los motores diésel de dos tiempos son los más eficientes.

Mirando los resultados de la Tabla 299, llama la atención el EEOI reportado para la flota de buques LNG con motores diésel de cuatro tiempos como sistema de propulsión. Es necesario mencionar que estos buques son sólo 5 buques en servicio y son de un tamaño pequeño, con tamaños de entre 1.781 a 2.528 toneladas de peso muerto, siendo este hecho un factor determinante para explicar ese EEOI tan elevado comparado con los otros sistemas de propulsión de los buques LNG.

Tabla 299 EEOI para la flota de gaseros según el sistema de propulsión.

| Tipo de motor | EEOI buques LNG |        | EEOI buques LPG |        |
|---------------|-----------------|--------|-----------------|--------|
|               | OMI I           | OMI II | OMI I           | OMI II |
| D2            | 5,5             | 6,9    | 31,0            | 37,5   |
| D4            | 56,4            | 65,9   | 87,1            | 109,9  |
| G2A           | 4,9             | 5,4    | -               | -      |
| G2B           | 5,9             | 8,7    | -               | -      |
| G4            | 9,5             | 11,5   | -               | -      |
| T             | 10,2            | 11,6   | -               | -      |
| TU            | 8,3             | 6,6    | -               | -      |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub>/milla m<sup>3</sup>

Los sistemas de propulsión en la flota de buques LNG dan EEOI inferiores al reportados por EMSA, con la excepción de los buques LNG con sistemas de propulsión con motores diésel de 4 tiempos, que como ya se ha mencionado anteriormente, son unos de los buques más pequeños dentro de la flota de buques LNG.

El EEOI obtenido para la flota de buques LPG es en general menor al EEOI promedio de EMSA, sólo los buques LPG con motores diésel de cuatro tiempos como sistema de propulsión, son superiores al valor EEOI de EMSA, cuando se aplica la metodología OMI II para el cálculo de consumo de combustible (109,9 vs. 101,6).

### 11.5.2. Relación anual de eficiencia de la flota de buques gaseros

La Relación de eficiencia media (AER) es un indicador que se emplea como una métrica de intensidad de carbono, utilizando los parámetros de emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por procesos de combustión, distancia navegada por cada buque anualmente y el tonelaje de peso muerto de diseño. Así mismo, el indicador AER se computa para todos los viajes que realiza cada barco en un año natural, tal como se muestra en el capítulo 7.4.2.

El indicador AER es menos preciso para estimar la intensidad de carbono de un barco que otras métricas comparándolo por ejemplo con el EEOI, ya que la carga real transportada por un barco es a menudo menor que su capacidad máxima y es común realizar viajes en lastre donde no se transporta ninguna carga a bordo, no quedando capturados según el método de cálculo del AER.

A pesar de su menor precisión, se analiza este indicador ya que es la métrica elegida por los Principios de Poseidón (The Poseidon Principles Association, 2019). Para estos, es esencial considerar la intensidad del carbono como una métrica para medir la alineación climática y actividad comercial. Para que los Principios de Poseidón se alineen con la OMI, se usa el indicador AER como métrica de intensidad de carbono.

Con el fin de tener una referencia sobre los valores del AER dentro de la industria marítima, se han encontrado los valores de AER para algunos sectores del transporte marítimo como buques graneleros y quimiqueros como se muestran a continuación.

Tabla 300 Valores AER para buques graneleros y quimiqueros.

| Tipo de buque                 | Peso Muerto   | AER (gCO <sub>2</sub> /milla TPM) |
|-------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Buques Graneleros             | <10.000       | 24,6                              |
|                               | 10000-34999   | 6,6                               |
|                               | 35000-59999   | 4,6                               |
|                               | 60000-99999   | 3,6                               |
|                               | 100000-199999 | 2,4                               |
|                               | ≥200000       | 2,3                               |
| Buques quimiqueros            | 0-4999        | 35,4                              |
|                               | 5000-9999     | 19,0                              |
|                               | 10000-19999   | 11,9                              |
|                               | >20000        | 6,5                               |
| Otros buques de carga líquida | -             | 97,6                              |

Fuente: Climate Bonds Standard, (2020)

Los valores que se obtiene para el indicador AER de la base de datos de la flota de gaseros en servicio a fecha de 1 enero de 2020, y se van a mostrar los resultados obtenidos aplicando la

metodología OMI I y OMI II para cuantificar el consumo de combustible, debido a que, según el método empleado para cuantificar el consumo de combustible, variaran el resultado de las emisiones atmosféricas de CO<sub>2</sub>, y, en consecuencia, se van a comparar ambos los resultados obtenidos.

Analizando los resultados según el tamaño de los buques atendiendo a las toneladas de peso muerto, los buques LNG (Tabla 301) con menor AER, y por lo tanto con menor intensidad de carbono son los que están en el grupo de peso muerto de igual o superior a 100.000 toneladas de peso muerto, es decir los buques LNG de mayor tamaño. Teniendo la mayor intensidad de carbono en los buques LNG más pequeños. Los valores obtenidos al comparar las dos metodologías son similares para todos los distintos grupos de peso muerto para los buques LNG.

*Tabla 301 AER para la flota de buques LNG según grupo de peso muerto.*

| Peso Muerto (TPM)      | AER (gCO <sub>2</sub> /milla tonelada peso muerto) |        |
|------------------------|--|--------|
|                        | OMI I  | OMI II |
| TPM < 75.000           | 27,3   | 24,6   |
| 75.000 ≤ TPM < 85.000  | 15,3   | 15,2   |
| 85.000 ≤ TPM < 100.000 | 11,9   | 12,5   |
| TPM ≥ 100.000          | 9,6  | 10,8   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub> / milla tonelada de peso muerto

Para la flota de buques LPG (Tabla 302), el menor AER se observa, al igual que ocurre en los buques LNG, en los buques de mayor tamaño, mientras que el mayor AER se observa en los buques LPG de menor tamaño.

*Tabla 302 AER para la flota de buques LPG según grupo de peso muerto.*

| Peso Muerto (TPM)     | AER   |        |
|-----------------------|-------|--------|
|                       | OMI I | OMI II |
| TPM < 5.000           | 71,7  | 92,5   |
| 5.000 ≤ TPM < 10.000  | 36,9  | 44,0   |
| 10.000 ≤ TPM < 50.000 | 21,6  | 22,4   |
| TPM ≥ 50.000          | 7,6   | 19,6   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub> / milla tonelada de peso muerto

Analizando el indicador AER según el grupo de edad (Tabla 303), los buques gaseros más modernos tienen AER más bajos, como era de esperar, y de manera general, cuanto más antiguos son los buques, mayor AER tienen.

Tabla 303 AER para la flota de gaseros según su año de construcción.

| Año de construcción | AER        |        |            |        |
|---------------------|------------|--------|------------|--------|
|                     | Buques LNG |        | Buques LPG |        |
|                     | OMI I      | OMI II | OMI I      | OMI II |
| A ≤ 5               | 12,2       | 12,0   | 24,0       | 32,4   |
| 5 < A ≤ 10          | 14,9       | 15,9   | 36,3       | 45,6   |
| 10 < A ≤ 15         | 15,0       | 15,3   | 35,0       | 44,0   |
| 15 < A ≤ 20         | 19,4       | 20,0   | 39,7       | 50,2   |
| A > 20              | 20,1       | 17,0   | 65,3       | 84,1   |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub> / milla tonelada de peso muerto

Tabla 304 AER para la flota de buques gaseros según el sistema de propulsión instalado a bordo.

| Tipo de motor | AER buques LNG |        | AER buques LPG |        |
|---------------|----------------|--------|----------------|--------|
|               | OMI I          | OMI II | OMI I          | OMI II |
| D2            | 9,6            | 10,6   | 24,3           | 31,3   |
| D4            | 72,4           | 66,3   | 74,0           | 95,2   |
| G2A           | 8,3            | 8,4    | -              | -      |
| G2B           | 9,8            | 11,8   | -              | -      |
| G4            | 15,7           | 16,0   | -              | -      |
| T             | 17,2           | 16,5   | -              | -      |
| TU            | 13,7           | 10,1   | -              | -      |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: gCO<sub>2</sub> / milla tonelada de peso muerto

Considerando el tipo de motor principal instalado a bordo (Tabla 304), en la flota de LNG los buques con motores duales de dos tiempos son los que menor AER tienen, y en la flota de LPG los buques con motores de dos tiempos diésel son los que menor AER tienen, confirmando que los motores de dos tiempos son los más eficientes, y dentro de los motores de dos tiempos, los que otorgan la flexibilidad de emplear combustibles líquidos (RO y DO) y gaseosos (LNG) al mismo tiempo, son aún más eficientes reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Los buques LNG con tipo de motor D4 son los buques LNG de menor tamaño, influyendo en que sean los tengan mayor AER.

Para los buques LPG, también son los buques con motores diésel de cuatro tiempos los que tienen mayor AER. El tamaño de estos buques también es un factor crucial aquí. De media, los buques LPG con motores de dos tiempos diésel tiene un tamaño de 26.719 toneladas de peso muerto, mientras que los buques LPG con motores de cuatro tiempos diésel tiene un tamaño medio de 2.836 toneladas de peso muerto.



## **12. ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD SOCIOECONÓMICA Y MEDIOAMBIENTAL DE LA FLOTA DE GASEROS**

En este capítulo se va a mostrar primero el coste total realizado por los buques gaseros en servicio en el año 2019.

Además, se van a presentar los resultados de los efectos de la flota de buques gaseros sobre los 10 sectores de la economía mundial para el año 2019, es decir se impactan los distintos gastos de los buques gaseros en cada una de las ramas de actividad, dando información sobre cuál es el efecto de la actividad de buques gaseros a nivel mundial sobre las macromagnitudes más relevantes (producción, valor añadido bruto, empleo y emisiones atmosféricas).

Por último, se muestran los multiplicadores de la flota de gaseros sobre la economía mundial, mostrando el efecto multiplicador del gasto producido por la actividad de los buques gaseros en los sectores de la economía mundial.

### **12.1. Coste total de la flota mundial de gaseros**

Tal y como se menciona en el capítulo 8, para realizar el análisis del impacto socioeconómico y medioambiental, es necesario calcular el gasto que realiza la flota de buques gaseros en servicio en el año 2019.

Se han determinado 8 categorías de costes (ver Tabla 305), y se ha calculado el coste total para la base de datos obtenida de OMI I y de OMI II.

Los resultados de las bases de datos difieren en el coste que realiza la flota de gaseros en la compra de combustibles como se ve en la Tabla 305, ya que la cantidad de cada tipo combustible empleado por la flota de gaseros en 2019 es distinta en cada una de las bases de datos.

Los resultados de OMI I dicen que la flota mundial de gaseros en servicio en el año 2019 tuvo un coste total para ese año de 29.723 millones de dólares americanos, donde la flota de buques LNG realizó la mayor cantidad de los costes con el 60% del coste total. Mientras que los resultados de OMI II estiman que la flota mundial de gaseros en servicio en el año 2019 tuvo un coste para ese año de 30.348 millones de dólares americanos, donde la flota de buques LNG es responsable de la mayoría de los costes con el 55% del coste total.

El precio de adquisición (amortización) es el mayor coste que tienen anualmente cada buque gasero, siendo para OMI I el 51% de los costes totales, diferenciando entre buques LPG y LNG, en los buques LNG, este coste supone el 56% y para los buques LPG supone el 45%. Para OMI

El 50% del coste total es causado por la amortización anual de los buques, siendo en los buques LNG, el 59% y para los buques LPG el 39% del coste total.

Tabla 305 Costes de la flota de gaseros en servicio en el año 2019.

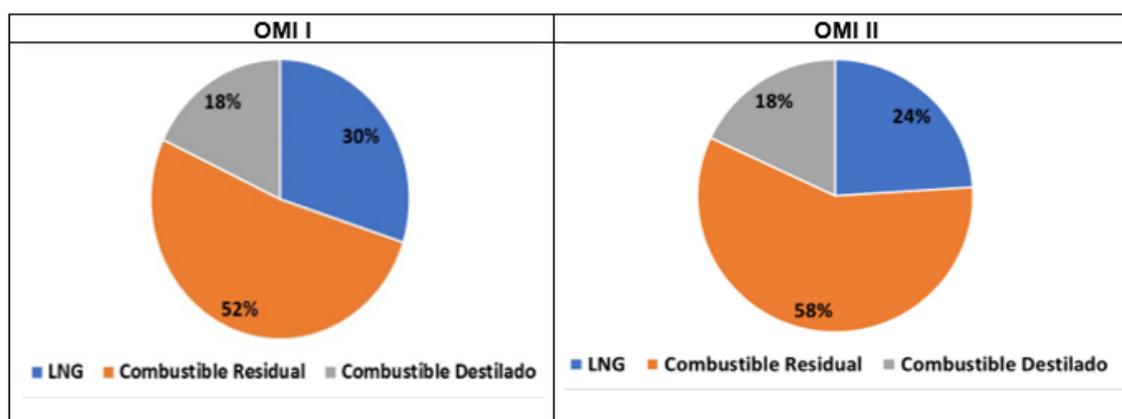
| Costes                               | OMI I                 |            | OMI II                |            | diferencia  |
|--------------------------------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------|-------------|
|                                      | Flota Gaseros         | %          | Flota Gaseros         | %          |             |
| Precio de adquisición (amortización) | 15.223.018.544        | 51,22      | 15.223.018.544        | 50,16      | 0           |
| Coste total combustible              | 8.508.702.400         | 28,63      | 9.133.695.995         | 30,10      | 624.993.595 |
| Coste tripulación                    | 3.170.305.270         | 10,67      | 3.170.305.270         | 10,45      | 0           |
| Coste de pertrechos                  | 405.337.842           | 1,36       | 405.337.842           | 1,34       | 0           |
| Costes lubricantes                   | 200.326.662           | 0,67       | 200.326.662           | 0,66       | 0           |
| Costes de M y R                      | 1.171.599.049         | 3,94       | 1.171.599.049         | 3,86       | 0           |
| Costes seguros                       | 395.408.858           | 1,33       | 395.408.858           | 1,30       | 0           |
| Costes generales                     | 648.815.316           | 2,18       | 648.815.316           | 2,14       | 0           |
| <b>Gasto total</b>                   | <b>29.723.513.941</b> | <b>100</b> | <b>30.348.507.536</b> | <b>100</b> |             |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: dólares americanos

El segundo mayor coste son los costes de combustible, que agrupan los costes de los tres tipos de combustibles que son empelados a bordo: residual, destilado o LNG. Hay que recordar que, en esta tesis, los buques LPG solo consumen combustibles residuales y destilados.

La distribución de cada tipo de combustible en el coste total asignado a todos los combustibles se muestra en la Gráfica 93.

Gráfica 94 Participación de cada tipo de combustible en el coste total de combustible



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver en las gráficas anteriores, los combustibles residuales son los que más coste anual representan y los combustibles destilados los que menor coste aportan al coste total, esto tiene su razón en que las empresas tratan de minimizar el uso del combustible más caro, que para el año que está siendo analizado son los combustibles destilados.

En cuanto al coste social, es decir, el coste de las tripulaciones (salarios y viajes), este coste se sitúa en tercera posición, siendo el responsable del 11% del coste total anual en la base de datos OMI I (8% para buques LNG y 14% para buques LPG), y siendo igualmente el responsable del 11% del coste total anual en la base de datos OMI II (9% para buques LNG y 12% para buques LPG).

Los dos costes que originan la menor parte del coste total son los costes en lubricantes y seguros tanto para OMI I como OMI II, siendo del 0,7% y 1,3% respectivamente.

## 12.2. Multiplicadores sobre la producción mundial

En este capítulo se muestran los resultados de los multiplicadores obtenidos a partir de los costes totales producidos por la actividad de la flota de gaseros sobre la producción mundial.

Como se ha explicado en el capítulo 8.1.4, los efectos multiplicadores de la actividad de los buques gaseros sobre las ramas de la economía dependen del coste total de los buques para desempeñar su actividad, luego los multiplicadores que se obtienen son diferentes según se aplique la base de datos de OMI I u OMI II.

*Tabla 306 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre la producción mundial*

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I         |               | OMI II        |               |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                   | Flota LNG     | Flota LPG     | Flota LNG     | Flota LPG     |
| Agricultura                       | 0,2851        | 0,2807        | 0,2748        | 0,3008        |
| Producción energía                | 0,5335        | 0,5343        | 0,4656        | 0,6635        |
| Bienes Intermedios                | 0,5493        | 0,5222        | 0,5632        | 0,499         |
| Bienes de Equipo                  | 1,0495        | 0,8712        | 1,1051        | 0,7874        |
| Bienes de Consumo                 | 0,1227        | 0,132         | 0,1244        | 0,1276        |
| Construcción                      | 0,0331        | 0,0332        | 0,0322        | 0,0349        |
| Transporte Marítimo               | 0,1048        | 0,1728        | 0,1108        | 0,1528        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0,1148        | 0,1229        | 0,1161        | 0,1195        |
| Otros Serv. de Mercado            | 0,5264        | 0,5492        | 0,533         | 0,5338        |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0,0714        | 0,0726        | 0,0715        | 0,0724        |
| <b>Total</b>                      | <b>3,3906</b> | <b>3,2911</b> | <b>3,3968</b> | <b>3,2917</b> |

Fuente: Elaboración propia.

Los multiplicadores obtenidos (Tabla 306) indican que, por cada dólar gastado por la flota, se produce un incremento de la producción mundial de más de 3 dólares. Siendo el incremento de la producción ligeramente superior en los buques LNG que en los buques LPG.

El sector más afectado es el de bienes de equipo, con multiplicador superior a 1; le siguen un grupo de sectores con multiplicadores próximos a 0,5 como producción de energía, bienes intermedios y otros servicios de mercado.

Los sectores menos afectados, que presentan los menores multiplicadores son la construcción y otros servicios de no mercado.

### 12.3. Multiplicadores sobre el valor añadido bruto

En este capítulo se muestran los multiplicadores del valor añadido generado por el gasto de la flota de gaseros recogidos en la Tabla 307.

Los multiplicadores indican que, por cada dólar gastado por la flota de gaseros, se produce un incremento del valor añadido de 1,22 dólares, siendo ligeramente superior en LNG que en LPG.

El sector más afectado es el de otros servicios de mercado, en segundo lugar, el de bienes de equipo, y les siguen producción de energía, agricultura y bienes intermedios. El resto de los sectores tienen un multiplicador del valor añadido inferior al 0,1. Los menores multiplicadores los presenta el sector construcción.

*Tabla 307 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre el VAB mundial*

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I         |               | OMI II        |               |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                   | Flota LNG     | Flota LPG     | Flota LNG     | Flota LPG     |
| Agricultura                       | 0,1623        | 0,1598        | 0,1564        | 0,1712        |
| Producción energía                | 0,1682        | 0,1684        | 0,1468        | 0,2092        |
| Bienes Intermedios                | 0,1243        | 0,1182        | 0,1275        | 0,113         |
| Bienes de Equipo                  | 0,2731        | 0,2267        | 0,2876        | 0,2049        |
| Bienes de Consumo                 | 0,0324        | 0,0349        | 0,0329        | 0,0337        |
| Construcción                      | 0,0115        | 0,0115        | 0,0112        | 0,0121        |
| Transporte Marítimo               | 0,0369        | 0,0608        | 0,039         | 0,0538        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0,0532        | 0,057         | 0,0538        | 0,0554        |
| Otros Serv. de Mercado            | 0,3188        | 0,3326        | 0,3228        | 0,3233        |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0,0453        | 0,046         | 0,0453        | 0,0459        |
| <b>Total</b>                      | <b>1,2259</b> | <b>1,2159</b> | <b>1,2232</b> | <b>1,2224</b> |

Fuente: Elaboración propia.

### 12.4. Multiplicadores sobre el empleo mundial

En este capítulo se muestran los multiplicadores del empleo producido por el gasto de la flota de gaseros como se recogen en la Tabla 308.

Los multiplicadores indican que, por cada dólar gastado por la flota de gaseros, requerirían alrededor de 0,046 empleos adicionales a nivel mundial.

El sector más afectado es el de agricultura, en segundo lugar, el de otros servicios de mercado, y les siguen bienes de equipos, bienes intermedios, producción de energía y resto de transporte y comunicaciones. El resto de los sectores tienen un multiplicador del empleo inferior al 0,02. Los menores multiplicadores los presenta el sector construcción y transporte marítimo.

*Tabla 308 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre el Empleo mundial*

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I         |               | OMI II        |               |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                   | Flota LNG     | Flota LPG     | Flota LNG     | Flota LPG     |
| Agricultura                       | 0,0156        | 0,0153        | 0,0150        | 0,0164        |
| Producción energía                | 0,0027        | 0,0027        | 0,0024        | 0,0034        |
| Bienes Intermedios                | 0,0041        | 0,0039        | 0,0042        | 0,0038        |
| Bienes de Equipo                  | 0,0049        | 0,0041        | 0,0052        | 0,0037        |
| Bienes de Consumo                 | 0,0017        | 0,0019        | 0,0018        | 0,0018        |
| Construcción                      | 0,0006        | 0,0006        | 0,0006        | 0,0006        |
| Transporte Marítimo               | 0,0005        | 0,0008        | 0,0005        | 0,0007        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0,0026        | 0,0028        | 0,0027        | 0,0027        |
| Otros Serv. de Mercado            | 0,0121        | 0,0126        | 0,0122        | 0,0122        |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0,0015        | 0,0016        | 0,0015        | 0,0016        |
| <b>Total</b>                      | <b>0,0464</b> | <b>0,0463</b> | <b>0,0460</b> | <b>0,0469</b> |

Fuente: Elaboración propia.

## 12.5. Multiplicadores sobre las emisiones atmosféricas mundiales

En este capítulo se muestran los multiplicadores de las emisiones de CO<sub>2</sub> producido por el gasto de la flota de gaseros se muestran en la Tabla 309.

Los multiplicadores indican que, por cada dólar gastado por la flota de gaseros, se producirán alrededor de 0,0016 toneladas de CO<sub>2</sub> a nivel mundial.

El sector más afectado es el de producción de energía con un multiplicador aproximado a 0,001, en segundo lugar, se encuentra el transporte marítimo con multiplicadores ligeramente inferiores a 0,001. El resto de los sectores tienen un multiplicador del empleo inferior al 0,0001. Los menores multiplicadores los presenta el sector construcción.

Además del CO<sub>2</sub>, también se analiza el efecto multiplicador de la flota de buques gaseros sobre otros contaminantes como son el CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, CO y NMVOC. Los efectos multiplicadores de la actividad de los gaseros sobre estos contaminantes son bastante menores a los producidos sobre el CO. Los multiplicadores totales para todos los sectores de la economía tratados en esta tesis se muestran en la Tabla 310.

Tabla 309 Multiplicadores producidos por la actividad de los buques gaseros sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                |                      | OMI II               |                      |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                   | Flota LNG            | Flota LPG            | Flota LNG            | Flota LPG            |
| Agricultura                       | $4,80 \cdot 10^{-5}$ | $4,72 \cdot 10^{-5}$ | $4,63 \cdot 10^{-5}$ | $5,06 \cdot 10^{-5}$ |
| Producción energía                | $1,11 \cdot 10^{-3}$ | $1,11 \cdot 10^{-3}$ | $9,71 \cdot 10^{-4}$ | $1,38 \cdot 10^{-3}$ |
| Bienes Intermedios                | $1,72 \cdot 10^{-4}$ | $1,64 \cdot 10^{-4}$ | $1,77 \cdot 10^{-4}$ | $1,57 \cdot 10^{-4}$ |
| Bienes de Equipo                  | $3,42 \cdot 10^{-5}$ | $2,84 \cdot 10^{-5}$ | $3,61 \cdot 10^{-5}$ | $2,57 \cdot 10^{-5}$ |
| Bienes de Consumo                 | $7,77 \cdot 10^{-6}$ | $8,36 \cdot 10^{-6}$ | $7,88 \cdot 10^{-6}$ | $8,09 \cdot 10^{-6}$ |
| Construcción                      | $9,45 \cdot 10^{-7}$ | $9,46 \cdot 10^{-7}$ | $9,19 \cdot 10^{-7}$ | $9,95 \cdot 10^{-7}$ |
| Transporte Marítimo               | $1,13 \cdot 10^{-4}$ | $1,87 \cdot 10^{-4}$ | $1,20 \cdot 10^{-4}$ | $1,65 \cdot 10^{-4}$ |
| Resto Transporte y Comunicaciones | $3,77 \cdot 10^{-5}$ | $4,04 \cdot 10^{-5}$ | $3,82 \cdot 10^{-5}$ | $3,93 \cdot 10^{-5}$ |
| Otros Serv. de Mercado            | $1,19 \cdot 10^{-5}$ | $1,4 \cdot 10^{-5}$  | $1,20 \cdot 10^{-5}$ | $1,20 \cdot 10^{-5}$ |
| Otros Serv. de no Mercado         | $3,79 \cdot 10^{-6}$ | $3,86 \cdot 10^{-6}$ | $3,79 \cdot 10^{-6}$ | $3,84 \cdot 10^{-6}$ |
| <b>Total</b>                      | <b>0,0015</b>        | <b>0,0016</b>        | <b>0,0014</b>        | <b>0,0018</b>        |

Fuente: Elaboración propia.

 Tabla 310 Multiplicadores totales de la flota de gaseros sobre los contaminantes CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, CO y NMVOC

| CONTAMINANTES    | OMI I                |                      | OMI II               |                      |
|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                  | Flota LNG            | Flota LPG            | Flota LNG            | Flota LPG            |
| CH <sub>4</sub>  | $7,76 \cdot 10^{-6}$ | $7,68 \cdot 10^{-6}$ | $7,41 \cdot 10^{-6}$ | $8,34 \cdot 10^{-6}$ |
| N <sub>2</sub> O | $3,38 \cdot 10^{-7}$ | $3,35 \cdot 10^{-7}$ | $3,26 \cdot 10^{-7}$ | $3,59 \cdot 10^{-7}$ |
| NO <sub>x</sub>  | $4,96 \cdot 10^{-6}$ | $5,75 \cdot 10^{-6}$ | $4,78 \cdot 10^{-6}$ | $5,99 \cdot 10^{-6}$ |
| SO <sub>x</sub>  | $6,70 \cdot 10^{-6}$ | $6,95 \cdot 10^{-6}$ | $6,14 \cdot 10^{-6}$ | $7,98 \cdot 10^{-6}$ |
| SO <sub>2</sub>  | $6,56 \cdot 10^{-6}$ | $6,81 \cdot 10^{-6}$ | $6,02 \cdot 10^{-6}$ | $7,82 \cdot 10^{-6}$ |
| SO <sub>4</sub>  | $1,34 \cdot 10^{-7}$ | $1,39 \cdot 10^{-7}$ | $1,23 \cdot 10^{-7}$ | $1,60 \cdot 10^{-7}$ |
| CO               | $1,41 \cdot 10^{-5}$ | $1,50 \cdot 10^{-5}$ | $1,41 \cdot 10^{-5}$ | $1,49 \cdot 10^{-5}$ |
| NMVOC            | $3,33 \cdot 10^{-6}$ | $3,36 \cdot 10^{-6}$ | $3,36 \cdot 10^{-6}$ | $3,31 \cdot 10^{-6}$ |

Fuente: Elaboración propia.

## 12.6. Efectos sobre la Producción mundial

Los resultados que en este apartado muestran el impacto que tiene la actividad de la flota de gaseros sobre la producción mundial. En concreto, los gastos se refieren a la flota de gaseros en servicio en el año 2019.

Se realiza un análisis del impacto sobre la producción mundial según el tipo de buque gasero y según el grupo de banderas de registro, aplicando la base de datos de OMI I y OMI II. La diferencia en los resultados entre ambas bases de datos radica en el coste de combustible, que es el elemento diferenciador entre las dos bases de datos (ver Tabla 305).

Los efectos totales (Tabla 311), que corresponden a la suma de los efectos directos e indirectos, sobre la producción mundial muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto ligeramente superior a los 100 mil millones dólares. Siendo el efecto sobre la producción superior en los buques LNG que en los buques LPG, estando distribuido al 60:40.

El sector más afectado es el de bienes de equipo, le siguen un grupo de sectores como son la producción de energía, bienes intermedios y otros servicios de mercado. Los sectores menos afectados, que presentan los menores efectos son la construcción y otros servicios de no mercado.

Tabla 311 Efectos totales de la flota de gaseros sobre la producción mundial

| SECTORES ECONÓMICOS                      | OMI I         |               |                | OMI II        |               |                |
|--|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
|  | Flota LNG     | Flota LPG     | Flota Gaseros  | Flota LNG     | Flota LPG     | Flota Gaseros  |
| <i>Agricultura</i>                       | 5.208         | 3.483         | 8.690          | 4.712         | 4.263         | 8.975          |
| <i>Producción energía</i>                | 9.744         | 6.629         | 16.373         | 7.983         | 9.405         | 17.388         |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 10.033        | 6.479         | 16.512         | 9.657         | 7.072         | 16.729         |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 19.170        | 10.810        | 29.980         | 18.949        | 11.159        | 30.108         |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 2.242         | 1.638         | 3.880          | 2.133         | 1.809         | 3.942          |
| <i>Construcción</i>                      | 605           | 412           | 1.017          | 553           | 495           | 1.047          |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 1.914         | 2.144         | 4.058          | 1.900         | 2.166         | 4.066          |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 2.096         | 1.525         | 3.622          | 1.990         | 1.693         | 3.683          |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 9.616         | 6.815         | 16.431         | 9.139         | 7.566         | 16.705         |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 1.305         | 901           | 2.206          | 1.225         | 1.026         | 2.252          |
| <b>Totales</b>                           | <b>61.934</b> | <b>40.836</b> | <b>102.770</b> | <b>58.241</b> | <b>46.655</b> | <b>104.896</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de dólares americanos

De los efectos totales, tanto totales como específico por tipo de buque gasero, el 70% son efectos indirectos y el 30% son efectos directos. Los efectos directos e indirectos de los buques gaseros en servicio en 2019 se observan en las tablas 312 y 313.

El sector con más efectos directos es el de bienes de equipo, le siguen un grupo de sectores como son la producción de energía y transporte marítimo. Los sectores con menos efectos directos son la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicaciones, y otros servicios de no mercado.

Respecto a los efectos indirectos, el sector con más efectos indirectos es el de bienes intermedio, le siguen un grupo de sectores como son bienes de equipo, producción de energía y otros servicios de mercado. Los sectores con menos efectos indirectos son el transporte marítimo, la construcción, resto de transporte y comunicaciones, y otros servicios de no mercado.

Tabla 312 Efectos directos e indirectos sobre la producción de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES DE LA ECONOMIA           | Efectos Directos |             |               |             | Efectos indirectos |             |               |             |
|-----------------------------------|------------------|-------------|---------------|-------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|
|                                   | LNG              | %LNG        | LPG           | %LPG        | LNG                | %LNG        | LPG           | %LPG        |
| Agricultura                       | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 5.208              | 11,9%       | 3.483         | 12,3%       |
| Producción energía                | 5.203            | 28,5%       | 3.578         | 28,8%       | 4.541              | 10,4%       | 3.052         | 10,7%       |
| Bienes Intermedios                | 573              | 3,1%        | 464           | 3,7%        | 9.461              | 21,7%       | 6.015         | 21,2%       |
| Bienes de Equipo                  | 10.188           | 55,8%       | 5.522         | 44,5%       | 8.982              | 20,6%       | 5.288         | 18,6%       |
| Bienes de Consumo                 | 116              | 0,6%        | 197           | 1,6%        | 2.125              | 4,9%        | 1.441         | 5,1%        |
| Construcción                      | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 605                | 1,4%        | 412           | 1,4%        |
| Transporte Marítimo               | 1.498            | 8,2%        | 1.774         | 14,3%       | 416                | 1,0%        | 370           | 1,3%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 2.096              | 4,8%        | 1.525         | 5,4%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 688              | 3,8%        | 874           | 7,0%        | 8.929              | 20,4%       | 5.941         | 20,9%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 1.305              | 3,0%        | 901           | 3,2%        |
| <b>Totales</b>                    | <b>18.266</b>    | <b>100%</b> | <b>12.409</b> | <b>100%</b> | <b>43.668</b>      | <b>100%</b> | <b>28.428</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de dólares americanos

Tabla 313 Efectos directos e indirectos sobre la producción de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES DE LA ECONOMIA           | Efectos Directos |             |               |             | Efectos indirectos |             |               |             |
|-----------------------------------|------------------|-------------|---------------|-------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|
|                                   | LNG              | %LNG        | LPG           | %LPG        | LNG                | %LNG        | LPG           | %LPG        |
| Agricultura                       | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 4.712              | 11,5%       | 4.263         | 13,1%       |
| Producción energía                | 4.083            | 23,8%       | 5.343         | 37,7%       | 3.900              | 9,5%        | 4.062         | 12,5%       |
| Bienes Intermedios                | 573              | 3,3%        | 464           | 3,3%        | 9.085              | 22,1%       | 6.608         | 20,3%       |
| Bienes de Equipo                  | 10.188           | 59,4%       | 5.522         | 39,0%       | 8.760              | 21,3%       | 5.638         | 17,4%       |
| Bienes de Consumo                 | 116              | 0,7%        | 197           | 1,4%        | 2.017              | 4,9%        | 1.612         | 5,0%        |
| Construcción                      | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 553                | 1,3%        | 495           | 1,5%        |
| Transporte Marítimo               | 1.498            | 8,7%        | 1.774         | 12,5%       | 402                | 1,0%        | 393           | 1,2%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 1.990              | 4,8%        | 1.693         | 5,2%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 688              | 4,0%        | 874           | 6,2%        | 8.452              | 20,6%       | 6.692         | 20,6%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0                | 0%          | 0             | 0%          | 1.225              | 3,0%        | 1.026         | 3,2%        |
| <b>Totales</b>                    | <b>17.146</b>    | <b>100%</b> | <b>14.174</b> | <b>100%</b> | <b>41.096</b>      | <b>100%</b> | <b>32.482</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de dólares americanos

Atendiendo a los grupos de bandera de registro (tablas 314 y 315), los buques registrados en grupos de bandera de registro abierto son los que mayor efecto tienen, originando el 54% del efecto total sobre la producción mundial, siendo los buques dentro del grupo de ROCDE los que menor efecto sobre la tienen, originando el 8% del efecto total sobre la producción mundial.

Todos los grupos tienen su mayor efecto sobre la producción en el sector de bienes de equipo, le siguen un grupo de sectores como son la producción de energía, bienes intermedios y otros servicios de mercado. Los sectores con menos efectos directos son la construcción y otros servicios de no mercado.

Tabla 314 Efectos totales de la flota de gaseros sobre la producción mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15         |             | RA            |             | RM            |             | ROCDE        |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd           | %           | mmd          | %           |
| Agricultura                       | 829          | 8,4%        | 4.780         | 8,6%        | 2.391         | 8,4%        | 690          | 8,0%        |
| Producción energía                | 1.529        | 15,6%       | 9.229         | 16,5%       | 4.430         | 15,6%       | 1.186        | 13,7%       |
| Bienes Intermedios                | 1.603        | 16,3%       | 8.945         | 16,0%       | 4.577         | 16,1%       | 1.388        | 16,0%       |
| Bienes de Equipo                  | 2.886        | 29,4%       | 16.247        | 29,1%       | 8.165         | 28,7%       | 2.682        | 30,9%       |
| Bienes de Consumo                 | 370          | 3,8%        | 2.093         | 3,7%        | 1.097         | 3,9%        | 321          | 3,7%        |
| Construcción                      | 97           | 1,0%        | 556           | 1,0%        | 281           | 1,0%        | 83           | 1,0%        |
| Transporte Marítimo               | 374          | 3,8%        | 2.017         | 3,6%        | 1.251         | 4,4%        | 416          | 4,8%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 344          | 3,5%        | 1.937         | 3,5%        | 1.024         | 3,6%        | 317          | 3,7%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 1.574        | 16,0%       | 8.829         | 15,8%       | 4.625         | 16,3%       | 1.402        | 16,2%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 210          | 2,1%        | 1.192         | 2,1%        | 616           | 2,2%        | 188          | 2,2%        |
| <b>Total</b>                      | <b>9.816</b> | <b>100%</b> | <b>55.823</b> | <b>100%</b> | <b>28.458</b> | <b>100%</b> | <b>8.674</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 315 Efectos totales de la flota de gaseros sobre la producción mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI II.

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15         |             | RA            |             | RM            |             | ROCDE        |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd           | %           | mmd          | %           |
| Agricultura                       | 820          | 8,4%        | 4.866         | 8,6%        | 2.615         | 8,7%        | 675          | 7,9%        |
| Producción energía                | 1.496        | 15,3%       | 9.537         | 16,9%       | 5.223         | 17,3%       | 1.131        | 13,2%       |
| Bienes Intermedios                | 1.596        | 16,4%       | 9.011         | 16,0%       | 4.746         | 15,8%       | 1.376        | 16,1%       |
| Bienes de Equipo                  | 2.882        | 29,6%       | 16.286        | 28,8%       | 8.265         | 27,4%       | 2.676        | 31,3%       |
| Bienes de Consumo                 | 368          | 3,8%        | 2.112         | 3,7%        | 1.145         | 3,8%        | 318          | 3,7%        |
| Construcción                      | 96           | 1,0%        | 565           | 1,0%        | 305           | 1,0%        | 82           | 1,0%        |
| Transporte Marítimo               | 374          | 3,8%        | 2.019         | 3,6%        | 1.258         | 4,2%        | 416          | 4,9%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 342          | 3,5%        | 1.955         | 3,5%        | 1.072         | 3,6%        | 314          | 3,7%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 1.565        | 16,1%       | 8.912         | 15,8%       | 4.840         | 16,1%       | 1.388        | 16,2%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 209          | 2,1%        | 1.206         | 2,1%        | 652           | 2,2%        | 185          | 2,2%        |
| <b>Total</b>                      | <b>9.747</b> | <b>100%</b> | <b>56.469</b> | <b>100%</b> | <b>30.121</b> | <b>100%</b> | <b>8.560</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

En las tablas 316 y 317 se muestran los efectos directos por cada grupo de banderas. Los buques bajo bandera del grupo RA son los que mas efectos directos sobre el VAB mundial generan, siendo los buques abanderados dentro del grupo ROCDE los que menores efectos directos tienen sobre el VAB mundial.

Tabla 316 Efectos directos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA            |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd          | %           | mmd          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0            | 0%          | 0             | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          |
| <i>Producción energía</i>                | 814          | 27,8%       | 4.997         | 30,1%       | 2.361        | 27,7%       | 609          | 23,5%       |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 116          | 4,0%        | 562           | 3,4%        | 300          | 3,5%        | 59           | 2,3%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 1.516        | 51,8%       | 8.509         | 51,2%       | 4.262        | 49,9%       | 1.424        | 55,0%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 29           | 1,0%        | 162           | 1,0%        | 102          | 1,2%        | 21           | 0,8%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0            | 0%          | 0             | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 301          | 10,3%       | 1.610         | 9,7%        | 1.020        | 11,9%       | 342          | 13,2%       |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0            | 0%          | 0             | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 153          | 5,2%        | 778           | 4,7%        | 494          | 5,8%        | 136          | 5,3%        |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0            | 0%          | 0             | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          |
| <b>Total</b>                             | <b>2.928</b> | <b>100%</b> | <b>16.617</b> | <b>100%</b> | <b>8.539</b> | <b>100%</b> | <b>2.591</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 317 Efectos directos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA            |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd          | %           | mmd          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0            | 0.0%        | 0             | 0.0%        | 0            | 0.0%        | 0            | 0.0%        |
| <i>Producción energía</i>                | 793          | 27.3%       | 5.193         | 30.9%       | 2.866        | 31.7%       | 574          | 22.5%       |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 116          | 4.0%        | 562           | 3.3%        | 300          | 3.3%        | 59           | 2.3%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 1.516        | 52.1%       | 8.509         | 50.6%       | 4.262        | 47.1%       | 1.424        | 55.7%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 29           | 1.0%        | 162           | 1.0%        | 102          | 1.1%        | 21           | 0.8%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0            | 0.0%        | 0             | 0.0%        | 0            | 0.0%        | 0            | 0.0%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 301          | 10.3%       | 1.610         | 9.6%        | 1.020        | 11.3%       | 342          | 13.4%       |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0            | 0.0%        | 0             | 0.0%        | 0            | 0.0%        | 0            | 0.0%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 153          | 5.3%        | 778           | 4.6%        | 494          | 5.5%        | 136          | 5.3%        |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0            | 0.0%        | 0             | 0.0%        | 0            | 0.0%        | 0            | 0.0%        |
| <b>Total</b>                             | <b>2.907</b> | <b>100%</b> | <b>16.813</b> | <b>100%</b> | <b>9.044</b> | <b>100%</b> | <b>2.556</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

En las tablas 318 y 319 se muestran los efectos indirectos por grupo de banderas. Al igual que ocurre para los efectos directos, los buques bajo bandera del grupo RA son los que mas efectos directos sobre el VAB mundial generan, siendo los buques abanderados dentro del grupo ROCDE los que menores efectos indirectos tienen sobre el VAB mundial.

Tabla 318 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA            |             | RM            |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd           | %           | mmd          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 829          | 12,0%       | 4.780         | 12,2%       | 2.391         | 12,0%       | 690          | 11,3%       |
| <i>Producción energía</i>                | 715          | 10,4%       | 4.232         | 10,8%       | 2.069         | 10,4%       | 577          | 9,5%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 1.488        | 21,6%       | 8.383         | 21,4%       | 4.276         | 21,5%       | 1.329        | 21,8%       |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 1.370        | 19,9%       | 7.739         | 19,7%       | 3.904         | 19,6%       | 1.258        | 20,7%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 341          | 5,0%        | 1.931         | 4,9%        | 994           | 5,0%        | 300          | 4,9%        |
| <i>Construcción</i>                      | 97           | 1,4%        | 556           | 1,4%        | 282           | 1,4%        | 83           | 1,4%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 74           | 1,1%        | 407           | 1,0%        | 232           | 1,2%        | 74           | 1,2%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 344          | 5,0%        | 1.937         | 4,9%        | 1.024         | 5,1%        | 317          | 5,2%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 1.421        | 20,6%       | 8.051         | 20,5%       | 4.131         | 20,7%       | 1.266        | 20,8%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 210          | 3,1%        | 1.192         | 3,0%        | 616           | 3,1%        | 188          | 3,1%        |
| <b>Total</b>                             | <b>6.889</b> | <b>100%</b> | <b>39.206</b> | <b>100%</b> | <b>19.918</b> | <b>100%</b> | <b>6.083</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 319 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre la producción mundial aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA            |             | RM            |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd           | %           | mmd          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 820          | 12,0%       | 4.866         | 12,3%       | 2.615         | 12,4%       | 675          | 11,2%       |
| <i>Producción energía</i>                | 703          | 10,3%       | 4.344         | 11,0%       | 2.358         | 11,2%       | 557          | 9,3%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 1.481        | 21,6%       | 8.449         | 21,3%       | 4.446         | 21,1%       | 1.317        | 21,9%       |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 1.366        | 20,0%       | 7.777         | 19,6%       | 4.004         | 19,0%       | 1.252        | 20,8%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 339          | 5,0%        | 1.950         | 4,9%        | 1.043         | 4,9%        | 297          | 4,9%        |
| <i>Construcción</i>                      | 96           | 1,4%        | 565           | 1,4%        | 305           | 1,4%        | 82           | 1,4%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 73           | 1,1%        | 409           | 1,0%        | 238           | 1,1%        | 74           | 1,2%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 342          | 5,0%        | 1.955         | 4,9%        | 1.072         | 5,1%        | 314          | 5,2%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 1.412        | 20,6%       | 8.134         | 20,5%       | 4.346         | 20,6%       | 1.252        | 20,8%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 209          | 3,1%        | 1.206         | 3,0%        | 652           | 3,1%        | 185          | 3,1%        |
| <b>Total</b>                             | <b>6.840</b> | <b>100%</b> | <b>39.656</b> | <b>100%</b> | <b>21.077</b> | <b>100%</b> | <b>6.003</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

## 12.7. Efectos sobre el Valor Añadido Bruto mundial

Los resultados que en este apartado muestran el efecto que tiene la actividad de la flota de gaseros sobre el VAB mundial.

Al igual que en el anterior apartado, se realiza un análisis del impacto sobre el VAB mundial según el tipo de buque gasero y según el grupo de banderas de registro, aplicando la base de datos de OMI I y OMI II.

Los efectos totales (Tabla 320), que corresponden a la suma de los efectos directos e indirectos, sobre el VAB mundial muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto cercano a los 38 mil millones dólares. Siendo el efecto sobre VAB superior en los buques LNG que en los buques LPG.

El sector más afectado es el de otros servicios de mercado, le siguen un grupo de sectores como son los bienes de equipo y la producción de energía. El sector menos afectado, que presenta el menor efecto es la construcción.

El valor que aportan los buques gaseros es alrededor del 0,05% sobre el VAB mundial, siendo el 0,01% el valor que añade de manera directa y el 0,04% el valor añadido de manera indirecta.

Tabla 320 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el VAB mundial.

| SECTORES ECONÓMICOS                      | OMI I         |               |               | OMI II        |               |               |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|  | Flota         | Flota         | Flota         | Flota         | Flota         | Flota         |
|  | LNG           | LPG           | Gaseros       | LNG           | LPG           | Gaseros       |
| <i>Agricultura</i>                       | 2.964         | 1.982         | 4.946         | 2.682         | 2.427         | 5.109         |
| <i>Producción energía</i>                | 3.072         | 2.090         | 5.162         | 2.517         | 2.965         | 5.481         |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 2.271         | 1.467         | 3.738         | 2.186         | 1.601         | 3.787         |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 4.989         | 2.813         | 7.802         | 4.931         | 2.904         | 7.836         |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 592           | 433           | 1.025         | 564           | 478           | 1.042         |
| <i>Construcción</i>                      | 210           | 143           | 352           | 191           | 171           | 363           |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 673           | 754           | 1.427         | 668           | 762           | 1.430         |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 972           | 707           | 1.678         | 922           | 785           | 1.707         |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 5.823         | 4.127         | 9.950         | 5.535         | 4.582         | 10.117        |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 827           | 571           | 1.398         | 777           | 651           | 1.427         |
| <b>Totales</b>                           | <b>22.393</b> | <b>15.087</b> | <b>37.480</b> | <b>20.973</b> | <b>17.325</b> | <b>38.298</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de dólares americanos

De los efectos totales, tanto totales como específico por tipo de buque gasero, el 75% son efectos indirectos y el 25% son efectos directos. Los efectos directos e indirectos de los buques gaseros en servicio en 2019 se muestran en las tablas 321 y 322.

El sector con más efectos directos es el de bienes de equipo, le siguen un grupo de sectores como son la producción de energía, transporte marítimo y otros servicios de mercado. Los sectores con menos efectos directos son la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicaciones, y otros servicios de no mercado.

Respecto a los efectos indirectos, el sector con más efectos indirectos es el de otros servicios de mercado, le siguen la agricultura, bienes de equipo, producción de energía y otros servicios de mercado. Los sectores con menos efectos indirectos son el transporte marítimo, la construcción, resto de transporte y comunicaciones, y otros servicios de no mercado.

Tabla 321 Efectos directos e indirectos sobre el VAB de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS                      | Efectos Directos |             |              |             | Efectos indirectos |             |               |             |
|--|------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|
|  | LNG              |             | LPG          |             | LNG                |             | LPG           |             |
|  | mmd              | %           | mmd          | %           | mmd                | %           | mmd           | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 2.964              | 17,4%       | 1.982         | 17,7%       |
| <i>Producción energía</i>                | 1.640            | 30,4%       | 1.128        | 29,1%       | 1.432              | 8,4%        | 962           | 8,6%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 130              | 2,4%        | 105          | 2,7%        | 2.142              | 12,6%       | 1.362         | 12,1%       |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 2.652            | 49,1%       | 1.437        | 37,1%       | 2.338              | 13,8%       | 1.376         | 12,3%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 31               | 0,6%        | 52           | 1,3%        | 562                | 3,3%        | 381           | 3,4%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 210                | 1,2%        | 143           | 1,3%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 527              | 9,8%        | 624          | 16,1%       | 146                | 0,9%        | 130           | 1,2%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 972                | 5,7%        | 707           | 6,3%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 416              | 7,7%        | 529          | 13,7%       | 5.407              | 31,8%       | 3.598         | 32,1%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 827                | 4,9%        | 571           | 5,1%        |
| <b>Totales</b>                           | <b>5.396</b>     | <b>100%</b> | <b>3.875</b> | <b>100%</b> | <b>16.998</b>      | <b>100%</b> | <b>11.212</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 322 Efectos directos e indirectos sobre el VAB de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | Efectos Directos |             |              |             | Efectos indirectos |             |               |             |
|--|------------------|-------------|--------------|-------------|--------------------|-------------|---------------|-------------|
|  | LNG              |             | LPG          |             | LNG                |             | LPG           |             |
|  | mmd              | %           | mmd          | %           | mmd                | %           | mmd           | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 2.682              | 16,8%       | 2.427         | 18,8%       |
| <i>Producción energía</i>                | 1.287            | 25,5%       | 1.684        | 38,0%       | 1.229              | 7,7%        | 1.281         | 9,9%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 130              | 2,6%        | 105          | 2,4%        | 2.057              | 12,9%       | 1.496         | 11,6%       |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 2.652            | 52,6%       | 1.437        | 32,4%       | 2.280              | 14,3%       | 1.467         | 11,4%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 31               | 0,6%        | 52           | 1,2%        | 533                | 3,3%        | 426           | 3,3%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 191                | 1,2%        | 171           | 1,3%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 527              | 10,5%       | 624          | 14,1%       | 141                | 0,9%        | 138           | 1,1%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 922                | 5,8%        | 785           | 6,1%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 416              | 8,3%        | 529          | 11,9%       | 5.118              | 32,1%       | 4.053         | 31,4%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0                | 0%          | 0            | 0%          | 777                | 4,9%        | 651           | 5,0%        |
| <b>Totales</b>                           | <b>5.042</b>     | <b>100%</b> | <b>4.432</b> | <b>100%</b> | <b>15.931</b>      | <b>100%</b> | <b>12.894</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Atendiendo a los grupos de bandera de registro (tablas 323 y 324), los buques registrados en grupos de bandera de registro abierto son los que mayor efecto tienen sobre el VAB mundial, originando alrededor del 54% del efecto total, siendo los buques dentro del grupo de ROCDE los que menor efecto tienen, originando el 8% del efecto total sobre el VAB mundial.

Todos los grupos de bandera tiene su mayor efecto sobre el VAB en el sector de otros servicios de mercado, le siguen un grupo de sectores como son la agricultura, producción de energía, bienes de equipo. El sector con menos efecto es la construcción.

Tabla 323 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el VAB mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI I.

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15         |             | RA            |             | RM            |             | ROCDE        |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd           | %           | mmd          | %           |
| Agricultura                       | 472          | 13.2%       | 2.721         | 13.4%       | 1.361         | 13.1%       | 393          | 12.5%       |
| Producción energía                | 482          | 13.5%       | 2.909         | 14.3%       | 1.397         | 13.4%       | 374          | 11.9%       |
| Bienes Intermedios                | 363          | 10.2%       | 2.025         | 10.0%       | 1.036         | 10.0%       | 314          | 10.0%       |
| Bienes de Equipo                  | 751          | 21.0%       | 4.228         | 20.8%       | 2.125         | 20.4%       | 698          | 22.1%       |
| Bienes de Consumo                 | 98           | 2.7%        | 553           | 2.7%        | 290           | 2.8%        | 85           | 2.7%        |
| Construcción                      | 33           | 0.9%        | 192           | 0.9%        | 97            | 0.9%        | 29           | 0.9%        |
| Transporte Marítimo               | 132          | 3.7%        | 709           | 3.5%        | 440           | 4.2%        | 146          | 4.6%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 159          | 4.4%        | 898           | 4.4%        | 474           | 4.6%        | 147          | 4.7%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 953          | 26.6%       | 5.347         | 26.3%       | 2.801         | 26.9%       | 849          | 26.9%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 133          | 3.7%        | 755           | 3.7%        | 391           | 3.8%        | 119          | 3.8%        |
| <b>Total</b>                      | <b>3.576</b> | <b>100%</b> | <b>20.337</b> | <b>100%</b> | <b>10.412</b> | <b>100%</b> | <b>3.154</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 324 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el VAB mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI II.

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15         |             | RA            |             | RM            |             | ROCDE        |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd           | %           | mmd          | %           |
| Agricultura                       | 466          | 13.1%       | 2.770         | 13.5%       | 1.488         | 13.5%       | 384          | 12.3%       |
| Producción energía                | 472          | 13.3%       | 3.006         | 14.6%       | 1.647         | 14.9%       | 357          | 11.5%       |
| Bienes Intermedios                | 361          | 10.2%       | 2.040         | 9.9%        | 1.074         | 9.7%        | 311          | 10.0%       |
| Bienes de Equipo                  | 750          | 21.1%       | 4.238         | 20.6%       | 2.151         | 19.5%       | 696          | 22.4%       |
| Bienes de Consumo                 | 97           | 2.7%        | 558           | 2.7%        | 303           | 2.7%        | 84           | 2.7%        |
| Construcción                      | 33           | 0.9%        | 196           | 1.0%        | 106           | 1.0%        | 28           | 0.9%        |
| Transporte Marítimo               | 132          | 3.7%        | 710           | 3.4%        | 442           | 4.0%        | 146          | 4.7%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 159          | 4.5%        | 906           | 4.4%        | 497           | 4.5%        | 145          | 4.7%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 948          | 26.7%       | 5.397         | 26.2%       | 2.931         | 26.5%       | 840          | 27.0%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 132          | 3.7%        | 764           | 3.7%        | 413           | 3.7%        | 117          | 3.8%        |
| <b>Total</b>                      | <b>3.550</b> | <b>100%</b> | <b>20.586</b> | <b>100%</b> | <b>11.052</b> | <b>100%</b> | <b>3.110</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

En las tablas 325 y 326 se muestran los efectos directos por grupo de banderas. Los buques bajo bandera del grupo RA son los que más efectos directos sobre el VAB mundial generan, siendo los buques abanderados dentro del grupo ROCDE los que menores efectos directos tienen sobre el VAB mundial.

Tabla 325 Efectos directos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15       |             | RA           |             | RM           |             | ROCDE      |             |
|--|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|
|  | mmd        | %           | mmd          | %           | mmd          | %           | mmd        | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          | 0          | 0%          |
| <i>Producción energía</i>                | 257        | 29,1%       | 1.575        | 31,5%       | 744          | 28,6%       | 192        | 24,5%       |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 26         | 3,0%        | 127          | 2,5%        | 68           | 2,6%        | 13         | 1,7%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 395        | 44,7%       | 2.214        | 44,3%       | 1.109        | 42,6%       | 371        | 47,3%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 8          | 0,8%        | 43           | 0,9%        | 27           | 1,0%        | 6          | 0,7%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          | 0          | 0%          |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 106        | 12,0%       | 566          | 11,3%       | 359          | 13,8%       | 120        | 15,3%       |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          | 0          | 0%          |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 93         | 10,5%       | 471          | 9,4%        | 299          | 11,5%       | 83         | 10,5%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          | 0          | 0%          |
| <b>Totales</b>                           | <b>883</b> | <b>100%</b> | <b>4.997</b> | <b>100%</b> | <b>2.606</b> | <b>100%</b> | <b>784</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 326 Efectos directos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15       |             | RA           |             | RM           |             | ROCDE      |             |
|--|------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|
|  | mmd        | %           | mmd          | %           | mmd          | %           | mmd        | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          | 0          | 0%          |
| <i>Producción energía</i>                | 250        | 28,5%       | 1.637        | 32,4%       | 903          | 32,7%       | 181        | 23,4%       |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 262        | 3,0%        | 1.271        | 2,5%        | 68           | 2,5%        | 13         | 1,7%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 395        | 45,0%       | 2.214        | 43,8%       | 1.109        | 40,1%       | 371        | 47,9%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 7.5        | 0,9%        | 43           | 0,8%        | 27           | 1,0%        | 6          | 0,7%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0,0%        | 0          | 0%          |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 106        | 12,1%       | 566          | 11,2%       | 359          | 13,0%       | 120        | 15,6%       |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0,0%        | 0          | 0%          |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 93         | 10,6%       | 471          | 9,3%        | 299          | 10,8%       | 83         | 10,7%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0          | 0%          | 0            | 0%          | 0            | 0%          | 0          | 0%          |
| <b>Totales</b>                           | <b>877</b> | <b>100%</b> | <b>5.059</b> | <b>100%</b> | <b>2.765</b> | <b>100%</b> | <b>773</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

En las tablas 327 y 328 se muestran los efectos indirectos por grupo de banderas. Al igual que ocurre para los efectos directos, los buques bajo bandera del grupo RA son los que mas efectos directos sobre el VAB mundial generan, siendo los buques abanderados dentro del grupo ROCDE los que menores efectos indirectos tienen sobre el VAB mundial.

Tabla 327 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA            |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd          | %           | mmd          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 472          | 17,5%       | 2.721         | 17,7%       | 1.361        | 17,4%       | 393          | 16,6%       |
| <i>Producción energía</i>                | 226          | 8,4%        | 1.334         | 8,7%        | 652          | 8,4%        | 182          | 7,7%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 337          | 12,5%       | 1.898         | 12,4%       | 968          | 12,4%       | 301          | 12,7%       |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 357          | 13,2%       | 2.014         | 13,1%       | 1.016        | 13,0%       | 328          | 13,8%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 90           | 3,3%        | 510           | 3,3%        | 263          | 3,4%        | 79           | 3,3%        |
| <i>Construcción</i>                      | 34           | 1,2%        | 193           | 1,3%        | 98           | 1,2%        | 29           | 1,2%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 26           | 1,0%        | 143           | 0,9%        | 81           | 1,0%        | 26           | 1,1%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 159          | 5,9%        | 898           | 5,9%        | 475          | 6,1%        | 147          | 6,2%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 861          | 32,0%       | 4.876         | 31,8%       | 2.502        | 32,0%       | 767          | 32,4%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 133          | 4,9%        | 755           | 4,9%        | 391          | 5,0%        | 119          | 5,0%        |
| <b>Totales</b>                           | <b>2.693</b> | <b>100%</b> | <b>15.341</b> | <b>100%</b> | <b>7.806</b> | <b>100%</b> | <b>2.370</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

Tabla 328 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el VAB mundial aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA            |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mmd          | %           | mmd           | %           | mmd          | %           | mmd          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 467          | 17,5%       | 2.770         | 17,8%       | 1.488        | 18,0%       | 384          | 16,4%       |
| <i>Producción energía</i>                | 222          | 8,3%        | 1.369         | 8,8%        | 743          | 9,0%        | 176          | 7,5%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 335          | 12,5%       | 1.913         | 12,3%       | 1.006        | 12,1%       | 298          | 12,8%       |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 355          | 13,3%       | 2.024         | 13,0%       | 1.042        | 12,6%       | 326          | 13,9%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 90           | 3,4%        | 515           | 3,3%        | 276          | 3,3%        | 78           | 3,4%        |
| <i>Construcción</i>                      | 33           | 1,2%        | 196           | 1,3%        | 106          | 1,3%        | 28           | 1,2%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 26           | 1,0%        | 144           | 0,9%        | 84           | 1,0%        | 26           | 1,1%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 159          | 5,9%        | 906           | 5,8%        | 497          | 6,0%        | 146          | 6,2%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 855          | 32,0%       | 4.926         | 31,7%       | 2.632        | 31,8%       | 758          | 32,4%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 132          | 4,9%        | 764           | 4,9%        | 413          | 5,0%        | 117          | 5,0%        |
| <b>Totales</b>                           | <b>2.673</b> | <b>100%</b> | <b>15.527</b> | <b>100%</b> | <b>8.286</b> | <b>100%</b> | <b>2.337</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mmd" =millones de dólares americanos

## 12.8. Efectos sobre el Empleo mundial

Los resultados que en este apartado muestran el efecto que tiene la actividad de la flota de gaseros sobre el empleo mundial. Al igual que en el apartado anterior, se realiza un análisis del impacto sobre el empleo mundial según el tipo de buque gasero y según el grupo de banderas de registro, aplicando la base de datos de OMI I y OMI II.

La flota de buques gaseros emplea de manera directa a 42.599 tripulantes a nivel mundial en los buques LPG y LNG en servicio en el año 2019. Los buques LNG emplearon de manera directa 13.376 tripulantes (31,4% del total de los tripulantes) y, los buques LPG emplearon de manera directa 29.223 tripulantes (68,6% del total de los tripulantes).

Los efectos totales (Tabla 329), que corresponden a la suma de los efectos directos e indirectos, sobre el empleo mundial muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un

efecto cercano a los 1,5 millones de personas. Siendo el efecto sobre empleo ligeramente superior en los buques LNG que en los buques LPG.

El sector con mayor efecto es el de agricultura, le sigue el sector de otros servicios de mercado, y un poco más alejado se encuentra el tercer grupo de sectores como son bienes de servicio y bienes de equipo. El sector menos afectado, es el sector de la construcción.

Tabla 329 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el empleo mundial.

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I      |            |               | OMI II     |            |               |
|-----------------------------------|------------|------------|---------------|------------|------------|---------------|
|                                   | Flota LNG  | Flota LPG  | Flota Gaseros | Flota LNG  | Flota LPG  | Flota Gaseros |
| Agricultura                       | 284        | 190        | 474           | 257        | 233        | 490           |
| Producción energía                | 49         | 34         | 83            | 41         | 48         | 88            |
| Bienes Intermedios                | 76         | 49         | 124           | 73         | 53         | 126           |
| Bienes de Equipo                  | 90         | 51         | 141           | 89         | 53         | 142           |
| Bienes de Consumo                 | 32         | 23         | 55            | 30         | 26         | 55            |
| Construcción                      | 11         | 7          | 18            | 10         | 9          | 19            |
| Transporte Marítimo               | 22         | 39         | 61            | 22         | 39         | 61            |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 48         | 35         | 83            | 46         | 39         | 84            |
| Otros Serv. de Mercado            | 220        | 156        | 376           | 209        | 173        | 383           |
| Otros Serv. de no Mercado         | 28         | 19         | 48            | 26         | 22         | 49            |
| <b>Totales</b>                    | <b>860</b> | <b>603</b> | <b>1.464</b>  | <b>803</b> | <b>694</b> | <b>1.497</b>  |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: miles de personas

De los efectos totales, tanto totales como específico por tipo de buque gasero, aproximadamente 87% son efectos indirectos y el 13% son efectos directos. Los efectos directos e indirectos de los buques gaseros en servicio en 2019 se muestran en las tablas 328 y 329.

El sector con más efectos directos es el de bienes de equipo, seguido por la producción de energía y otros servicios de mercado. Los sectores con menos efectos directos son la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicaciones, y otros servicios de no mercado.

Respecto a los efectos indirectos, el sector con más efectos indirectos es la agricultura, le sigue el sector de otros servicios de mercado. Los sectores con menos efectos indirectos son el transporte marítimo y la construcción.

Tabla 330 Efectos directos e indirectos sobre el empleo de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS               | Efectos Directos |             |             |             | Efectos indirectos |             |              |             |
|-----------------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | LNG              |             | LPG         |             | LNG                |             | LPG          |             |
|                                   | mdp              | %           | mdp         | %           | mdp                | %           | mdp          | %           |
| Agricultura                       | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 284,1              | 38,2%       | 190          | 38,3%       |
| Producción energía                | 26,4             | 25,7%       | 18,1        | 23,1%       | 23                 | 3,1%        | 15,5         | 3,1%        |
| Bienes Intermedios                | 4,3              | 4,2%        | 3,5         | 4,5%        | 71,2               | 9,6%        | 45,3         | 9,1%        |
| Bienes de Equipo                  | 48               | 46,6%       | 26          | 33,2%       | 42,3               | 5,7%        | 24,9         | 5,0%        |
| Bienes de Consumo                 | 1,6              | 1,6%        | 2,8         | 3,6%        | 30                 | 4,0%        | 20,4         | 4,1%        |
| Construcción                      | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 10,9               | 1,5%        | 7,4          | 1,5%        |
| Transporte Marítimo               | 6,8              | 6,6%        | 8           | 10,2%       | 1,9                | 0,3%        | 1,7          | 0,3%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 47,9               | 6,4%        | 34,9         | 7,0%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 15,8             | 15,4%       | 20          | 25,5%       | 204,6              | 27,5%       | 136,1        | 27,5%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0,0              | 0%          | 0           | 0%          | 28,1               | 3,8%        | 19,4         | 3,9%        |
| <b>Totales</b>                    | <b>102,9</b>     | <b>100%</b> | <b>78,4</b> | <b>100%</b> | <b>744</b>         | <b>100%</b> | <b>495,6</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

Tabla 331 Efectos directos e indirectos sobre el empleo de los buques gaseros aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS               | Efectos Directos |             |             |             | Efectos indirectos |             |              |             |
|-----------------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|--------------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | LNG              |             | LPG         |             | LNG                |             | LPG          |             |
|                                   | mdp              | %           | mdp         | %           | mdp                | %           | mdp          | %           |
| Agricultura                       | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 257                | 37,1%       | 232,6        | 40,3%       |
| Producción energía                | 20,7             | 21,3%       | 27,1        | 31%         | 19,8               | 2,9%        | 20,6         | 3,6%        |
| Bienes Intermedios                | 4,3              | 4,4%        | 3,5         | 4%          | 68,4               | 9,9%        | 49,8         | 8,6%        |
| Bienes de Equipo                  | 48               | 49,4%       | 26          | 29,7%       | 41,3               | 6,0%        | 26,6         | 4,6%        |
| Bienes de Consumo                 | 1,6              | 1,6%        | 2,8         | 3,2%        | 28,5               | 4,1%        | 22,8         | 4,0%        |
| Construcción                      | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 10                 | 1,4%        | 8,9          | 1,5%        |
| Transporte Marítimo               | 6,8              | 7,0%        | 8           | 9,2%        | 1,8                | 0,3%        | 1,8          | 0,3%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 45,5               | 6,6%        | 38,7         | 6,7%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 15,8             | 16,3%       | 20          | 22,9%       | 193,6              | 28%         | 153,3        | 26,6%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0                | 0%          | 0           | 0%          | 26,4               | 3,8%        | 22,1         | 3,8%        |
| <b>Totales</b>                    | <b>97,2</b>      | <b>100%</b> | <b>87,4</b> | <b>100%</b> | <b>692,3</b>       | <b>100%</b> | <b>577,2</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

Atendiendo a los grupos de bandera de registro (tablas 332 y 333), los buques registrados en grupos de bandera de registro abierto son los que mayor efecto total tienen sobre el empleo mundial, originando alrededor del 54% del efecto total, siendo los buques dentro del grupo de ROCDE los que menor efecto tienen, originando el 8% del efecto total sobre el empleo mundial.

Todos los grupos de bandera tiene su mayor efecto sobre el empleo en el sector de la agricultura, seguido por el sector de otros servicios de mercado. Los sectores con menos efecto son la construcción y transporte marítimo.

Tabla 332 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el empleo mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI I.

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15         |             | RA           |             | RM         |             | ROCDE      |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|------------|-------------|------------|-------------|
|                                   | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp        | %           | mdp        | %           |
| Agricultura                       | 45,2         | 33,3%       | 260,7        | 33,8%       | 130,5      | 33%         | 37,7       | 31,9%       |
| Producción energía                | 7,7          | 5,7%        | 46,8         | 6,1%        | 22,5       | 5,7%        | 6,0        | 5,1%        |
| Bienes Intermedios                | 12,1         | 8,9%        | 67,4         | 8,7%        | 34,5       | 87%         | 10,4       | 8,8%        |
| Bienes de Equipo                  | 13,6         | 10%         | 76,5         | 99%         | 38,5       | 9,7%        | 12,6       | 10,7%       |
| Bienes de Consumo                 | 5,2          | 3,8%        | 29,6         | 3,8%        | 15,5       | 3,9%        | 4,5        | 3,8%        |
| Construcción                      | 1,7          | 1,3%        | 10,0         | 1,3%        | 5,1        | 1,3%        | 1,5        | 1,3%        |
| Transporte Marítimo               | 1,7          | 1,3%        | 9,1          | 1,2%        | 5,7        | 1,4%        | 1,9        | 1,6%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 7,9          | 5,8%        | 44,3         | 5,7%        | 23,4       | 5,9%        | 7,3        | 6,2%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 36,1         | 26,6%       | 202,3        | 26,2%       | 106        | 26,8%       | 32,1       | 27,2%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 4,5          | 3,3%        | 25,7         | 3,3%        | 13,3       | 3,4%        | 4,0        | 3,4%        |
| <b>Total</b>                      | <b>135,7</b> | <b>100%</b> | <b>772,4</b> | <b>100%</b> | <b>395</b> | <b>100%</b> | <b>118</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

Tabla 333 Efectos totales de la flota de gaseros sobre el empleo mundial por grupo de bandera de registro, aplicando OMI II.

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15         |             | RA           |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|-----------------------------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|                                   | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp          | %           |
| Agricultura                       | 44,7         | 33,2%       | 265,5        | 33,9%       | 142,6        | 33,9%       | 36,8         | 31,6%       |
| Producción energía                | 7,6          | 5,6%        | 48,3         | 6,2%        | 26,5         | 6,3%        | 5,7          | 4,9%        |
| Bienes Intermedios                | 12           | 8,9%        | 67,8         | 8,7%        | 357          | 8,5%        | 10,4         | 8,9%        |
| Bienes de Equipo                  | 13,6         | 10,1%       | 76,7         | 9,8%        | 38,9         | 9,2%        | 12,6         | 10,8%       |
| Bienes de Consumo                 | 5,2          | 3,9%        | 29,8         | 3,8%        | 16,2         | 3,9%        | 4,5          | 3,9%        |
| Construcción                      | 1,7          | 1,3%        | 10,2         | 1,3%        | 5,5          | 1,3%        | 1,5          | 1,3%        |
| Transporte Marítimo               | 1,7          | 1,3%        | 9,2          | 1,2%        | 5,7          | 1,4%        | 1,9          | 1,6%        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 7,8          | 5,8%        | 44,7         | 5,7%        | 24,5         | 5,8%        | 7,2          | 6,2%        |
| Otros Serv. de Mercado            | 35,9         | 26,7%       | 204,2        | 26,1%       | 110,9        | 26,4%       | 31,8         | 27,3%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 4,5          | 3,3%        | 26           | 3,3%        | 14,1         | 3,4%        | 4,0          | 3,4%        |
| <b>Total</b>                      | <b>134,7</b> | <b>100%</b> | <b>782,4</b> | <b>100%</b> | <b>420,6</b> | <b>100%</b> | <b>116,4</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

En las tablas 334 y 335 se muestran los efectos directos por grupo de banderas. Los buques bajo bandera del grupo RA son los que mas efectos directos sobre el empleo mundial generan, siendo los buques abanderados dentro del grupo ROCDE los que menores efectos directos tienen sobre el empleo mundial.

Tabla 334 Efectos directos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS               | EU15        |             | RA        |             | RM          |             | ROCDE       |             |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                                   | mdp         | %           | mdp       | %           | mdp         | %           | mdp         | %           |
| Agricultura                       | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0           | 0%          |
| Producción energía                | 4,1         | 23,6%       | 25,3      | 26,1%       | 12          | 23,2%       | 3,1         | 20,4%       |
| Bienes Intermedios                | 0,9         | 5,2%        | 4,2       | 4,3%        | 2,3         | 4,4%        | 0,4         | 2,6%        |
| Bienes de Equipo                  | 7,1         | 40,8%       | 40,1      | 41,3%       | 20,1        | 38,9%       | 6,7         | 44,1%       |
| Bienes de Consumo                 | 0,4         | 2,3%        | 2,3       | 2,4%        | 1,4         | 2,7%        | 0,3         | 2,0%        |
| Construcción                      | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0           | 0%          |
| Transporte Marítimo               | 1,4         | 8,0%        | 7,3       | 7,5%        | 4,6         | 8,9%        | 1,6         | 10,5%       |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0           | 0%          |
| Otros Serv. de Mercado            | 3,5         | 20,1%       | 17,8      | 18,4%       | 11,3        | 21,9%       | 3,1         | 20,4%       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0           | 0%          |
| <b>Totales</b>                    | <b>17,4</b> | <b>100%</b> | <b>97</b> | <b>100%</b> | <b>51,7</b> | <b>100%</b> | <b>15,2</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

Tabla 335 Efectos directos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15        |             | RA        |             | RM          |             | ROCDE     |             |
|--|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|
|  | mdp         | %           | mdp       | %           | mdp         | %           | mdp       | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0         | 0%          |
| <i>Producción energía</i>                | 4,0         | 23,1%       | 26,3      | 26,8%       | 14,5        | 26,8%       | 2,9       | 19,3%       |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 0,9         | 5,2%        | 4,2       | 4,3%        | 2,3         | 4,2%        | 0,4       | 2,7%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 7,1         | 41,0%       | 40,1      | 40,9%       | 20,1        | 37,1%       | 6,7       | 44,7%       |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 0,4         | 2,3%        | 2,3       | 2,3%        | 1,4         | 2,6%        | 0,3       | 2,0%        |
| <i>Construcción</i>                      | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0         | 0%          |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 1,4         | 8,1%        | 7,3       | 7,4%        | 4,6         | 8,5%        | 1,6       | 10,7%       |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0         | 0%          |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 3,5         | 20,2%       | 17,8      | 18,2%       | 11,3        | 20,8%       | 3,1       | 20,7%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0           | 0%          | 0         | 0%          | 0           | 0%          | 0         | 0%          |
| <b>Totales</b>                           | <b>17,3</b> | <b>100%</b> | <b>98</b> | <b>100%</b> | <b>54,2</b> | <b>100%</b> | <b>15</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

En las tablas 336 y 337 se muestran los efectos indirectos por grupo de banderas. Al igual que ocurre para los efectos directos, los buques bajo bandera del grupo RA son los que mas efectos directos sobre el empleo mundial generan, siendo los buques abanderados dentro del grupo ROCDE los que menores efectos indirectos tienen sobre el empleo mundial.

Tabla 336 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI I

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA           |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 45,2         | 38,2%       | 260,7        | 38,6%       | 130,5        | 38,0%       | 37,7         | 36,7%       |
| <i>Producción energía</i>                | 3,6          | 3,0%        | 21,4         | 3,2%        | 10,5         | 3,1%        | 2,9          | 2,8%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 11,2         | 9,5%        | 63,1         | 9,3%        | 32,2         | 9,4%        | 10,0         | 9,7%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 6,5          | 5,5%        | 36,5         | 5,4%        | 18,4         | 5,4%        | 5,9          | 5,7%        |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 4,8          | 4,1%        | 27,3         | 4,0%        | 14,0         | 4,1%        | 4,2          | 4,1%        |
| <i>Construcción</i>                      | 1,7          | 1,4%        | 10,0         | 1,5%        | 5,1          | 1,5%        | 1,5          | 1,5%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 0,3          | 0,3%        | 1,8          | 0,3%        | 1,0          | 0,3%        | 0,3          | 0,3%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 7,9          | 6,7%        | 44,3         | 6,6%        | 23,4         | 6,8%        | 7,3          | 7,1%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 32,6         | 27,6%       | 184,5        | 27,3%       | 94,6         | 27,6%       | 29,0         | 28,2%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 4,5          | 3,8%        | 25,7         | 3,8%        | 13,3         | 3,9%        | 4,0          | 3,9%        |
| <b>Totales</b>                           | <b>118,3</b> | <b>100%</b> | <b>675,3</b> | <b>100%</b> | <b>343,0</b> | <b>100%</b> | <b>102,8</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

Tabla 337 Efectos indirectos de los buques gaseros sobre el empleo mundial aplicando la base de datos OMI II

| SECTORES ECONÓMICOS                      | EU15         |             | RA           |             | RM           |             | ROCDE        |             |
|--|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|--------------|-------------|
|  | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp          | %           | mdp          | %           |
| <i>Agricultura</i>                       | 44,7         | 38,1%       | 265,5        | 38,8%       | 142,6        | 38,9%       | 36,8         | 36,3%       |
| <i>Producción energía</i>                | 3,6          | 3,1%        | 22,0         | 3,2%        | 11,9         | 3,2%        | 2,8          | 2,8%        |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 11,1         | 9,5%        | 63,6         | 9,3%        | 33,5         | 9,1%        | 9,9          | 9,8%        |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 6,4          | 5,5%        | 36,6         | 5,3%        | 18,9         | 5,2%        | 5,9          | 5,8%        |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 4,8          | 4,1%        | 27,5         | 4,0%        | 14,7         | 4,0%        | 4,2          | 4,1%        |
| <i>Construcción</i>                      | 1,7          | 1,4%        | 10,2         | 1,5%        | 5,5          | 1,5%        | 1,5          | 1,5%        |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 0,3          | 0,3%        | 1,9          | 0,3%        | 1,1          | 0,3%        | 0,3          | 0,3%        |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 7,8          | 6,6%        | 44,7         | 6,5%        | 24,5         | 6,7%        | 7,2          | 7,1%        |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 32,4         | 27,6%       | 186,4        | 27,2%       | 99,6         | 27,2%       | 28,7         | 28,3%       |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 4,5          | 3,8%        | 26,0         | 3,8%        | 14,1         | 3,8%        | 4,0          | 3,9%        |
| <b>Totales</b>                           | <b>117,3</b> | <b>100%</b> | <b>684,4</b> | <b>100%</b> | <b>366,4</b> | <b>100%</b> | <b>101,3</b> | <b>100%</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: "mdp" =miles de personas

## 12.9. Efectos sobre las Emisiones Atmosféricas mundiales

Los resultados que en este apartado muestran el efecto que tiene la actividad de la flota de gaseros sobre una serie de emisiones atmosféricas mundial.

Al igual que en los anteriores apartados, el análisis se realiza según el tipo de buque gasero y según el grupo de banderas de registro, aplicando la base de datos de OMI I y OMI II.

Las emisiones atmosféricas producidas a bordo de los buques gaseros son calculadas en el capítulo 10 de esta tesis. Estas emisiones se imputan en las emisiones directas para cada contaminante dentro del sector de la economía de "Transporte Marítimo".

Los efectos totales sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se muestran en la Tabla 336. Los efectos sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto entre 127 y 132 millones de toneladas según se aplique la metodología OMI I u OMI II. Los efectos sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto alrededor de 0,8 y 0,015 millones de toneladas respectivamente.

El sector más afectado es el de otros servicios de mercado, le siguen un grupo de sectores como son los bienes de equipo y la producción de energía. El sector menos afectado, que presenta el menor efecto es la construcción.

Tabla 338 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O de la flota de gaseros.

| SECTORES ECONÓMICOS                      | OMI I           |                        |                        | OMI II          |                        |                        |
|--|-----------------|------------------------|------------------------|-----------------|------------------------|------------------------|
|  | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>        | N <sub>2</sub> O       | CO <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub>        | N <sub>2</sub> O       |
| <i>Agricultura</i>                       | 1,4628          | 0,1947                 | 0,0089                 | 1,5108          | 0,2011                 | 0,0091                 |
| <i>Producción energía</i>                | 34,1419         | 0,0288                 | 0,0006                 | 36,2565         | 0,0306                 | 0,0007                 |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 5,1827          | 0,0028                 | 0,0006                 | 5,2507          | 0,0028                 | 0,0006                 |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 0,9780          | 0,0002                 | 2,62· 10 <sup>-5</sup> | 0,9822          | 2,07· 10 <sup>-4</sup> | 2,63· 10 <sup>-5</sup> |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 0,2458          | 0,0001                 | 9,82· 10 <sup>-6</sup> | 0,2498          | 1,12· 10 <sup>-4</sup> | 9,98· 10 <sup>-6</sup> |
| <i>Construcción</i>                      | 0,0290          | 4,83· 10 <sup>-6</sup> | 1,31· 10 <sup>-6</sup> | 0,0299          | 4,98· 10 <sup>-6</sup> | 1,35· 10 <sup>-6</sup> |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 83,4351         | 0,6452                 | 0,0038                 | 86,0469         | 0,5412                 | 0,0040                 |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 1,1906          | 0,0042                 | 4,98· 10 <sup>-5</sup> | 1,2108          | 0,0042                 | 5,06· 10 <sup>-5</sup> |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 0,3699          | 0,0001                 | 1,08· 10 <sup>-5</sup> | 0,3761          | 0,0001                 | 1,10· 10 <sup>-5</sup> |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 0,1171          | 0,0055                 | 3,84· 10 <sup>-5</sup> | 0,1195          | 0,0056                 | 3,92· 10 <sup>-5</sup> |
| <b>Totales</b>                           | <b>127,153</b>  | <b>0,882</b>           | <b>0,014</b>           | <b>132,033</b>  | <b>0,786</b>           | <b>0,015</b>           |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

Los efectos totales sobre las emisiones de SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub> se muestran en la Tabla 339. Los efectos sobre las emisiones de SO<sub>x</sub> muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto de alrededor de 0,5 millones de toneladas. Los efectos sobre las emisiones de SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub> muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto alrededor de 0,5 y 0,01 millones de toneladas respectivamente.

 Tabla 339 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub> de la flota de gaseros

| SECTORES ECONÓMICOS                      | OMI I                  |                        |                        | OMI II                 |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|  | SO <sub>x</sub>        | SO <sub>2</sub>        | SO <sub>4</sub>        | SO <sub>x</sub>        | SO <sub>2</sub>        | SO <sub>4</sub>        |
| <i>Agricultura</i>                       | 0,0398                 | 0,0390                 | 0,0008                 | 0,0411                 | 0,0403                 | 0,0008                 |
| <i>Producción energía</i>                | 0,1331                 | 0,1305                 | 0,0027                 | 0,1414                 | 0,1385                 | 0,0028                 |
| <i>Bienes Intermedios</i>                | 0,0143                 | 0,0140                 | 0,0003                 | 0,0145                 | 0,0142                 | 2,90· 10 <sup>-4</sup> |
| <i>Bienes de Equipo</i>                  | 0,0017                 | 0,0017                 | 3,47· 10 <sup>-5</sup> | 0,0017                 | 0,0017                 | 3,49· 10 <sup>-5</sup> |
| <i>Bienes de Consumo</i>                 | 0,0005                 | 0,0005                 | 1,04· 10 <sup>-5</sup> | 5,27· 10 <sup>-4</sup> | 5,17· 10 <sup>-4</sup> | 1,05· 10 <sup>-5</sup> |
| <i>Construcción</i>                      | 5,74· 10 <sup>-5</sup> | 5,62· 10 <sup>-5</sup> | 1,15· 10 <sup>-6</sup> | 5,91· 10 <sup>-5</sup> | 5,79· 10 <sup>-5</sup> | 1,18· 10 <sup>-6</sup> |
| <i>Transporte Marítimo</i>               | 0,3077                 | 0,3015                 | 0,0062                 | 0,3673                 | 0,3600                 | 0,0073                 |
| <i>Resto Transporte y Comunicaciones</i> | 0,0005                 | 0,0005                 | 9,29· 10 <sup>-6</sup> | 4,72· 10 <sup>-4</sup> | 4,63· 10 <sup>-4</sup> | 9,45· 10 <sup>-6</sup> |
| <i>Otros Serv. de Mercado</i>            | 0,0004                 | 0,0004                 | 8,31· 10 <sup>-6</sup> | 4,23· 10 <sup>-4</sup> | 4,14· 10 <sup>-4</sup> | 8,45· 10 <sup>-6</sup> |
| <i>Otros Serv. de no Mercado</i>         | 1,22· 10 <sup>-4</sup> | 1,20· 10 <sup>-4</sup> | 2,45· 10 <sup>-6</sup> | 1,25· 10 <sup>-4</sup> | 1,22· 10 <sup>-4</sup> | 2,50· 10 <sup>-6</sup> |
| <b>Totales</b>                           | <b>0,4982</b>          | <b>0,4882</b>          | <b>0,0100</b>          | <b>0,5676</b>          | <b>0,5563</b>          | <b>0,0114</b>          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

Los efectos totales sobre las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y NMVOC se muestran en la Tabla 340. Los efectos sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto entre 1,3 y 1,5 millones de toneladas según se aplique la metodología OMI I u OMI II. Los efectos sobre las emisiones de CO y NMVOC muestran que la actividad de la flota de gaseros produjo un efecto alrededor de 0,6 y 0,2 millones de toneladas respectivamente.

En la Tabla 341 se ven los efectos totales de los buques LNG y LPG para cada contaminante, se observa que, para los contaminantes CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, los buques LNG tienen un mayor efecto, mientras que para los contaminantes NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub> y CO, los efectos de los LPG son superiores. En los contaminantes N<sub>2</sub>O y NMVOC, depende de la metodología para el cálculo de combustible, varía quien tiene un mayor efecto.

Tabla 340 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y NMVOC de la flota de gaseros

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                  |               |                        | OMI II                 |               |                        |
|-----------------------------------|------------------------|---------------|------------------------|------------------------|---------------|------------------------|
|                                   | NO <sub>x</sub>        | CO            | NMVOC                  | NO <sub>x</sub>        | CO            | NMVOC                  |
| Agricultura                       | 0,0281                 | 0,0326        | 0,0150                 | 0,0290                 | 0,0337        | 0,0155                 |
| Producción energía                | 0,0579                 | 0,0727        | 0,0076                 | 0,0615                 | 0,0772        | 0,0080                 |
| Bienes Intermedios                | 0,0112                 | 0,1984        | 0,0546                 | 0,0113                 | 0,2010        | 0,0553                 |
| Bienes de Equipo                  | 0,0035                 | 0,0232        | 0,0074                 | 0,0035                 | 0,0233        | 0,0075                 |
| Bienes de Consumo                 | 0,0010                 | 0,0030        | 0,0023                 | 0,0010                 | 0,0030        | 0,0023                 |
| Construcción                      | 2,26· 10 <sup>-4</sup> | 0,0006        | 6,63· 10 <sup>-4</sup> | 2,32· 10 <sup>-4</sup> | 0,0006        | 6,82· 10 <sup>-4</sup> |
| Transporte Marítimo               | 1,2097                 | 0,2147        | 0,0912                 | 1,4092                 | 0,2062        | 0,0932                 |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0,0098                 | 0,0300        | 0,0029                 | 0,0100                 | 0,0305        | 0,0030                 |
| Otros Serv. de Mercado            | 0,0013                 | 0,0057        | 0,0019                 | 0,0013                 | 0,0058        | 0,0019                 |
| Otros Serv. de no Mercado         | 3,59· 10 <sup>-4</sup> | 0,0016        | 5,36· 10 <sup>-4</sup> | 0,0004                 | 0,0017        | 5,47· 10 <sup>-4</sup> |
| <b>Totales</b>                    | <b>1,3231</b>          | <b>0,5825</b> | <b>0,1841</b>          | <b>1,5274</b>          | <b>0,5830</b> | <b>0,1880</b>          |

Unidades: millones de toneladas

 Tabla 341 Efectos totales sobre los contaminantes CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, N<sub>2</sub>O, SO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, CO y NMVOC, según tipo de buque gasero

| CONTAMINANTES    | OMI I          |                | OMI II         |                |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                  | LNG            | LPG            | LNG            | LPG            |
| CO <sub>2</sub>  | 53,2455        | 25,8030        | 67,2816        | 64,7515        |
| CH <sub>4</sub>  | 0,6441         | 0,0957         | 0,6670         | 0,1190         |
| N <sub>2</sub> O | 0,0023         | 0,0055         | 0,0075         | 0,0070         |
| NO <sub>x</sub>  | 0,5113         | 0,7212         | 0,4708         | 1,0566         |
| SO <sub>x</sub>  | 0,1299         | 0,2460         | 0,2127         | 0,3550         |
| SO <sub>2</sub>  | 0,1273         | 0,2411         | 0,2084         | 0,3479         |
| SO <sub>4</sub>  | 0,0026         | 0,0049         | 0,0043         | 0,0071         |
| CO               | 0,1150         | 0,2093         | 0,3374         | 0,2456         |
| NMVOC            | 0,0562         | 0,0671         | 0,1032         | 0,0848         |
| <b>Totales</b>   | <b>53,2455</b> | <b>25,8030</b> | <b>67,2816</b> | <b>64,7515</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

Respecto al análisis por grupo de banderas, los buques bajo bandera del grupo RA son los que mayor efecto tienen para todos los contaminantes, siendo los buques registrados en el grupo de banderas ROCDE los que menor efectos tienen para todos los contaminantes.

En la Tabla 342 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de CO<sub>2</sub>. Para todos los grupos, el mayor efecto se observa sobre el sector del transporte marítimo, seguido por el sector de la Producción de energía. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto es el de la construcción. Los mayores efectos directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector de la producción de energía, seguido por un grupo de sectores como son bienes intermedios, la agricultura y resto de transporte y comunicaciones. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de la construcción.

Tabla 342 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> mundial por grupo de bandera de registro

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I         |               |               |               | OMI II        |               |               |              |
|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|                                   | EU15          | RA            | RM            | ROCDE         | EU15          | RA            | RM            | ROCDE        |
| Agricultura                       | 0,1395        | 0,8046        | 0,4025        | 0,1162        | 0,1379        | 0,8191        | 0,4401        | 0,1136       |
| Producción energía                | 3,1885        | 19,244        | 9,2372        | 2,4722        | 3,1197        | 19,886        | 10,892        | 2,3589       |
| Bienes Intermedios                | 0,5033        | 2,8075        | 1,4365        | 0,4355        | 0,5010        | 2,8281        | 1,4896        | 0,4319       |
| Bienes de Equipo                  | 0,0941        | 0,5300        | 0,2664        | 0,0875        | 0,0940        | 0,5313        | 0,2696        | 0,0873       |
| Bienes de Consumo                 | 0,0234        | 0,1326        | 0,0695        | 0,0203        | 0,0233        | 0,1338        | 0,0726        | 0,0201       |
| Construcción                      | 0,0028        | 0,0159        | 0,0080        | 0,0024        | 0,0027        | 0,0161        | 0,0087        | 0,0023       |
| Transporte Marítimo               | 8,1635        | 47,029        | 21,469        | 6.2534        | 7,7875        | 47,406        | 24,357        | 5,717        |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0,1131        | 0,6367        | 0,3366        | 0,1043        | 0,1125        | 0,6428        | 0,3523        | 0,1032       |
| Otros Serv. de Mercado            | 0,0354        | 0,1988        | 0,1041        | 0,0316        | 0,0352        | 0,2006        | 0,1090        | 0,0312       |
| Otros Serv. de no Mercado         | 0,0112        | 0,0633        | 0,0327        | 0,0100        | 0,0111        | 0,0640        | 0,0346        | 0,0098       |
| <b>Totales</b>                    | <b>12,275</b> | <b>71,902</b> | <b>33,362</b> | <b>9,6137</b> | <b>11,825</b> | <b>72,970</b> | <b>38,282</b> | <b>8,956</b> |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

En la Tabla 343 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de CH<sub>4</sub>. Para todos los grupos, el mayor efecto total se observa sobre el sector del transporte marítimo, seguido por el sector de la Producción de energía. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto total es el de la construcción. Los mayores efectos directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector la agricultura, seguido por un grupo de sectores como son la producción de energía, resto de transporte y comunicaciones y otros servicios de no mercado. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de la construcción.

En la Tabla 344 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de N<sub>2</sub>O. Para todos los grupos, el mayor efecto se observa sobre el sector de la agricultura seguido por el transporte marítimo. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto es el de la construcción. Los mayores efectos directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector de la agricultura, seguido por un grupo de sectores como son bienes intermedios. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de la construcción, bienes de consumo, bienes de equipo y otros servicios de mercado.

Tabla 343 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CH<sub>4</sub> mundial por grupo de bandera de registro.

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                  |                        |                        |                        | OMI II                 |                        |                        |                        |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                   | EU15                   | RA                     | RM                     | ROCDE                  | EU15                   | RA                     | RM                     | ROCDE                  |
| Agricultura                       | 0,0186                 | 0,1071                 | 0,0536                 | 0,0155                 | 0,0184                 | 0,1090                 | 0,0586                 | 0,0151                 |
| Producción energía                | 0,0027                 | 0,0163                 | 0,0078                 | 0,0021                 | 0,0026                 | 0,0168                 | 0,0092                 | 0,0020                 |
| Bienes Intermedios                | 2,7 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0015                 | 7,6 · 10 <sup>-4</sup> | 2,3 · 10 <sup>-4</sup> | 2,7 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0015                 | 7,9 · 10 <sup>-4</sup> | 2,3 · 10 <sup>-4</sup> |
| Bienes de Equipo                  | 2 · 10 <sup>-5</sup>   | 1,1 · 10 <sup>-4</sup> | 5,6 · 10 <sup>-5</sup> | 1,8 · 10 <sup>-5</sup> | 2 · 10 <sup>-5</sup>   | 1,1 · 10 <sup>-4</sup> | 5,7 · 10 <sup>-5</sup> | 1,8 · 10 <sup>-5</sup> |
| Bienes de Consumo                 | 1,1 · 10 <sup>-5</sup> | 6 · 10 <sup>-5</sup>   | 3,1 · 10 <sup>-5</sup> | 9,1 · 10 <sup>-6</sup> | 1 · 10 <sup>-5</sup>   | 6 · 10 <sup>-5</sup>   | 3,3 · 10 <sup>-5</sup> | 9 · 10 <sup>-6</sup>   |
| Construcción                      | 4,6 · 10 <sup>-7</sup> | 2,6 · 10 <sup>-6</sup> | 1,3 · 10 <sup>-6</sup> | 4 · 10 <sup>-7</sup>   | 4,5 · 10 <sup>-7</sup> | 2,7 · 10 <sup>-6</sup> | 1,4 · 10 <sup>-6</sup> | 3,9 · 10 <sup>-7</sup> |
| Transporte Marítimo               | 0,0753                 | 0,3775                 | 0,1304                 | 0,0622                 | 0,0656                 | 0,3170                 | 0,1091                 | 0,0497                 |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 4 · 10 <sup>-4</sup>   | 0,0022                 | 0,0012                 | 3,7 · 10 <sup>-4</sup> | 3,9 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0022                 | 0,0012                 | 3,6 · 10 <sup>-4</sup> |
| Otros Serv. de Mercado            | 7,3 · 10 <sup>-6</sup> | 4,1 · 10 <sup>-5</sup> | 2,2 · 10 <sup>-5</sup> | 6,6 · 10 <sup>-6</sup> | 7,3 · 10 <sup>-6</sup> | 4,2 · 10 <sup>-5</sup> | 2,3 · 10 <sup>-5</sup> | 6,5 · 10 <sup>-6</sup> |
| Otros Serv. de no Mercado         | 5,3 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0030                 | 0,0015                 | 4,7 · 10 <sup>-4</sup> | 5,2 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0030                 | 0,0016                 | 4,6 · 10 <sup>-4</sup> |
| <b>Totales</b>                    | <b>0,0977</b>          | <b>0,5077</b>          | <b>0,1953</b>          | <b>0,0808</b>          | <b>0,0877</b>          | <b>0,4498</b>          | <b>0,1806</b>          | <b>0,0679</b>          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

En la Tabla 345 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de SO<sub>x</sub>. El SO<sub>x</sub> está compuesto por los contaminantes SO<sub>2</sub> y SO<sub>4</sub>, así que analizando los efectos del SO<sub>x</sub> se obtienen correlativamente los efectos de los otros dos contaminantes.

Para todos los grupos, el mayor efecto se observa sobre el sector del transporte marítimo, seguido por un grupo de sectores como la producción de energía y la agricultura. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto es el de la construcción. Los mayores efectos directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector de la producción de energía, seguido por un grupo de sectores como son la agricultura y los bienes intermedios. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de la construcción, resto transporte y comunicaciones, y otros servicios de mercado.

En la Tabla 346 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de NO<sub>x</sub>. Para todos los grupos, el mayor efecto es sobre el sector transporte marítimo seguido por el sector de la producción de energía. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto es el de la construcción. Los mayores efectos directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector de la agricultura, seguido por un grupo de sectores como

son bienes producción de energía, resto transporte y comunicación y, otros servicios de mercado. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de la construcción.

Tabla 344 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de N<sub>2</sub>O mundial por grupo de bandera de registro

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                  |                        |                        |                        | OMI II                 |                        |                        |                        |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                   | EU15                   | RA                     | RM                     | ROCDE                  | EU15                   | RA                     | RM                     | ROCDE                  |
| Agricultura                       | 8,4 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0049                 | 0,0024                 | 7 · 10 <sup>-4</sup>   | 8,3 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0050                 | 0,0027                 | 6,9 · 10 <sup>-4</sup> |
| Producción energía                | 5,7 · 10 <sup>-5</sup> | 3,5 · 10 <sup>-4</sup> | 1,7 · 10 <sup>-4</sup> | 4,5 · 10 <sup>-5</sup> | 5,6 · 10 <sup>-5</sup> | 3,6 · 10 <sup>-4</sup> | 2 · 10 <sup>-4</sup>   | 4,3 · 10 <sup>-5</sup> |
| Bienes Intermedios                | 5,7 · 10 <sup>-5</sup> | 3,2 · 10 <sup>-4</sup> | 1,6 · 10 <sup>-4</sup> | 5 · 10 <sup>-5</sup>   | 5,7 · 10 <sup>-5</sup> | 3,2 · 10 <sup>-4</sup> | 1,7 · 10 <sup>-4</sup> | 4,9 · 10 <sup>-5</sup> |
| Bienes de Equipo                  | 2,5 · 10 <sup>-6</sup> | 1,4 · 10 <sup>-5</sup> | 7,1 · 10 <sup>-6</sup> | 2,3 · 10 <sup>-6</sup> | 2,5 · 10 <sup>-6</sup> | 1,4 · 10 <sup>-5</sup> | 7,2 · 10 <sup>-6</sup> | 2,3 · 10 <sup>-6</sup> |
| Bienes de Consumo                 | 9,4 · 10 <sup>-7</sup> | 5,3 · 10 <sup>-6</sup> | 2,8 · 10 <sup>-6</sup> | 8,1 · 10 <sup>-7</sup> | 9,3 · 10 <sup>-7</sup> | 5,3 · 10 <sup>-6</sup> | 2,9 · 10 <sup>-6</sup> | 8 · 10 <sup>-7</sup>   |
| Construcción                      | 1,2 · 10 <sup>-7</sup> | 7,2 · 10 <sup>-7</sup> | 3,6 · 10 <sup>-7</sup> | 1,1 · 10 <sup>-7</sup> | 1,2 · 10 <sup>-7</sup> | 7,3 · 10 <sup>-7</sup> | 3,9 · 10 <sup>-7</sup> | 1,1 · 10 <sup>-7</sup> |
| Transporte Marítimo               | 3,1 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0022                 | 9,4 · 10 <sup>-4</sup> | 3,1 · 10 <sup>-4</sup> | 3,1 · 10 <sup>-4</sup> | 0,0022                 | 0,0011                 | 2,1 · 10 <sup>-4</sup> |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 4,7 · 10 <sup>-6</sup> | 2,7 · 10 <sup>-5</sup> | 1,4 · 10 <sup>-5</sup> | 4,4 · 10 <sup>-6</sup> | 4,7 · 10 <sup>-6</sup> | 2,7 · 10 <sup>-5</sup> | 1,5 · 10 <sup>-5</sup> | 4,3 · 10 <sup>-6</sup> |
| Otros Serv. de Mercado            | 1 · 10 <sup>-6</sup>   | 5,8 · 10 <sup>-6</sup> | 3 · 10 <sup>-6</sup>   | 9,2 · 10 <sup>-7</sup> | 1 · 10 <sup>-6</sup>   | 5,9 · 10 <sup>-6</sup> | 3,2 · 10 <sup>-6</sup> | 9,1 · 10 <sup>-7</sup> |
| Otros Serv. de no Mercado         | 3,7 · 10 <sup>-6</sup> | 2,1 · 10 <sup>-5</sup> | 1,1 · 10 <sup>-5</sup> | 3,3 · 10 <sup>-6</sup> | 3,6 · 10 <sup>-6</sup> | 2,1 · 10 <sup>-5</sup> | 1,1 · 10 <sup>-5</sup> | 3,2 · 10 <sup>-6</sup> |
| <b>Totales</b>                    | <b>0,0013</b>          | <b>0,0078</b>          | <b>0,0037</b>          | <b>0,0011</b>          | <b>0,0013</b>          | <b>0,0079</b>          | <b>0,0042</b>          | <b>0,0010</b>          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

Tabla 345 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de SO<sub>x</sub> mundial por grupo de bandera de registro.

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                   |                        |                        |                        | OMI II                 |                        |                        |                        |
|-----------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                                   | EU15                    | RA                     | RM                     | ROCDE                  | EU15                   | RA                     | RM                     | ROCDE                  |
| Agricultura                       | 0,0038                  | 0,0219                 | 0,0110                 | 0,0032                 | 0,0038                 | 0,0223                 | 0,0120                 | 0,0031                 |
| Producción energía                | 0,0124                  | 0,0750                 | 0,0360                 | 0,0096                 | 0,0122                 | 0,0775                 | 0,0425                 | 0,0092                 |
| Bienes Intermedios                | 0,0014                  | 0,0078                 | 0,0040                 | 0,0012                 | 0,0014                 | 0,0078                 | 0,0041                 | 0,0012                 |
| Bienes de Equipo                  | 1,67 · 10 <sup>-4</sup> | 9,4 · 10 <sup>-4</sup> | 4,7 · 10 <sup>-4</sup> | 1,6 · 10 <sup>-4</sup> | 1,7 · 10 <sup>-4</sup> | 9,4 · 10 <sup>-4</sup> | 4,8 · 10 <sup>-4</sup> | 1,5 · 10 <sup>-4</sup> |
| Bienes de Consumo                 | 4,94 · 10 <sup>-5</sup> | 2,8 · 10 <sup>-4</sup> | 1,5 · 10 <sup>-4</sup> | 4,3 · 10 <sup>-5</sup> | 4,9 · 10 <sup>-5</sup> | 2,8 · 10 <sup>-4</sup> | 1,5 · 10 <sup>-4</sup> | 4,2 · 10 <sup>-5</sup> |
| Construcción                      | 5,45 · 10 <sup>-6</sup> | 3,1 · 10 <sup>-5</sup> | 1,6 · 10 <sup>-5</sup> | 4,7 · 10 <sup>-6</sup> | 5,4 · 10 <sup>-6</sup> | 3,2 · 10 <sup>-5</sup> | 1,7 · 10 <sup>-5</sup> | 4,6 · 10 <sup>-6</sup> |
| Transporte Marítimo               | 0,0265                  | 0,1725                 | 0,0898                 | 0,0190                 | 0,0271                 | 0,2026                 | 0,1176                 | 0,0200                 |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 4,41 · 10 <sup>-5</sup> | 2,5 · 10 <sup>-4</sup> | 1,3 · 10 <sup>-4</sup> | 4,1 · 10 <sup>-5</sup> | 4,4 · 10 <sup>-5</sup> | 2,5 · 10 <sup>-4</sup> | 1,4 · 10 <sup>-4</sup> | 4 · 10 <sup>-5</sup>   |
| Otros Serv. de Mercado            | 3,98 · 10 <sup>-5</sup> | 2,2 · 10 <sup>-4</sup> | 1,2 · 10 <sup>-4</sup> | 3,5 · 10 <sup>-5</sup> | 4 · 10 <sup>-5</sup>   | 2,3 · 10 <sup>-4</sup> | 1,2 · 10 <sup>-4</sup> | 3,5 · 10 <sup>-5</sup> |
| Otros Serv. de no Mercado         | 1,17 · 10 <sup>-5</sup> | 6,6 · 10 <sup>-5</sup> | 3,4 · 10 <sup>-5</sup> | 1 · 10 <sup>-5</sup>   | 1,2 · 10 <sup>-5</sup> | 6,7 · 10 <sup>-5</sup> | 3,6 · 10 <sup>-5</sup> | 1 · 10 <sup>-5</sup>   |
| <b>Totales</b>                    | <b>0,0444</b>           | <b>0,2789</b>          | <b>0,1416</b>          | <b>0,0332</b>          | <b>0,0447</b>          | <b>0,3120</b>          | <b>0,1771</b>          | <b>0,0338</b>          |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

En la Tabla 347 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de CO. Para todos los grupos, el mayor efecto se observa sobre el sector del transporte marítimo seguido por un grupo de sectores como son la producción de energía y los bienes intermedios. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto es el de la construcción seguido por otros servicios de no mercado. Los mayores efectos

directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector de bienes intermedios seguido por un grupo de sectores como son el de la agricultura, producción de energía y resto de transporte y comunicación. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de la construcción.

Tabla 346 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de NO<sub>x</sub> mundial por grupo de bandera de registro

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                 |                       |                       |                       | OMI II                |                       |                       |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                   | EU15                  | RA                    | RM                    | ROCDE                 | EU15                  | RA                    | RM                    | ROCDE                 |
| Agricultura                       | 0,0027                | 0,0154                | 0,0077                | 0,0022                | 0,0026                | 0,0157                | 0,0084                | 0,0022                |
| Producción energía                | 0,0054                | 0,0326                | 0,0157                | 0,0042                | 0,0053                | 0,0337                | 0,0185                | 0,0040                |
| Bienes Intermedios                | 0,0011                | 0,0061                | 0,0031                | 9,4· 10 <sup>-4</sup> | 0,0011                | 0,0061                | 0,0032                | 9,3· 10 <sup>-4</sup> |
| Bienes de Equipo                  | 3,4· 10 <sup>-4</sup> | 0,0019                | 0,0010                | 3,1· 10 <sup>-4</sup> | 3,4· 10 <sup>-4</sup> | 0,0019                | 0,0010                | 3,1· 10 <sup>-4</sup> |
| Bienes de Consumo                 | 9,6· 10 <sup>-5</sup> | 5,4· 10 <sup>-4</sup> | 2,8· 10 <sup>-4</sup> | 8,3· 10 <sup>-5</sup> | 9,5· 10 <sup>-5</sup> | 5,5· 10 <sup>-4</sup> | 3· 10 <sup>-4</sup>   | 8,2· 10 <sup>-5</sup> |
| Construcción                      | 2,1· 10 <sup>-5</sup> | 1,2· 10 <sup>-4</sup> | 6,2· 10 <sup>-5</sup> | 1,8· 10 <sup>-5</sup> | 2,1· 10 <sup>-5</sup> | 1,3· 10 <sup>-4</sup> | 6,8· 10 <sup>-5</sup> | 1,8· 10 <sup>-5</sup> |
| Transporte Marítimo               | 0,1002                | 0,6964                | 0,3504                | 0,0628                | 0,1026                | 0,7824                | 0,4585                | 0,0656                |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 9,3· 10 <sup>-4</sup> | 0,0052                | 0,0028                | 8,6· 10 <sup>-4</sup> | 9,2· 10 <sup>-4</sup> | 0,0053                | 0,0029                | 8,5· 10 <sup>-4</sup> |
| Otros Serv. de Mercado            | 1,3· 10 <sup>-4</sup> | 7· 10 <sup>-4</sup>   | 3,7· 10 <sup>-4</sup> | 1,1· 10 <sup>-4</sup> | 1,2· 10 <sup>-4</sup> | 7,1· 10 <sup>-4</sup> | 3,9· 10 <sup>-4</sup> | 1,1· 10 <sup>-4</sup> |
| Otros Serv. de no Mercado         | 3,4· 10 <sup>-5</sup> | 1,9· 10 <sup>-4</sup> | 1· 10 <sup>-4</sup>   | 3,1· 10 <sup>-5</sup> | 3,4· 10 <sup>-5</sup> | 2· 10 <sup>-4</sup>   | 1,1· 10 <sup>-4</sup> | 3· 10 <sup>-5</sup>   |
| <b>Totales</b>                    | <b>0,1109</b>         | <b>0,7592</b>         | <b>0,3814</b>         | <b>0,0716</b>         | <b>0,1131</b>         | <b>0,8467</b>         | <b>0,4934</b>         | <b>0,0741</b>         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

Tabla 347 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de CO mundial por grupo de bandera de registro.

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                 |                       |                       |                       | OMI II                |                       |                       |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                   | EU15                  | RA                    | RM                    | ROCDE                 | EU15                  | RA                    | RM                    | ROCDE                 |
| Agricultura                       | 0,0031                | 0,0179                | 0,0090                | 0,0026                | 0,0031                | 0,0183                | 0,0098                | 0,0025                |
| Producción energía                | 0,0068                | 0,0410                | 0,0197                | 0,0053                | 0,0066                | 0,0423                | 0,0232                | 0,0050                |
| Bienes Intermedios                | 0,0193                | 0,1075                | 0,0550                | 0,0167                | 0,0192                | 0,1083                | 0,0570                | 0,0165                |
| Bienes de Equipo                  | 0,0022                | 0,0126                | 0,0063                | 0,0021                | 0,0022                | 0,0126                | 0,0064                | 0,0021                |
| Bienes de Consumo                 | 2,8· 10 <sup>-4</sup> | 0,0016                | 8,4· 10 <sup>-4</sup> | 2,5· 10 <sup>-4</sup> | 2,8· 10 <sup>-4</sup> | 0,0016                | 8,8· 10 <sup>-4</sup> | 2,4· 10 <sup>-4</sup> |
| Construcción                      | 5,6· 10 <sup>-5</sup> | 3,2· 10 <sup>-4</sup> | 1,6· 10 <sup>-4</sup> | 4,8· 10 <sup>-5</sup> | 5,6· 10 <sup>-5</sup> | 3,3· 10 <sup>-4</sup> | 1,8· 10 <sup>-4</sup> | 4,7· 10 <sup>-5</sup> |
| Transporte Marítimo               | 0,0219                | 0,1180                | 0,0552                | 0,0196                | 0,0205                | 0,1120                | 0,0558                | 0,0179                |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 0,0028                | 0,0160                | 0,0085                | 0,0026                | 0,0028                | 0,0162                | 0,0089                | 0,0026                |
| Otros Serv. de Mercado            | 5,5· 10 <sup>-4</sup> | 0,0031                | 0,0016                | 4,9· 10 <sup>-4</sup> | 5,4· 10 <sup>-4</sup> | 0,0031                | 0,0017                | 4,8· 10 <sup>-4</sup> |
| Otros Serv. de no Mercado         | 1,5· 10 <sup>-4</sup> | 8,7· 10 <sup>-4</sup> | 4,5· 10 <sup>-4</sup> | 1,4· 10 <sup>-4</sup> | 1,5· 10 <sup>-4</sup> | 8,8· 10 <sup>-4</sup> | 4,8· 10 <sup>-4</sup> | 1,4· 10 <sup>-4</sup> |
| <b>Totales</b>                    | <b>0,0572</b>         | <b>0,3189</b>         | <b>0,1567</b>         | <b>0,0497</b>         | <b>0,0555</b>         | <b>0,3156</b>         | <b>0,1644</b>         | <b>0,0476</b>         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

En la Tabla 348 se observan los efectos totales de la flota según su grupo de bandera sobre las emisiones de NMVOC. Para todos los grupos, el mayor efecto se observa sobre el sector del transporte marítimo seguido por un grupo de sectores como son la agricultura y los bienes intermedios. Para todos los grupos de banderas, el sector donde se produce el menor efecto es el de otros servicios de no mercado, seguido por el sector de la construcción. Los mayores efectos directos los produce el sector del transporte marítimo, seguido del sector de la producción de energía y bienes de equipo; teniendo los menores efectos directos sobre los sectores de la agricultura, construcción, resto de transporte y comunicación y otros servicios de no mercado. Respecto a los efectos indirectos, el mayor efecto se produce sobre el sector de bienes intermedios seguido por el sector de la agricultura. Los menores efectos indirectos se encuentran en el sector de y otros servicios de no mercado seguido por el sector de la construcción.

Tabla 348 Efectos totales de la flota de gaseros sobre las emisiones de NMVOC mundial por grupo de bandera de registro.

| SECTORES ECONÓMICOS               | OMI I                 |                       |                       |                       | OMI II                |                       |                       |                       |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
|                                   | EU15                  | RA                    | RM                    | ROCDE                 | EU15                  | RA                    | RM                    | ROCDE                 |
| Agricultura                       | 0,0014                | 0,0083                | 0,0041                | 0,0012                | 0,0014                | 0,0084                | 0,0045                | 0,0012                |
| Producción energía                | 7,1· 10 <sup>-4</sup> | 0,0043                | 0,0021                | 5,5· 10 <sup>-4</sup> | 6,9· 10 <sup>-4</sup> | 0,0044                | 0,0024                | 5,2· 10 <sup>-4</sup> |
| Bienes Intermedios                | 0,0053                | 0,0296                | 0,0151                | 0,0046                | 0,0053                | 0,0298                | 0,0157                | 0,0046                |
| Bienes de Equipo                  | 7,2· 10 <sup>-4</sup> | 0,0040                | 0,0020                | 6,7· 10 <sup>-4</sup> | 7,2· 10 <sup>-4</sup> | 0,0040                | 0,0021                | 6,6· 10 <sup>-4</sup> |
| Bienes de Consumo                 | 2,2· 10 <sup>-4</sup> | 0,0012                | 6,4· 10 <sup>-4</sup> | 1,9· 10 <sup>-4</sup> | 2,1· 10 <sup>-4</sup> | 0,0012                | 6,7· 10 <sup>-4</sup> | 1,8· 10 <sup>-4</sup> |
| Construcción                      | 6,3· 10 <sup>-5</sup> | 3,6· 10 <sup>-4</sup> | 1,8· 10 <sup>-4</sup> | 5,4· 10 <sup>-5</sup> | 6,2· 10 <sup>-5</sup> | 3,7· 10 <sup>-4</sup> | 2· 10 <sup>-4</sup>   | 5,3· 10 <sup>-5</sup> |
| Transporte Marítimo               | 0,0090                | 0,0516                | 0,0236                | 0,0072                | 0,0086                | 0,0516                | 0,0265                | 0,0066                |
| Resto Transporte y Comunicaciones | 2,8· 10 <sup>-4</sup> | 0,0016                | 8,3· 10 <sup>-4</sup> | 2,6· 10 <sup>-4</sup> | 2,8· 10 <sup>-4</sup> | 0,0016                | 8,7· 10 <sup>-4</sup> | 2,5· 10 <sup>-4</sup> |
| Otros Serv. de Mercado            | 1,8· 10 <sup>-4</sup> | 0,0010                | 5,3· 10 <sup>-4</sup> | 1,6· 10 <sup>-4</sup> | 1,8· 10 <sup>-4</sup> | 0,0010                | 5,5· 10 <sup>-4</sup> | 1,6· 10 <sup>-4</sup> |
| Otros Serv. de no Mercado         | 5,1· 10 <sup>-5</sup> | 2,9· 10 <sup>-4</sup> | 1,5· 10 <sup>-4</sup> | 4,6· 10 <sup>-5</sup> | 5,1· 10 <sup>-5</sup> | 2,9· 10 <sup>-4</sup> | 1,6· 10 <sup>-4</sup> | 4,5· 10 <sup>-5</sup> |
| <b>Totales</b>                    | <b>0,0179</b>         | <b>0,1022</b>         | <b>0,0492</b>         | <b>0,0149</b>         | <b>0,0175</b>         | <b>0,1027</b>         | <b>0,0536</b>         | <b>0,0142</b>         |

Fuente: Elaboración propia. Unidades: millones de toneladas

**EXTENSIONES.  
DESCARBONIZACIÓN DEL  
TRANSPORTE MARÍTIMO**



## 13. DESCARBONIZACIÓN DEL TRANSPORTE MARÍTIMO

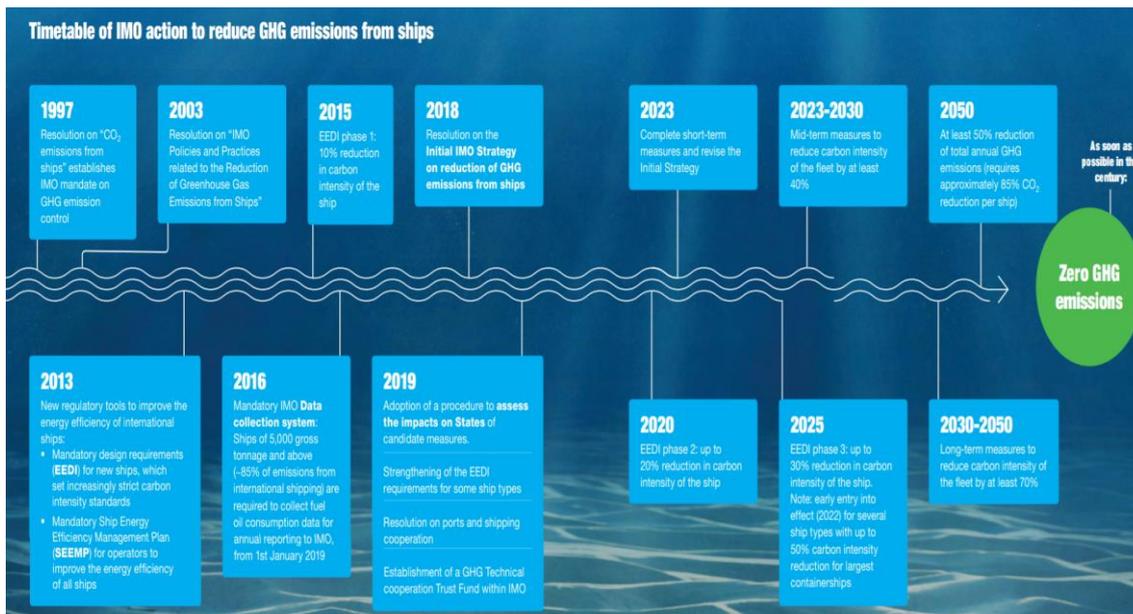
La situación económica actual depende directamente del transporte de mercancías. Las actividades que están intrínsecamente relacionadas con la creación de valor de productos y servicios que satisfagan las necesidades de la sociedad y del individuo, no podrían llevarse a cabo sin la posibilidad de realizar el transporte de bienes o servicios a la población (Skrúcaný *et al.*, 2018).

En el Acuerdo sobre el Cambio Climático de París de 2015 estableció ambiciones claras para mitigar las emisiones de GEI de todas las actividades económicas. Esto incluye un objetivo a largo plazo de mantener el aumento de la temperatura media mundial por debajo de los 2°C por encima de los niveles preindustriales; tener como objetivo limitar el aumento a 1,5°C; y que las emisiones globales alcancen su punto máximo lo antes posible para comenzar el abatimiento de estas rápidamente. Aunque el transporte marítimo no está explícitamente excluido del Acuerdo Climático de París, se podría discutir en qué medida está realmente cubierto por él. El acuerdo no menciona el transporte marítimo internacional y, considerando que el transporte marítimo internacional es una actividad global, los países no han incluido el sector en sus Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional que forman la columna vertebral del Acuerdo de París.

El transporte marítimo es el encargado de mover alrededor del 90% de las mercancías a nivel global (Psaraftis, 2018; Ng *et al.*, 2021), es decir, el transporte marítimo es un sistema que ya se encuentra incluido como parte esencial de la producción mundial y por lo tanto, para cumplir con los requisitos de sostenibilidad globales, el poder realizar esta actividad de transporte de manera eficaz es vital, siendo entonces esencial realizar el transporte con la menor impacto posible sobre el medio ambiente y con la menor producción de emisiones atmosféricas a nivel global posible (Pettit *et al.*, 2018; Arioli *et al.*, 2020).

Las emisiones que producen el calentamiento global son sobre las que se están poniendo mayor atención en los últimos años, dado que su efecto es a nivel mundial. La industria marítima a través de la OMI tiene metas ambiciosas en apoyo del Objetivo número 13 de Desarrollo Sostenible de la ONU, para llevar a cabo la descarbonización del transporte marítimo, teniendo como meta reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 40% en 2030 comparado con los niveles del año 2008, alcanzando una reducción de entre 70-85% de emisiones de CO<sub>2</sub> en 2050 (con una reducción de los GEI del 50%) comparado también con los niveles del año 2008, con la finalidad de alcanzar un transporte sin emisiones de GEI lo antes posible dentro del siglo XXI. Aunque bien es cierto que aún existen buques que consumen hasta un 30% más de combustible de lo necesario debido a un diseño imperfecto, propulsión ineficiente o deficiencias de mantenimiento en el timón y la hélice (CEPAL, 2011).

Figura 26 Estrategia de OMI para descarbonizar el transporte marítimo.



Fuente: International Maritime Organization, (2018)

La OCDE en su informe de 2018 dijo que es probable que las emisiones de GEI causadas por el transporte marítimo podrían disminuir para 2035 como consecuencia de una menor utilización de combustibles fósiles y una mayor regionalización del comercio, pero esto sólo resultaría en una disminución moderada. Para lograr mejores resultados, se necesitarían otras mejoras significativas a nivel operativo y técnico (OCDE/ITF, 2018). Es decir, para lograr la descarbonización del transporte marítimo, son necesarias poner en marcha herramientas que permitan el objetivo de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y GEI. Tres son las herramientas o medidas que con más frecuencia son evaluadas con el fin de descarbonizar el transporte marítimo, estas son: medidas tecnológicas, operativas y políticas (Halim *et al.*, 2018; Psaraftis, 2018; Wan *et al.*, 2018; Psaraftis *et al.*, 2021).

Cada una de las diferentes herramientas o medidas que se encuentran bajo análisis o que ya están instauradas como parte de transporte marítimo, tienen su impacto económico para las empresas navieras, y, en consecuencia, este impacto económico también podría afectar sobre toda la cadena de valor de los productos transportados por buques, siendo esto del 80 al 90% de las mercancías mundiales, según el estudio que se consulte.

Por otro lado, aunque la emisión fundamental que se trata para descarbonizar el transporte marítimo es el CO<sub>2</sub>, otras dos emisiones son objetivo de reducción para la OMI: las emisiones de NO<sub>x</sub> y de SO<sub>x</sub>.

A continuación, se van a mostrar de manera breve que medidas tecnológicas, operativas y políticas se están empleando en el transporte marítimo a fecha de este trabajo de investigación.

## 13.1. Medidas tecnológicas

OMI ha desarrollado una serie de indicadores con los que hay que cumplir para poder desarrollar la actividad de transporte en línea con los objetivos de descarbonización del transporte marítimo. Estos indicadores están incluidos en el marco legislativo promulgado por OMI por lo que son de obligado cumplimiento para los buques (ver capítulo 3.5). Para cumplir con estos indicadores y normativas, en muchos casos, es necesario aplicar tecnologías a bordo de los buques para lograr la reducción de las emisiones atmosféricas deseada.

En este capítulo se tratan las soluciones tecnológicas que están actualmente siendo utilizadas o evaluadas por la industria marítima para lograr la descarbonización del transporte marítimo.

Mejorar la eficiencia energética a través de medidas tecnológicas es el objetivo del reglamento global sobre la eficiencia energética de los buques (MARPOL VI). Este reglamento exige que los buques construidos después del 1 de enero de 2013 cumplan con un nivel mínimo de eficiencia energética a través de la comparación del diseño con el valor del EEDI obtenido, según el diseño del barco y los datos de rendimiento del motor.

Las soluciones tecnológicas tratan de utilizar medios técnicos para mejorar la eficiencia energética de los buques, reduciendo el consumo de combustible y, de este modo se reducirán así las emisiones de CO<sub>2</sub> por trabajo de transporte (carga transportada por milla náutica).

Las medidas tecnológicas tienen principalmente dos problemas para su rápida adopción por parte de la industria, una que la mayoría de las tecnologías existentes tienen un alto coste de implementación, y segundo existe un escaso soporte por parte de la industria para su instalación y mejora continua (Wan *et al.*, 2018).

Dentro de las medidas tecnológicas más relevantes nos encontramos las siguientes:

- Optimización de la hidrodinámica del buque
- Innovadores sistemas de propulsión y sistemas de generación de energía auxiliar
- Sistemas de recuperación y conservación de energía
- Utilización de combustibles alternativos

A continuación, se tratan brevemente cada una de las tecnologías mencionadas.

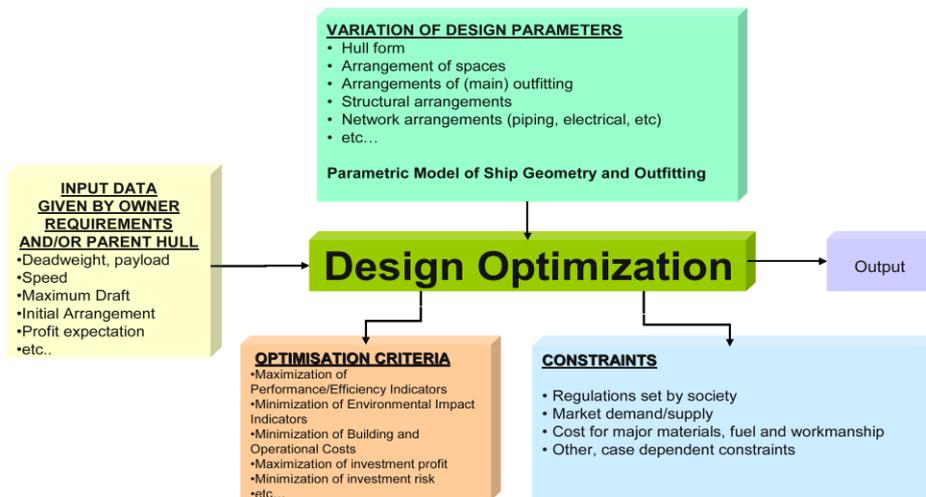
### 13.1.1. Optimización hidrodinámica del buque

Si se logra una reducción de la cantidad de potencia necesaria para alcanzar la velocidad de navegación requerida, se conseguirá en consecuencia un ahorro de combustible.

Optimizando las líneas del flujo del agua sobre el casco y la hélice, se conseguirá reducir la resistencia al avance del barco. Partiendo de este punto, la industria marítima está trabajando en el desarrollo de diseños más optimizados de las líneas casco, hélice y timón.

Sin embargo, el diseño naval es un sistema multiobjetivo donde la optimización tiene restricciones importantes que deben ser consideradas.

Figura 27 Modelo multiobjetivo genérico de diseño naval.



Fuente: Papanikolaou, (2010)

A nivel de diseño naval, la tendencia en buques con velocidad de diseños altas (como es, por ejemplo, el caso de los LNG) es instalar bulbo en proa que ayude a romper el tren de olas, reduciendo la resistencia de estas sobre el avance del buque (Liu *et al.*, 2021). También buques con líneas más suaves y cascos más estilizados tienen importancia a la hora de conseguir reducir la resistencia del agua sobre el avance del buque. En este ámbito de mejora de la eficiencia energética de los buques desde el punto de mejoras hidrodinámicas del diseño de los buques, también se están desarrollando diseños innovadores en elementos esenciales como el timón, donde, por ejemplo, el diseño del concepto “timón de compuerta” (*Rudder Gate*) ya está siendo desarrollado por Wartsila en cooperación con la universidad de Stratchclyde y el astillero japonés Yamanaka Shipbuilding, para instalar este tipo de timón en un buque para la naviera Kuribayashi Steamship (Wartsila, 2020). Incluso el diseño de la hélice de los buques está siendo continuamente analizada para mejorar sus diseños para sean más eficientes o bien a partir de añadidos en el área de la hélice que ayude a reducir el consumo de combustible (Wartsila, 2010a, 2010b, 2016).

Otras maneras de reducir la resistencia del buque al avance son empleando materiales de construcción más ligeros como pueden ser los materiales compuestos o polímeros, alternándolos con secciones de acero (Hellbratt, 2010; Samoilescu *et al.*, 2019; Yoon, 2021); y aplicando tecnologías que ayuden a reducir la resistencia al avance de los buques, como por ejemplo, la

lubricación por aire del casco (Mäkiharju *et al.*, 2012; Fitzpatrick *et al.*, 2017; Gunawan *et al.*, 2020) o el empleo de pinturas y recubrimientos especiales (Schultz, 2007; Swain, 2010; Tribou *et al.*, 2010).

Otro aspecto que tiene una influencia esencial en la resistencia del buque al avance es el calado del buque durante la navegación. Cuanto mayor es la obra viva (mayor calado) mayor resistencia al avance tienen los buques. El control del calado del buque se consigue al cargar el buque con la mercancía que se va a transportar o mediante el agua de lastre. Al introducir agua de lastre en los buques, se está añadiendo peso adicional al buque con fines de seguridad en la navegación, para mantener unos niveles de estabilidad determinados.

La posibilidad de reducir la cantidad de agua de lastre o eliminar la necesidad de lastrado en los buques es un concepto que está siendo explorado por la comunidad marítima debido a dos aspectos que se muestran a continuación.

- Si se reduce la cantidad de lastre a bordo, se reduce la superficie de obra viva del buque, por lo tanto, se reduce la resistencia al avance de este, reduciendo en consecuencia las emisiones atmosféricas (Georgiopoulos *et al.*, 2011; Bui *et al.*, 2021).
- Conseguir, ya no solo reducir la cantidad de agua de lastre, sino eliminarlo por completo, tiene una ventaja esencial en cuanto a la sostenibilidad medioambiental, ya que, al no transportar agua de lastre, no se produciría invasión de organismos no autóctonos cuando se produce el proceso de deslastre. Aunque es cierto, que, para mitigar este problema ecológico, los buques deben llevar plantas de tratamiento de agua de lastre, las cuales serían innecesarias si los buques no necesitasen agua de lastre (David *et al.*, 2018; Lakshmi *et al.*, 2021).

### **13.1.2. Innovadores sistemas de propulsión y sistemas de generación de energía auxiliar**

Los sistemas de propulsión de los buques en servicio tienen un claro dominante, el motor diésel, ya sean motores de dos o de cuatro tiempos, son la alternativa más común instalada a bordo de la flota de buques mercantes (Trozzi, 2010). Lo mismo ocurre en los sistemas auxiliares, donde la energía eléctrica auxiliar necesaria es suministrada por motores diésel en la gran mayoría de la flota mundial de buques mercantes.

La industria marítima está evaluando varias alternativas para descarbonizar el transporte marítimo mediante la instalación de sistemas energéticos a bordo más eficientes. Desde novedosos reactores nucleares basados en sales fundidas que utilizarían Torio como combustible nuclear (Gennaro *et al.*, 2020; Emblemsvaag, 2021; Freitas Neto *et al.*, 2021), pasando por sistemas híbridos donde se combinan motores de combustión interna con baterías (He *et al.*, 2021; Q-learning, 2021), hasta la instalación de sistemas renovables para generar energía a partir del viento (Kim *et al.*, 2010; Huang *et al.*, 2021; Pan *et al.*, 2021).

Desde el punto de vista de la generación de energía auxiliar a bordo, las bombas, los compresores, aire acondicionado y alumbrado son los mayores consumidores. Algunas de las iniciativas que se emplean actualmente para disminuir la demanda eléctrica auxiliar son el reemplazo de las luces convencionales por luces LED, instalación de variadores de frecuencia en ventiladores y bombas, e incluso se está investigando la posibilidad de usar pintura ultra blanca, con un poder de refracción del calor muy elevado con el fin de minimizar la necesidad del uso del aire acondicionado.

### **13.1.3. Sistemas de recuperación y conservación de energía**

Para la operación de los buques, se necesitan una serie de procesos termodinámicos que llevan implícitos unas pérdidas de energía asociadas, tales como las pérdidas de calor en los gases de escape de los motores de combustión interna, aislamientos en tanques que no son perfectos requiriendo un suministro de calor (energía) casi continuo etc.

Investigar sobre sistemas que puedan recuperar energía que de otro modo se perdería, así como desarrollar sistemas que conserven la energía en los sistemas de manera más eficiente son campos de la ingeniería que están teniendo un gran desarrollo (Liu *et al.*, 2020).

### **13.1.4. Combustibles alternativos**

La necesidad que tiene la flota de buques mercantes mundial hacia el cumplimiento de los objetivos de reducción de GEI a largo plazo de la OMI requerirá cambios significativos en la tecnología y los combustibles de los buques. La adopción de nuevos combustibles y tecnologías conducirá al diseño y la construcción de nuevos buques, pero también requerirá importantes mejoras de infraestructura relacionadas con la distribución de combustibles alternativos y el abastecimiento de combustible en las instalaciones del puerto.

El amoníaco, el hidrógeno y la electrificación surgen como soluciones a largo plazo que permitirán un transporte marítimo sin emisiones de carbono, pero identificar las soluciones adecuadas a mediano plazo plantea un desafío para los armadores y operadores. Estas soluciones a medio plazo deben permitir que la flota mundial cumpla con el índice de eficiencia energética de buques existentes (EEXI) y el índice de emisiones de carbono.

El gas natural licuado (GNL), el gas licuado de petróleo (GLP) y el metanol son combustibles bajos en carbono que pueden ofrecer beneficios a mediano plazo utilizando la tecnología y la infraestructura existentes, siendo unas de las opciones intermediadas en el camino de lograr la descarbonización.

#### **13.1.4.1. Gas Natural Licuado y Gases licuados del Petróleo**

El gas natural licuado (GNL) es un combustible bajo en carbono que puede reducir las emisiones en aproximadamente un 20 por ciento en comparación con el fueloil, aunque es importante tener en cuenta su huella de carbono debido a la contribución del metano emitido a (*methane slip*) durante el proceso de combustión en los motores de combustión interna. Ambos factores son importantes y pueden conducir a emisiones de GEI hasta un 80% más altas que el gasóleo marino sobre la base del ciclo de vida del combustible, dependiendo del sistema de generación de energía utilizado. Las emisiones fugitivas de metano es solo una fracción del metano emitido a la atmósfera a lo largo de la cadena de producción, distribución y abastecimiento de GNL. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) estima que las emisiones de metano de la producción de gas natural de los EE. UU representan aproximadamente el 1,4% del gas bruto producido; sin embargo, estudios recientes han demostrado que este valor puede estar subestimado hasta en un 60%. Estos factores crean la necesidad de tener en cuenta las emisiones de todos los combustibles utilizados en el transporte marítimo, que se espera que haga del GNL un combustible de transición, pero no una solución a largo plazo (American Bureau of Shipping, 2021).

Por otro lado, los gases licuados del petróleo son también una alternativa a combustible marino que ya se está empleando y que será una alternativa intermedia considerada para alcanzar los objetivos de OMI respecto a la descarbonización. No tiene el problema del GNL de las emisiones fugitivas de metano y produce una cantidad menor de emisiones de CO<sub>2</sub> que otros combustibles fósiles (Nikolaou, 2017). Se puede realizar operaciones de bunker para abastecerse de GLP de varias formas que ya se encuentran disponibles en la red del transporte marítimo, como abastecerse de este combustible desde camiones cisterna, desde terminales o desde buques cisterna (Brinks and Chryssakis, 2017). Sin embargo, un factor negativo que puede hacer que el uso de GLP como combustible marino se demore es que, tradicionalmente, su precio ha sido superior al de otros combustibles marino que ya se encuentran en servicio como el fuelóleo, el gasóleo o el GNL (Kjartansson, 2012), teniendo otra barrera para su adopción como combustible marino la tecnología disponible para almacenamiento a bordo, motores que puedan usar este combustible y el conocimiento de GLP como combustible por parte de los armadores y operadores de buques (Nikolaou, 2017).

#### **13.1.4.2. Biocombustibles**

Los biocombustibles son combustibles de hidrocarburos líquidos que se producen a partir de fuentes renovables como aceites vegetales y animales o residuos agrícolas y forestales. Su composición es similar a la del petróleo, por lo que no ofrecen ninguna reducción de emisiones de carbono desde el punto de vista de las emisiones producidas por su combustión a bordo. Sin embargo, estas emisiones pueden compensarse total o parcialmente durante su proceso de producción pudiendo crear combustibles neutros en carbono en base al ciclo completo de vida

del combustible. Dicho combustible puede ofrecer importantes beneficios al sector marino siempre que su huella de carbono se calcule en base al ciclo completo de vida del combustible.

La similitud en las propiedades físicas y químicas entre los biocombustibles y combustible fósiles hacen que sea posible utilizar los biocombustibles como combustible directo sin necesidad de modificaciones o reacondicionamientos en el equipo a bordo de los buques.

Actualmente, muchos armadores y operadores de todo el mundo se embarcan en ejercicios de prueba de biocombustibles para evaluar sus efectos en la maquinaria y las emisiones del buque. Una de las limitaciones clave de los biocombustibles es su baja disponibilidad y, por lo tanto, su alto costo, que se espera que cambie en los próximos años a medida que más proveedores aumenten su producción y surjan nuevos proveedores.

#### **13.1.4.3. Metanol**

La infraestructura de comercio de metanol existente también puede ser un factor importante desde el punto de vista económico y de abastecimiento sobre otras opciones de combustibles alternativos. La adopción temprana de dichos combustibles depende de la demanda y de la oferta. En el caso del metanol, a pesar de que su comercio está evolucionado, sus múltiples usos y demanda pueden no permitir excedentes para uso en aplicaciones marinas sin los incentivos apropiados. Debido a este uso generalizado de metanol en todo el mundo, el sector marino puede reclamar como máximo una fracción de la cantidad disponible a menos que el metanol se produzca sintéticamente. Sin embargo, esta opción también puede generar costos adicionales (American Bureau of Shipping, 2021).

Con la aparición de buques que transportan metanol, también llegan los nuevos sistemas de propulsión que pueden utilizar su carga para como combustible.

La ventaja del metanol sobre el GNL u otros combustibles gaseosos es su estado líquido y la capacidad de reutilizar la infraestructura existente para incluir su uso en motores marinos de manera eficiente. El metanol es significativamente más fácil y económico de almacenar a bordo que el GNL. Modificar un buque para la utilización de metanol como combustible es mucho más sencillo ya que se puede almacenar (después de pequeñas modificaciones) en los tanques de fuelóleo convencional, de lastre o decantación. Sin embargo, uno de los desafíos del metanol como combustible alternativo es el menor contenido de energía en comparación con los combustibles convencionales. Es decir, los tanques de almacenamiento deberían tener un mayor tamaño para contener mayores volúmenes de metanol que serían necesarios para suministrar una cantidad equivalente de energía.

#### **13.1.4.4. Amoníaco**

El amoníaco es uno de los dos combustibles de carbono cero considerados para su uso en el sector marino y su vía de producción está directamente relacionada con el hidrógeno. Por lo

tanto, los desafíos asociados con la producción y el aumento de producción de hidrógeno sostenible (verde) también se aplican a la producción de amoníaco.

Los beneficios del uso como combustible marino del amoníaco derivan de su mayor densidad que el hidrógeno y del hecho de que puede almacenarse como líquido a  $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$  y a presión ambiental a bordo del buque y en las instalaciones portuarias. Estos factores hacen que el amoníaco sea un combustible con un contenido o densidad de energía más efectivo que el hidrógeno y ofrece una distribución, almacenamiento y abastecimiento de combustible más sencillo.

Siendo una nueva alternativa de combustible marino, el amoníaco requerirá nuevos lugares de suministro y claras guías e instrucciones de cómo proceder durante las operaciones de suministro de combustible, para respaldar una amplia adopción. Se prevé que la experiencia previa de la industria química y de fertilizantes, y los recientes desarrollos del abastecimiento de combustible de GLP / GNL ayudarán en el proceso. Es necesario identificar cualquier brecha entre la industria establecida y el contexto de abastecimiento de combustible marino y proponer soluciones para alinear las operaciones utilizando medidas técnicas y operativas. El amoníaco se puede almacenar en forma líquida presurizado, semi-refrigerado o completamente refrigerado dependiendo del volumen necesario para un almacenamiento de manera segura.

#### **13.1.4.5. Hidrógeno**

El hidrógeno se puede extraer de combustibles fósiles y biomasa, o del agua, o de una combinación de ambos. Actualmente, la energía total utilizada en todo el mundo para la producción de hidrógeno es de aproximadamente 275 millones de toneladas equivalentes, que corresponde al dos por ciento de la demanda mundial de energía. El gas natural es actualmente la principal fuente de producción de hidrógeno (75%) y se usa ampliamente en las industrias de producción de amoníaco y metanol, dado el origen de la producción de este tipo de hidrogeno, se le conoce como hidrogeno gris.

La segunda fuente de producción de hidrógeno es el carbón (23%), que es la producción dominante en China, dado el origen de la producción de este tipo de hidrogeno, se le conoce como hidrogeno marrón. El 2% restante de la producción mundial de hidrógeno se basa en petróleo y energía eléctrica. Sin embargo, la opción más interesante del futuro es la producción de hidrógeno verde a través de la electrólisis del agua utilizando energía totalmente renovable (American Bureau of Shipping, 2021).

La disponibilidad y el bajo costo del carbón y el gas natural hacen que la producción de hidrógeno sea más económica que el uso de energía renovable para el mismo fin, lo que se refleja en el costo del combustible cuando está terminado. El costo del hidrógeno marrón y gris oscila entre 1-4 \$ / kg, mientras que el del hidrógeno verde oscila actualmente entre 6-8 \$ / kg. Sin embargo, el costo de producir hidrógeno verde se ha reducido en aproximadamente un 50 por ciento desde 2015 y se espera que esta tendencia continúe en la próxima década a medida

que aumenten los proyectos centrados en el despliegue de energía renovable para la producción de hidrógeno. Reducir el costo del hidrógeno verde a 2 \$ / kg puede hacerlo competitivo para su uso en el sector marino.

Se espera que el costo de las instalaciones de abastecimiento de hidrógeno sea más alto que el de las instalaciones de GNL, principalmente debido al mayor requerimiento de almacenamiento criogénico de hidrógeno líquido y el material requerido para tanques, tuberías y sellos.

Esta alternativa como combustible marítimo se encuentra en un estado de poco desarrollo dado la novedad del concepto, aunque bien es cierto que la industria ve a este combustible como una de las pocas alternativas que lograrían tener un transporte marítimo sin emisiones, lo cual podría acelerar las inversiones en el desarrollo del combustible y todas las tecnologías necesarias para su utilización.

## 13.2. Medidas operativas

En este capítulo se tratan las soluciones operativas que están actualmente siendo utilizadas o evaluadas por la industria marítima para lograr la descarbonización del transporte marítimo.

Las soluciones operativas son normalmente implementadas bajo el marco del SEEMP (*Ship Energy Efficiency Management Plan*) para buques con un arqueo bruto superior a las 400 toneladas, siendo parte del MARPOL VI promulgado por OMI.

Generalmente las medidas operacionales utilizadas responden a las estrategias de eficiencia energética de las compañías marítimas, y normalmente, estas medidas operacionales no tienen un gran impacto económico en la operación del buque y tampoco requieren de grandes inversiones capitales.

Dentro de las medidas operativas más relevantes nos encontramos las siguientes:

- Slow steaming
- Asiento óptimo
- Optimización de la ruta de navegación
- Estrategias de mantenimiento

Estas medidas operativas se tratan por separado a continuación.

### 13.2.1. Navegación Slow Steaming

Los buques están diseñados para navegar a una velocidad de diseño. Cuando los buques navegan a velocidades más reducidas se denomina *slow steaming*.

Esta es una medida operacional muy extendida dentro de los operadores de los buques con el fin de reducir el consumo de combustible. Al reducir la velocidad, se reduce la necesidad de potencia propulsora siendo necesario menor cantidad de combustible y en consecuencia reduciendo las emisiones atmosféricas (Degiuli *et al.*, 2021). De igual modo, los barcos tienen una eficiencia de combustible significativamente mayor cuando navegan a velocidades más bajas, por lo tanto la operación en slow steaming ha sido reconocido como una medida beneficiosa para reducir los costos de combustible y las emisiones atmosféricas (Lee *et al.*, 2015).

Esta práctica es una de las alternativas que OMI está incentivando su investigación dentro de la comunidad científica con el fin de mitigar las emisiones atmosféricas de los buques. Sin embargo, reducir la velocidad de navegación tiene otros efectos como mayor duración de los viajes, necesidad de más buques para mover la carga demandada, efecto en los sistemas de propulsión (mantenimiento) que están diseñados para operar en su punto óptimo a la velocidad de diseño, etc.

### **13.2.2. Asiento óptimo**

La optimización del asiento es un concepto relativamente nuevo recomendado por la Organización Marítima Internacional, que no requiere ninguna modificación estructural del barco y se puede lograr simplemente mediante la gestión del agua de lastre y la distribución de la carga a bordo. Los principios de optimización del asiento de los barcos se basan en el hecho de que los barcos experimentan una resistencia diferente en el agua para la misma velocidad y calado según su asiento. Por lo tanto, la optimización del asiento simplemente aboga por la selección de una condición de resistencia mínima para esa condición de viaje en particular, teniendo la velocidad del buque, estado de la mar/medioambiente y estado de carga como principales factores (Islam *et al.*, 2019).

Generalmente los buques tienen tablas de asiento para cada condición de carga y velocidad. También existen sistemas basados en algoritmos de optimización que calculan el asiento óptimo de manera dinámica, según los múltiples factores que afectan la navegación del buque (seguridad, obligaciones comerciales, reducción de consumo de combustibles, entre otras).

Existen varios trabajos que investigan y detallan de manera exhaustiva los beneficios de elegir el asiento óptimo a la hora de realizar la navegación, alguno de estos trabajos son: Perera *et al.* (2015); Coraddu *et al.* (2017); Islam *et al.* (2019); Le *et al.* (2021).

### **13.2.3. Optimización de la ruta de navegación**

Planificar y ejecutar las rutas de navegación es esencial desde el punto de vista de la seguridad, comercial y sostenibilidad.

Al planificar la ruta de navegación se tienen en cuenta factores sobre el estado de la mar, variaciones atmosféricas, distancia de navegación (entre puerto de salida y llegada), riesgo (piratas) y razones comerciales (mercado, precio de flete, precio combustible, etc.). Estos múltiples factores hacen que navegar por la ruta más óptima sea un problema multivariables y dinámico, el cual puede ocasionar beneficios si se consideran todas las variables de maneras correctas, o pueden acarrear perjuicios al operador de los buques (retrasos, sobre consumos, etc.).

Algunos trabajos sobre la planificación y ejecución de la navegación por la ruta más óptima se encuentra en los trabajos de: Christiansen *et al.* (2004); Halvorsen-Weare y Fagerholt (2013); Fagerholt *et al.* (2015); Ji *et al.* (2015); Song *et al.* (2015); Krata y Szlapczynska (2018).

#### **13.2.4. Estrategias de Mantenimiento**

El correcto mantenimiento de cualquier sistema o tecnología es crucial para mantener la eficiencia operacional de dicho sistema o tecnología lo más alto posible. Tratando de minimizar el número de fallos en los equipos y reducir al máximo las averías que puedan perturbar la operación normal de los buques. La tripulación de los buques son los primeros responsables de realizar tareas de mantenimiento planificado de acuerdo con los estándares de los fabricantes. Las labores de mantenimiento en los buques engloban absolutamente todos los componentes que se pueden encontrar a bordo, desde equipos de cubierta, sistema de carga, bombas de agua de lastre, motores, equipos de sala de máquinas, sistemas y equipos eléctricos, sistemas de lubricación, hasta el casco y la hélice.

Generalmente las tácticas de mantenimiento se dividen en dos grandes grupos (Jaramillo Jimenez *et al.*, 2020):

- Preventivas: tareas de mantenimiento planeadas de acuerdo con las sugerencias de los fabricantes (mantenimiento predeterminado) y tareas que se basan en el análisis de los parámetros dentro de una monitorización continua de los equipos (conocido como *Condition Based Maintenance*) (Cipollini *et al.*, 2018)
- Correctivas: una vez existe deterioro visible o avería, entonces se realizan las tareas de mantenimiento.

Aunque ya se ha comentado que un equipo con mal mantenimiento puede hacer que no trabaje de manera óptima, y por lo tanto influya en la eficiencia global del buque, este trabajo de investigación, bajo este epígrafe, nos centramos en el mantenimiento del casco de manera especial, ya que su estado superficial tiene un gran impacto en la resistencia al avance del buque, por lo tanto, en el consumo de combustible. Además, se entiende que los equipos instalados a bordo tales como motores, bombas, intercambiadores, maquinillas, etc., están siendo mantenidos por la tripulación de acuerdo con los estándares de los fabricantes. Sin embargo, el

casco y la hélice de los buques no tienen “repuestos” o “partes” que cambiar cuando llegan a un número determinado de horas, lo que hace que su mantenimiento preventivo sea más complejo.

Los cascos de los buques son generalmente de acero, el cual se le pinta y normalmente se le aplica una capa protectora antiincrustante (antifouling) para prevenir la acumulación de microorganismos a la superficie del casco, incrementando la rugosidad superficial, y, en consecuencia, añadiendo resistencia al avance del buque.

Existen una vasta literatura sobre recubrimientos antifouling en buques, los tipos, los beneficios y los efectos que pueden ocasionar en el medioambiente marino, algunos trabajos actuales y destacados son: Dai *et al.* (2018); Mukherjee *et al.* (2019); Silva *et al.* (2019); Chen *et al.* (2021); Li *et al.* (2021); Tian *et al.* (2021); Xie *et al.* (2021).

Para saber el estado de casco y de la hélice, actualmente existen dos métodos, uno basados en el análisis de datos operacionales (Coraddu *et al.*, 2019; Davies *et al.*, 2021; Ji *et al.*, 2021; Shaw *et al.*, 2021; Muthugala *et al.*, 2021), y otro basado en inspecciones visuales (Ventikos *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2018). Ambos métodos son empleados hoy en día y ambos son eficaces. El análisis de datos ayuda a tomar decisiones de manera continuada ya que los datos son analizados constantemente, mientras que las inspecciones visuales, se hacen con más separación temporal, siendo imposible de saber el estado del casco hasta que el buzo o robot inspeccionan bajo el agua.

### 13.3. Medidas políticas o de mercado

A partir de la publicación del Segundo Estudio sobre Gases de Efecto Invernadero publicado en 2009 por la OMI, este Organismo comenzó a evaluar propuestas legales para mitigar las emisiones atmosféricas del transporte marítimo como se aprecia en el Anexo VI del MARPOL, con la aparición de indicadores que las nuevas construcciones de buques deben cumplir como por ejemplo el EEDI para nuevas construcciones. Para la industria del transporte marítimo, este fue el primer tratado legalmente vinculante sobre el cambio climático adoptado desde el Protocolo de Kioto y entró en vigor el 1 de enero de 2013.

Además de las regulaciones sobre las emisiones atmosféricas promulgadas por la Comisión Europea y OMI entre otros, existen otras series medidas políticas y/o comerciales, conocidas también por sus siglas en inglés MBMs (*Market Based Measures*) que están siendo desarrolladas bajo el marco de la OMI.

En 2010 el secretario general de la OMI nombró un Grupo de Expertos después de la solicitud de los Estados miembros y se le encomendó evaluar hasta once propuestas de MBM separadas, presentadas por varios Estados miembros y otras organizaciones. Todas las propuestas de MBM describieron programas y procedimientos que apuntarían a las reducciones de GEI a través de reducciones de emisiones 'dentro del sector' provenientes del transporte marítimo, o reducciones

'fuera del sector' a través de la recolección de fondos para ser utilizados para actividades de mitigación en otros sectores que contribuirían a reducción global de emisiones de GEI.

OMI formuló los siguientes nueve criterios para la evaluación de medidas para la reducción de GEI (Psaraftis *et al.*, 2020):

- Eficacia ambiental
- Rentabilidad y posible impacto en el comercio y el desarrollo sostenible
- El potencial para incentivar el cambio tecnológico y la innovación.
- Viabilidad práctica de implementar MBM
- La necesidad de transferencia de tecnología y creación de capacidad dentro de los países en desarrollo, en particular los Países Menos Adelantados (PMA) y los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID)
- La relación con otras convenciones relevantes (CMNUCC, Protocolo de Kioto y OMC) y la compatibilidad con el derecho internacional consuetudinario
- La posible carga administrativa adicional y los aspectos legales para que las Administraciones Nacionales implementen y hagan cumplir las MBM
- La carga de trabajo adicional potencial, la carga económica y el impacto operativo para los buques individuales, la industria naviera y el sector marítimo en su conjunto, de implementar MBM
- La compatibilidad con las disposiciones de aplicación y control existentes en el marco legal de la OMI.

A la hora de debatir sobre medidas políticas que impacten sobre el comercio de bienes por parte de los distintos países, se observan dos vertientes principales: aquellos países en vías de desarrollo que basan en la exportación masiva su desarrollo económico, y los por otro lado los países industrializados que ya tienen una estructura más consolidada a nivel económico. La principal desavenencia es que los países en vías de desarrollo no son favorables a la imposición de leyes que afecten al transporte marítimo en cuanto a descarbonización ya que esto podría tener como consecuencia el encarecimiento del transporte, por lo tanto, afectando al desarrollo económico de los países.

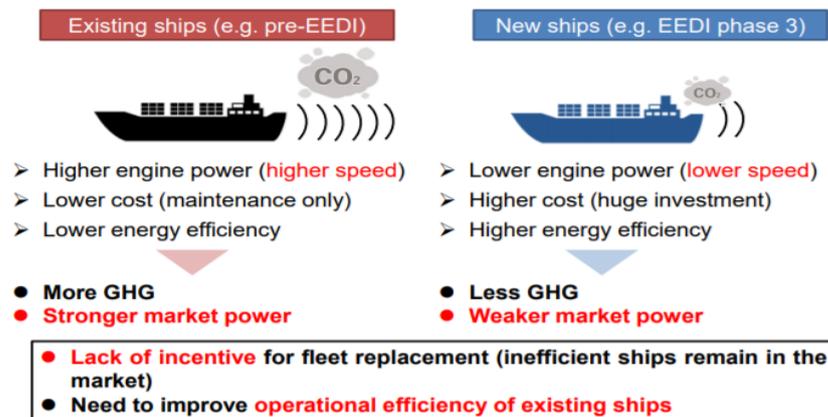
Las propuestas políticas más relevantes que están siendo tratadas y que entraran próximamente en vigor dentro del transporte marítimo se tratan a continuación.

### 13.3.1. Índice de Eficiencia Energética para barcos existentes (EEXI)

Durante el MEPC 76 en junio de 2021, la OMI adoptó enmiendas al Anexo VI de MARPOL, introduciendo un Índice de Diseño de Eficiencia Energética para barcos existentes (EEXI). Los requisitos entrarán en vigor el 1 de enero de 2023. El EEXI es aplicable para todos los buques de más de 400 GT incluidos en el Anexo VI de MARPOL. Las directrices sobre cálculos, estudios y verificación de la EEXI se finalizaron en el MEPC 76. Las directrices de cálculo se refieren a las directrices correspondientes del EEDI para nuevas construcciones con algunas adaptaciones con respecto al acceso limitado a los datos de diseño.

Para cada tipo de barcos, se han introducido los ajustes adecuados sobre la línea de referencia calculada para determinar el EEDI con el fin de permitir una comparación adecuada. Esto se realiza mediante factores de corrección.

Figura 28 Nivel competitivo de los buques pre y post EEDI.



Fuente: ISWG-GHG 5/4/1, (2019)

El EEDI requiere que los buques de nueva construcción entregados después de 2015 cumplan con los cada vez más estrictos niveles de eficiencia energética. Los buques entregados en la Fase 1 (2015), Fase 2 (2020) y Fase 3 (2022 o 2025, según el tipo de barco) del EEDI deben reducir su intensidad de carbono en un 10%, 20% y 30% o más, en comparación con una línea de base de referencia establecida para barcos de tamaño y tipo similares construidos entre 1999 y 2008 (Comer, B. & Rutherford, 2019).

Según el EEXI, los buques existentes deberían cumplir con los estándares de eficiencia técnica basados en los objetivos del EEDI para su tipo de buque que estarán en vigor en 2022. Esto significa que, por definición, los buques de nueva construcción entregados en el 2022 y posteriormente, ya cumplirán con la EEXI.

Como ejemplo, para los buques gaseros que son el tipo de buques que se analizan en este trabajo de investigación, los factores de reducción del EEXI se muestran en la *Tabla 349*.

Tabla 349 Factor reducción EEXI para buques Gaseros.

| Tipo de barco | Peso muerto     | Factor de reducción |
|---------------|-----------------|---------------------|
| Gaseros**     | 2.000 – 9.999   | 0 – 20%*            |
|               | 10.000 – 14.999 | 20%                 |
|               | 15.000 +        | 30%                 |

Fuente: Rutherford et al., (2020)

\* La tasa de reducción se interpola linealmente entre los tamaños de los barcos, y el objetivo más bajo se aplica a los barcos más pequeños, siendo para buques gaseros la siguiente regresión línea: **Factor de reducción = -5,00063 + Peso Muerto x 0.0025.**

\*\* Para buques LNG con tamaños superiores a 10.000 toneladas de peso muerto se aplica un factor de reducción de 30%.

El EEXI describe las emisiones de CO<sub>2</sub> por tonelada y milla navegada y peso muerto del buque. Es decir, determina las emisiones de CO<sub>2</sub> estandarizadas relacionadas con la potencia del motor instalado, la capacidad de transporte y la velocidad del barco. El EEXI es un índice de diseño, no un índice operativo por lo que, ningún valor medido de años anteriores es relevante y de igual manera, no se requieren mediciones a bordo; el índice sólo se refiere a la eficiencia del diseño del barco.

Los barcos en servicio pueden cumplir con los requisitos de eficiencia energética del EEXI a través de la limitación de potencia del motor principal (EPL) (Chambers, 2019; International Maritime Organization, 2019a) o mediante el retiro anticipado de los buques.

La aplicación de EPL se considera que es la forma más fácil para que los barcos más antiguos cumplan con los requisitos de EEXI porque requiere cambios mínimos en el barco y no cambia el rendimiento del motor (Rutherford et al., 2020). EPL establece un límite en la potencia máxima de un barco y, por lo tanto, en la velocidad (MAN B&W, 2017). EPL se podría anular si el barco está navegando en condiciones climáticas adversas y requiere potencia de motor adicional por razones de seguridad; en ese caso, la anulación debe registrarse e informarse a la autoridad reguladora correspondiente (International Maritime Organization, 2019b).

Los buques que den EPL cero o con valores negativos significan que cumplen con los requisitos EEXI sin necesidad de tomar acciones adicionales.

Por cuestiones de seguridad en la operación de los buques, se considera que los barcos no pueden reducir la potencia propulsora por debajo del 40% de la potencia propulsora original (Rutherford et al., 2020), con el fin de asegurar una navegación segura. Por lo tanto, barcos que requieran EPL superiores al 60%, para cumplir con el EEXI necesitarían acciones adicionales o alternativas a la limitación de potencia, tales como el empleo de nuevos combustibles, utilizar nuevos sistemas de generación de energía a bordo (eólica, solar, etc.), mejora de la hidrodinámica de los buques, etc.

### **13.3.2. Indicador de intensidad de Carbono, CII**

La 76 sesión del Comité de Medio Ambiente Marino (MEPC 76) de la Organización Marítima Internacional adoptó varias medidas obligatorias en junio de 2021 para reducir las emisiones de carbono de los barcos. Una de las medidas aprobadas fue el indicador de intensidad de carbono (CII), que son las emisiones de carbono por unidad de trabajo de transporte de cada barco (equivalente al AER que se detalla en el capítulo 7.4.2).

El CII será categorizado comparando el valor CII calculado de un barco durante un año con los valores CII de referencia determinados por la OMI, el rendimiento del barco se calificará como 'A', 'B', 'C', 'D' o 'E'. Se requiere una calificación de "A", "B" o "C" para el cumplimiento, y se deben tomar medidas correctivas para los buques que reciben la calificación "D" durante tres años consecutivos o "E" durante un año. Por tanto, los armadores deberían intentar conseguir una calificación de "C" o superior para sus barcos. Los valores de CII de referencia disminuirán con el tiempo. El MEPC 76 decidió que cada buque logre una reducción anual del 1% hasta 2023 y del 2% de 2023 a 2026, dejando abiertas las reducciones requeridas hasta 2030. Nótese que 2030 es el año de la meta intermedia, que estipula una reducción del CII de al menos el 40% en 2030 frente al nivel de 2008.

Este indicador puede tener un impacto comercial sobre los buques ya que el CII y su ranking son herramientas que pueden ser usadas por los fletadores para seleccionar los buques que van a transportar las cargas. Esto se debe a que los fletadores, dentro de sus estrategias de sostenibilidad, tienen el objetivo de reducir la huella de carbono y ecológica en todas sus actividades, siendo una de ellas el transporte. Es por esto por lo que algunos armadores y operadores de buques hayan resaltado el hecho de que la fórmula del CII premia a los buques que realizan más viajes en lastre por encima de los buques que están más tiempo navegando en condición de carga. Esta condición desfavorable se debe a que los buques en lastre necesitan menos combustible para alcanzar las velocidades deseadas ya que la superficie de obra viva es menor que cuando van cargados, luego la resistencia al avance es también menor, necesiándose menos potencia y, por ende, menos combustible y emitiendo menos CO<sub>2</sub>. Sin embargo la controversia radica en que los buques en lastre no transportan mercancía por lo tanto, en esa condición los buques no operativamente eficientes al no realizar ningún servicio para el que están diseñados (mover mercancía de un lugar a otro), el objetivo de las empresas es minimizar el número de viajes en lastre con el objetivo de maximizar los ingresos de las compañías y también, para minimizar la necesidad de nuevos buques en las rutas (optimización de los tamaños de las flotas).

### **13.3.3. Fit for 55 – Unión Europea**

En julio de 2021, se publicó un paquete de medidas lanzadas por la Comisión Europea, conocido como "Fit for 55", siendo esto el núcleo del "Pacto Verde Europeo", habiendo este sido presentado en diciembre de 2019.

La ambición de la UE es alcanzar la neutralidad climática dentro del año 2050. Como un paso intermedio hacia el objetivo de “cero emisiones netas” de gases de efecto invernadero, la UE se ha comprometido a reducir las emisiones atmosféricas al menos un 55% en 2030. El paquete de medidas “Fit for 55” presenta las revisiones e iniciativas necesarias para alinear el clima actual, la energía y transporte relacionado con la legislación con el objetivo de reducir el 55% las emisiones.

Se presentaron varias medidas para descarbonizar la industria del transporte marítimo. A continuación, se explican brevemente algunas de las más importantes para el transporte marítimo (European Commission, 2021).

### **13.3.3.1. Régimen de comercio de derechos de emisión para el sector marítimo**

El transporte marítimo estará sujeto al régimen de comercio de emisión (conocido por sus siglas en inglés ETS) a partir de 2023. Actualmente los barcos ya se encuentran monitoreando e informando sobre las emisiones atmosféricas que causan según la regulación MRV de la UE, este sistema se va a requerir para comprar créditos de emisiones de CO<sub>2</sub>. Se incluirán todas las emisiones dentro de la UE, pero solo el 50% de las emisiones de los viajes al llegar o salir de la UE. También habrá un período de introducción gradual que comenzará con una cobertura del 20% en 2023 y aumentará al 100% en 2026. El incumplimiento será sancionado y eventualmente puede conducir a la prohibición del desarrollo de la actividad del buque dentro de las aguas de la Unión Europea (European Commission, 2021).

Las compañías navieras tendrán que comprar derechos de emisión de ETS por cada tonelada de CO<sub>2</sub> emitida por los barcos que operan entre los puertos de la UE y atracados en los puertos de la UE, y el 50% de las emisiones de CO<sub>2</sub> de los viajes globales de la UE entrantes y salientes. No habrá asignaciones gratuitas para la industria marítima.

A fecha de este trabajo de investigación, un crédito de emisiones o EUA es equivalente a 1 tonelada de CO<sub>2</sub> y su coste es de 53,92 euros/EUA. De igual modo, la información disponible dice que, en caso de que la compañía naviera no entregase el número correcto de derechos de emisión antes del 30 de abril del año siguiente, se le impondrá una multa de 100 euros por tonelada de CO<sub>2</sub> no contabilizada. También se puede negar la entrada a los buques a los puertos de la UE cuando la compañía naviera responsable no haya entregado los permisos necesarios durante dos o más años consecutivos.

A fecha de esta tesis, la entidad responsable del cumplimiento de esa regulación es la compañía naviera o cualquier otra organización o persona, como el administrador o el fletador, que ha asumido la responsabilidad de la operación del buque del propietario del buque. La propuesta también establece que de acuerdo con el principio de quien contamina paga, la compañía naviera podría, mediante un acuerdo contractual, responsabilizar a la entidad que es directamente responsable de las decisiones que afecten a las emisiones de CO<sub>2</sub> del buque,

responsable de los costos de cumplimiento. Esta entidad sería normalmente la entidad responsable de la elección del combustible, la ruta y la velocidad del barco.

La inclusión del principio de quien contamina paga podría hacer que tanto los fletadores en *time charter* como los fletadores en modo contractual *spot o tramp* sean responsables del costo del carbono de sus decisiones comerciales.

Por lo tanto, los operadores legales de los buques deberán comprar y entregar derechos de emisión de ETS por cada tonelada de emisiones de CO<sub>2</sub> notificada.

### **13.3.3.2. Propuesta marítima FuelEU**

La propuesta marítima de FuelEU establece un límite máximo en la intensidad de los gases de efecto invernadero de la energía utilizada a bordo para cada buque que llega a los puertos de la UE y de la Unión Económica Europea, permanece en ellos o sale de ellos y determinadas obligaciones para utilizar el suministro de energía en tierra o tecnología de “cero emisiones” disponibles en los puertos de la UE/UEM. Esto se propone para estimular la adopción de combustibles marítimos sostenibles y tecnologías de “cero emisiones”.

Esta propuesta de reglamento se aplicará a todos los buques con un arqueo bruto superior a 5.000 toneladas, independientemente de su pabellón.

Según la propuesta, los objetivos se determinan tomando como valor de referencia que refleja la intensidad media de las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por el uso de la energía utilizada a bordo por los buques en 2020, y se aplicaran los siguientes factores de reducción en los próximos años:

- 2% reducción para el 2025
- 6% reducción para el 2030
- 13% reducción para el 2035
- 26% reducción para el 2040
- 59% reducción para el 2045
- 75% reducción para el 2050

Las compañías navieras deberán elaborar un informe anual que detalle la intensidad de GEI de la energía utilizada para cada buque de más de 5.000 toneladas de arqueo bruto. La intensidad de GEI significa la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por mega julio de energía utilizada. Se expresa en gramos de CO<sub>2</sub> equivalente y se establece según el ciclo de vida del combustible. Este método incluye no solo las emisiones de la combustión de combustible a bordo del barco, sino también las emisiones producidas de la producción de este, el transporte y la distribución de combustibles, es decir el ciclo de vida completo.

Un mecanismo de recompensa para los que superan el rendimiento permite a los operadores que utilizan tecnologías de mayor eficiencia intercambiar el exceso de "puntos de cumplimiento" con buques y operadores que presenten un menor rendimiento. A fecha de este trabajo de investigación, se encuentran más detalles sobre este mecanismo, pero la evaluación de impacto establece que permitiría la transferencia de saldo, lo que significa compra y venta de créditos, entre distintas empresas.

La propuesta de FuelEU también se refiere a los barcos atracados en los puertos de la UE/UEM y establece que los barcos más contaminantes deberán utilizar suministro de energía en tierra (o tecnología equivalente de emisión cero) durante su estancia en los puertos. Los puertos se abastecerán de electricidad desde tierra y, a partir de 2035 en adelante, los buques en general ya no podrán contaminar cuando estén atracados en los puertos.

Las empresas que no cumplan con las reglas antes del 1 de mayo del año siguiente de entrada en vigor de esta normativa, deberán pagar multas. La propuesta establece que el dinero debería utilizarse para promover la distribución y el uso de combustibles renovables y de bajas emisiones de carbono.

La propuesta trata de promover, más bien agilizar, el empleo de combustibles renovables y/o con bajo contenido de carbono en el transporte marítimo, como por ejemplo biocombustibles líquidos, LNG descarbonizado (bio-LNG), hidrógeno verde y combustibles derivados del hidrógeno verde (como el metanol y amoníaco).

Se propone que el reglamento se aplique al 50% de la energía utilizada por un buque que realiza viajes que llegan a un puerto bajo la jurisdicción de un Estado miembro desde un puerto fuera de la jurisdicción de un Estado miembro, el 50% de la energía utilizada por un buque que realiza viajes con salida de un puerto bajo la jurisdicción de un Estado miembro y que llega a un puerto fuera de la jurisdicción de un Estado miembro, el 100% de la energía utilizada por un buque que realiza viajes que llegan a un puerto bajo la jurisdicción de un Estado miembro de un puerto bajo la jurisdicción de un Estado miembro, y el 100% de la energía utilizada en el atraque en un puerto bajo la jurisdicción de un Estado miembro.

Además, existe una propuesta de Reglamento sobre la infraestructura (TEN-T) de combustibles alternativos para garantizar que la ecologización de la flota de transporte esté respaldada por una infraestructura adecuada de recarga y reabastecimiento de combustible. Se exigirá a los puertos marítimos de la Red Transeuropea de Transporte que instalen suministro de electricidad para atender la demanda de al menos el 90% de los buques portacontenedores y de pasajeros que hacen escala en ese puerto, considerando estos dos tipos de buques como los más contaminantes. La instalación de los sistemas que suministren potencia eléctrica desde tierra debe estar disponibles en todos los puertos de la RTE-T. Esto garantizará que los barcos tengan acceso al suministro de electricidad en los principales puertos.

### **13.3.3.3. Revisión de la Directiva sobre fiscalidad de la energía – Impuesto sobre combustibles**

La actual Directiva sobre fiscalidad de la energía (ETD) establece normas estructurales y tipos mínimos de impuestos especiales para la fiscalidad de los productos energéticos utilizados como combustible para motores, calefacción, y electricidad (Comisión Europea, 2011). Los Estados miembros individuales son libres de establecer sus propios tipos siempre que se cumplan dichos tipos mínimos.

Las actualizaciones sobre la directiva se centran en dos áreas principales. En primer lugar, la introducción de una nueva estructura de tipos impositivos basada en el contenido energético e impacto medioambiental de los combustibles y la producción de electricidad. En segundo lugar, la propuesta amplía la base imponible al incluir más productos en el ámbito de aplicación y al eliminar algunas de las exenciones y reducciones actuales.

El combustible suministrado para su uso en el transporte marítimo está actualmente exento de impuestos según la ETD. La propuesta presentada el 14 de julio de 2021 introduce un tipo impositivo mínimo sobre los combustibles pertinentes utilizados para los buques mercantes y los buques pesqueros dentro de la UE.

Los combustibles sostenibles y alternativos estarán sujetos a una tasa impositiva mínima de cero durante un período de transición de 10 años cuando se utilicen para la navegación. Por ejemplo, el combustible residual (tradicionalmente ha sido el combustible más empleado en el sector marítimo) utilizado en la industria marítima ya no estará exento de impuestos sobre la energía para viajes que se realicen dentro de la UE. La Directiva revisada sobre fiscalidad de la energía propone un impuesto mínimo sobre el fuelóleo pesado desde 0,9 euros por giga julio de energía producido (es decir, unos 45 dólares extra por toneladas de fuelóleo pesado) a partir de 2023. La comisión dice que la tasa impositiva mínima aumentará gradualmente durante un período de diez años. Algunos otros combustibles, incluidos el gas licuado de petróleo (GLP) y el gas natural licuado (GNL), se enfrentarán a una tasa impositiva de transición de 0,6 EUR / Gj en 2023. Si bien estos dos combustibles son combustibles fósiles, estos aún pueden ayudar a la descarbonización del transporte marítimo en el corto y mediano plazo. Los biocombustibles sostenibles avanzados, el hidrógeno renovable y la electricidad se enfrentarán al nivel mínimo más bajo de 0,15 EUR / Gj.



# **CONCLUSIONES**



**PRIMERA:** Los buques gaseros componen una flota heterogénea, habiendo grandes diferencias en los diseños y equipos a bordo, entre los dos tipos principales de gaseros que conforman la flota (buques LNG y LPG). Esto pone de manifiesto la necesidad de analizar los dos tipos de buques por separado para obtener información más precisa a nivel de flota.

**SEGUNDA:** La metodología empleada por OMI en su Tercer Estudio de Gases de Efecto Invernadero de 2014 analiza de manera agregada los buques LNG y LPG para obtener los resultados de la flota de gaseros, esto añade incertidumbre en los resultados al no poder discernir el origen de las emisiones a partir del tipo de buque gasero que las genera y sus particularidades.

**TERCERA:** La metodología denominada OMI I, es aplicada de manera correcta y esto se comprueba al comparar las emisiones de CO<sub>2</sub> obtenidas en este trabajo de investigación (47,5 millones de toneladas) con la cantidad de CO<sub>2</sub> reportado en el estudio de 2014 de la OMI (46 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>), habiendo un 3,3% de diferencia, estando dentro del error aceptado en esta tesis del 5%.

**CUARTA:** La metodología alternativa, llamada OMI II, desarrollada en este trabajo de investigación, analiza de forma más desagregada las fuentes de emisiones a bordo de los buques y las particularidades técnicas y operativas de cada buque, reduciendo la incertidumbre en los resultados y dando una información más detallada y precisa del estado de la flota.

**QUINTA:** Tanto la metodología OMI I como OMI II, se han mostrado como herramientas adecuadas para determinar los consumos y emisiones atmosféricas de la flota mundial de gaseros para el año considerado.

**SEXTA:** Comparando datos reales recogidos de buques gaseros en servicio con la metodología OMI I y con la metodología OMI II, muestra que los resultados que se obtienen a partir de la metodología OMI II son más próximos a los valores reales reportados por los buques en servicio.

**SEPTIMA:** La metodología OMI I, para los buques LPG, se obtienen valores inferiores a los obtenidos a partir de OMI II tanto para consumo de combustibles residuales (6,3 millones de toneladas vs. 9,6 millones de toneladas de OMI II) como para combustibles destilados (1,9 millones de toneladas vs. 2,8 millones de toneladas de OMI II).

**OCTAVA:** La metodología OMI I, para los buques LNG, se obtienen valores superiores a los obtenidos a partir de OMI II tanto para consumo de combustibles residuales (5,2 millones de toneladas vs. 4,3 millones de toneladas de OMI II) como para combustibles destilados (0,8 millones de toneladas vs. 0,2 millones de toneladas de OMI II) y para el consumo de LNG como combustible (12,6 millones de toneladas vs. 10,5 millones de toneladas de OMI II).

**NOVENA:** La flota de buques LPG consume un 77% del total de combustible anual del tipo residual, y siendo un 23% de combustible destilado. La flota de buques LNG, existen diferencias según la metodología empleada para calcular el consumo (OMI I u OMI II). Los buques LNG consume alrededor del 27% del consumo de combustible anual del tipo residual, entre el 1 y 4% combustible destilado y alrededor del 70% de LNG.

**DECIMA:** La producción de energía, tanto propulsora como auxiliar a bordo de los buques, precisa de procesos de combustión a bordo, los cuales producen un impacto medioambiental (emisiones), por lo tanto, y siempre priorizando la seguridad en la operación de los buques, se debe tratar de minimizar la cantidad de energía producida a bordo con el fin de minimizar las emisiones atmosféricas.

**UNDECIMA:** El motor principal es el sistema que realiza más consumo de combustible en los buques LPG, consumiendo alrededor del 90% de los combustibles residuales y destilados. Los motores auxiliares son los segundos mayores consumidores de combustibles en los buques LPG con alrededor del 6% del total de combustibles residuales y destilados, siendo las calderas auxiliares responsables de alrededor del 4% del consumo de combustibles residuales y destilados.

**DUODECIMA:** El motor principal es el sistema que realiza más consumo de combustible en los buques LNG, consumiendo el 87,6% de los combustibles residuales, el 90,4% de los combustibles destilados y el 93,7% del LNG consumido según OMI I, y el 82,3% del combustible total residual, el 54,4% del total de combustible destilado y el 85,7% del consumo de LNG aplicando la base de datos OMI II. Los motores auxiliares son los segundos mayores consumidores de combustibles en los buques LNG con el 11,1% del consumo total de combustibles residuales, 7,8% de los combustibles destilados y el 6,3% del consumo de LNG aplicando la base de datos OMI I y, el 16,7% del combustible total residual, el 38,5% del total de combustible destilado y el 11% del consumo de LNG aplicando la base de datos OMI II. Las calderas auxiliares son responsables del 1,4% del consumo total de combustibles residuales, 1,8% de los combustibles destilados y el 6,3% del consumo de LNG según OMI I, y del 1% del combustible total residual y el 7% del total de combustible destilado según la base de datos OMI II.

**DECIMOTERCERA:** El sistema GCU es responsable de quemar el 3,3% del total de LNG consumido por la flota de buques LNG en el año 2019. Este consumo de LNG no produce ningún trabajo a bordo de los buques luego son perdidas tanto económicas como energéticas, por lo que debería ser minimizado lo máximo posible, ya sea con mejoras de los diseños de los tanques de carga o a partir de optimización de la gestión del LNG en los tanques de carga.

**DECIMOCUARTA:** La flota mundial de gaseros emitió en 2019 alrededor de 80 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmosfera. Los buques LNG contribuyeron de manera predominante en las emisiones de CO<sub>2</sub> en un 67,5 y 52,8% respectivamente, según se aplique OMI I u OMI II.

**DECIMOQUINTA:** La flota mundial de gaseros emitió en 2019, 0,6 y 0,5 millones de toneladas de CH<sub>4</sub> a la atmosfera (según se aplique OMI I u OMI II). Los buques LNG son los responsables de la gran mayoría de estas emisiones, causando el 99,9% de las emisiones de CH<sub>4</sub> totales de la flota de buques gaseros. Esto se debe al hecho de que los buques LNG emplean el mismo LNG que transportan como combustible.

**DECIMOSEXTA:** En los buques LPG, el sistema de propulsión más eficientes respecto a la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> por kW de potencia instalado son los motores diésel de dos tiempos. En los buques LNG, los motores duales de dos tiempos de inyección de gas de alta presión son los que menos emisiones de CO<sub>2</sub> por kW emiten.

**DECIMOSEPTIMA:** Tanto en los buques LPG como LNG, los buques más eficientes son los buques más modernos (edades iguales o inferiores a 5 años) teniendo la menor tasa de CO<sub>2</sub> por tonelada de peso muerto construido en cada grupo de edad.

**DECIMOOCCTAVA:** Tanto en los buques LPG como LNG, los buques de mayor tamaño (capacidad de carga, arqueo bruto y peso muerto) son los más eficientes al tener la menor tasa de CO<sub>2</sub> por tonelada de peso muerto y arqueo bruto construido y metro cubico de capacidad en los tanques de carga.

**DECIMONOVENA:** El tiempo operacional anual de cada buque al año es un factor esencial para analizar la evolución de las emisiones atmosféricas de la flota. Esto implica que el análisis temporal de las emisiones debe ser contextualizado según la actividad de la flota desarrollada y la demanda anual de la carga transportada.

**VIGESIMA:** La flota de buques gaseros necesita al año consumir los recursos naturales de alrededor del 1,7% de la superficie bio productiva de los bosques a nivel mundial para asimilar las emisiones atmosféricas causadas por la actividad de la flota.

**VIGESIMOPRIMERA:** La flota de buques LNG tiene una mayor eficiencia operacional que la flota de buques LPG, expresado en gCO<sub>2</sub> por milla y metro cubico de carga transportado.

**VIGESIMOSEGUNDA:** El modelo input-output de demanda se ha mostrado como una herramienta idónea para determinar los efectos de la actividad de la flota mundial de gaseros sobre los diferentes sectores de la economía mundial. El modelo hibrido aplicado es también es una metodología apropiada para determinar los impactos y efectos en las variables medioambientales

**VIGESIMOTERCERA:** La actividad de los gaseros sobre la producción mundial tiene un efecto multiplicador algo superior a 3, siendo el incremento de la producción ligeramente superior en los buques LNG que en los buques LPG.

**VIGESIMOCUARTA:** La actividad de los gaseros sobre el VAB mundial tiene un efecto multiplicador de 1,2.

**VIGESIMOQUINTA:** La actividad de los gaseros sobre el empleo mundial tiene un efecto multiplicador de 0,04

**VIGESIMOSEXTA:** La actividad de los gaseros sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales tiene un efecto multiplicador de 0,0016.

**VIGESIMOSEPTIMA:** La preocupación sobre el impacto de la actividad marítima sobre medioambiente está pasado a un primer plano y por ello se está avanzando en tratar de desarrollar un transporte marítimo más sostenible, a partir del desarrollo de nuevas regulaciones y una mayor inversión en I+D, estudiando y aplicando nuevas medidas tecnológicas y operativas. En esta línea queda bastante trabajo por hacer lo cual abre muchas futuras líneas de investigación.

# **FUENTES CONSULTADAS**



Abadie, L. M., Goicoechea, N. and Galarraga, I. (2017) 'Adapting the shipping sector to stricter emissions regulations: Fuel switching or installing a scrubber?', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57(October), pp. 237–250. doi: 10.1016/j.trd.2017.09.017.

Abudu, H. and Sai, R. (2020) 'Examining prospects and challenges of Ghana's petroleum industry: A systematic review', *Energy Reports*, 6, pp. 841–858. doi: 10.1016/j.egy.2020.04.009.

Adamkiewicz, A. and Drzewieniecki, J. (2013) 'Service and maintenance of marine steam turbogenerators with the assistance of vibration diagnostics', *Polish Maritime Research*, 20(1), pp. 31–38. doi: <https://doi.org/10.2478/pomr-2013-0004> Open access.

Adland, R., Jia, H. and Lu, J. (2008) 'Price dynamics in the market for Liquid Petroleum Gas transport', *Energy Economics*, 30(3), pp. 818–828. doi: 10.1016/j.eneco.2007.02.008.

Adom, E., Islam, S. Z. and Ji, X. (2010) 'Adom\_Modelling of Boil-off Gas in LNG tanks; A case study\_2010.pdf', 2(4), pp. 292–296.

Afon, Y. and Ervin, D. (2012) 'An assessment of air emissions from liquefied natural gas ships using different power systems and different fuels', *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(3), pp. 404–411. doi: <http://dx.doi.org/10.3155/1047-3289.58.3.404>.

Aguilera, R. F. (2014) 'The role of natural gas in a low carbon Asia Pacific', *Applied Energy*, 113, pp. 1795–1800. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.07.048.

Ahmadian Behrooz, H. (2016) 'Managing demand uncertainty in natural gas transmission networks', *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, pp. 100–111. doi: 10.1016/j.jngse.2016.06.051.

Aichele, R. and Felbermayr, G. (2012) 'Kyoto and the carbon footprint of nations', *Journal of Environmental Economics and Management*, 63(3), pp. 336–354. doi: 10.1016/j.jeem.2011.10.005.

Alcántara, V. (1995) *Economía y contaminación atmosférica: hacia un nuevo enfoque desde el análisis input-output*. Universidad de Barcelona.

Alcántara, V. and Roca, J. (1995) 'Energy and CO<sub>2</sub> emissions in Spain. Methodology of analysis and some results for 1980- 1990', *Energy Economics*, 17(3), pp. 221–230.

Aldous, L. *et al.* (2015) 'Uncertainty analysis in ship performance monitoring', *Ocean Engineering*, 110, pp. 29–38. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.05.043.

Aldous, L. and Smith, T. (2012) 'Low carbon shipping conference 2012 speed optimisation for liquefied natural gas carriers: a techno- economic model'.

Almer, C. and Winkler, R. (2017) 'Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol', *Journal of Environmental Economics and Management*, 82(December 1997), pp. 125–151. doi: 10.1016/j.jeem.2016.11.003.

American Bureau of Shipping (2021) 'Setting the course to low carbon shipping, view of the value chain'. Available at: [https://absinfo.eagle.org/acton/attachment/16130/f-c04f4eaf-a121-4560-9e15-5a56ee443f32/1/-/-/-/ sustainability-outlook-iii-21055-web.pdf?utm\\_source=cision](https://absinfo.eagle.org/acton/attachment/16130/f-c04f4eaf-a121-4560-9e15-5a56ee443f32/1/-/-/-/ sustainability-outlook-iii-21055-web.pdf?utm_source=cision).

Ančić, I. and Šestan, A. (2015) 'Influence of the required EEDI reduction factor on the CO<sub>2</sub> emission from bulk carriers', *Energy Policy*, 84, pp. 107–116. doi: 10.1016/j.enpol.2015.04.031.

Anderson, M. *et al.* (2015) 'Characterization of particles from a marine engine operating at low loads', *Atmospheric Environment*, 101(2015), pp. 65–71. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.009.

André, F. J., Cardenete, M. A. and Velázquez, E. (2005) 'Performing an environmental tax reform in a regional economy. A CGE approach.', *Annals of Regional Science*, (39), pp. 375–392.

Ankur, S. (2018) *LNG vs. pipeline economics*, *gaille energy blog Issue 66*. Available at: <https://gaillelaw.com/2018/05/16/lng-vs-pipeline-economics-gaille-energy-blog-issue-66/>.

Arioli, M., Fulton, L. and Lah, O. (2020) 'Transportation strategies for a 1.5 °C world: A comparison of four countries', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87(September), p. 102526. doi: 10.1016/j.trd.2020.102526.

Atlantic Consulting (2010) 'Clearing the Air: Black carbon, climate policy and lp gas', p. 32.

Ayres, R. U. and Kneese, A. V (1969) 'Production, consumption, and externalities', *American Economic Review*, 59(3), pp. 282–297. Available at: <https://econpapers.repec.org/RePEc:aea:aecrev:v:59:y:1969:i:3:p:282-97>.

B&W, M. (2015) 'Service letter SL2015-604/DOJA, lubricating oils for MAN B&W low speed two-stroke engines'. Available at: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/service-letters/sl2015-604.pdf?sfvrsn=4>.

Babicz, J. (2015) Wärtsilä encyclopedia of ship technology, Wärtsilä Encyclopedia of Ship Technology. doi: 10.1007/978-1-4614-9610-6.

Bai, X. and Lam, J. S. L. (2019) 'A destination choice model for very large gas carriers (VLGC) loading from the US Gulf', *Energy*, 174, pp. 1267–1275. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.148.

Banaszkiewicz, M. (2014) 'Steam turbines start-ups', *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery*, (126), pp. 169–198. Available at: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-484a0f98-081c-46a9-8716-cb06f56ffc03> (Accessed: 15 October 2019).

Banks, C. *et al.* (2013) 'Understanding ship operating profiles with an aim to improve energy efficient ship operations', in *Low Carbon Shipping Conference*. London, p. 11.

Baranzini, A. and Goldemberg, J. (1996) 'Desertification, energy consumption and liquified petroleum gas use, with an emphasis on Africa', *Energy for Sustainable Development*, 2(5), pp. 32–37. doi: 10.1016/S0973-0826(09)60001-6.

Basurko, O. C. and Uriondo, Z. (2015) 'Condition-based maintenance for medium speed diesel engines used in vessels in operation', *Applied Thermal Engineering*, 80(x), pp. 404–412. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.01.075.

Berner, E., Olving, M. and Mjøs, A. (2013) 'Norwegian corporate accounts - company information for Norwegian companies', p. 63.

Bertram, C. *et al.* (2017) 'The Adaptive Marine Policy (AMP) toolbox: Supporting policy-makers developing adaptive policies in the Mediterranean and Black Sea', *Marine Policy*, 38(July), pp. 99–109. doi: 10.1016/j.marpol.2017.07.009.

Bertram, C. and Rehdanz, K. (2013) 'On the environmental effectiveness of the EU Marine Strategy Framework Directive', *Marine Policy*, 38, pp. 25–40. doi: 10.1016/j.marpol.2012.05.016.

Bialystocki, N. and Konovessis, D. (2016) 'On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach', *Journal of Ocean Engineering and Science*, 1(2), pp. 157–166. doi: 10.1016/j.joes.2016.02.001.

Di Blasio, G., Belgiorno, G. and Beatrice, C. (2017) 'Effects on performances, emissions and particle size distributions of a dual fuel (methane-diesel) light-duty engine varying the compression ratio', *Applied Energy*, 204(January), pp. 726–740. doi: 10.1016/j.apenergy.2017.07.103.

BOE. Ministerio de empleo y seguridad social (2014) 'Enmiendas al anexo del protocolo de 1997', *Boletín Oficial del Estado*, 176(x), pp. 23183–23191. doi: BOE-A-2012-5403.

Bora, B. J. *et al.* (2014) 'Effect of compression ratio on performance, combustion and emission characteristics of a dual fuel diesel engine run on raw biogas', *Energy Conversion and Management*, 87, pp. 1000–1009. doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.080.

Bows, A. and Anderson, K. L. (2007) 'Policy clash: Can projected aviation growth be reconciled with the UK Government's 60% carbon-reduction target?', *Transport Policy*, 14(2), pp. 103–110. doi: 10.1016/j.tranpol.2006.10.002.

Brewer, T. L. (2019) 'Black carbon emissions and regulatory policies in transportation', *Energy Policy*, 129(May 2018), pp. 1047–1055. doi: 10.1016/j.enpol.2019.02.073.

Brinks, H. W. and Chryssakis, C. (2017) LPG as a marine fuel., DNV - GL - Group technology & research.

Brundtland, G. H. (1987) 'Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común', *Documentos de las Naciones, Recolección de un ...*, p. 416. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Informe+de+la+comision+mundial+sobre+el+medio+ambiente+y+el+desarrollo.+nuestro+futuro+comun#5>.

Bui, K. Q. and Perera, L. P. (2021) 'Advanced data analytics for ship performance monitoring under localized operational conditions', *Ocean Engineering*, 235(June), p. 109392. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109392.

Butt, E. W. *et al.* (2016) 'The impact of residential combustion emissions on atmospheric aerosol, human health, and climate', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(2), pp. 873–905. doi: 10.5194/acp-16-873-2016.

Cabioch, Fanch;De Castelet, Damien; Penelon, Thibault; Pagnon, Stephane; Peuch, Aline;Duhart,Julien;Drevert,Daniel;Dernat,Marin;Hermant, J. C. (2009) 'Accidents on vessels transporting liquid gases and responders concerns: the Galerne project', pp. 289–300.

Calderón, M., Illing, D. and Veiga, J. (2016) 'Facilities for bunkering of Liquefied Natural Gas in ports', *Transportation Research Procedia*, 14(0), pp. 2431–2440. doi: 10.1016/j.trpro.2016.05.288.

California Air Resources Board. Planning and Technical Support Division (2011) 'Appendix D: emissions estimation methodology for ocean-going vessels'. Available at: <http://www.arb.ca.gov/regact/2011/ogv11/ogv11appd.pdf>.

Cameretti, M. C. *et al.* (2016) 'A numerical and experimental study of dual fuel diesel engine for different injection timings', *Applied Thermal Engineering*, 101, pp. 630–638. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.12.071.

Carballo-Penela, A. and Doménech, J. L. (2010) 'Managing the carbon footprint of products: The contribution of the method composed of financial statements (MC3)', *International Journal of Life Cycle Assessment*, 15(9), pp. 962–969. doi: 10.1007/s11367-010-0230-1.

Cariou, P. (2011) 'Is slow steaming a sustainable means of reducing CO2 emissions from container shipping?', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 16(3), pp. 260–264. doi: 10.1016/j.trd.2010.12.005.

Carlton, J. S. (2007) *Marine propellers and propulsion*. Second Edi.

Carneiro Caneda, C. (2002) '¿Moda o necesidad? La Responsabilidad Social Corporativa', *Economía & Empleo*.

del Castillo Cuervo-Arango, F. (1993) *Bibliografía input-output española*. Edited by D. de E. Comunidad de Madrid, Consejería de Economía. [Madrid]: Comunidad de Madrid, Consejería de Economía, Departamento de Estadística.

Castro, J. M., Morillas, A. and Melchor, E. (1996) 'Análisis de los efectos de la estructura de demanda sobre crecimiento y medioambiente en Andalucía', *Revista de Estudios Regionales*, (46), pp. 47–68.

CCNR/OCIMF (2010) 'International Safety Guide: Types of gas carriers', *International Safety Guide for Inland Navigation Tank-barges and Terminals*, pp. 505–518. Available at: [http://www.isgintt.org/files/documents/Chapter\\_33en\\_isgintt\\_062010.pdf](http://www.isgintt.org/files/documents/Chapter_33en_isgintt_062010.pdf).

CEPAL, C. E. para A. L. y el C. (2011) 'Medidas para mejorar la eficiencia energética en el transporte marítimo', *Boletín FAL*, pp. 1–10.

Chambers, S. (2019) 'Japan pushes for engine power limitation system on all ships.', *Splash 24/7*. Available at: <https://splash247.com/japan-pushes-for-engine-%0Apower-limitation-system-on-all-ships/>.

Chang, D. *et al.* (2008) 'A study on availability and safety of new propulsion systems for LNG carriers', *Reliability Engineering and System Safety*, 93(12), pp. 1877–1885. doi: 10.1016/j.res.2008.03.013.

Chen, Y. *et al.* (2021) 'Rapid curing and self-stratifying lacquer coating with antifouling and anticorrosive properties', *Chemical Engineering Journal*, 421(P1), p. 129755. doi: 10.1016/j.cej.2021.129755.

Christiansen, M., Fagerholt, K. and Ronen, D. (2004) 'Ship routing and scheduling: status and perspectives', *Transportation Science*, 38(1), pp. 1–18. doi: 10.1287/trsc.1030.0036.

CIMAC (2008) 'Guidelines for the lubrication of medium speed diesel engines', *The International Council on Combustion Engines*, (29), p. 56.

Cipollini, F. *et al.* (2018) 'Condition-based maintenance of naval propulsion systems: Data analysis with minimal feedback', *Reliability Engineering and System Safety*, 177, pp. 12–23. doi: 10.1016/j.res.2018.04.015.

Climate Bonds Standard (2020) 'Shipping Criteria', (April), pp. 1–2.

Coello, J. *et al.* (2015a) 'An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet', *Atmospheric Environment*. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.011.

Coello, J. *et al.* (2015b) 'An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet', *Atmospheric Environment*, 114, pp. 1–7. doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.05.011.

Comer, B. & Rutherford, D. (2019) 'Turning the ship, slowly: Progress at IMO on new ship efficiency and black carbon', *the International Council on Clean Transportation*. Available at: <https://theicct.org/blog/staff/mepc74>.

Comisión Europea (2013) 'Regulation of the European Parliament and of the Council - on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport and amending Regulation (EU) No 525/2013'. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Comisión Europea (2011) Dictamen del Comité Económico y Social Europeo sobre la «Propuesta de Directiva del Consejo que modifica la Directiva 2003/96/CE del Consejo por la que se reestructura el régimen comunitario de imposición de los productos energéticos y de la electricidad». Diario Oficial de la Unión Europea. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011AE1586&from=ES>.

Cooper, D. (2002) 'Representative emission factors for use in Quantification of emissions from ships associated with ship movements between port in the European Community ', *Environmental Research*, (July), pp. 1–44.

Cooper, D. and Gustafsson, T. (2004) 'Report series SMED and SMED 2004 Swedish Methodology for Environmental Data Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors Assignment for Swedish Environmental Protection Agency', (4). Available at: [www.smed.se](http://www.smed.se).

Coraddu, A. *et al.* (2017) 'Vessels fuel consumption forecast and trim optimisation: A data analytics perspective', *Ocean Engineering*, 130(September 2015), pp. 351–370. doi: 10.1016/j.oceaneng.2016.11.058.

Coraddu, A. *et al.* (2019) 'A novelty detection approach to diagnosing hull and propeller fouling', *Ocean Engineering*, 176(December 2018), pp. 65–73. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.054.

Corbett, J. J. *et al.* (2010) 'Arctic shipping emissions inventories and future scenarios', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(19), pp. 9689–9704. doi: 10.5194/acp-10-9689-2010.

Corbett, J. J. and Koehler, H. W. (2003) 'Updated emissions from ocean shipping', *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 108(D20), p. 4650.

Corbett, J. J. and Koehler, H. W. (2004) 'Considering alternative input parameters in an activity-based ship fuel consumption and emissions model: Reply to comment by Øyvind Endresen *et al.* on "Updated emissions from ocean shipping"', *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 109(23), pp. 1–8. doi: 10.1029/2004JD005030.

Dai, G. *et al.* (2018) 'Biodegradable poly(ester)-poly(methyl methacrylate) copolymer for marine anti-biofouling', *Progress in Organic Coatings*, 124(July), pp. 55–60. doi: 10.1016/j.porgcoat.2018.08.003.

Dalsøren, S. B. *et al.* (2009) 'Update on emissions and environmental impacts from the international fleet of ships: The contribution from major ship types and ports', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(6), pp. 2171–2194. doi: 10.5194/acp-9-2171-2009.

Daly, H. E. (1968) 'On economics as a life science', *Journal of Political Economy*, 76. Available at: <https://econpapers.repec.org/RePEc:ucp:jpollec:v:76:y:1968:p:392>.

Danish Ship Finance (2018) 'Shipping market review - May 2018', (May). Available at: <https://www.shipfinance.dk/media/1817/shipping-market-review-may-2018.pdf>.

Datum Electronics Limited (2018) 'Commercial marine shaft power meter handbook'. Isle of Wight: Datum Electronics Limited, p. 12. Available at: <https://datum-electronics.co.uk/product/commercial-marine-shaft-power-meter/>.

David, M., Gollasch, S. and Penko, L. (2018) 'Identification of ballast water discharge profiles of a port to enable effective ballast water management and environmental studies', *Journal of Sea Research*, 133, pp. 60–72. doi: 10.1016/j.seares.2017.03.001.

Davies, J. *et al.* (2021) 'Optimal inspections and maintenance planning for anti-corrosion coating failure on ships using non-homogeneous Poisson Processes', *Ocean Engineering*, 238(August), p. 109695. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109695.

Degiuli, N. *et al.* (2021) 'The impact of slow steaming on reducing CO2 emissions in the Mediterranean Sea', *Energy Reports*. doi: 10.1016/j.egyr.2021.02.046.

Delft, C. E. (2017) 'Update of Maritime Greenhouse Gas Emission Projections', p. 46.

Delgado Cabeza, M., Morillas Raya, A. and Pajuelo Gallego, A. (1980) 'Repercusiones sobre los precios interiores de una variación en los precios de importación', *Cuadernos de Ciencias Económicas y Empresariales*, 6, pp. 137–152.

Dimopoulos, G. G. and Frangopoulos, C. A. (2008) 'A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation', *International Journal of Thermodynamics*, 11(3), pp. 123–131. doi: 10.5541/IJOT.1034000220.

Dimopoulos, G. G., Stefanatos, I. V and Kakalis, N. M. . (2016) 'A process modelling approach to the evaluation of ship machinery configuration alternatives of LNG carriers', *International Journal of Thermodynamics*, 19(3), p. 146. doi: 10.5541/ijot.5000156256.

DNV (2020a) *Current price development oil and gas*. Available at: <https://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/current-price-development-oil-and-gas.html>.

DNV (2020b) *Current price development oil and gas*.

DNV GL (2019) *EGS Reporting - DNV-GL Service*. Available at: <https://www.dnvgl.co.uk/services/esg-sustainability-reporting-11176> (Accessed: 5 March 2020).

Doulgeris, G. *et al.* (2012) 'Techno-economic and environmental risk analysis for advanced marine propulsion systems', *Applied Energy*, 99, pp. 1–12. doi: 10.1016/j.apenergy.2012.04.026.

Dragović, B. *et al.* (2018) 'Ship emissions and their externalities in cruise ports', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 61, pp. 289–300. doi: 10.1016/j.trd.2015.11.007.

Earth Overshoot Day (2020) *Earth Overshoot day*. Available at: <https://www.overshootday.org/newsroom/press-release-june-2020-spanish/#:~:text=OAKLAND%2C CA%2C USA - 5,2019%2C según Global Footprint Network>.

Economides, M. J. and Wood, D. A. (2009) 'The state of natural gas', *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 1(1–2), pp. 1–13. doi: 10.1016/j.jngse.2009.03.005.

Eichler, P. *et al.* (2017) 'Lubricating oil as a major constituent of ship exhaust particles', *Environmental Science and Technology Letters*, 4(2), pp. 54–58. doi: 10.1021/acs.estlett.6b00488.

Ekanem Attah, E. and Bucknall, R. (2015) 'An analysis of the energy efficiency of LNG ships powering options using the EEDI', *Ocean Engineering*, 110, pp. 62–74. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.040.

Emblemsvaag, J. (2021) 'How thorium-based molten salt reactors can provide clean, safe, and cost-effective technology for deep-sea shipping', *Marine Technology Society Journal*, 55(1), pp. 56–72. doi: <https://doi.org/10.4031/MTSJ.55.1.2>.

EMSA (2013) *Sustainable Shipping*. Available at: <http://www.emsa.europa.eu/implementation-tasks/environment/sustainable-toolbox.html>.

EMSA (2018) *MRV Database - Reporting year 2019*. Available at: <https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report> (Accessed: 21 April 2020).

Endresen, Ø. (2003) 'Emission from international sea transportation and environmental impact', *Journal of Geophysical Research*, 108(D17), p. 4560. doi: 10.1029/2002JD002898.

Endresen, Ø. *et al.* (2007) 'A historical reconstruction of ships' fuel consumption and emissions', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(12), pp. 1–17. doi: 10.1029/2006JD007630.

Energetics (2007) *The reality of carbon neutrality*, London. Available at: [www.energetics.com.au/file?node\\_id=21228](http://www.energetics.com.au/file?node_id=21228) (Accessed: 23 June 2019).

Engelen, S. *et al.* (2011) 'Multifractal features of spot rates in the Liquid Petroleum Gas shipping market', *Energy Economics*, 33(1), pp. 88–98. doi: 10.1016/j.eneco.2010.05.009.

Entec (2002) 'Ship emissions final report - quantification of ship emissions', *Ship Emissions Final report*, (July), pp. 3–48. Available at: [http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2\\_ship\\_emissions.pdf](http://ec.europa.eu/environment/air/pdf/chapter2_ship_emissions.pdf).

ENTEC (2005) 'Task 2 – general report final report august 2005 Entec UK Limited', (August).

EPA (2009) 'Current methodologies in preparing mobile source port-related emission inventories.', *U.S. Environmental Protection Agency*, (April), pp. 1–18. Available at: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/2009-port-inventory-guidance.pdf>.

European Commission (2020) 'EU-U.S. Ing trade', (October 2018).

European Commission (2021) Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stab. Belgium. Available at: [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets-with-annex\\_en\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets-with-annex_en_0.pdf).

European Environment Agency, E. E. A. (2013) 'EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook', (i), p. 26. doi: 10.2800/247535.

Europeo, E. L. P. *et al.* (2015) 'Directiva (UE) 2015/720 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2015', 2015, pp. 4–8.

Ewing, B. *et al.* (2008) 'The ecological footprint Atlas 2008', *WWF European Policy Office, Brussels, Belgium*, p. 24. Available at: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EUROPE+2005+The+Ecological+Footprint#0>.

Eyres, D. J. and Bruce, G. J. (2012) 'Liquefied gas carriers', *Ship Construction*, pp. 279–289. doi: 10.1016/b978-0-08-097239-8.00023-4.

Fabricant, S. (1952) 'The structure of American economy, 1919–1939: An empirical application of equilibrium analysis (2d edition, enlarged). By Wassily W. Leontief. New York: Oxford University Press, 1951. Pp. 264.', *The Journal of Economic History*, 12(1), pp. 69–69. doi: 10.1017/S0022050700054899.

Fagerholt, K. *et al.* (2015) 'Maritime routing and speed optimization with emission control areas', *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 52(x), pp. 57–73. doi: 10.1016/j.trc.2014.12.010.

Fernández, I. A. *et al.* (2017) 'Review of propulsion systems on LNG carriers', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67, pp. 1395–1411. doi: 10.1016/J.RSER.2016.09.095.

Fitzpatrick, P. *et al.* (2017) 'Full scale applications of air lubrication for reduction of ship frictional resistance', *SNAME Maritime Convention*.

Førsund, F. R. (1985) *Limits and problems of taxation*. 1st edn. Edited by F. R. Førsund and S. Honkapohja. Palgrave Macmillan UK. doi: 10.1007/978-1-349-08094-6.

Franklin, R. S. and Ruth, M. (2012) 'Growing up and cleaning up: The environmental Kuznets curve redux', *Applied Geography*, 32(1), pp. 29–39. doi: 10.1016/j.apgeog.2010.10.014.

Freitas Neto, L. G. de *et al.* (2021) 'Potential advantages of molten salt reactor for merchant ship propulsion', *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 9(2B), pp. 1–18. doi: 10.15392/bjrs.v9i2b.1466.

Frey, H. C. (2007) 'Quantification of uncertainty in emissions factors and inventories', 16th annual international emission inventory conference emission inventories: 'integration, analysis and communications'. Raleigh, NC: US EPA., pp. 1–16.

FUHEM (2009) 'Huella ecológica: metodología de cálculo', La crisis ecosocial en clave educativa. Guía didáctica para una nueva Cultura de Paz, pp. 1–3.

Gallagher, K. P. (2005) 'International trade and air pollution: Estimating the economic costs of air emissions from waterborne commerce vessels in the United States', *Journal of Environmental Management*, 77(2), pp. 99–103. doi: 10.1016/j.jenvman.2005.02.012.

Galli, A., Kitzes, J., Wermer, P., Wackernagel, M., Niccolucci, V., Tiezzi, E. (2007) 'An exploration of the mathematics behind the ecological footprint', *International Journal of Ecodynamics*, 2(4), pp. 250–257.

Gao, L. *et al.* (2011) 'Cost analysis of CO2 transportation: Case study in China', *Energy Procedia*, 4, pp. 5974–5981. doi: 10.1016/j.egypro.2011.02.600.

Gary J. Schmitt (2006) 'Natural gas: the next energy crisis?' issues in science and technology. Vol. XXII, No. 4 Summer 2006. Available at: <https://issues.org/schmitt-3/>.

Gennaro, G. and Boe, M. (2020) 'Sustainable decarbonization of ocean transportation from marine Molten Salt Reactors (m-MSR) for zero-emission electric propulsion', *SNAME Maritime Convention*.

George, D. G., Eleftherios, K. D. and Chariklia, G. A. (2020) 'LNG carrier two-stroke propulsion systems: A comparative study of state of the art reliquefaction technologies', *Energy*, 195, p. 116997. doi: 10.1016/j.energy.2020.116997.

Georgiopoulos, M., Li, C. and Kocak, T. (2011) 'Learning in the feed-forward random neural network: A critical review', *Performance Evaluation*, 68(4), pp. 361–384. doi: 10.1016/j.peva.2010.07.006.

Germanischer Lloyd (2012) 'Rules for classification and construction: ship technology - bridge arrangement and equipment on seagoing ships'.

GFN (2007) 'Global Footprint Network 2007 Annual Report'.

GFN (2009) 'Ecological footprint standards', *Global Footprint Network*, (September). Available at: <http://www.footprintstandards.org>.

Gierusz, W. (2015) 'Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion Part 1: Forces generated by pods', *Ocean Engineering*, 108, pp. 105–114. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.031.

GIIGNL (2020) 'The LNG industry - annual report 2020', p. 26.

Giorgiutti, Y., Rezende, F., Van, S. Monteiro, C., Preterote, G. (2014) 'Impact of fouling on vessel's energy efficiency', *Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore*, 10 a, pp. 4–6.

Giranza, M. J. and Bergmann, A. (2018) 'An economic evaluation of onshore and floating liquefied natural gas receiving terminals: the case study of Indonesia', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 150(1). doi: 10.1088/1755-1315/150/1/012026.

Global Footprint Network (2019) *Earth Overshoot day, Global Footprint Network National footprint and Biocapacity accounts*. Available at: <https://www.footprintnetwork.org/resources/data/> (Accessed: 24 October 2020).

Goldsworthy, B. (2017) 'Spatial and temporal allocation of ship exhaust emissions in Australian coastal waters using AIS data: Analysis and treatment of data gaps', *Atmospheric Environment*, 163, pp. 77–86. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.05.028.

Goldsworthy, B., Enshaei, H. and Jayasinghe, S. (2019) 'Comparison of large-scale ship exhaust emissions across multiple resolutions: From annual to hourly data', *Atmospheric Environment*, 214(July), p. 116829. doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116829.

González Gutiérrez, C. *et al.* (2020) 'An empirical analysis on the operational profile of liquefied natural gas carriers with steam propulsion plants', *Journal of Navigation*, 2020(January), pp. 1–20. doi: 10.1017/S0373463320000612.

Gray, R. (2004) 'Bulk liquefied gas by sea : the early years by Robin Gray', (September).

Greenhouse Gas Protocol (2015) 'Global Warming Potential Values', *Greenhouse Gas Protocol*, 2014(1995), pp. 2–5.

Gritsenko, D. (2017) 'Regulating GHG Emissions from shipping: Local, global, or polycentric approach?', *Marine Policy*, 84(July), pp. 130–133. doi: 10.1016/j.marpol.2017.07.010.

Grunewald, N. . and Martinez-Zarzoso, I. (2016) 'Did the Kyoto Protocol fail? An evaluation of the effect of the Kyoto Protocol on CO2 emissions', *Environment and Development Economics*, 21((1)), pp. 1–22. doi: 10.1017/S1355770X15000091.

Gunawan, Yanuar and Waskito, K. T. (2020) 'Determination the optimum location for microbubble drag reduction method in self propelled barge model; an experimental approach', *Energy Reports*, 6, pp. 774–783. doi: 10.1016/j.egyr.2019.11.157.

Gutiérrez Ortiz, F. J. (2011) 'Modeling of fire-tube boilers', *Applied Thermal Engineering*, 31(16), pp. 3463–3478. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.07.001.

de Haan, M. and Keuning, S. (2000) 'The NAMEA as Validation Instrument for Environmental Macroeconomics', *Integrated Assessment*, 2(2), pp. 79–87. doi: 10.1023/A:1011569705991.

Haberl, H. *et al.* (2004) 'Ecological footprints and human appropriation of net primary production: A comparison', *Land Use Policy*, 21(3), pp. 279–288. doi: 10.1016/j.landusepol.2003.10.008.

Habibnia, A., Rahimipour, G. and Ranjbar, H. (2020) 'Equivalence assessment and leveling of geochemical datasets to generate integrated geochemical maps: Application to mineral exploration', *Journal of Geochemical Exploration*, 212(October 2018), p. 106507. doi: 10.1016/j.gexplo.2020.106507.

Halim, R. A. *et al.* (2018) 'Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment', *Sustainability (Switzerland)*, 10(7). doi: 10.3390/su10072243.

Halvorsen-Weare, E. E. and Fagerholt, K. (2013) 'Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints', *Annals of Operations Research*, 203(1), pp. 167–186. doi: 10.1007/s10479-010-0794-y.

Harrould-Kolieb, E. (2008) 'Shipping impacts on climate: a source with solution', *Oceana*, (July).

Hasan, M. M. F., Zheng, A. M. and Karimi, I. A. (2009) 'Minimizing Boil-Off losses in Liquefied Natural Gas transportation', *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(21), pp. 9571–9580. doi: 10.1021/ie801975q.

Hawdon, D. and Pearson, P. (1995) 'Input-output simulations of energy, environment, economy interactions in the UK', *Energy Economics*, 17(1), pp. 73–86. Available at: <https://econpapers.repec.org/RePEc:eee:eneeco:v:17:y:1995:i:1:p:73-86>.

He, Y. *et al.* (2021) 'Two-phase energy efficiency optimisation for ships using parallel hybrid electric propulsion system', *Ocean Engineering*, 238(April), p. 109733. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.109733.

Heitmann, N. and Khalilian, S. (2011) 'Accounting for carbon dioxide emissions from international shipping: Burden sharing under different UNFCCC allocation options and regime scenarios', *Marine Policy*, 35(5), pp. 682–691. doi: 10.1016/j.marpol.2011.02.009.

Hellbratt, S.-E. (2010) 'Time for light weight composite materials to enter the merchant shipbuilding', p. 8. Available at: <http://www.escm.eu.org/docs/eccm13/0116.pdf>.

Hiroshi, T. *et al.* (2013) 'New LPG Carrier Adopting Highly Reliable Cargo Tank - IMO Tank Type B -', *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 50(2), pp. 12–17.

Holden, E. and Høyer, K. G. (2005) 'The ecological footprints of fuels', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 10(5), pp. 395–403. doi: 10.1016/j.trd.2005.04.013.

Hollanders, H. and Keuning, S. J. (1994) 'A research and development module supplementing the national accounts', *Review of Income and Wealth*, 40(3), pp. 273–285.

Holtmark, B. and Mæstad, O. (2002) 'Emission trading under the Kyoto Protocol - Effects on fossil fuel markets under alternative regimes', *Energy Policy*, 30(3), pp. 207–218. doi: 10.1016/S0301-4215(01)00090-8.

Howitt, O. J. A. *et al.* (2010) 'Carbon emissions from international cruise ship passengers' travel to and from New Zealand', *Energy Policy*, 38(5), pp. 2552–2560. doi: 10.1016/j.enpol.2009.12.050.

Huang, M. *et al.* (2021) 'Renewable energy storage and sustainable design of hybrid energy powered ships: A case study', *Journal of Energy Storage*, 43(October), p. 103266. doi: 10.1016/j.est.2021.103266.

Hunsucker, J. T. *et al.* (2018) 'Uncertainty analysis of methods used to measure ship fuel oil consumption', (January).

Hydrex (2010) 'ship hull performance in the post-tbt era: how to save money while improving hull performance and dramatically reducing', *Hydrex White Paper No. 1*, pp. 1–24.

Hydrex (2011) 'White paper clean ship hulls and ports – without compromise best approach to safeguarding of the marine environment through correct hull protection and maintenance'.

ICCT (2017) 'Black carbon emissions and fuel use in 2015', *International Council on Clean Transportation (ICCT)*.

IEA (2019) *IEA Database - Natural Gas*. Available at: <https://www.iea.org/statistics/monthly/> (Accessed: 30 June 2019).

IEA (2018) 'Security', *IEA - Global Gas Security 2018*, p. 102.

IGU, I. G. U. (2018) '2017 Perspectives on the world LNG industry', *27th World Gas Conference*.

IGU, I. G. U. (2020) '2020 World LNG Report'.

IHS Markit (2017) *IHS Markit*.

Information Handling Services Markit (2018) *ihms maritime world register of ships, maritime & trade: shipping intelligence*. Available at: <https://ihsmarkit.com/products/maritime-world-ship-register.html> (Accessed: 10 October 2018).

Information Handling Services Markit (2020) *IHS maritime world register of ships, maritime & trade: shipping intelligence*. Available at: <https://ihsmarkit.com/products/maritime-world-ship-register.html> (Accessed: 9 March 2020).

International Gas Union (2012) 'Natural gas conversion guide'. Oslo: International Gas Union, pp. 19–21. doi: [www.igu.org](http://www.igu.org).

International Gas Union (2019) *2019 World LNG Report*. Barcelona.

International Maritime Organization (1986) 'International code for the construction and equipment of ships carrying liquefied gases in bulk'.

International Maritime Organization (2009) *Second IMO GHG Study 2009*. London.

International Maritime Organization (2013) *MARPOL Annex VI & NTC 2008*. 2013 Editi. London: IMO Publishing.

International Maritime Organization (2014a) 'Resolution mepc.245(66) - 2014 guidelines on the method of calculation of the attained energy efficiency design index (EEDI) for new ships'. London: International Maritime Organization, p. 30.

International Maritime Organization (2014b) *Third IMO Greenhouse Gas Study 2014*. London.

International Maritime Organization (2015) 'Guidelines for exhaust gas cleaning systems (MEPC.259(68))', 259(May), pp. 1–23.

International Maritime Organization (2016a) 'IGC Code: International Code for the Construction and Equipment of Ships carrying Liquefied Gases in Bulk'. London: International Maritime Organization, p. 183.

International Maritime Organization (2016b) 'Resolution MEPC.281(70): Amendments to The 2014 Guidelines on The Method of Calculation of The Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships (Resolution MEPC.245(66), As Amended By Resolution Mepc.263(68))', *Annex 9*. London: International Maritime Organization, pp. 1–10.

International Maritime Organization (2018) 'Adoption of the initial IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships and existing IMO activity related to reducing GHG emissions in the shipping sector'. London: International Maritime Organization, p. 27. Available at: [https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250\\_IMO\\_submission\\_Talanoa\\_Dialogue\\_April\\_2018.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/resource/250_IMO_submission_Talanoa_Dialogue_April_2018.pdf).

International Maritime Organization (2019a) 'Energy efficiency improvement measure for existing ships. MEPC 74/7/2 - Submitted by Japan'. International Maritime Organization. Available at: <https://docs.imo.org>.

International Maritime Organization (2019b) 'Engine power limitation for improving energy efficiency of existing ships. MEPC 74/INF.23. Submitted by Japan'. International Maritime Organization. Available at: <https://docs.imo.org>.

International Organization for Standardization (2016) 'ISO 19030 ships and marine technology - measurement of changes in hull and propeller performance - Part 1: General Principles'. International Organization for Standardization, p. 21.

International Transport Forum (2018) 'Reducing Shipping Greenhouse Gas Emissions - Lessons from Port-Based Initiatives Case-Specific Policy Analysis', *Oecd*.

Isard, W. (1969) 'Some notes on the linkage of the ecologic and economic systems', *Papers in Regional Science*, 22(1), pp. 85–96. doi: 10.1111/j.1435-5597.1969.tb01455.x.

Islam, H. and Soares, G. (2019) 'Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts', *Ocean Engineering*, 183(March 2018), pp. 106–115. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.03.058.

ISO (2002) ISO 3046-1:2002 Reciprocating internal combustion engines — Performance — Part 1: Declarations of power, fuel and lubricating oil consumptions, and test methods — Additional requirements for engines for general use. 3046–1:2002.

ISO (2016) 'ISO 15550:2016 Internal combustion engines — Determination and method for the measurement of engine power — General requirements'. International Standard Organization.

Jafarzadeh, S. and Schjøberg, I. (2018) 'Operational profiles of ships in Norwegian waters: An activity- based approach to assess the benefits of hybrid and electric propulsion', *Transportation Research Part D*, 65, pp. 500–523. doi: 10.1016/j.trd.2018.09.021.

Jalkanen, J. P. *et al.* (2012) 'Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(5), pp. 2641–2659. doi: 10.5194/acp-12-2641-2012.

Jalkanen, J. P., Johansson, L. and Kukkonen, J. (2016) 'A comprehensive inventory of ship traffic exhaust emissions in the European sea areas in 2011', *Atmospheric Chemistry and Physics*. doi: 10.5194/acp-16-71-2016.

Jeong, B. *et al.* (2019) 'Investigation on marine LNG propulsion systems for LNG carriers through an enhanced hybrid decision making model', *Journal of Cleaner Production*, 230, pp. 98–115. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.054.

Ji, D. *et al.* (2021) 'Model-free fault diagnosis for autonomous underwater vehicles using sequence Convolutional Neural Network', *Ocean Engineering*, 232(December 2020). doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108874.

Ji, M. *et al.* (2015) 'Routing optimization for multi-type containerships in a hub-and-spoke network', *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2(5), pp. 362–372. doi: 10.1016/j.jtte.2015.08.008.

Jimenez, V. J., Bouhmala, N. and Gausdal, A. H. (2020) 'Developing a predictive maintenance model for vessel machinery', *Journal of Ocean Engineering and Science*, 5(4), pp. 358–386. doi: 10.1016/j.joes.2020.03.003.

Johansson, L., Jalkanen, J. P. and Kukkonen, J. (2017) 'Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution', *Atmospheric Environment*, 167, pp. 403–415. doi: 10.1016/j.atmosenv.2017.08.042.

Johnson, E. (2003) 'LPG: A secure, cleaner transport fuel? A policy recommendation for Europe', *Energy Policy*, 31(15), pp. 1573–1577. doi: 10.1016/S0301-4215(02)00223-9.

Jovanović, F. *et al.* (2019) 'Comparative analysis of natural gas imports by pipelines and FSRU terminals', *Pomorstvo*, 33(1), pp. 110–116. doi: 10.31217/p.33.1.12.

Kano, T. and Namie, S. (2014) 'A study on estimation methodology of GHG emission from vessels by using energy efficiency index and time series monitoring data', in Ehlers, S. *et al.* (eds) *Maritime-Port Technology and Development*. 1st edn. London: CRC Press, pp. 35–41. doi: 10.1201/b17517-6.

Karthikeyan, A. . (2014) Energy performance assessment of boilers, Bureau Energy Efficiency - Government of India - Ministry of Power.

Keuning, S. J. and Timmerman, J. (1995) 'An information system foreconomic, social and environmental statistics; integrating environmental datainto the SESAME', in *US Bureau of Economic Analysis, Second Meeting of the London Group on National Resource and Economic Accounting*. Washington DC.

Kim, D. *et al.* (2019a) 'Process design and economic optimization of boil-off-gas re-liquefaction systems for LNG carriers', *Energy*, 173, pp. 1119–1129. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.098.

Kim, D. *et al.* (2019b) 'Process design and economic optimization of boil-off-gas re-liquefaction systems for LNG carriers', *Energy*, 173, pp. 1119–1129. doi: 10.1016/j.energy.2019.02.098.

Kim, J. and Park, C. (2010) 'Wind power generation with a parawing on ships, a proposal', *Energy*, 35(3), pp. 1425–1432. doi: 10.1016/j.energy.2009.11.027.

Kim, K. *et al.* (2019) 'Case Study on Boil-off Gas ( BOG ) Minimization for LNG bunkering vessel using energy storage system ( ESS )', (X).

Kjärstad, J. *et al.* (2016) 'Ship transport—A low cost and low risk CO2 transport option in the Nordic countries', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, pp. 168–184. doi: 10.1016/j.ijggc.2016.08.024.

Kjartansson, S. (2012) *A Feasibility Study on LPG as Marine Fuel Rapport SGC 259*. Chalmers University of technology. Available at: [www.sgc.se](http://www.sgc.se).

Kleiser, W. V. D. and W. M. (1996) Lubricant related factors controlling oil consumption in diesel engines, Tribo Test.

Knežević, V., Radonja, R. and Dundović, Č. (2018) 'Emission inventory of marine traffic for the port of Zadar', *Pomorstvo*, 32(2), pp. 239–244. doi: 10.31217/p.32.2.9.

Kökkülünk, G., Parlak, A. and Erdem, H. H. (2016) 'Determination of performance degradation of a marine diesel engine by using curve based approach', *Applied Thermal Engineering*, 108, pp. 1136–1146. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.08.019.

Kontovas, C. A. (2020) 'Integration of air quality and climate change policies in shipping: The case of sulphur emissions regulation', *Marine Policy*, 113(January), p. 103815. doi: 10.1016/j.marpol.2020.103815.

Kosmas, V. and Acciaro, M. (2017) 'Bunker levy schemes for greenhouse gas (GHG) emission reduction in international shipping', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57(October), pp. 195–206. doi: 10.1016/j.trd.2017.09.010.

Krata, P. and Szlapczynska, J. (2018) 'Ship weather routing optimization with dynamic constraints based on reliable synchronous roll prediction', *Ocean Engineering*, 150(March 2017), pp. 124–137. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.12.049.

Krikkis, R. N. (2018) 'A thermodynamic and heat transfer model for LNG ageing during ship transportation. Towards an efficient boil-off gas management', *Cryogenics*, 92(February), pp. 76–83. doi: 10.1016/j.cryogenics.2018.04.007.

Kristenen, H. O. and Kristensen, H. O. (2015) 'Energy demand and exhaust gas emissions of marine engines by', (2014).

Kuang, M. (2018) *The future of LNG, Bloombergnef. [online] BloombergNEF*. Available at: <https://about.bnef.com/blog/the-future-of-lng/>.

Kurle, Y. M., Wang, S. and Xu, Q. (2015) 'Simulation study on boil-off gas minimization and recovery strategies at LNG exporting terminals', *Applied Energy*, 156, pp. 628–641. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.055.

Kurle, Y. M., Wang, S. and Xu, Q. (2017) 'Dynamic simulation of LNG loading, BOG generation, and BOG recovery at LNG exporting terminals', *Computers and Chemical Engineering*, 97, pp. 47–58. doi: 10.1016/j.compchemeng.2016.11.006.

Lack, D. A. *et al.* (2009) 'Particulate emissions from commercial shipping: Chemical, physical, and optical properties', *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(4), pp. 1–16. doi: 10.1029/2008JD011300.

Lack, D. A. and Corbett, J. J. (2012) 'Black carbon from ships: A review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing', *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(9), pp. 3985–4000. doi: 10.5194/acp-12-3985-2012.

Lai, K. H. *et al.* (2011) 'Green shipping practices in the shipping industry: Conceptualization, adoption, and implications', *Resources, Conservation and Recycling*, 55(6), pp. 631–638. doi: 10.1016/j.resconrec.2010.12.004.

Lakshmi, E., Priya, M. and Achari, V. S. (2021) 'An overview on the treatment of ballast water in ships', *Ocean and Coastal Management*, 199(June 2020), p. 105296. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105296.

Lam, M. (2017) Marine Fuel Oil ( MGO & HFO ) and FCC additive technical analysis.

Langella, G. *et al.* (2016) 'Ship engines and air pollutants: emission during fuel change-over and dispersion over coastal areas', *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 7(3), pp. 307–320. doi: 10.1007/s40095-016-0211-7.

Le, T. H. *et al.* (2021) 'Numerical investigation on the effect of trim on ship resistance by RANSE method', *Applied Ocean Research*, 111(August 2020), p. 102642. doi: 10.1016/j.apor.2021.102642.

Lee, C. Y., Lee, H. L. and Zhang, J. (2015) 'The impact of slow ocean steaming on delivery reliability and fuel consumption', *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 76, pp. 176–190. doi: 10.1016/j.tre.2015.02.004.

Leonardi, J. and Browne, M. (2010) 'A method for assessing the carbon footprint of maritime freight transport: European case study and results', *International Journal of Logistics Research and Applications*, 13(5), pp. 349–358. doi: 10.1080/13675567.2010.511607.

Leontief, W. (1970) 'Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach', *The Review of Economics and Statistics*, 52(3), p. 262. doi: 10.2307/1926294.

Leontief, W. W. (1936) 'Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States', *The Review of Economics and Statistics*, 18(3), pp. 105–125. doi: 10.2307/1927837.

Leontief, W. W. and Ford, D. (1971) 'Air pollution and the economic structure : empirical results of input-output computations', in *Input-output techniques: proceedings of the Fifth International Conference on Input-Output Techniques*. North-Holland Publ. Co., pp. 9–30.

Li, D. *et al.* (2021) 'An engineering-oriented approach to construct rough micro/nano-structures for anticorrosion and antifouling application', *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 621(March), p. 126590. doi: 10.1016/j.colsurfa.2021.126590.

Li, F. (2017) 'Discussion on improving marine boiler efficiency on board', *Advances in Intelligent Systems Research*, 156(Meici), pp. 907–910.

- Li, W., Liu, Z. and Wang, Z. (2016) 'Experimental and theoretical analysis of the combustion process at low loads of a diesel natural gas dual-fuel engine', *Energy*, 94, pp. 728–741. doi: 10.1016/j.energy.2015.11.052.
- Lin, Y., Yu, Y. and Guan, G. (2014) 'Research on energy efficiency design index for sea-going LNG carriers', *Journal of Marine Science and Application*, 13(4), pp. 430–436. doi: 10.1007/s11804-014-1282-6.
- liquefiedgascarrier.com (2019) *Dual Fuel Diesel Electrical Propulsion, safety & operational matters*. Available at: <http://www.liquefiedgascarrier.com/dual-fuel-electrical-propulsion.html> (Accessed: 9 November 2019).
- Liu, X. *et al.* (2020) 'A novel waste heat recovery system combining steam Rankine cycle and organic Rankine cycle for marine engine', *Journal of Cleaner Production*, 265, p. 121502. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121502.
- Liu, X., Zhao, W. and Wan, D. (2021) 'Hull form optimization based on calm-water wave drag with or without generating bulbous bow', *Applied Ocean Research*, 116(April), p. 102861. doi: 10.1016/j.apor.2021.102861.
- Livanos, G. A., Theotokatos, G. and Pagonis, D. N. (2014) 'Techno-economic investigation of alternative propulsion plants for Ferries and RoRo ships', *Energy Conversion and Management*, 79, pp. 640–651. doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.050.
- López-Aparicio, S. *et al.* (2017) 'Shipping emissions in a Nordic port: Assessment of mitigation strategies', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53(2017), pp. 205–216. doi: 10.1016/j.trd.2017.04.021.
- Lounici, M. S. *et al.* (2014) 'Towards improvement of natural gas-diesel dual fuel mode: An experimental investigation on performance and exhaust emissions', *Energy*, 64, pp. 200–211. doi: 10.1016/j.energy.2013.10.091.
- Lubiano, M. A., Salas, A. and Gil, M. Á. (2017) 'A hypothesis testing-based discussion on the sensitivity of means of fuzzy data with respect to data shape', *Fuzzy Sets and Systems*, 328, pp. 54–69. doi: 10.1016/j.fss.2016.10.015.
- Luptacik, M. and Böhm, B. (1999) 'A consistent formulation of the leontief pollution model', *Economic Systems Research*, 11(3), pp. 263–276. doi: 10.1080/09535319900000018.
- Luptáčik, M. and Böhm, B. (1994) 'An environmental input-output model with multiple criteria', *Annals of Operations Research*, 54(1), pp. 119–127. doi: 10.1007/BF02031730.
- Mäkiharju, S. A., Perlin, M. y Ceccio, S. L. (2012) 'On the energy economics of air lubrication drag reduction', *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(4), pp. 412–422. doi: 10.2478/ijnaoe-2013-0107.
- MAN, B. (2014) 'Service Letter SL2014-593/DOJA Action code:Guidelines for Operation on Fuels with less than 0.1% Sulphur', pp. 0–16. Available at: [www.mandieselturbo.com](http://www.mandieselturbo.com).
- MAN, B. (2019) 'Marine Engine Program', *MAN Energy Solutions*, 2nd Editio, p. 250.
- MAN B&W (2016) 'The ME-LGI concept. Liquid Gas Injection engine', pp. 0–1. Available at: [https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/me-lgi-engines.pdf?sfvrsn=ce48ac0e\\_2](https://marine.man-es.com/docs/default-source/shopwaredocuments/me-lgi-engines.pdf?sfvrsn=ce48ac0e_2).
- MAN B&W (2017) 'What is EPL? MAN & PrimeServ.', pp. 1–13.
- MAN Diesel & Turbo (2016) Marine Engine. IMO Tier II and Tier III Programme. Second.

Manresa, A. and Sancho, F. (1997) El análisis medioambiental y la tabla de input-output. Cálculos energéticos y emisiones de CO<sub>2</sub>. Ayuntamiento de Barcelona.

McGeorge, H. D. (1995) 'Tanker and gas carrier cargo pumps and systems', *Marine Auxiliary Machinery*, pp. 176–213. doi: 10.1016/b978-0-7506-1843-4.50010-0.

McKinnon, A. (2007) 'CO<sub>2</sub> Emissions from Freight Transport in the UK', Report prepared for the Climate Change Working Group of the Commission for Integrated Transport, (iii), p. 57.

MEPC. 278(70) (2018) 'Resolución MEPC.278(70) - (Sistema de recopilación de datos sobre el consumo de fueloil de los buques)', 278(70), pp. 1–8.

MEPC.1/Circ.679 (2009) 'Technical Code 2008. 2 The purpose of the NO', 59(x), pp. 2009–2010.

MEPC.1/Circ.871 (2017) 'Presentación de datos de un estado que no es parte en el anexo vi del convenio marpol al sistema de recopilación de datos de la omi sobre el consumo de fueloil de los buques'. doi: 10.1017/cbo9781107415324.004.

MEPC.1/Circ.876 (2018) 'Ejemplo de modelo para la confirmación del cumplimiento, presentación temprana de la parte ii del seemp acerca del plan de recopilación de datos sobre el consumo de fueloil de los buques y su verificación oportuna, de conformidad con la regla 5.4.5 del an', 44(0), pp. 4–6.

MEPC.278(70) (2016) *Amendments to MARPOL Annex VI (Data collection system for fuel oil consumption of ships)*, IMO. Available at: [http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-\(MEPC\)/Documents/MEPC.278\(70\).pdf](http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Marine-Environment-Protection-Committee-(MEPC)/Documents/MEPC.278(70).pdf).

MEPC.282(70) (2016) 'Directrices de 2016 para la elaboración de un plan de gestión de la eficiencia energética del buque (SEEMP)', 282(70), pp. 1–22.

MEPC.292(17) (2017) 'Directrices de 2017 para la verificación de los datos sobre el consumo de fueloil de los buques por la Administración', 295(July), pp. 1–30.

MEPC.320(74) (2019) '2019 Guidelines for consistent implementation of the 0.50% sulphur limit under MARPOL ANNEX VI', *Resolution Marine Environment Protection Committee*, 320(February 2019), pp. 1–13.

MEPC (2018) 'List of special areas, emission control areas and particularly sensitive sea areas', *MEPC.1/Circ.778/Rev.3*, 44(0).

Messner, S. (2020) Future Arctic shipping, black carbon emissions, and climate change, Maritime Transport and Regional Sustainability. Elsevier Inc. doi: 10.1016/b978-0-12-819134-7.00012-5.

De Meyer, P., Maes, F. and Volckaert, A. (2008) 'Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports', *Atmospheric Environment*, 42(1), pp. 196–206. doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.06.059.

MHI (2007) 'Development of high efficiency marine propulsion plant ( Ultra Steam Turbine )', 44(3), pp. 3–7.

Migliore, C., Tubilleja, C. and Vesovic, V. (2015) 'Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG)', *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, pp. 570–580. doi: 10.1016/j.jngse.2015.06.056.

Miller, R. E. and Blair, P. D. (1985) *Input-output analysis: foundations and extensions*. 2nd edn. Edited by Cambridge University Press. Cambridge University Press. Available at: <https://books.google.no/books?id=Qdz9zQEACAAJ>.

- Miller, R. E. and Blair, P. D. (2009) *Input–Output analysis foundations and extensions*. 2nd edn. New York: Cambridge University Press.
- Miola, A. y Ciuffo, B. (2011) 'Estimating air emissions from ships: Meta-analysis of modelling approaches and available data sources', *Atmospheric Environment*. doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.01.046.
- Mjelde, A. *et al.* (2014) 'Environmental accounting for Arctic shipping - A framework building on ship tracking data from satellites', *Marine Pollution Bulletin*, 87(1), pp. 22–28. doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.07.013.
- Mohammed, A. G. *et al.* (2020) 'Performance analysis of supercritical ORC utilizing marine diesel engine waste heat recovery', *Alexandria Engineering Journal*, 59(2), pp. 893–904. doi: 10.1016/j.aej.2020.03.021.
- Montenegro, M. *et al.* (2001) 'Two-sample hypothesis tests of means of a fuzzy random variable', *Information Sciences*, 133(1–2), pp. 89–100. doi: 10.1016/S0020-0255(01)00078-0.
- Moreno-Gutiérrez, J. *et al.* (2012) 'Emission-factor uncertainties in maritime transport in the Strait of Gibraltar, Spain', *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 5(4), pp. 5953–5991. doi: 10.5194/amtd-5-5953-2012.
- Moreno-Gutiérrez, J. *et al.* (2019a) 'Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data', *Science of the Total Environment*, 650, pp. 575–584. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.045.
- Moreno-Gutiérrez, J. *et al.* (2019b) 'Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship's emissions and energy consumption based on operational data', *Science of The Total Environment*, 650, pp. 575–584. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.09.045.
- Mousavi, S. M. *et al.* (2016) 'A numerical investigation on combustion and emission characteristics of a dual fuel engine at part load condition', *Fuel*, 166(x), pp. 309–319. doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.052.
- Mrzljak, V., Poljak, I. and Medica-Viola, V. (2017) 'Dual fuel consumption and efficiency of marine steam generators for the propulsion of LNG carrier', *Applied Thermal Engineering*, 119, pp. 331–346. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.078.
- Mrzljak, V., Poljak, I. and Mrakovčić, T. (2017) 'Energy and exergy analysis of the turbo-generators and steam turbine for the main feed water pump drive on LNG carrier', *Energy Conversion and Management*, 140, pp. 307–323. doi: 10.1016/j.enconman.2017.03.007.
- Mrzljak, V., Senčić, T. and Žarković, B. (2018) 'Turbogenerator steam turbine variation in developed power: analysis of exergy efficiency and exergy destruction change', *Modelling and Simulation in Engineering*, 2018, pp. 1–12. doi: 10.1155/2018/2945325.
- Mukherjee, A. *et al.* (2019) 'Antifouling paint schemes for green ships', *Ocean Engineering*, 173(January 2017), pp. 227–234. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.12.057.
- Mustafi, N. N., Raine, R. R. and Verhelst, S. (2013) 'Combustion and emissions characteristics of a dual fuel engine operated on alternative gaseous fuels', *Fuel*, 109, pp. 669–678. doi: 10.1016/j.fuel.2013.03.007.
- Muthugala, M. A. V. J., Samarakoon, S. M. B. P. and Elara, M. R. (2022) 'Toward energy-efficient online Complete Coverage Path Planning of a ship hull maintenance robot based on Glasius Bio-inspired Neural Network', *Expert Systems with Applications*, 187(December 2020), p. 115940. doi: 10.1016/j.eswa.2021.115940.

Myśków, J. y Borkowski, T. (2012) 'Emission inventory of exhaust gases from oil-fired ship boilers', *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 19(4), pp. 487–494. doi: 10.5604/12314005.1138621.

Naciones Unidas (1992) 'Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático', p. 50. doi: 10.3917/ridp.723.0975.

Di Natale, F. and Carotenuto, C. (2015) 'Particulate matter in marine diesel engines exhausts: Emissions and control strategies', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 40(600), pp. 166–191. doi: 10.1016/j.trd.2015.08.011.

Ng, M. and Talley, W. K. (2021) 'Decarbonizing the maritime industry with analytics', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93(February), p. 102755. doi: 10.1016/j.trd.2021.102755.

Van Nieuwkoop, J. C. C. *et al.* (2013) 'Wave resource assessment along the Cornish coast (UK) from a 23-year hindcast dataset validated against buoy measurements', *Renewable Energy*, 58, pp. 1–14. doi: 10.1016/j.renene.2013.02.033.

Nikolaou, G. (2017) 'LPG for Marine Engines. The Marine Alternative Fuel', p. 144.

Nolan, D. P. (2019) 'Physical properties of hydrocarbons and petrochemicals', *handbook of fire and explosion protection engineering principles for oil, gas, chemical, and related facilities*, pp. 65–88. doi: 10.1016/b978-0-12-816002-2.00004-0.

Nordic Council, M. (2019) Refrigeration units in Marine Vessels.

Norges Rederiforbund (2020) 'Guidelines ESG reporting in the shipping and offshore industries'.

Notti, E. *et al.* (2019) 'Experimental assessment of the fouling control coating effect on the fuel consumption rate', *Ocean Engineering*, 188(June 2018), p. 106233. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106233.

Nunes, R.A.O. *et al.* (2017) 'The activity-based methodology to assess ship emissions - A review', *Environmental Pollution*, 231, pp. 87–103. doi: 10.1016/J.ENVPOL.2017.07.099

OCDE/ITF (2018) 'Decarbonising maritime transport case-specific policy analysis'. Available at: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf>.

Olmer, N. *et al.* (2017) 'Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013–2015', *The International Council on Clean Transportation*, pp. 2013–2015. Available at: [https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015\\_ICCT-Report\\_17102017\\_vF.pdf](https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf).

OMI (2020) *OMI - MARPOL VI Antecedentes, Organización Marítima Internacional*. Available at: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Historic-Background-.aspx> (Accessed: 4 May 2020).

OMI - Circular no. 3827 (2018) 'Circular 3827 - Sistema mundial integrado de información marítima de la OMI (GISIS): base de datos de la OMI sobre el consumo de fueloil de los buques', 44(0).

ONU (1995) 'Día internacional de la preservación de la capa de ozono', *Asamblea General de las Naciones Unidas*, 49, pp. 1–11. Available at: <http://www.un.org/es/comun/docs/?symbol=A/RES/49/114>.

Organización Marítima Internacional (2008) 'Código técnico relativo al control de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los motores diesel marinos', 177(x).

Paltsev, S. (2015) 'Economics and geopolitics of natural gas: Pipelines versus LNG', *International Conference on the European Energy Market, EEM*, 2015-Augus. doi: 10.1109/EEM.2015.7216651.

Pambour, K. A., Bolado-Lavin, R. and Dijkema, G. P. J. (2016) 'An integrated transient model for simulating the operation of natural gas transport systems', *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 28, pp. 672–690. doi: 10.1016/j.jngse.2015.11.036.

Pan, P. *et al.* (2021) 'Research progress on ship power systems integrated with new energy sources: A review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 144(April), p. 111048. doi: 10.1016/j.rser.2021.111048.

Papanikolaou, A. (2010) 'Holistic ship design optimization', *CAD Computer Aided Design*, 42(11), pp. 1028–1044. doi: 10.1016/j.cad.2009.07.002.

Pardo, A. and Ruiz, M. Á. (2002) SPSS 11 Guía para el análisis de datos.

Park, Y. IL (2019) 'Ultimate crushing strength criteria for GTT NO96 LNG carrier cargo containment system under sloshing load', *Ocean Engineering*, 188(July), p. 106224. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.106224.

Parlamento Europeo, C. de la U. E. (2009) 'Directiva 2009/29/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 por la que se modifica la Directiva 2003/87/CE para perfeccionar y ampliar el régimen comunitario de comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero', *Diario Oficial de la Unión Europea. Serie L*, 2008(140, 5 de junio), pp. 63–87. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0029>.

Peeters, S. (2018) Auckland air emissions inventory 2016: Sea Transport.

Peña-Troncoso, S. *et al.* (2019) 'Diagnosis of conceptual knowledge in physical education: a mixed study in Chile', *Revista Brasileira de Ciências do Esporte*, 41(3), pp. 248–255. doi: 10.1016/j.rbce.2018.06.009.

Peng, P., Cheng, S. and Lu, F. (2020) 'Characterizing the global liquefied petroleum gas trading community using mass vessel trajectory data', *Journal of Cleaner Production*, 252, p. 119883. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.119883.

Perera, L. P., Mo, B. and Kristjánsson, L. A. (2015) 'Identification of optimal trim configurations to improve energy efficiency in ships', *IFAC-PapersOnLine*, 28(16), pp. 267–272. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.10.291.

Pettit, S. *et al.* (2018) 'Revisiting history: Can shipping achieve a second socio-technical transition for carbon emissions reduction?', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, pp. 292–307. doi: 10.1016/j.trd.2017.05.001.

Preserve, L. and Stevenson, E. (2018) 'Oil price shock: changing effects of oil shocks on the 2003-2008 oil price shock: changing effects of oil shocks on the economy'. Available at: <https://preserve.lehigh.edu/library-research-prize>.

Proops, J. L. R. (1988) 'Energy intensities, input—output analysis and economic development', *Input-Output Analysis*. Springer Netherlands, pp. 201–215. doi: 10.1007/978-94-009-2607-3\_13.

Prpić-Oršić, J. and Faltinsen, O. M. (2012) 'Estimation of ship speed loss and associated CO<sub>2</sub> emissions in a seaway', *Ocean Engineering*, 44, pp. 1–10. doi: 10.1016/j.oceaneng.2012.01.028.

Psaraftis, H.N; Zis, T.; Lagouvardou, S. (2020) DMA-DTU project on Market Based Measures (MBMs), Technical University of Denmark. Denmark.

Psaraftis, H. N. (2018) 'Decarbonization of maritime transport: to be or not to be?', *Maritime Economics & Logistics*, pp. 1–19. doi: 10.1057/s41278-018-0098-8.

Psaraftis, H. N., Zis, T. and Lagouvardou, S. (2021) 'A comparative evaluation of market based measures for shipping decarbonization', *Maritime Transport Research*, 2(April), p. 100019. doi: 10.1016/j.martra.2021.100019.

Q-learning, D. (2021) 'Applied energy near-optimal energy management for plug-in hybrid fuel cell and battery propulsion using deep reinforcement learning', *International Journal of Hydrogen Energy*, (xxxx). doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.09.196.

Qayum, A. (1991) 'Books and Notes', *Economic Systems Research*, 3(4), pp. 428–430. doi: 10.1080/09535319100000033.

Rahim, M. M., Islam, M. T. and Kuruppu, S. (2016) 'Regulating global shipping corporations' accountability for reducing greenhouse gas emissions in the seas', *Marine Policy*, 69, pp. 159–170. doi: 10.1016/j.marpol.2016.04.018.

Raslavičius, L. *et al.* (2014) 'Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 513–525. doi: 10.1016/j.rser.2014.01.052.

Rehmatulla, N. and Smith, T. (2015) 'Barriers to energy efficient and low carbon shipping', *Ocean Engineering*, 110, pp. 102–112. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.030.

Richardson, S. M. and Saville, G. (1996) 'Blowdown of LPG pipelines', *Process Safety and Environmental Protection*, 74(4), pp. 235–244. doi: 10.1205/095758296528581.

Rogers, H. (2018) 'The LNG Shipping Forecast : costs rebounding , outlook uncertain'. Oxford: The Oxford Institute for Energy Studies, pp. 1–18.

Roussanaly, S. *et al.* (2013) 'Benchmarking of CO2 transport technologies: Part I-Onshore pipeline and shipping between two onshore areas', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19, pp. 584–594. doi: 10.1016/j.ijggc.2013.05.031.

Roussanaly, S., Brunsvold, A. L. and Hognes, E. S. (2014) 'Benchmarking of CO2 transport technologies: Part II - Offshore pipeline and shipping to an offshore site', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, pp. 283–299. doi: 10.1016/j.ijggc.2014.06.019.

Rutherford, D., Mao, X. and Comer, B. (2020) 'Potential CO2 reductions under the Energy Efficiency Existing Ship Index', (October 2020). Available at: [www.theicct.org](http://www.theicct.org).

Saenz de Miera, G. (2000) 'Modelo Input–Output híbrido para el análisis de las relaciones entre la economía y el agua: aplicación al caso de Andalucía', *Estadística y Medio Ambiente.IEA*, pp. 267–285.

Samoilescu, G., Bordianu, A. and Patroi, E. (2019) 'Use of composite materials in shipbuilding. Utility and necessity', *Scientific Bulletin of Naval Academy*, XXII(2), pp. 17–20. doi: 10.21279/1454-864X-19-I1-002.

Sánchez Chóliz, J., Bielsa Callau, J. and Arrojo Agudo, P. (1995) 'Water values for Aragón.', *Wissenschaftsverlag Vauk Kiel KG*.

Scarborough, T. (2017) 'A review of the NAEI shipping emissions methodology', (1109088).

Schach, M. and Madlener, R. (2018) 'Impacts of an ice-free Northeast passage on LNG markets and geopolitics', *Energy Policy*, 122(July), pp. 438–448. doi: 10.1016/j.enpol.2018.07.009.

Schaltegger, S. and Wagner, M. (2006) 'Integrative management of sustainability performance, measurement and reporting', *International Journal of Accounting, Auditing and Performance Evaluation*, 3, pp. 1–19. doi: 10.1504/IJAAP.2006.010098.

Schim van der Loeff, W., Godar, J. and Prakash, V. (2018) 'A spatially explicit data-driven approach to calculating commodity-specific shipping emissions per vessel', *Journal of Cleaner Production*, 205, pp. 895–908. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.09.053.

Schreier, M. *et al.* (2007) 'Global ship track distribution and radiative forcing from 1 year of AATSR data', *Geophysical Research Letters*, 34(17). doi: 10.1029/2007GL030664.

Schultz, M. P. (2007) 'Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering', *Biofouling*, 23(5), pp. 331–341. doi: 10.1080/08927010701461974.

Schwarz, B. W. and Rhiemeier, J. (2007) 'The analysis of the emissions of fluorinated greenhouse gases from refrigeration and air conditioning equipment used in the transport sector other than road transport and options for reducing these emissions Maritime , Rail , and Aircraft Sec', *Outlook*, (November).

Senjanović, I. *et al.* (2006) 'Structure design of cargo tanks in Liquefied Gas Carriers', *9th International Design Conference, DESIGN 2006*, pp. 357–368.

Shaton, K., Hervik, A. and Hjelle, H. M. (2019) 'The environmental footprint of natural gas transportation: LNG vs. Pipeline', *Economics of Energy & Environmental Policy*, 8(2), pp. 1–22. doi: 10.5547/2160-5890.8.2.ksha.

Shaw, H. J. and Lin, C. K. (2021) 'Marine big data analysis of ships for the energy efficiency changes of the hull and maintenance evaluation based on the ISO 19030 standard', *Ocean Engineering*, 232(3), p. 108953. doi: 10.1016/j.oceaneng.2021.108953.

Sheng, D. *et al.* (2017) 'Modeling the effects of unilateral and uniform emission regulations under shipping company and port competition', *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 101, pp. 99–114. doi: 10.1016/j.tre.2017.03.004.

Sheng, Y., Shi, X. and Su, B. (2018) 'Re-analyzing the economic impact of a global bunker emissions charge', *Energy Economics*, 74, pp. 107–119. doi: 10.1016/j.eneco.2018.05.035.

Shi, Y. (2014) 'Greenhouse gas emissions from international shipping: The response from China's Shipping Industry to the regulatory initiatives of the international maritime organization', *International Journal of Marine and Coastal Law*, 29(1), pp. 77–115. doi: 10.1163/15718085-12341303.

Shi, Yubing (2016) 'Are greenhouse gas emissions from international shipping a type of marine pollution?', *Marine Pollution Bulletin*, 113(1–2), pp. 187–192. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.09.014.

Shi, Y (2016) 'Reducing greenhouse gas emissions from international shipping: Is it time to consider market-based measures?', *Marine Policy*, 64, pp. 123–134. doi: 10.1016/j.marpol.2015.11.013.

Shim, H. B. *et al.* (2020) 'Ultrasonic fatigue test at cryogenic temperatures on SUS304L by cold rolling ratio for LNG carriers', *Engineering Failure Analysis*, 112(November 2019), p. 104515. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.104515.

SIGTTO (2016) 'SIGTTO LNG and LPG Experience Matrix Guidelines for Use', p. 12.

Silva, E. R. *et al.* (2019) 'Eco-friendly non-biocide-release coatings for marine biofouling prevention', *Science of the Total Environment*, 650, pp. 2499–2511. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.010.

Singhal, N. and Dev, A. (2016) Global Reporting Initiative, Sustainability Reporting.

Sinha, R. P. and Mohd Norsani Wan Nik, Wan, et al. (2012) 'Investigation of propulsion system for large LNG ships', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 36(1). doi: 10.1088/1757-899X/36/1/012004.

Sinha, R. P. and Mohd Norsani Wan Nik, Wan, et al (2012) 'Investigation of propulsion system for large LNG ships', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/36/1/012004.

Sinha, R. P. and Mohd Norsani Wan Nik, W. et al. (2012) 'Investigation of propulsion system for large LNG ships', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. doi: 10.1088/1757-899X/36/1/012004.

Skrúcaný, T. et al. (2018) 'Environmental comparison of different transport mode', *Nase More*, 65(4 Special issue), pp. 192–196. doi: 10.17818/NM/2018/4SI.5.

Smith, T. et al. (2015) Third IMO GHG Study 2014. London.

Smith, T. W. . et al. (2016) CO2 Emissions from International Shipping: Possible reduction targets and their associated pathways. London.

SNAME (1961) 'Recommended practices for preparing marine steam power plant heat balances'. New York: The Society of Naval Architects and Marine Engineers, p. 61.

Song, D. P., Li, D. and Drake, P. (2015) 'Multi-objective optimization for planning liner shipping service with uncertain port times', *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 84, pp. 1–22. doi: 10.1016/j.tre.2015.10.001.

Song, S., Demirel, Y. K. and Atlar, M. (2020) 'Penalty of hull and propeller fouling on ship self-propulsion performance', *Applied Ocean Research*, 94(October 2019), p. 102006. doi: 10.1016/j.apor.2019.102006.

Speranza, N. et al. (2019) 'Modelling of hull roughness', *Ocean Engineering*, 174(January), pp. 31–42. doi: 10.1016/j.oceaneng.2019.01.033.

Stahmer, C. (2002) *Social accounting matrices and extended input-output tables*. 1st edn. Federal Statistics Office Germany.

Stopford, M. (2009) *Maritime economics 3rd Edition*, *Choice Reviews Online*. doi: 10.5860/choice.47-3934.

Stoumpos, S. et al. (2018) 'Marine dual fuel engine modelling and parametric investigation of engine settings effect on performance-emissions trade-offs', *Ocean Engineering*, 157(December 2016), pp. 376–386. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.059.

Strantzali, E. et al. (2019) "A decision support approach for evaluating liquefied natural gas supply options: Implementation on Greek case study", *Journal of Cleaner Production*, 222, pp. 414–423. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.03.031.

Sustainable Shipping Initiative (2014) 'Driving Transformational change through the value chain driving transformational change through the value chain', (November 2014).

Swain, G. W. (2010) 'The importance of ship hull coatings and maintenance as drivers for environmental sustainability', *RINA, Royal Institution of Naval Architects - Ship Design and Operation for Environmental Sustainability - Papers*, pp. 55–62. doi: 10.3940/rina.es.2010.17.

Synák, F. et al. (2019a) 'Liquefied petroleum gas as an alternative fuel', *Transportation Research Procedia*, 40, pp. 527–534. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.076.

Synák, F. *et al.* (2019b) 'Liquefied petroleum gas as an alternative fuel', *Transportation Research Procedia*, 40, pp. 527–534. doi: 10.1016/j.trpro.2019.07.076.

Sys, C. *et al.* (2014) 'International emission regulation in sea transport: Economic feasibility and impact', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 45, pp. 139–151. doi: 10.1016/j.trd.2015.06.009.

Tan, P. qiang, Li, Y. and Shen, H. yan (2018) 'Exhaust particle properties from a light duty diesel engine using different ash content lubricating oil', *Journal of the Energy Institute*, 91(1), pp. 55–64. doi: 10.1016/j.joei.2016.11.001.

Tanaka, H. and Okada, A. (2019) 'Effects of market-based measures on a shipping company: Using an optimal control approach for long-term modeling', *Research in Transportation Economics*, 73(September 2017), pp. 63–71. doi: 10.1016/j.retrec.2019.01.006.

The Poseidon Principles Association (2019) 'A global framework for responsible ship finance', p. 58. Available at: [www.poseidonprinciples.org](http://www.poseidonprinciples.org).

The World LPG Association (2017) 'Guide to LPG use in waterborne vessels', *Guide to Good Industry Practice – LPG Use in Waterborne Vessels*, (01), p. 34.

Tian, J. J. *et al.* (2021) 'Effect of coating composition on the micro-galvanic dissolution behavior and antifouling performance of plasma-sprayed laminated-structured Cu[sbnd]Ti composite coating', *Surface and Coatings Technology*, 410(December 2020), p. 126963. doi: 10.1016/j.surfcoat.2021.126963.

Timmer, M. P. (2012) 'The World input-output database (WIOD): contents, sources and methods', in (University of Groningen (ed.) *Spatial Economic Analysis*. European Commission, Research directorate general as part of the 7th framework programme, Theme 8: Socio-Economic Sciences and Humanities. Grant Agreement no: 225 281, p. 74. doi: 10.1080/17421772.2020.1708574.

Timmer, M. P. *et al.* (2015) 'An illustrated user guide to the world input-output database: The case of global automotive production', *Review of International Economics*, 23(3), pp. 575–605. doi: 10.1111/roie.12178.

Timmer, M. P. *et al.* (2016) 'An Anatomy of the Global Trade Slowdown based on the WIOD 2016 Release', *GGDC Research memorandum*, 162(November), pp. 1–67.

TNO (2010) 'Methodologies for estimating shipping emissions in the Netherlands'.

Trede, M. (2020) 'Maximum likelihood estimation of high-dimensional Student-t copulas', *Statistics and Probability Letters*, 159, p. 108678. doi: 10.1016/j.spl.2019.108678.

Tribou, M. and Swain, G. (2010) 'The use of proactive in-water grooming to improve the performance of ship hull antifouling coatings', *Biofouling*, 26(1), pp. 47–56. doi: 10.1080/08927010903290973.

Trivyza, N. L., Rentizelas, A. and Theotokatos, G. (2016) 'The influence of ship operational profile in the sustainability of ship energy systems', *International Conference of Maritime Safety and Operations 2016*, (January 2013). Available at: <https://strathprints.strath.ac.uk/65070/>.

Trodden, D. G. *et al.* (2015) 'Fuel usage data analysis for efficient shipping operations', *Ocean Engineering*, 110, pp. 75–84. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.09.028.

Trozzi, Carlo; De Lauretis, R. (2019) 'EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019', *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), pp. 1689–1699. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

Trozzi, C. (2010) 'Emission estimate methodology for maritime navigation', *19th Annual International Emission Inventory Conference 'Emissions Inventories - Informing Emerging Issues'*, (September 2010). Available at: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/conference/ei19/session10/trozzi.pdf>.

Trust, C. (2007) *Carbon Footprint measurement methodology, Version 1.1*, The Carbon Trust. Londres, Inglaterra. Available at: [www.carbontrust.co.uk](http://www.carbontrust.co.uk).

Tu Huan, Fan Hongjun, L. W. and Z. G. (2019) 'Options and evaluations on propulsion systems of LNG carriers', *Propulsion Systems*, i, p. 13. doi: <http://dx.doi.org/10.5772/57353>.

Tzannatos Ernestos, E. (2010) 'Ship emissions and their externalities for Greece', *Atmospheric Environment*, 44(18), pp. 2194–2202. doi: 10.1016/j.atmosenv.2010.03.018.

UCL Energy Institute (2018) *Rutas marítimas de buques gaseros*. Available at: <https://www.shipmap.org/> (Accessed: 24 June 2020).

UMAS (2015) The Existing Shipping Fleet's CO2 Efficiency, Marine Environment Protection Committee 68th session. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.

UMAS (2016) *FUSE, Products*. Available at: <https://u-mas.co.uk/Products/fuse> (Accessed: 1 July 2019).

UNCTAD (2018) Maritime Review 2018.

UNCTAD (2019) *Review of maritime transport 2019*. United Nations, Geneva. Available at: [https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-\(Series\).aspx](https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-(Series).aspx).

UNFCCC (2015) 'Paris Agreement', p. 29. Available at: [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/spanish\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/spanish_paris_agreement.pdf).

UNFCCC (2019) *What is the United Nations Framework Convention on Climate Change?* Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-convention/what-is-the-united-nations-framework-convention-on-climate-change> (Accessed: 26 November 2019).

UNPD (2019) *Protocolo de Montreal, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Available at: <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development/environment-and-natural-capital/montreal-protocol.html> (Accessed: 13 December 2019).

Varahrami, V. and Haghghat, M. S. (2018) 'The assessment of liquefied natural gas (LNG) demand reversibility in selected OECD countries', *Energy Reports*, 4, pp. 370–375. doi: 10.1016/j.egy.2018.05.006.

Velázquez, E. (2003) 'Modelo input-output del agua. análisis de las relaciones intersectoriales del agua en Andalucía', *FundaciónCentra*. e2003/1.

Ventikos, N. P., Sotiralis, P. and Drakakis, M. (2018) 'A dynamic model for the hull inspection of ships: The analysis and results', *Ocean Engineering*, 151(October 2017), pp. 355–365. doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.020.

Verifavia Shipping (2020) *IMO-DCS Regulation*. Available at: [https://www.verifavia-shipping.com/shipping-carbon-emissions-verification/shipping-mrv-regulation-the-imo-data-collection-system-dcs-106.php#:~:text=The International Maritime Organization \(IMO,an IMO database from 2019](https://www.verifavia-shipping.com/shipping-carbon-emissions-verification/shipping-mrv-regulation-the-imo-data-collection-system-dcs-106.php#:~:text=The International Maritime Organization (IMO,an IMO database from 2019).

Vianello, C. *et al.* (2016) 'Risk assessment in a hypothetical network pipeline in UK transporting carbon dioxide', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 44, pp. 515–527. doi: 10.1016/j.jlp.2016.05.004.

Victor, P. A. (1972) *Pollution - economy and environment*. 1st edn. London: Routledge. doi: 10.4324/9781315108483.

Wackernagel, M., Rees, W. E. (1996) 'Our ecological footprint: reducing human impact on the Earth', *Gabriola Press New Society Publishing, B.C.*

Wackernagel, Mathis; Yount, J. D. (1998) 'The ecological footprint: an indicator of progress toward regional sustainability', *Environmental Monitoring and Assessment*, 51, pp. 511–529.

Wackernagel, M. *et al.* (2002) 'Tracking the ecological overshoot of the human economy', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 99(14), pp. 9266–9271. doi: 10.1073/pnas.142033699.

Wan, Z. *et al.* (2018) 'Decarbonizing the international shipping industry: Solutions and policy recommendations', *Marine Pollution Bulletin*, 126(September 2017), pp. 428–435. doi: 10.1016/j.marpolbul.2017.11.064.

Wang, H. *et al.* (2018) 'Life cycle cost and environmental impact analysis of ship hull maintenance strategies for a short route hybrid ferry', *Ocean Engineering*, 161(April), pp. 20–28. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.04.084.

Wang, H. and Rutherford, D. (2015) 'Assessment of energy consumption by liquefied natural gas carriers and impact of improving the energy efficiency on natural gas supply chain', *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2502(1), pp. 40–47. doi: 10.3141/2502-05.

Wang, K. *et al.* (2016) 'Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, pp. 81–93. doi: 10.1016/j.trd.2016.03.014.

Wang, K. *et al.* (2017) 'Study on route division for ship energy efficiency optimization based on big environment data', *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety, ICTIS 2017 - Proceedings*, pp. 111–116. doi: 10.1109/ICTIS.2017.8047752.

Wang, K., Fu, X. and Luo, M. (2015) 'Modeling the impacts of alternative emission trading schemes on international shipping', *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 77, pp. 35–49. doi: 10.1016/j.tra.2015.04.006.

Wartsila (2010a) 'Wärtsilä propulsion upgrade with new propeller design', *Wärtsilä Corporation*.

Wartsila (2010b) 'Wärtsilä rudder solutions - energopac', *Wärtsilä Corporation*.

Wartsila (2016) 'Wärtsilä energoprofin wärtsilä energoprofin', *Wärtsilä Corporation*.

Wartsila (2018) 'Wärtsilä 50df product guoide', p. 256.

Wartsila (2019a) 'Wartsila 34f product guide', *product guide*, p. 322.

Wartsila (2019b) 'Wärtsilä 46f product guide', *product guide*, p. 208.

Wartsila (2020) Wärtsilä signs agreement with Kuribayashi Steamship in Japan for deployment of innovative gate rudder technology, Wärtsilä Corporation, Trade press release. Available at: <https://www.wartsila.com/media/news/30-03-2020-wartsila-signs-agreement-with-kuribayashi-steamship-in-japan-for-deployment-of-innovative-gate-rudder-technology-2672893>.

Wärtsilä Corporation (2008) 'Wärtsilä rt-flex96c and Wärtsilä rta96c technology review'.

Wiedmann, T. (2009) 'Carbon footprint and input–output analysis – an introduction', *Economic Systems Research*, 21(3), pp. 175–186. doi: 10.1080/09535310903541256.

Wiedmann, T. and Minx, J. (2007) 'A Definition of ' Carbon Footprint', *Science*, 1(01), pp. 1–11. doi: 10.1088/978-0-750-31040-6.

WINGD (2020) 'Operational Manual for XDF - Engines', 41(002).

Winnes, H. and Fridell, E. (2009) 'Particle emissions from ships: Dependence on fuel type', *Journal of the Air and Waste Management Association*, 59(12), pp. 1391–1398. doi: 10.3155/1047-3289.59.12.1391.

Winnes, H. and Fridell, E. (2010) 'Emissions of NO<sub>x</sub> and particles from manoeuvring ships', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(4), pp. 204–211. doi: 10.1016/j.trd.2010.02.003.

Winther, M. *et al.* (2014) 'Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data', *Atmospheric Environment*, 91(2014), pp. 1–14. doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.03.006.

Wiser, Ryan; Bolinger, Mark; St. Clair, M. (2005) 'Easing the natural gas crisis: reducing natural gas prices through increased deployment of renewable energy and energy efficiency', (January).

World Resources Institute (2013) 'Technical guidance for calculating scope 3 emissions', *Supplement to the Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting & Reporting Standard. Green House Gas Protocol*, 1(Scope 3), pp. 1–187.

Xie, M., Zhao, W. and Wu, Y. (2021) 'Preventing algae biofilm formation via designing long-term oil storage surfaces for excellent antifouling performance', *Applied Surface Science*, 554(March), p. 149612. doi: 10.1016/j.apsusc.2021.149612.

Yang, B. *et al.* (2015) 'Parametric investigation of natural gas port injection and diesel pilot injection on the combustion and emissions of a turbocharged common rail dual-fuel engine at low load', *Applied Energy*, 143, pp. 130–137. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.037.

Yang, Z. L. *et al.* (2012) 'Selection of techniques for reducing shipping NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions', *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(6), pp. 478–486. doi: 10.1016/j.trd.2012.05.010.

Yoo, B. Y. *et al.* (2013) 'Development of CO<sub>2</sub> terminal and CO<sub>2</sub> carrier for future commercialized CCS market', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 12, pp. 323–332. doi: 10.1016/j.ijggc.2012.11.008.

Yoon, S. (2021) 'Application of composite materials for shipbuilding and marine engineering', in *Advanced Composites Engineering and Its Nano-Bridging Technology*. World Scientific, p. Chapter 8. doi: [https://doi.org/10.1142/9789811235320\\_0009](https://doi.org/10.1142/9789811235320_0009).

Yu, W., Zhou, P. and Wang, H. (2018a) 'Evaluation on the energy efficiency and emissions reduction of a short-route hybrid sightseeing ship', *Ocean Engineering*, 162(April), pp. 34–42. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.016.

Yu, W., Zhou, P. and Wang, H. (2018b) 'Evaluation on the energy efficiency and emissions reduction of a short-route hybrid sightseeing ship', *Ocean Engineering*, 162(February), pp. 34–42. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.05.016.

Yuan, J., Ng, S. H. and Sou, W. S. (2016) 'Uncertainty quantification of CO<sub>2</sub> emission reduction for maritime shipping', *Energy Policy*, 88, pp. 113–130. doi: 10.1016/j.enpol.2015.10.020.

Yusim, A., Jember, U. and Suastika, K. (2018) 'Review of correlation between marine fouling and fuel', (May).

Zaccone, R. *et al.* (2018) 'Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: A dynamic programming approach', *Ocean Engineering*, 153(March 2017), pp. 215–224. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.100.

Zakaria, M. S., Osman, K. and Abdullah, H. (2013) 'Greenhouse gas reduction by utilization of cold LNG boil-off gas', *Procedia Engineering*, 53, pp. 645–649. doi: 10.1016/j.proeng.2013.02.083.

Zakaria, M. S., Osman, K. and Musa, M. N. M. (2012) 'Boil-off gas formation inside large scale liquefied natural gas (LNG) tank based on specific parameters', *Applied Mechanics and Materials*, 229–231(May 2014), pp. 690–694. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.229-231.690.

Zalar, M., Malenica, Š. and Diebold, L. (2006) 'Selected hydrodynamic issues in design of large LNG carriers', *International Conference - ICSOT 2006: Design, Construction and Operation Of Natural Gas Carriers and Offshore Systems*, pp. 155–162.

Zanne, M. and Grčić, M. (2009) 'Challenges of LNG (liquefied natural gas) carriers in 21st century', *Promet - Traffic - Traffico*, 21(1), pp. 49–60.

Zhang, C. (2015) 'Analysis of liquid sloshing in LNG carrier with wedge-shaped tanks', *Ocean Engineering*, 105, pp. 304–317. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.044.

Zhang, D., Chen, Y. and Tanaka, M. (2018) 'On the effectiveness of tradable performance-based standards', *Energy Economics*, 74, pp. 456–469. doi: 10.1016/j.eneco.2018.06.012.

Zhang, H. Y. *et al.* (2018) 'Exploring the driving factors of global LNG trade flows using gravity modelling', *Journal of Cleaner Production*, 172, pp. 508–515. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.10.244.

Zhang, J. *et al.* (2013) 'Analysis of oil consumption in cylinder of diesel engine for optimization of piston rings', *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 26(1), pp. 207–216. doi: 10.3901/CJME.2013.01.207.

Zhang, Q. *et al.* (2019) 'Reducing black carbon emissions from Arctic shipping: Solutions and policy implications', *Journal of Cleaner Production*, 241, p. 118261. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118261.

Zheng, H., Huang, Y. and Ye, Y. (1999) 'New level sensor system for ship stability analysis and monitor', *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 48(6), pp. 1014–1017. doi: 10.1109/19.816106.

Zoolfakar, M. R. *et al.* (2014) 'Holistic study of Liquefied natural gas carrier systems', *Procedia Computer Science*, 36(C), pp. 440–445. doi: 10.1016/j.procs.2014.09.018.