

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN DE UN BUQUE LNG

TRABAJO FIN DE GRADO



Autor: Eduardo Gómez Piñuela
Directores: Sonia Busquier Sáez
 Maria José Legáz Almansa

Arquitectura Naval e Ingeniería de Sistemas Marinos
UPCT, 2019

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN AL PROYECTO.....	4
1.1. Objetivos.....	5
1.2. Alcance del proyecto.....	5
CAPÍTULO 2: INTRODUCCIÓN AL GNL Y BUQUES DE TRANSPORTE.....	7
2.1. Objetivos.....	8
2.2. Marco histórico del Gas Natural.....	9
2.3. Breve historia del Gas Natural en España.....	10
2.4. El compuesto químico, definición y características.....	12
2.5. El Gas Natural y el medio ambiente.....	14
2.6. Ventajas de este recurso.....	15
2.7. Usos y aplicaciones.....	15
2.8. Actualidad del Gas Natural.....	17
2.8.1. Principales países productores de gas natural.....	17
2.8.2. Demanda actual.....	19
2.9. Transporte del Gas Natural.....	19
2.9.1. Transporte por vía terrestre - gaseoductos.....	20
2.9.2. Transporte por vía marítima.....	21
2.10. Futuro del mercado.....	23
2.11. Introducción a los buques de transporte de LNG.....	24
2.11.1. Tipos de tanques para el almacenamiento y transporte.....	25
CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL BUQUE.....	35
3.1. Objetivos.....	36
3.2. Dimensiones principales y coeficientes.....	36
3.3. Dimensiones principales.....	38
3.3.1. Eslora total.....	38
3.3.2. Eslora entre perpendiculares.....	39
3.3.3. Manga del buque.....	40
3.3.4. Puntal del buque.....	41
3.3.5. Calado del buque.....	42
3.3.6. Desplazamiento del buque.....	43
3.4. Coeficientes adimensionales.....	44
3.4.1. Coeficiente de bloque.....	44
3.4.2. Coeficiente de la maestra.....	44
3.4.3. Coeficiente prismático.....	45
3.4.4. Coeficiente de flotación.....	45
3.5. Generación de las formas del buque.....	47

3.6. Estimación de la potencia propulsora	51
3.6.1. Método de D.G.M. Watson	52
3.6.2. Método de L.K. Kupras	53
3.6.3. Método de J.Holtrop & G.G.J. Mennen	55
3.7. Cálculo de la hélice	64
3.8. Selección preliminar del motor principal	71
3.9. Conclusiones	76
CAPÍTULO 4: DIMENSIONAMIENTO MEDIANTE MATLAB	77
4.1. Objetivos	78
4.2. Tamaño de la muestra. Base de datos	78
4.3. Métodos de remuestreo	79
4.4. Método de Bootstrap	80
4.5. Tipos de ajuste de regresión	82
4.5.1. Ajuste por mínimos cuadrados	82
4.5.2. Ajuste lineal	82
4.5.3. Ajuste cuadrático	83
4.5.4. Ajuste exponencial	83
4.5.5. Ajuste potencial	83
4.6. Estimación de las dimensiones principales a partir de la muestra	83
4.6.1. Interfaz gráfica para futuras estimaciones	91
4.7. Conclusiones	94
CAPÍTULO 5: MÉTODOS MATEMÁTICOS EN EL MUNDO NAVAL	95
5.1. Objetivos	96
5.2. Justificación de la necesidad de métodos matemáticos	96
5.3. Introducción a las ecuaciones diferenciales ordinarias	97
5.4. Ecuaciones diferenciales ordinarias lineales y no lineales	97
5.4.1. Método de Runge-Kutta	98
5.5. Método de Euler	98
5.5.1. Método de Heún	100
5.5.2. Método general	101
5.5.3. Método Runge-Kutta de Cuarto Orden	102
5.6. Propagación del oleaje	102
5.6.1. Teoría de Ayri	103
5.7. Conclusiones	107
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	108
ANEXO 1: CURVAS OPERACIÓN MOTOR DE WÄRTSILA	110
ANEXO 2: ALGORITMOS IMPLEMENTADOS EN MATLAB	112

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN AL PROYECTO

1.1. Objetivos

En la actualidad los nuevos motores de combustión interna deben cumplir con normativas europeas que obligan a los fabricantes a exigir estrictos requisitos en términos de contaminación medioambiental. Es por ello que una de las tendencias en los sistemas de combustión es el uso del gas natural, haciendo de este modo aumentar la demanda de este producto. Como consecuencia, todo lo relacionado con el transporte y almacenamiento del gas, ha afectado positivamente al sector naval, haciendo crecer así la cartera de trabajo para la construcción de nuevos buques capaces de transportar por mar grandes cantidades de gas natural.

El objetivo de este proyecto, y con motivo de lo anterior, es el dimensionamiento preliminar de un buque LNG de 174.000m³, que por especificación de contrato navegará a 18,5 nudos, y al cual se le realizará un estudio propulsivo para la selección del motor principal.

Posteriormente se realizará para dicho buque, la implementación del estudio del dimensionamiento principal bajo el software de Matlab para su comprobación.

Por último, nos apoyaremos en los métodos matemáticos con motivo de mostrar la importancia de estos en el desarrollo con éxito de la ingeniería y el negocio del transporte marítimo, donde se desarrollará una teoría de la propagación del oleaje debido al sentido especial que tiene a la hora de seleccionar tanto una ruta de navegación, como el diseño estructural del buque.

1.2. Alcance del proyecto

El proyecto se centrará en los aspectos ya comentados de la siguiente forma:

- Dimensionamiento:

Obtención de las dimensiones principales del buque y los coeficientes de formas mediante un estudio estadístico de buques similares.

- Generación de formas:

Estimación de la resistencia al avance del buque mediante software específico.

- Estudio propulsivo:

Estimación de la resistencia al avance del buque mediante métodos empíricos. Con los valores obtenidos, se calculará la potencia necesaria del buque y se seleccionará el motor principal para la propulsión.

- Comprobación de las características principales mediante Matlab

Se desarrollará en Matlab un estudio con el fin de estimar de manera sencilla las dimensiones principales y coeficientes para un buque de transporte LNG, comprobando así los resultados de las regresiones utilizadas anteriormente.

- Necesidad de métodos matemáticos en el mundo naval

Justificación de la importancia de los métodos matemáticos en la ingeniería y en el desarrollo del negocio marítimo, mostrando la teoría de Airy para la propagación del oleaje, y su importancia en algunos factores para la fase de diseño de los buques.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



CAPÍTULO 2:

INTRODUCCIÓN AL GNL Y BUQUES DE TRANSPORTE

2.1. Objetivos

El objetivo de este capítulo es mostrar aquellos aspectos y características generales que han propiciado el desarrollo y la utilización en los distintos sectores del gas natural, así como las bases de este combustible como una fuente de energía limpia y con un gran potencial de futuro, aun siendo un recurso limitado.

El gas natural es en la actualidad una de las principales y más relevantes fuentes de energía, utilizado en todo el planeta tanto para uso doméstico como para uso industrial o comercial por sus ventajas técnico-económicas como de desarrollo sostenible.

La utilización de este recurso ha aumentado en los últimos años debido a sus grandes ventajas frente a otras fuentes de energía no renovables como el carbón o el petróleo, haciendo así crecer y desarrollar toda una industria alrededor del gas natural en sus distintas fases, desde la extracción hasta su entrega para el consumidor final.

Es por ello, que uno de los sectores que se ha visto afectado, de un modo positivo, ha sido el transporte marítimo. De este modo se ha visto un gran aumento en las carteras de trabajo de los astilleros especializados en buques para transporte de gas natural licuado (GNL), haciendo de estos buques una necesidad para todo aquel que precise del gas natural como una fuente principal.

2.2. Marco histórico del Gas Natural

El descubrimiento del gas natural data de la antigüedad en el Medio Oriente. Hace miles de años, se pudo comprobar que existían fugas de gas natural que prendían fuego cuando los sacerdotes arrimaban antorchas, dando lugar a las llamadas "fuentes ardientes". En Persia, Grecia o la India, se levantaron templos para prácticas religiosas alrededor de estas "llamas eternas". Sin embargo, estas civilizaciones no reconocieron inmediatamente la importancia de su descubrimiento. Fue en China, alrededor del año 900 antes de nuestra era, donde se comprendió la importancia de este producto. Los chinos perforaron el primer pozo de gas natural que se conoce en el año 211 antes de nuestra era, para usarlo como horno para fundición de metales [1].

En Europa no se conoció el gas natural hasta que fue descubierto en Gran Bretaña en 1659, aunque no se empezó a comercializar hasta 1790. Y en Norte América fue en 1821, cuando los habitantes de Fredonia (Estados Unidos) observaron burbujas de gas que remontaban hasta la superficie en un arroyo, y como percusor de estos pozos norteamericanos el norteamericano William Hart, considerado como el "padre del gas natural", excavó el primer pozo norteamericano de gas natural.

Durante el siglo XIX el gas natural fue casi exclusivamente utilizado como fuente de luz, en las vías de las grandes ciudades europeas y americanas. Su consumo permaneció muy localizado por la falta de infraestructuras de transporte que dificultaban el traslado de grandes cantidades de gas natural a grandes distancias. En 1890, se produjo un importante cambio con la invención de las juntas a prueba de fugas en los gasoductos. No obstante, las técnicas existentes no permitieron transportar el gas natural a más de 160 kilómetros de distancia por lo que el producto se quemaba o se dejaba en el mismo lugar. El transporte del gas natural a gran distancia se generalizó en el transcurso de los años veinte, gracias a las mejoras tecnológicas aportadas a los gasoductos, válvulas, materiales, compresores más potentes, etc. Después de la segunda guerra mundial, el uso del gas natural creció rápidamente como consecuencia del desarrollo de las redes de gasoductos y de los sistemas de almacenamiento.

En los primeros tiempos de la exploración del petróleo, el gas natural era frecuentemente considerado como un subproducto sin interés que impedía el trabajo de los obreros forzados a parar de trabajar para dejar escapar el gas natural descubierto en el momento de la perforación. Hoy en día, en particular a partir de las crisis petroleras de los años 70, el gas natural se ha convertido en una importante fuente de energía en el mundo.

Durante muchos años, la industria del gas natural estuvo fuertemente regulada debido a que era considerada un bien social, convirtiéndose en un monopolio de Estado. En el transcurso de los últimos 30 años, se ha producido un movimiento hacia una mayor liberalización de los mercados del gas natural y una fuerte desregulación de los precios de este producto. Esta tendencia tiene como consecuencia la apertura del mercado a una mayor competencia y la aparición de una industria de gas natural mucho más dinámica e innovadora.

2.3. Breve historia del Gas Natural en España

El gas natural comenzó a introducirse en España a finales de la década de los 60. La planta de regasificación de Barcelona empezó a recibir aprovisionamientos de gas natural licuado (GNL) procedente de Libia en febrero de 1969, cargamentos que, una vez descargados y regasificados, abastecían de gas natural a toda el área metropolitana de la ciudad. En 1974 comenzó a suministrarse GNL procedente de Argelia en la planta de Barcelona. La crisis económica de comienzos de los años 80 provocó el retraso del desarrollo de las infraestructuras gasistas y obligó a renegociar los contratos de largo plazo de suministro de GNL. En 1985 se firmó el "Protocolo del Gas", cuyo objetivo era impulsar el crecimiento del consumo de gas natural y del sector del gas natural en España en general [2].

Entre los años 1985 y 1993 los aprovisionamientos por GNL (a través de la planta de Barcelona y de dos nuevas plantas de regasificación construidas en Huelva y Cartagena) se complementaban con la limitada producción de gas natural de los yacimientos de Serrablo y Gaviota (hoy agotados y convertidos en instalaciones de almacenamiento subterráneo). En 1993 se puso en funcionamiento la primera conexión internacional del sistema gasista español en Larrau (sur de Francia, cerca de su frontera con Navarra), a través de la cual se importa gas procedente de Noruega.

Posteriormente, en 1996, entró en operación el gasoducto del Magreb (conectado con la península en Tarifa), por el que se importa gas producido en Argelia. Este gasoducto supuso un hito importante, al conectar España con los yacimientos de Argelia. Para su construcción, se hizo necesario el acuerdo con Marruecos (país de tránsito) y un compromiso del sector eléctrico para garantizar el consumo de determinados volúmenes de gas.

En marzo de 2011 se puso en funcionamiento el Gasoducto Medgaz, que conecta directamente la costa almeriense con los campos argelinos de Hassi R'mel. En la actualidad, los aprovisionamientos de gas natural, tanto a través de gasoductos (58% del total) como a través de plantas de regasificación de GNL (42% restante), provienen de orígenes muy diversificados geográficamente, como muestra la siguiente tabla aprovisionamiento de gas natural en España.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Producción Nacional	0,80	1,00	1,30	1,70	1,20	1,90	1,10	0,50	0,50	0,80	0,70
Importaciones	409,00	408,90	457,60	410,53	404,49	399,31	394,93	375,49	383,96	364,80	382,70
Argelia	131,10	152,40	160,50	127,56	122,05	147,33	160,30	192,03	211,94	218,80	227,20
GN	100,30	102,20	103,70	79,56	79,40	103,97	118,64	155,33	154,63	175,40	173,50
GNL	30,80	50,20	56,80	48,00	42,65	43,36	41,66	36,70	57,31	43,40	53,70
Francia	0,00	1,00	1,50	1,60	12,17	25,48	35,33	45,65	49,20	37,00	37,60
Países del Golfo (2)	68,30	53,10	61,40	73,26	67,46	53,46	46,18	43,44	36,87	34,10	28,00
Nigeria	82,50	96,90	86,70	55,19	87,87	74,18	59,93	37,11	31,65	43,30	53,70
Trinidad y Tobago	39,00	24,40	50,10	43,78	34,79	27,64	27,49	22,44	23,48	12,80	7,70
Perú	-	-	-	-	7,16	21,09	28,30	16,86	13,97	10,80	19,80
Noruega	24,60	25,30	32,30	38,13	20,68	13,92	19,56	13,37	14,06	8,00	8,70
GN	24,60	25,30	20,80	22,36	-	-	-	-	-	-	-
GNL	-	-	11,50	15,77	20,68	13,92	19,56	13,37	14,06	8,00	8,70
Bélgica	-	-	-	-	0,88	2,97	7,46	2,17	1,30	0,00	0,00
Portugal	0,00	0,00	0,00	1,35	0,00	4,49	3,23	1,96	0,20	0,00	0,00
Egipto	55,20	47,00	57,00	47,94	32,73	25,93	7,15	0,46	1,29	0,00	0,00
Libia	8,00	8,80	6,10	8,25	4,13	0,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Guinea Ecuatorial	-	-	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Yemen	-	-	-	1,05	2,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Italia</i>	0,00	0,00	0,00	12,42	10,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
EE.UU.	0,00	0,00	0,00	0,00	1,31	1,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Otros	0,30	0,00	1,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
TOTAL APROV.	409,80	409,90	458,90	412,23	405,69	401,21	396,03	375,99	384,46	365,60	383,40
EXPORTACIONES	0,00	1,20	2,20	11,54	12,57	19,22	31,28	42,40	66,80	56,90	0,00
Francia	0,00	1,20	1,90	8,57	6,89	2,70	0,25	4,90	0,40	5,60	-
Portugal	0,00	0,00	0,30	2,97	5,68	8,43	8,33	5,70	6,40	35,30	-
Otros (GNL)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,09	22,70	31,80	60,00	16,00	-
TOTAL SUM. NETOS	409,80	408,70	456,70	400,69	393,12	381,99	364,75	333,59	317,66	308,70	-
Total Aprov. (bcm)	35,33	35,34	39,56	35,34	34,97	34,59	34,14	32,41	32,40	-	-
GNL/TOTAL (%)	69,30	68,40	72,30	74,10	77,10	66,10	60,00	46,30	47,00	42,00	42,00

Tabla 1: Evolución del aprovisionamiento del GN en España

2.4. El compuesto químico, definición y características.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos ligeros compuesto principalmente de metano, etano, propano, butanos y pentanos (como se muestra en la siguiente tabla). Al ser una composición variable entre diferentes elementos, no existe una composición específica del gas natural, por lo que los porcentajes de los compuestos no siempre es la misma y dependerá de la calidad del gas natural; predominando siempre el metano. Es por ello, que no se muestran los porcentajes de etano y butano en la tabla, ya que son muy variables y normalmente despreciables frente al compuesto orgánico principal.

Proviene de la degradación de materia orgánica. En muchos casos va asociado a yacimientos de petróleo, aunque en otras ocasiones se descubre aislado.

El gas se origina como consecuencia de la descomposición durante miles de años de materia orgánica enterrada con otros sedimentos a altas presiones y altas temperaturas en el interior de yacimientos a grandes profundidades, de donde es extraído, por lo cual es considerado un combustible fósil [3].

Elemento	Formulación	%
Metano	CH ₄	70-90%
Etano	C ₂ H ₆	
Propano	C ₃ H ₈	0-20%
Butano	C ₄ H ₁₀	
Dióxido de Carbono	CO ₂	0-8%
Oxígeno	O ₂	0-0,2%
Nitrógeno	N ₂	0-5%
Sulfato de Hidrógeno	H ₂ S	0-5%
Otros gases	A, He, Ne, Xe	trazas

Figura 1. Características del gas natural

El gas natural no es ni corrosivo ni tóxico, su temperatura de combustión es elevada y posee un estrecho intervalo de inflamabilidad, lo que hace de él un combustible fósil seguro en comparación con otras fuentes de energía. Además, por su densidad relativa de 0,60 kg/l, inferior a la del aire (1,00), no se acumulan en zonas bajas en estancias evitando intoxicaciones.

Es generalmente admitido que el carbono y el hidrógeno contenidos en el gas natural provienen de restos de plantas y de animales que se juntaron en el fondo de los lagos y de los océanos durante millones de años. Después de haber sido cubierto por grandes capas de otros sedimentos, el material orgánico se transformó en petróleo bruto y en gas natural bajo el efecto de la presión ejercida por las capas de sedimentos y el calor emitido por el núcleo terrestre.

El petróleo y el gas son entonces expulsados fuera de los esquistos arcillosos marinos en los cuales se habían depositado y de ahí penetran en las rocas sedimentarias porosas. Posteriormente el petróleo y el gas suben a través de la roca porosa, ya que son menos densos que el agua, y llenan los poros. Existen diferentes tipos de "trampas" de petróleo y gas.

El gas natural está presente por todo el mundo, ya sea en los depósitos situados en las profundidades de la superficie terrestre, o en los océanos. Las napas de gas pueden formarse encima de los depósitos de petróleo bruto, o estar atrapadas en el seno de las rocas porosas.

A una presión atmosférica normal, si el gas natural se enfría a una temperatura de 161°C bajo cero aproximadamente, se condensa bajo la forma de un líquido llamado gas natural licuado (GNL). Un volumen de este líquido ocupa casi 600 veces menos espacio que el gas natural y es dos veces menos pesado que el agua (45% aproximadamente). Cuando se evapora se quema solamente en concentraciones del 10% al 15% mezclado con el aire. Ni el GNL ni su vapor pueden explotar al aire libre. La principal ventaja del gas natural licuado, es el volumen que ocupa, por ello el gas natural se licua para facilitar su transporte y almacenaje [4].



Figura 2. Planta de licuefacción

Las plantas de licuefacción se encuentran normalmente situadas en la costa, y pueden disponer de una o más unidades paralelas ("trenes" de GNL).

El gas natural es considerado como un combustible limpio, debido a su bajo porcentaje de emisiones de partículas. Bajo su forma comercializada, casi no contiene azufre y virtualmente no genera dióxidos de azufre (SO₂). Sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NO) son menores a las generadas por el petróleo y el carbón. Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son inferiores a la de otros combustibles fósiles (diversos estudios mantienen que este combustible emite 40 a 50% menos que el carbón y 25 a 30% menos que el petróleo).

2.5. El Gas Natural y el medio ambiente

El gas natural es el combustible fósil con menor impacto medioambiental de todos los utilizados, tanto en la etapa de extracción, elaboración y transporte, como en la fase de utilización [5].

Respecto a la fase de extracción, la única incidencia medioambiental está ligada a los pozos en los que el gas natural se encuentra ligado a yacimientos de petróleo que carecen de sistemas de reinyección. En esos casos el gas se considera como un subproducto y se quema en antorchas. Por otro lado, la transformación es mínima, limitándose a una fase de purificación y en algunos casos, eliminación de componentes pesados, sin emisión de efluentes ni producción de escorias.

Las consecuencias atmosféricas del uso del gas natural son menores que las de otros combustibles por las siguientes razones:

- La menor cantidad de residuos producidos en la combustión permite su uso como fuente de energía directa en los procesos productivos o en el sector terciario, evitando los procesos de transformación como los que tienen lugar en las plantas de refino del crudo.
- La misma pureza del combustible lo hace apropiado para su empleo con las tecnologías más eficientes: Generación de electricidad mediante ciclos combinados, la producción simultánea de calor y electricidad mediante sistemas de cogeneración, climatización mediante dispositivos de compresión y absorción.
- Se puede emplear como combustible para vehículos, tanto privados como públicos, mejorando la calidad medioambiental del aire de las grandes ciudades.
- Energía menos contaminante, ya que posee un índice menor de emisiones de gases contaminantes (SO₂, CO₂, NO_x y CH₄) por unidad de energía producida.

2.6. Ventajas de este recurso.

- Ventajas ambientales de seguridad
 - Baja presencia de contaminantes
 - Combustión más limpia
 - No-emisión de particulares (cenizas)
 - No exige tratamiento de los gases de combustión
 - Rápida dispersión de las pérdidas
 - Uso en vehículos automotores, disminuyendo la contaminación urbana

- Ventajas macroeconómicas
 - Diversificación de la matriz energética
 - Disponibilidad amplia, creciente y dispersa
 - Mejoría del rendimiento energético
 - Mayor competitividad de las industrias
 - Generación de energía eléctrica junto a los centros de Consumo

El gas natural es una energía abundante y respetuosa con el medio ambiente, que permite aplicaciones de alta eficiencia energética, que presenta claras ventajas en relación con otros combustibles fósiles y que está llamada a jugar un papel relevante y clave en las políticas energéticas. Su aportación puede ser decisiva para conseguir una mejora en las actuales condiciones ambientales y favorecer un Desarrollo Sostenible

2.7. Usos y aplicaciones.

El gas natural ofrece un amplio abanico de usos, siendo actualmente utilizado en muy diversos tipos de industrias, actividades comerciales e incluso particulares. Estas industrias y consumidores en general son, en efecto, clientes intermedios que hacen rentable el transporte del GNL en los buques. A continuación, se citan algunos de los usos y aplicaciones del gas natural en la actualidad, algunos obtenidos del sitio web de Ecopetrol [6].

- El gas natural se utiliza como combustible doméstico en hogares, distribuyéndose generalmente de manera subterránea. Es comúnmente utilizado en secadores, estufas, hornos, cocinas de gas, calentadores de agua y calefactores.
- En industrias siderúrgicas y metalúrgicas, el gas es utilizado para la fundición de metales. En industrias de cemento, cales y cerámica, es utilizado como combustible de los hornos y calderas utilizadas.
- Fabricación de vidrio: debido a las altas temperaturas necesarias para alcanzar su derretimiento.

- En plantas generadoras de energía eléctrica se utiliza como principal combustible de los generadores de electricidad.
- En la industria de textiles se aplica para la creación de acabados de ciertas telas.
- Fabricación de papel y de cartón, debido a los vapores generados por los quemadores que funcionan con gas natural para facilitar la manipulación y explotación de la pulpa cuando se reciclan estos productos.
- Como materia prima en industrias que utilizan el metano para crear otros subproductos como monóxido de carbono, metanol, hidrógeno, ácido acético y anhídrido acético, entre otros.
- Como combustible alternativo a los combustibles fósiles. Es el combustible urbano recomendado para coches, taxis, autobuses... al objeto de un mejor control de las emisiones en las zonas urbanas.
- También es la principal apuesta como combustible alternativo a los combustibles fósiles en los buques mercantes. El establecimiento de Áreas de Control de Emisiones, y la reducción del contenido de azufre en los combustibles marinos en el 2020 [6], ha hecho que el gas natural se convierta en el futuro combustible marino.

Hasta el momento, España ha estado importando gas desde países como Argelia (51%), Francia (12%) o Qatar (11%). Nigeria y Trinidad y Tobago también aparecen como proveedores. Debe destacarse que en 2016 Gas Natural Fenosa firmó un contrato con la empresa estadounidense Cheniere por un período de 20 años para el suministro de 4900 millones de metros cúbicos de gas al año, aunque finalmente la cantidad de suministro quedó por debajo de lo esperado. La ventaja del gas ruso, además de la estabilidad política que posee Rusia, es el precio. Mil metros cúbicos de gas natural ruso tienen un precio de 210 dólares, unos 30 dólares menos que el resto de competidores [7].

El ritmo de desarrollo de la industria mundial de GNL es cada vez mayor. Según Alexéi Belogóriev [8], uno de los directores del Instituto de Energía y Finanzas de Rusia, el gas natural licuado de Estados Unidos, que también trata de penetrar en el mercado europeo, no puede competir con el GNL ruso. El mayor problema para el GNL proveniente de Estados Unidos consiste en que entra en el mercado europeo en un momento en el que hay exceso de oferta y en el que los precios van a la baja, mientras que, a fin de mantenerse competitivas, las empresas estadounidenses necesitan que estos sean más altos.

En la actualidad, el escenario del gas natural, así como el del petróleo, se está viendo afectado por los conflictos político-económicos en los que se encuentran países del continente americano, Europa y Asia.

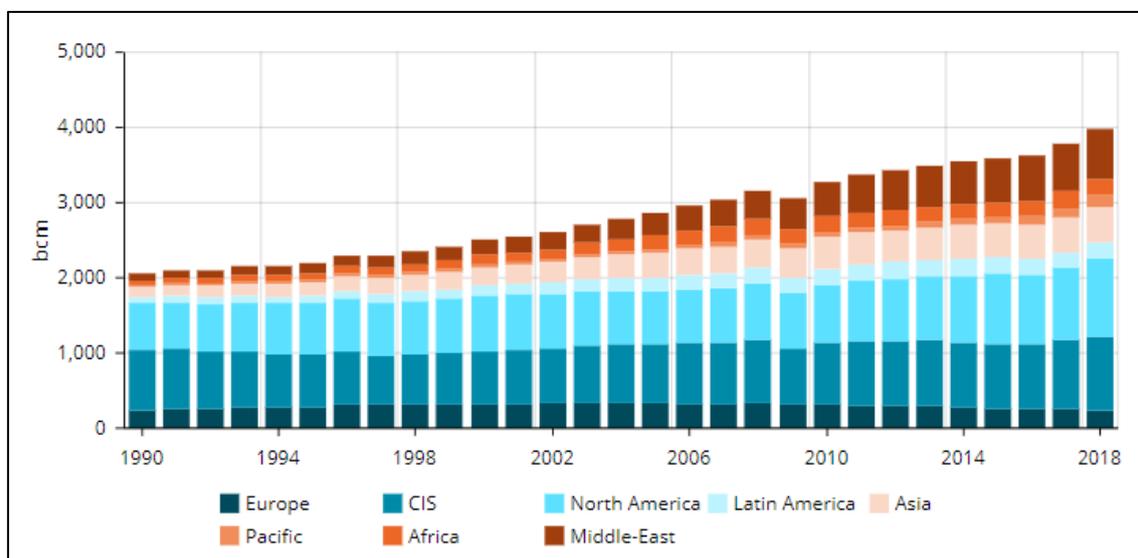


Figura 5. Evolución del consumo del gas natural por regiones del mundo.

Como se puede observar, los países desarrollados tienden a gasificarse, es decir, a dejar de depender del petróleo y pasar al consumo de Gas Natural.

2.8.2. Demanda actual

Como se observa en la siguiente tabla, entre 1985 y 2000 el consumo creció principalmente debido al incremento del uso de gas natural en procesos industriales, acompañado por un crecimiento gradual del consumo de gas natural en los hogares. Desde 2002 y hasta el 2008, el consumo de gas natural se aceleró, como consecuencia de la instalación de ciclos combinados de gas natural que utilizan gas natural como combustible para generar energía eléctrica.

	1985	1990	1995	2000	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2014	2015	2016
Doméstico	7.128	10.771	18.101	34.755	51.983	56.424	51.995	56.785	59.617	55.945	64.328	49.162	51.774	53.510
Industrial	15.480	44.166	69.381	144.994	196.230	202.428	199.167	203.391	197.256	180.264	194.089	195.327	196.503	202.844
Generación electricidad	6.890	2.254	879	10.379	66.093	111.170	134.664	142.057	187.534	160.888	135.625	51.772	61.238	59.643
Usos no energéticos	173	4.835	6.196	6.131	5.687	6.199	5.698	6.158	5.033	4.874	6.131	5.346	5.283	5.490
Total GN	26.870	61.438	94.225	195.756	319.493	375.653	391.023	407.837	448.868	401.523	400.125	301.561	314.767	321.444
TOTAL DEMANDA	29.671	62.026	94.557	196.258	319.992	376.221	391.524	408.391	449.441	401.971	400.174	301.607	314.798	321.487

Figura 6. Evolución del consumo de GN en España.

La crisis económica, provocó una reducción de la demanda eléctrica, y los cambios producidos en el mix de generación, que han visto cómo la generación con fuentes renovables se ha visto favorecida frente a la generación térmica, y especialmente la generación con ciclo combinado, han provocado una importante reducción del consumo de gas para generación eléctrica. En 2016, del consumo total de gas natural en España (321,5 TWh), sólo un 18% (59,5 TWh) se destinó a la generación de electricidad y un 82% (262 TWh) al consumo convencional.

2.9. Transporte del Gas Natural

El transporte eficiente y efectivo del gas natural desde las regiones productoras hasta las regiones de consumo necesita de un sistema de transporte extenso y elaborado. En la mayoría de los casos, el gas natural extraído de un pozo en particular deberá viajar una gran distancia para llegar al lugar de su uso. El transporte se realiza por mar o por tierra. El transporte por mar se realiza mediante el uso de los buques GNL, en los que el gas se transporta licuado a bajas temperaturas en forma de GNL. El transporte por tierra se realiza principalmente por gasoductos, aunque también se utiliza el tren y el camión. En este caso, para su transporte se utilizan más las altas presiones, por lo que el transporte se realiza en forma de CNG a diferencia del transporte marítimo que utiliza el formato GNL.

2.9.1. Transporte por vía terrestre - gaseoductos

El sistema clásico de transporte de gas entre dos puntos determinados es el gasoducto (tuberías de acero con carbono, de elevada elasticidad), bien enterrado en la superficie terrestre o bien en el fondo de los océanos. La capacidad de transporte de los gasoductos depende de la diferencia de presión entre sus extremos y de su diámetro (a medida que éste aumenta, lo hace la capacidad de transporte).

La forma de hacer circular el gas a través de los gasoductos no es otra que aumentar en determinados puntos de los mismos la presión del gas. Esta acción se realiza en las estaciones de compresión, que aseguran la correcta circulación de los caudales de gas, compensando las pérdidas de presión que se producen en el transporte. El control de los flujos de gas se realiza desde instalaciones donde se reciben las medidas de presiones, temperaturas, caudales y poderes caloríficos (centros de control).

Las infraestructuras existentes en el sistema gasista para el transporte de gas comprenden los gasoductos, estaciones de compresión, estaciones de regulación y medida, centros de control, etc. La siguiente figura muestra la red básica de gas natural en España a finales de 2016, donde se puede observar las instalaciones de transporte de gas.

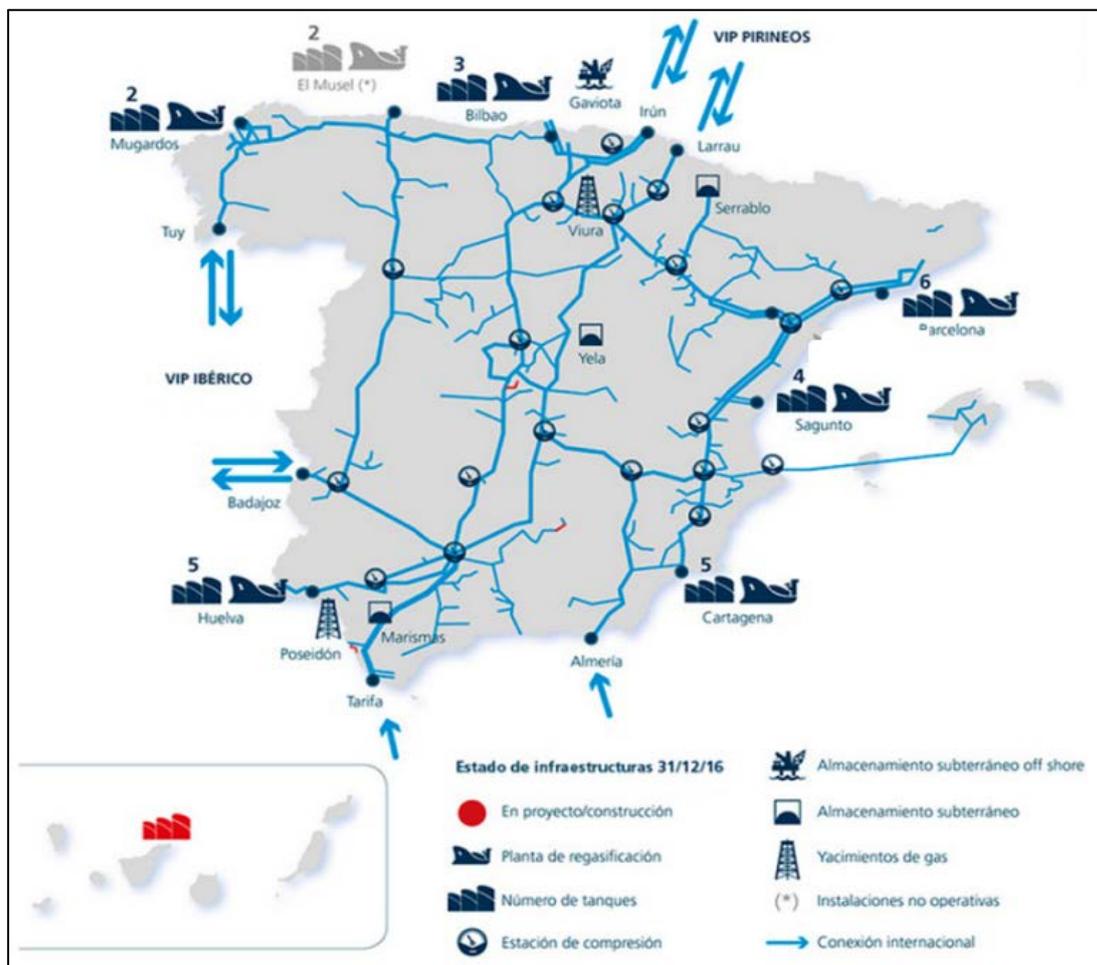


Figura 7. Esquema de gasoductos en España.

Red de transporte: La red de transporte de gas natural se divide en red de transporte primario (gasoductos con presiones de diseño superiores a 60 bar) y red de transporte secundario (gasoductos con presiones de diseño entre 16 y 60 bar). A finales del año 2016, la red de transporte primario estaba integrada por 11.369 km de gasoductos. El transporte del gas natural en la red se controla gracias a 18 estaciones de compresión situadas a lo largo de la geografía, dirigidas desde el Centro Principal de Control (CPC) del Gestor Técnico del Sistema (GTS). Mientras que Enagás es el transportista mayoritario de la red troncal de transporte primario de gas, la red de transporte secundario en España está integrada por gasoductos de Enagás y de otros transportistas, como Gas Natural Transporte, Reganosa, Endesa Gas Transportista, Redexis Gas, y otros menores.

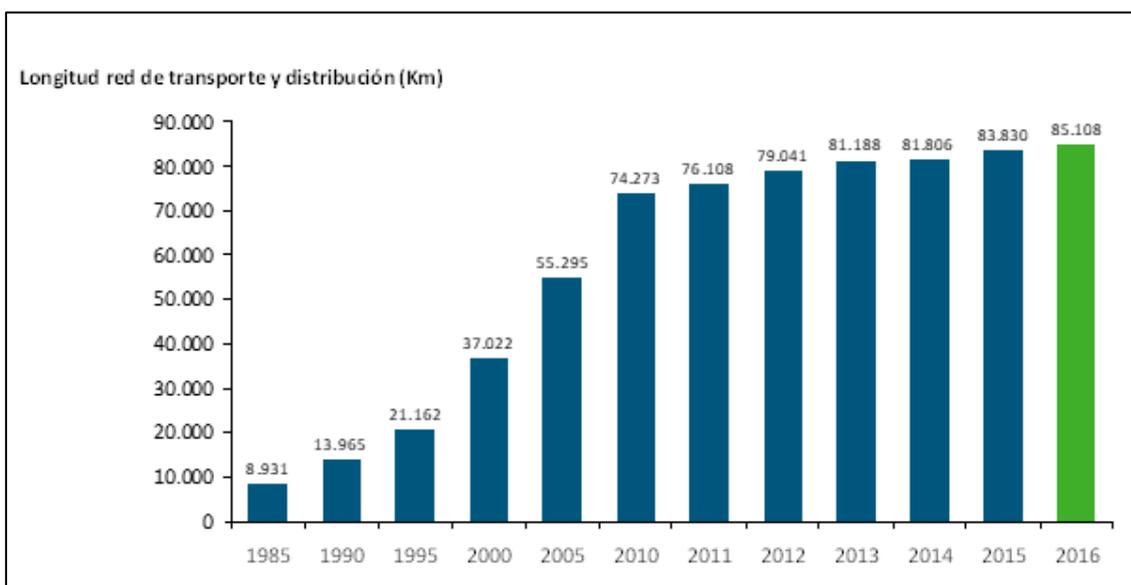


Figura 8. Evolución longitud de transporte de gaseoductos en España

2.9.2. Transporte por vía marítima

Con los buques GNL, el gas se transporta licuado, manteniendo la temperatura por debajo de su punto de vaporización. Esto es conveniente para el transporte internacional, ya que, en comparación con el gasoducto y el transporte terrestre en general, al ser transportado en estado líquido se aprovecha mejor el volumen ya que en estado líquido es más denso. Como se vio anteriormente, los principales productores de gas natural son países de Norteamérica, Medio Oriente y Rusia. Dado que estas zonas se encuentran alejadas de Corea, China, Japón y los países europeos, que son importadores claves del gas natural, es esencial que exista un envío marítimo de GNL y por lo tanto ciertas rutas marítimas tendrán un mayor flujo de GNL que otras.

En la siguiente imagen se pueden apreciar en color naranja los principales países importadores de gas natural. En azul, los principales exportadores. Los países con líneas de pendiente positiva comprenden aquellos que exportan e importan, y los de pendiente negativa aquellos que re-exportan. En verde se pueden apreciar las principales rutas del transporte del gas natural en flujo de millón de toneladas para el año 2016. Como puede observarse, hay un gran flujo de gas desde el Medio Oriente a países asiáticos como India, China, Japón y Corea.

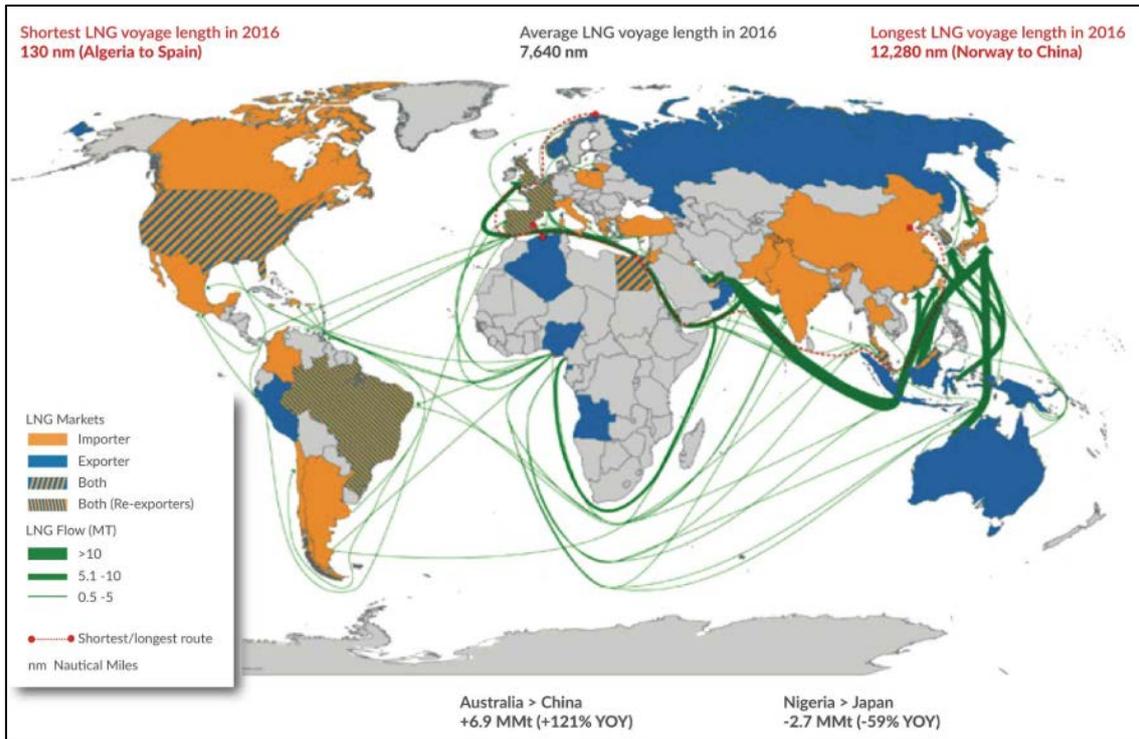


Figura 9. Principales rutas de buques LNG

- Desde Medio Oriente, este y norte de África y Trinidad y Tobago, hasta las costas orientales de América del Norte y las islas del Caribe.
- De Medio Oriente hasta Europa Occidental y Meridional por medio del Canal de Suez. Otra alternativa es por la ruta del Cabo de Buena Esperanza.
- Además, de África Oriental y Central, el norte de África y Medio Oriente a través del Océano Atlántico hacia Asia, Europa y Norteamérica.
- Desde Rusia se transporta hacia países asiáticos industrializados como Japón, China, Corea del Sur y hacia países europeos como Reino Unido. Esta ruta se realiza a veces por la zona ártica

2.10. Futuro del mercado

El bajo precio del gas natural y el reciente aumento del coste requerido para producir electricidad a partir del carbón, ha generado en los últimos años un cambio del carbón al gas natural como fuente de producción energética. La quema del gas natural en lugar del carbón podría ayudar a reducir la contaminación atmosférica, generando así beneficios para la salud pública y el medio ambiente. Además, debido a que los generadores de gas natural pueden aumentar o disminuir su ritmo de producción rápidamente, podrían soportar la integración de energía eólica y solar, creando un marco flexible para el sistema eléctrico y pudiéndose utilizar para satisfacer los picos de demanda.

A pesar de que el gas natural es concebido como clave para el futuro de la producción eléctrica mundial, el carbón mantendrá su estatus como el líder mundial en producción de electricidad hasta 2040. La razón de esto es que la mayoría de los países, y en especial los de rápido desarrollo, van a continuar aprovechando el coste más bajo disponible, y ese coste le pertenece al carbón.

Sin embargo, el WEO-2017 muestra que a pesar de que el carbón seguirá manteniendo el liderazgo como fuente de energía, su participación en la producción mundial de electricidad se reducirá del 40% actual al 30% para el año 2030. Esto se debe a la presión ejercida en muchos países al objeto de frenar la contaminación atmosférica. Es en este punto donde entra el gas natural en juego, ya que el WEO2017 anticipa un gran crecimiento en la producción de energía eléctrica, correspondiéndole al gas natural la mayor parte de dicho crecimiento.

El carbón se mantendrá en estas décadas como líder, pero perderá una participación sustancial en el mercado en beneficio del gas natural. Según el informe, habrá un incremento del 45% en la producción y uso del gas natural para el año 2040. Además, aunque el WEO-2017 tiene una ventaja limitada en la producción de electricidad debido al coste del carbón, el gas natural superará al carbón hacia el año 2040 en términos de todos los usos de energía combinados. Esto se debe a que el carbón es utilizado principalmente para la producción de electricidad, mientras que el gas natural posee una gama diferente de usos, como se mencionó en la sección Usos y Aplicaciones del Gas Natural (Capítulo 4, Apartado 4.1), incluyendo el uso del gas natural como combustible en buques, recalando que el 90% del comercio mundial se hace en algún punto de la cadena de producción o suministro por medio del transporte marítimo, lo que va a suponer, no solo el aumento de consumo de GNL ya mencionado, sino una considerable expansión de su red de distribución y puntos de almacenaje y suministro.

Sólo en 2016, el comercio mundial de GNL creció en 20 millones de toneladas, un 8%, y debido a las nuevas regulaciones internacionales y la viabilidad del GNL todo indica que seguirá habiendo demanda de buques en los próximos años.

2.11. Introducción a los buques de transporte de LNG

Los buques gaseros conforman un subgrupo de lo que se denomina Buques Tanque, es decir, “un buque de carga construido o adaptado para el transporte a granel de cargamentos líquidos de naturaleza inflamable” según el SOLAS (Safety of Life at Sea).

El SOLAS define al gasero bajo el siguiente enunciado: “es todo buque de carga construido o adaptado y utilizado para el transporte a granel de cualquiera de los gases licuados u otros productos enumerados en el capítulo 19 del Código Internacional de Gaseros” [9].

La estructura de los cascos se adapta a las exigencias de los depósitos que pueden ser esféricos, cilíndricos, formas combinadas de ambos, etc. y pueden estar dispuestos, de forma vertical u horizontal. Los depósitos pueden ser muchos y pequeños o ser grandes y en número reducido. Siendo estas consideraciones las que indican la variedad de las soluciones para la estructura del casco.

Sin embargo, el problema constructivo de estos barcos no es su casco, en general, sino los propios depósitos que exigen aceros especiales, técnicas de soldaduras difíciles, máxima calidad de los trabajos, tensiones internas atenuadas, etc.

El apoyo de los depósitos sobre el fondo o doble fondo obliga a estructuras no convencionales; el soporte y sujeción plantea problemas técnicos, pero actualmente todos ellos están resueltos.

La cámara de máquinas y la superestructura de estos buques suele estar a popa.

Las instalaciones para la carga y descarga de estos buques es complicada y las exigencias de seguridad son muy rigurosas. Las reglamentaciones exigen que estos buques posean una barrera secundaria para contener temporalmente cualquier pérdida proveniente del tanque o de la barrera primaria. Por ello, estos buques llevan siempre doble casco, con motivo de seguridad.

Para mantener las bajas temperaturas de los tanques deberán estar perfectamente aislados de la estructura, existiendo diversas soluciones como el sistema de membrana de Kockums o la esfera de Moos-Rosenberg.

Como el gas licuado en contacto próximo al acero está a muy bajas temperaturas, el acero utilizado debe tener un grado especial por requerimiento de las sociedades de clasificación, que en caso de impacto no se vea afectado por las temperaturas a las que está sometido. Por ello, el doble casco del buque está construido en acero, pero con una condición requerida especial en el grado del material, en función de la temperatura.

La temperatura de condensación de un gas depende de la presión de la presión, por eso la combinación entre la presurización y enfriamiento es fundamental para la contención de la carga.

2.11.1. Tipos de tanques para el almacenamiento y transporte.

Según el Código Internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel (Código CIG) de la OMI existen cinco tipos de tanques:

- Tanques independientes (“A”, “B” o “C”).
- Tanques de membrana.
- Tanques de semi-membrana.
- Tanques integrales o estructurales.
- Tanques de aislamiento interno.

Los tanques independientes poseen tres categorías: “A”, “B” y “C”. Los tanques de membrana son tanques independientes. Los tanques más utilizados en buques LNG son los tanques independientes de membrana y los tanques independientes de tipo B. Por dicho motivo, y a efectos del presente estudio, estos tipos de tanque en concreto serán los analizados. El resto de tanque anteriormente referidos, no obstante, igualmente son utilizados en otro tipo de buques gaseros, tales como los buques LPG.

Como su nombre indica, los tanques independientes no forman parte de la estructura del casco ni contribuyen a la resistencia del mismo. Se clasifican en tipo “A”, “B” y “C” y de membrana dependiendo de la presión de vapor de proyecto y la forma del tanque, además de la temperatura, aislamientos, espacios de bodega y barreras.

2.11.1.1 Tanques independientes Tipo “A”

Este tipo de buques se caracteriza por transportar cargas en condiciones totalmente refrigeradas a presión atmosférica. Sus capacidades varían desde los 15.000 a los 85.000 metros cúbicos.

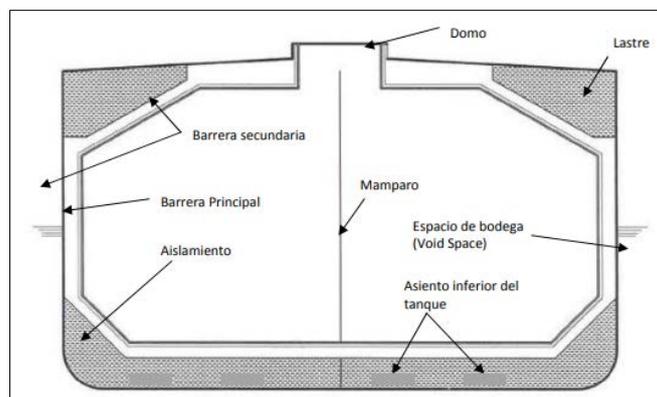


Figura 10. Tanque independiente Tipo A

Estos tanques están diseñados para transportar LPG, amoniaco y algunos productos químicos, como el butadieno, propileno y cloruro de vinilo.

En los tanques del tipo A los esfuerzos que se producen no pueden ser determinados con la misma precisión que los tanques de presión, por ello se requiere de un sistema secundario de contención en caso de que exista algún tipo de fuga que pueda dañar la estructura del casco. Este sistema se conoce como “barrera secundaria” y es típico de los tanques tipo A.

El espacio existente entre el tanque y la barrera secundaria se conoce como “Espacio de Bodega o Void Space”; cuando las cargas transportadas son inflamables, estos espacios deben ser llenados con gas inerte con el propósito de evitar la creación de una atmósfera inflamable en caso de fugas.

Con respecto al Domo (parte superior conectada con la cubierta), este debe quedar flotando libremente en la apertura hacia cubierta. Esto se debe a que el tanque en sí es auto soportable y se ve afectado a expansiones producidas por la carga.

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los problemas que presentan los buques gaseros es el efecto de superficie libre el cual perturba directamente a la estabilidad de la embarcación. Con el objeto de reducir este efecto los estanques se dividen en 2 partes iguales separados mediante un mamparo longitudinal central (tal como se muestra en la figura anterior). Este mamparo posee una válvula de comunicación ubicada en su parte inferior y es posible accionarla directamente desde la cubierta.

2.11.1.2 Tanques independientes Tipo “B”



Figura 11. Buque con tanques esféricos tipo Moss Rosenberg

Este tipo de tanque está constituido por superficies planas, siendo la forma del tanque generalmente esférica; aunque también existen tanques tipo "B" de forma prismática, si bien estos son menos comunes. Los de forma esférica son llamados tanques Moss Rosenberg debido al nombre de la compañía noruega que los diseñó (Moss Maritime). La presión de vapor de proyecto en este tipo de tanque habrá de ser inferior a 0,7 bares. El sistema utilizado para el estudio de tensiones en los mismos es muy avanzado y exacto en comparación con los otros tipos de tanques independientes. Estos tanques son proyectados contando con el apoyo y ayuda de modelos de prueba para determinar los niveles de esfuerzos, resistencia a la fatiga y propagación de grietas, ya que habrán de transportar GNL completamente refrigerado a temperaturas muy bajas (-163 °C).

En la siguiente imagen que se muestra a continuación, se puede observar el esquema de un tanque esférico tipo "B" obtenido de ICS Tanker Safety Guide (liquefied gas).

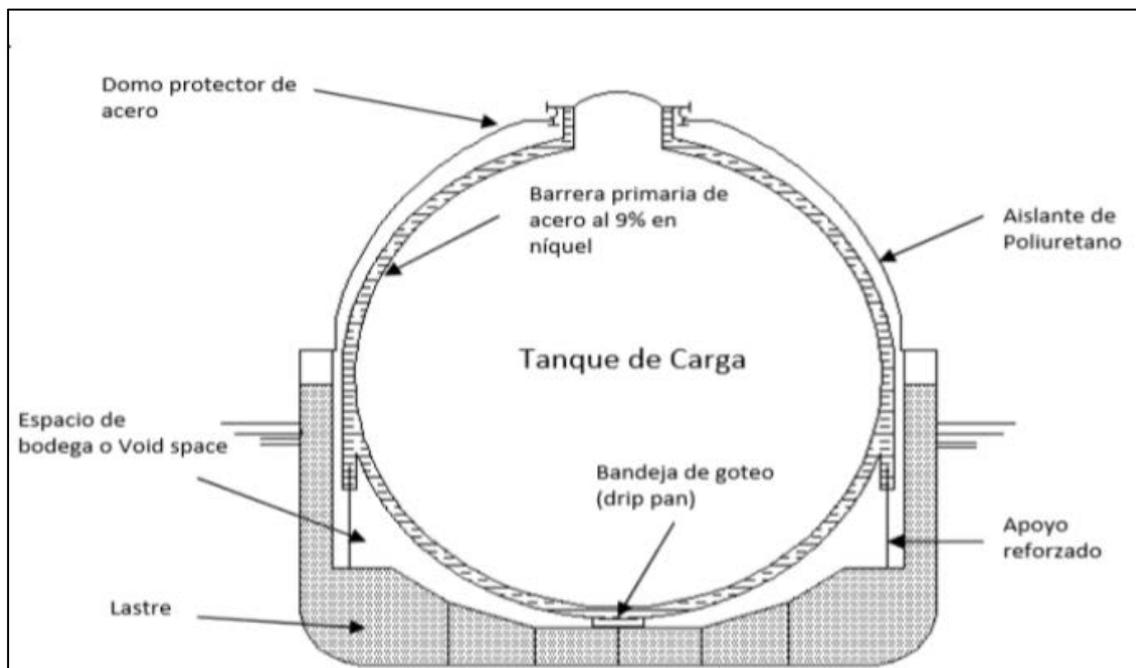


Figura 12. Esquema de un tanque esférico tipo "B".

Este tipo de tanque consiste en una esfera de gran tamaño que no forma parte de la estructura del casco, por lo que es auto-soportable. Se construye con aleaciones de aluminio o acero-níquel al 9% aislado por dos capas, una de espuma de resina fenólica y otra de espuma de poliuretano, reforzadas ambas además por malla de alambre y cubierta con planchas de aluminio.

El espacio de bodega o "voidspace" en este tipo de barcos se suele llenar con gas inerte seco, aunque podría darse el caso de que se utilice también aire seco siempre y cuando el sistema sea capaz de inertizar el espacio antes de que se forme una atmósfera inflamable, y en el caso del metano antes de alcanzar el 5% en volumen. El espacio de bodega es el espacio que existe entre el casco del buque y el tanque.

En la parte superior del tanque se encuentra el domo protector de acero, el cual cubre la barrera principal por encima del nivel de la cubierta, por lo que puede ser visualizado fácilmente. El objetivo de los domos es proteger la barrera principal del tanque, para cuyos efectos posee un aislante en su parte exterior. Este tipo de tanque es muy utilizado en buques GNL ya que usa una barrera secundaria parcial en lugar de una barrera secundaria completa, lo que comporta una reducción del coste global.

Aunque la gran mayoría de los tanques tipo B son esféricos, existen algunos con forma prismática. Esta forma de los tanques posee la ventaja de aprovechar mejor el espacio del casco del buque tanque, ya que posee una mejor eficiencia volumétrica además de mantener el tanque por debajo de la cubierta.

2.11.1.3 Tanques de tipo C

Este tipo de estanques está diseñado para el transporte de cargas “semi-presurizadas” y a veces totalmente refrigeradas; cuando la carga sea totalmente refrigerada los estanques deben ser construidos con aceros adecuados para soportar las bajas temperaturas de la carga.

Para la mayor parte de la gran variedad de barcos de este tipo el término más apropiado es “semi-presurizado/full refrigerado”, debido a que gran parte de las embarcaciones que cuentan con este tipo de estanques poseen plantas de refrigeración capaces de mantener las cargas totalmente refrigeradas, sin embargo, sus estanques han sido diseñados para contener las cargas bajo efectos de presión.

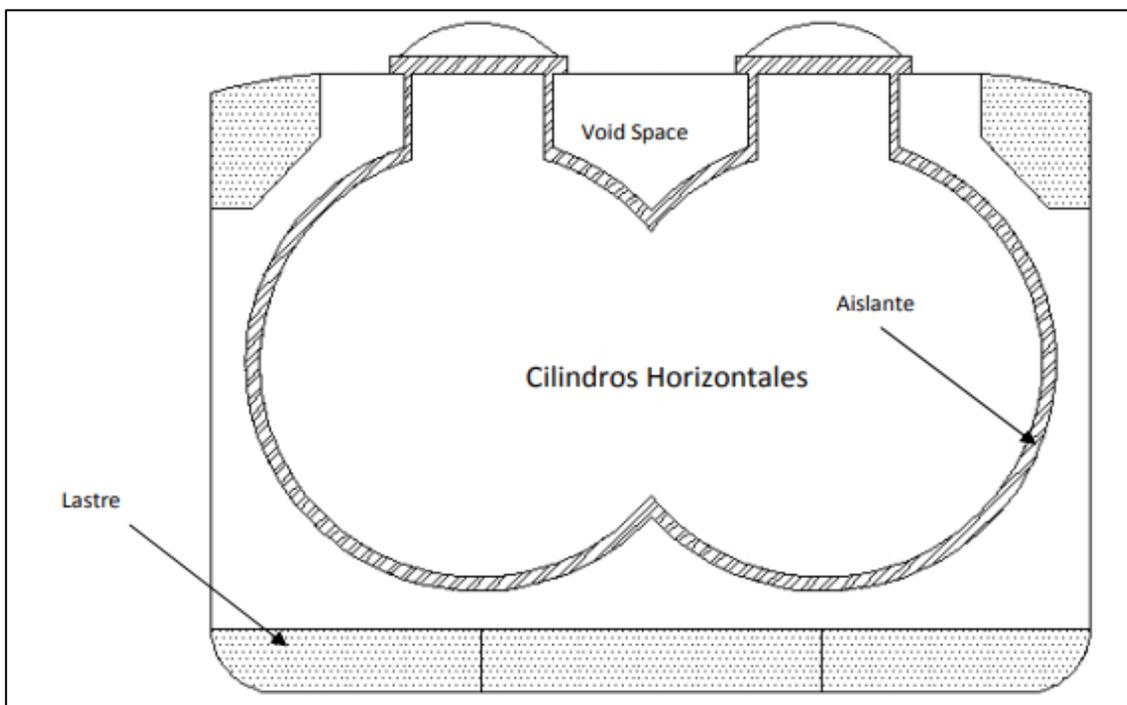


Figura 13. Esquema de tanque Tipo C

Específicamente, el estanque de la figura anterior, es diseñado para soportar temperaturas entre los -10°C hasta -33°C . Los buques “semi-presurizados” (que utilizan generalmente este diseño de tanques) de última generación están siendo diseñados para soportar cargas hasta los -48°C permitiendo el transporte de LPG, amoniaco y gases químicos como el butadieno, cloruro de vinilo y propileno.

Generalmente los barcos que poseen este sistema de contención son relativamente más grandes que aquellos que utilizan sistemas totalmente presurizados, y sus capacidades varían desde 15.000 m^3 hasta 30.000 m^3 .

Habitualmente el número de tanques en estas naves fluctúa entre 2 para los más pequeños hasta 6 tanques para las naves de mayor envergadura, además no requieren de barreras secundarias para fugas de carga y los espacios de bodega o void space son normalmente ventilados con aire seco.

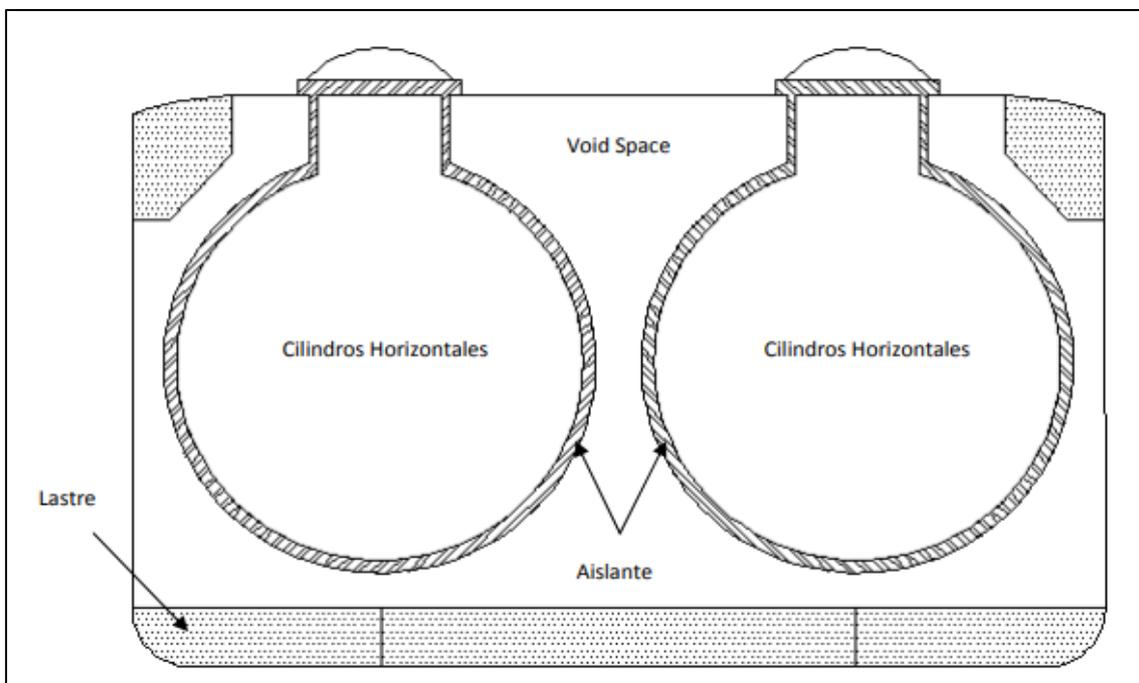


Figura 14. Esquema de Tanque Tipo C, con dos cilindros.

La figura anterior representa un tanque típico de un buque “totalmente presurizado”. Este tipo de naves son diseñadas para soportar cargas por sobre los 17 bar de presión y sus capacidades se encuentran por sobre los 3.000 m^3 .

Estos estanques se caracterizan por ser cilíndricos o esféricos y no requieren de una barrera secundaria de contención de fugas. El doble fondo en este caso se utiliza preferentemente para lastre o contención de fuel oíl. El “voidspace” o Espacios de bodega no requieren inertizado. En síntesis, los tanques independientes tipo C, son diseñados para transportar “cargas semipresurizadas/refrigeradas y totalmente presurizadas”.

2.11.1.4 Tanques de tipo membrana



Figura 15. Buque LNG de tipo membrana

El concepto de sistema de contención de membrana se basa en la disposición de una fina barrera primaria (0.7 – 1.5 mm) como elemento de contención principal, esta primera barrera está recubierta de aislante y se soporta por el propio casco del buque.

El sistema de membrana debe estar siempre apoyada de una barrera secundaria que asegure la integridad total del sistema, la barrera primaria está diseñada para compensar las dilataciones y contracciones térmicas y tensiones para evitar esfuerzos excesivos. En general los tanques de membranas no están diseñados para soportar una presión de vapor superior a los 0.25 bar, pero si se modifican los escantillones del casco añadiendo un mayor número podría aumentarse la resistencia hasta una presión siempre por debajo de 0.7 bar. Estos sistemas se emplean para el transporte de LNG por el buen resultado de las membranas ante temperaturas criogénicas (-163° C).



Figura 16. Imagen tanque de membrana LNG

El grosor de las capas de aislante es modificable según el diseño del buque, el volumen de carga y el tiempo de un viaje concreto para determinar la cantidad de boil-off producidos. Actualmente los buques LNG siguen tienden a aumentar su tamaño y a tomar rutas más largas, esto hace optar a los constructores a la instalación a bordo de una planta de relicuefacción a bordo.

Hoy en día los gaseros están prefiriendo utilizar buques con tanques de membrana debido a su forma prismática que permite un mejor aprovechamiento del espacio y, al no ser tecnológicamente tan avanzados, más baratos.

Existen dos tipos principales de sistemas de contención por membrana, ambos sistemas reciben el nombre de la compañía que las ha diseñado:

- Sistema Gaz Transport
- Sistema Technigaz

Actualmente, fruto de la fusión del desarrollo de estas membranas, ambas empresas han combinado sus sistemas de membranas para desarrollar un tercer tipo que combina las prestaciones de ambas membranas, dando lugar así a la empresa GTT, Gaz Transport and Technigaz, por lo que se puede decir que todo el mercado en sistemas de contención para GNL en este tipo de buques pasa por esta compañía.

A continuación, se van a mostrar los dos grandes sistemas de que dispone GTT como fruto de la unión de estas compañías, y en las que se ha aunado lo mejor de cada una de ellas:

➤ Sistema de membrana NO 96:

El sistema posee dos membranas prácticamente idénticas: la barrera primaria y la barrera secundaria, ambas construidas con una capa de 0,7mm de acero invar. Este acero es una aleación al 64% de hierro, 36% de níquel, 0,2% de carbono y una pequeña cantidad de cromo que posee un factor de contracción y coeficiente de expansión térmica prácticamente nulo, útil por consiguiente para las bajas temperaturas del GNL. Entre cada barrera, existe un espacio de aislamiento por donde circula nitrógeno (Gas Inerte). El aislamiento primario tiene un grosor de 230 mm y el aislamiento secundario uno de 300 mm.

En la siguiente imagen, a continuación, obtenida de *Liquefied Gas Carrier* [10] se presenta el esquema de un tanque de membrana Gaztransport. En el mismo se pueden apreciar las dos barreras formadas por acero invar y entre ellas, el primer espacio de aislamiento de 230 mm en color azul claro, así como el segundo de 300 mm en azul oscuro.

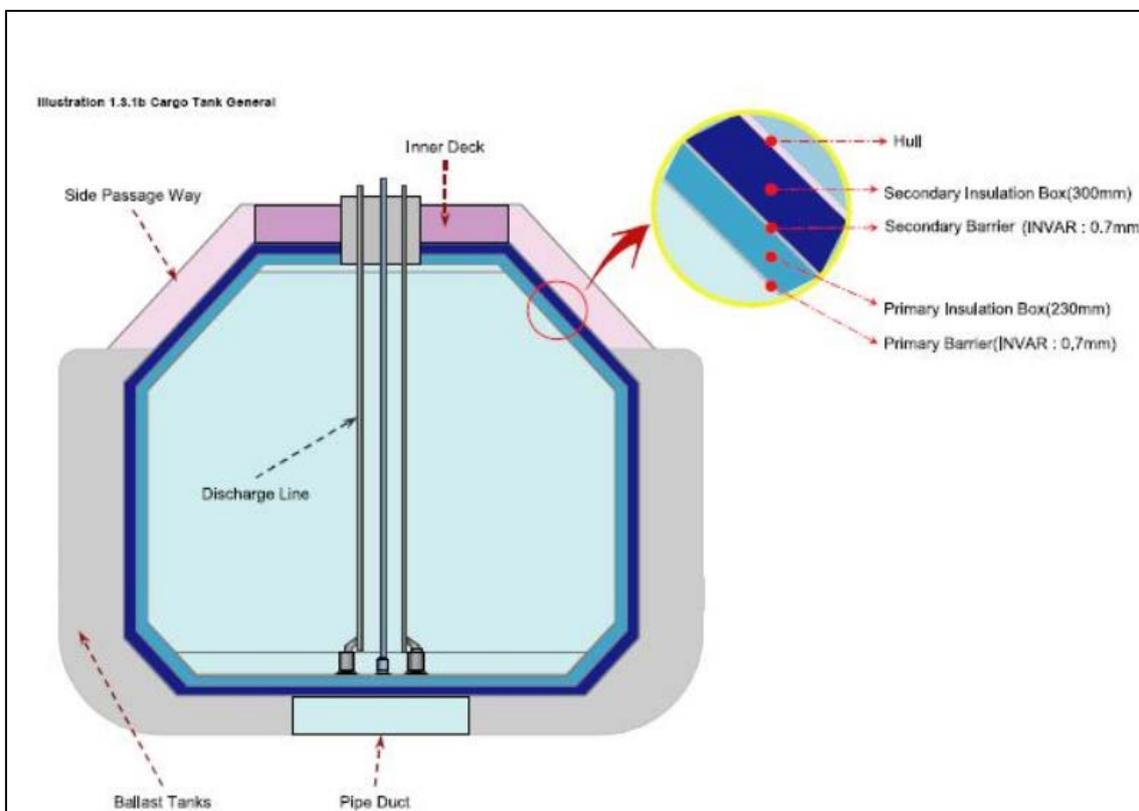


Figura 17. Esquema de membrana No 96

La función de los espacios de aislamiento es soportar, retener y transmitir el GNL en caso de fuga de las barreras correspondientes, mientras minimiza el intercambio de calor entre el GNL y el casco interior, ayudando de esta manera a que se genere menos *boil-off*. La barrera secundaria reduce las corrientes convectivas entre los dos aislamientos. En caso de fuga en la barrera primaria, la carga podrá ser contenida por la barrera secundaria durante 15 días, según el Código CIG.

Los espacios de aislamiento poseen una atmósfera de nitrógeno como gas inerte para evitar la formación de una atmósfera explosiva en caso de fugas en las barreras así como para evitar la humedad y la corrosión. El espacio de aislamiento primario posee una presión controlada. La presión del espacio de aislamiento primaria debe ser mayor que la presión del tanque de carga para, de esta manera, contener una posible fuga por diferencia de presiones. En caso de que existan fugas en ambas barreras, y a fin de evitar la contaminación del espacio de aislamiento secundario y por la misma razón, se debe mantener la presión del espacio de aislamiento secundario mayor que la presión del espacio de aislamiento primario.

Según un artículo del LNG/c Ibérica Knutsen obtenido de la página de Tecnología Marítima [11], este aislamiento está formado por dos capas de cajas de madera tipo *plywood* llenas de perlita fijadas al casco utilizando adaptadores y anclajes mecánicos soldados, ya que esta es una buena forma de hacer firme la madera al acero. La membrana de invar se dispone en forma de tracas de 0,7 mm de espesor y 530 mm de ancho, poseyendo los bordes doblados. Se colocan adyacentes entre ellas, y van soldadas igualmente entre ellas por resistencia.

La perlita es un material que se obtiene de una roca vítrea de origen volcánico. Cuando se calienta a temperaturas elevadas (727 °C), se transforma en bolas de tamaño muy reducido (su diámetro oscila entre centésimas a décimas de milímetro). La estructura final obtenida hace que posea muy buenas propiedades de aislamiento. Posteriormente es tratada y procesada con silicona para hacerla impermeable al agua y a la humedad.

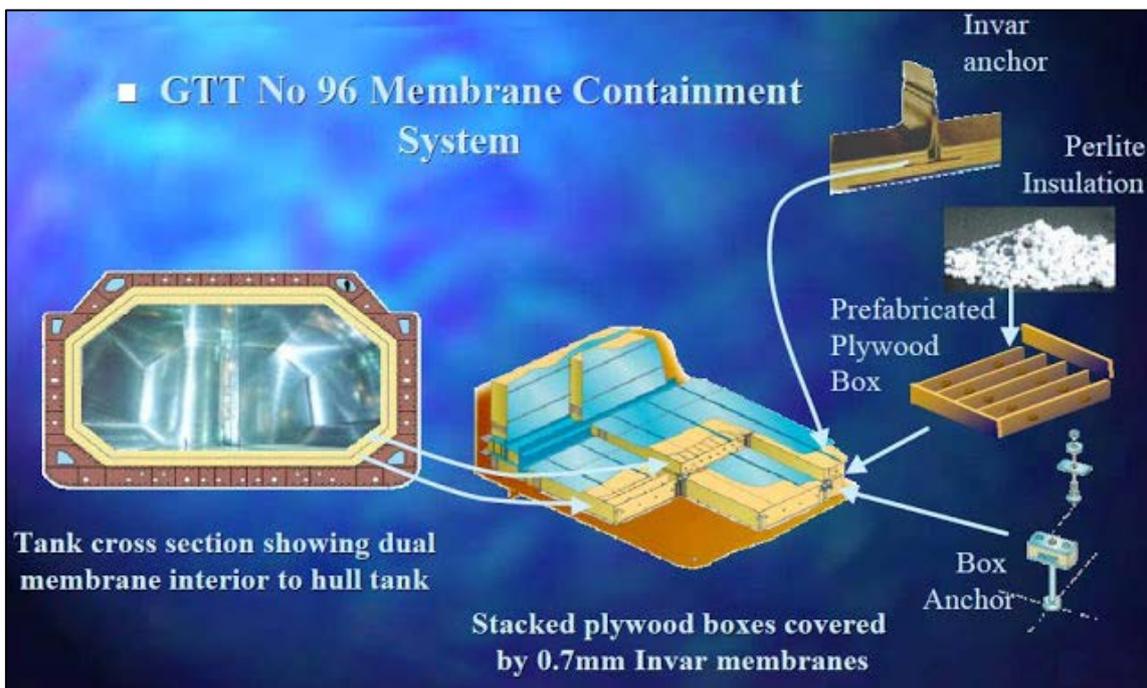


Figura 18. Sistema de aislamiento de membrana No 96

➤ Sistema de membrana Mark III:

Este sistema fue desarrollado en principio por Technigaz bajo el modelo Mark III, pero después de fusionarse fue mejorado al modelo GTT Mk III. Aquí, la barrera primaria es de acero inoxidable y posee una superficie corrugada en forma de rejillas que permite tanto la expansión como la contracción. Posee un espesor de 1,2 mm y está fijada y soportada directamente por el sistema de aislamiento. El tamaño de las hojas corrugadas es de 3 x 1 metros. La membrana se pliega para crear ondulaciones y el *nudo* que las une es la intersección entre dichas corrugaciones.

Su sistema de aislamiento (ver imagen a continuación) es soportado por espuma aislante, estando formado por paneles de madera de balsa laminada que a su vez se encuentran en dos capas de triplex (una hoja de aluminio entre dos capas de fibra de vidrio). El triplex a su vez se coloca dentro de los paneles de aislamiento prefabricados entre dos capas de aislamiento. La primera capa forma la barrera secundaria del tanque. Los paneles de madera laminada se encuentran interconectados mediante juntas diseñadas para este fin que a su vez están soportadas sobre el casco interno del buque. En la segunda capa, el aislante de madera es reemplazado por espuma celular y una tela de fibra de vidrio laminada con aluminio.

En la siguiente imagen puede observarse las tracas de acero inoxidable de 1,2 mm que forman la barrera primaria con corrugaciones elevadas para permitir la contracción y expansión térmica. Después, inicia el aislamiento con una lámina de *plywood* seguida de la primera capa de aislamiento, y la lámina de triplex formando la barrera secundaria. A continuación, en la segunda capa, se aprecia la espuma de aislamiento y la otra lámina de *plywood*. Finalmente se une a la parte interior del casco. Las imágenes fueron tomadas del sitio web de GTT y de *ICS Tanker Safety Guide (liquefied gas)*, apéndice 2 y del Capítulo III de *Clasificación de los buques Gaseeros de la Universidad Austral de Chile* [12].

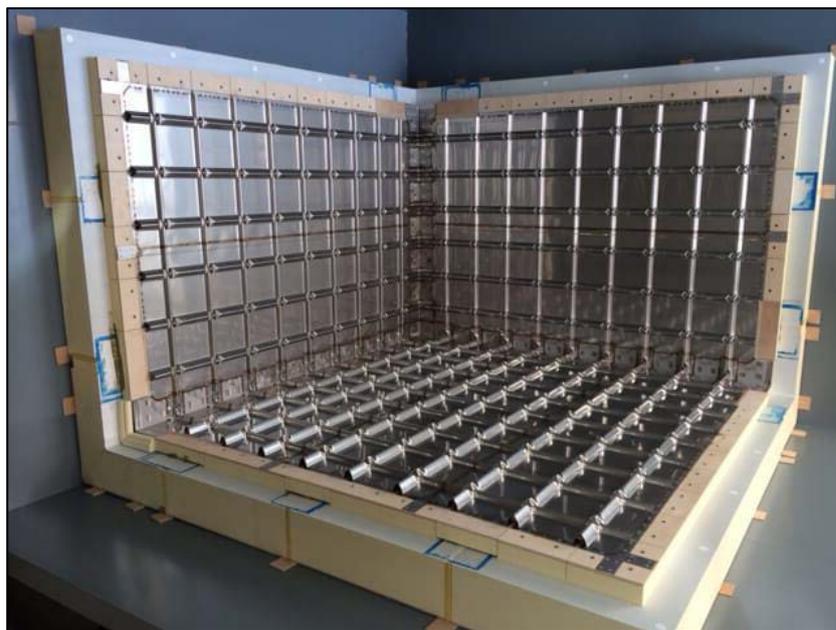


Figura 19. Estructura de membrana Mark III

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



CAPÍTULO 3:
DEFINICIÓN DEL BUQUE

3.1. Objetivos.

A lo largo de este capítulo se desarrollará la definición del buque objeto de estudio, y al cual se referirán los cálculos posteriores de este proyecto.

Debido a que no se dispone de las características principales del buque a estudiar, una primera parte de este capítulo estará dedicada exclusivamente al cálculo de las mismas, a partir de una base de datos de buques de características similares.

Una vez se hayan calculado las dimensiones principales y coeficientes de formas del buque, se obtendrá con la ayuda de Maxurf, las formas de un casco que se asemeje al de nuestro buque de proyecto con el fin de obtener la resistencia al avance.

En los próximos capítulos, y una vez se haya definido el buque de proyecto, el siguiente paso será hacer el estudio propulsivo para definir el sistema de propulsión que llevará nuestro buque.

Para poder aportar los cálculos a este capítulo, se ha tenido en cuenta la información aportada por los libros incluidos en el capítulo de Bibliografía.

3.2. Dimensiones principales y coeficientes

En función de una base de datos de buques LNG con un volumen de carga similar al requerido por las especificaciones (174.000m^3), mediante el uso de regresiones, se van a establecer las principales características del buque objeto de proyecto, tanto las dimensiones principales como los coeficientes de formas del buque.

La siguiente base de datos que recoge las diferentes características sobre el dimensionamiento de buques LNG se ha recopilado de la "*The Royal Institution of Naval Architects - Significant Ships*" tal y como se referencia en la bibliografía.

Esta base de datos estará compuesta por un total de 21 buques.

Como hipótesis para la realización de los próximos cálculos se tomará como una muestra de datos significativa de la población de buques LNG, por lo que servirá como base para realizar las regresiones necesarias para la estimación de las dimensiones principales y coeficientes de nuestro buque de proyecto.

Cabe destacar que, se quiere dejar constancia de que lo ideal sería disponer de una muestra mucho mayor capaz de reflejar un mayor número de individuos para definir mejor así la población de buques LNG, pero por dificultad para la recopilación de estos datos, se trabajará únicamente con la base de datos disponible.

Los buques que se han tenido en cuenta en el estudio estadístico, junto a sus características principales se encuentran en la siguiente tabla:

NOMBRE	FECHA DE ENTREGA	VOLUMEN DE CARGA (m3)	DIMENSIONES				CALADO		VOLUMEN DE CARGA (m3)	Δ (tonnes)	GT	TPM		Peso en Rosca	Cb (δ)
			Loa	Lpp	B	H (to main deck)	DISEÑO	ESCANTILLONADO				DISEÑO	ESCANTILLONADO		
ASIA VISION	28/09/2014	160000	285,00	274,00	43,40	26,40	11,50	12,75	160000		101427	75400	82200		
CORCOVADO	03/04/2014	160100	294,20	283,20	44,00	26,00	11,50	12,50	160100	122740	103900	78600	89600	33140	
GOLAR ESKIMO	17/12/2013	160660	288,50	281,00	43,40	26,60	11,73	12,75	160660		103446	75191	80040		
VELIKIY NOVGOROD	29/06/2014	170200	299,90	288,00	45,80	26,00	11,50	12,50	170200	129096	113876	81811	93485	35611	0,7600
WOODSIDE ROGERS	01/07/2013	159760	294,20	283,20	44,00	26,00	11,50	12,50	159760		103670	78000	89000		
SOYO	29/07/2011	160518	285,36	278,00	43,40	26,40	11,75	12,75	160518	112871	100723	78697	82857	30014	0,7595
ABDELKADER	27/02/2010	177400	298,00	285,00	46,00	26,80	11,90	13,00	177400		114200	87100	99700		
BARCELONA KNUITSEN	10/02/2010	173650	290,00	283,00	45,80	26,50	11,65	12,90	173650	131570	110920	86920	97930	33640	0,7780
CASTILLO DE SANTISTEBAN	10/08/2010	173887	299,90	288,00	45,80	26,00	11,60	12,50	173887	128837	111665	83515	93796	35041	0,7614
GDF SUEZ POINT FORTIN	16/02/2010	154913	289,93	276,00	44,70	26,00	11,73	12,60	154913		101129	72354	85547		
METHANE JULIA LOUISE	19/04/2010	170723	291,06	283,00	45,00	26,00	11,50	12,50	170723	128944	109004	81621	86125	42819	0,7721
EXPRESS	11/05/2009	151000	291,00	280,00	43,40	26,00	11,60	12,40	151000	117150	100300	74700	83200	33950	0,6500
GDF SUEZ NEPTUNE	30/09/2009	145130	283,61	270,00	43,40	26,00	11,40	12,40	145130		96153	70860	80980		0,7465
SERI BALHAF	01/06/2009	157720	294,60	281,60	46,50	25,80	11,25	12,40	157720		107633		91201		0,6500
DAPENG SUN	03/04/2008	147237	292,00	274,10	43,35	26,25	11,45	12,33	147237		97871	83050			
STX KOLT	27/12/2008	153000	288,60	276,00	44,00	26,20	11,50	12,50	153000	116450	100189	77200	86600	29850	0,7540
TRINITY ARROW	31/03/2008	154982	289,00	276,00	44,70	26,00	11,37	12,60	154982		101080	72318	85511		0,6300
AL GATTARA	06/11/2007	216250	315,00	303,00	50,00	27,00	12,00	13,00	216250		136410	100200	106900		
AL RUWAIS	31/10/2007	210000	315,00	303,00	50,00	27,00	12,00	13,30	210000		137535	100200	121800		0,6500
BRITISH EMERALD	05/07/2007	155000	287,60	275,00	44,20	26,00	11,47	12,20	155000		102000	76600	84300		0,6700
TEMBEK	20/10/2007	216200	315,00	303,00	50,00	27,00	12,00	12,80	216200			100800	107000		0,7100

Tabla 2. Base de datos de buques LNG para el dimensionamiento principal.

3.3. Dimensiones principales

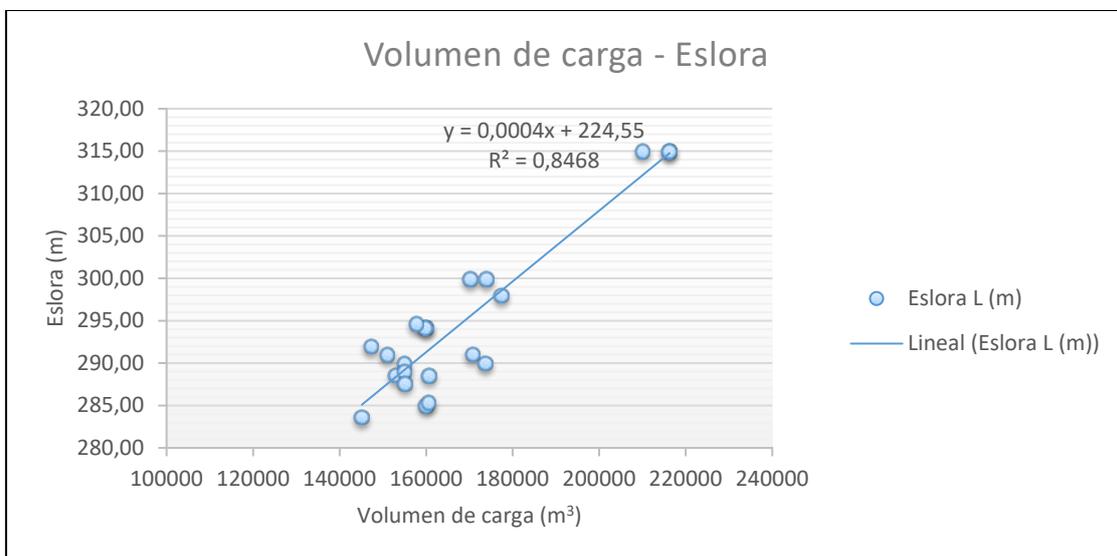
A continuación, se pasará a hacer la estimación de las principales características del buque mediante el uso de regresiones utilizando los datos de la tabla X, y como dato de partida el volumen de carga seleccionado de 174.000m³.

Como la base de datos de la que se han obtenido las características principales de los buques para las regresiones proviene de datos reales, es posible que en ocasiones el coeficiente de determinación ajustado de la regresión sea muy inferior a 0.9; pero no por ello es despreciable la aproximación. Al tratarse de una base de datos real, es muy normal que dependiendo de las especificaciones o requerimientos del cliente o del armador para el diseño de alguno de esos buques construidos, diste de la tendencia de fabricación de otros barcos por diferentes causas.

Por ello, se analizará en cada caso la tendencia de la regresión obtenida y se estudiará para la obtención de las características principales de nuestro buque de proyecto.

3.3.1. Eslora total

Para determinar la eslora se ha hecho una regresión relacionando el volumen de carga con la eslora, obteniéndose así la siguiente gráfica:



Gráfica 1. Volumen de carga Vs Eslora

La regresión lineal obtenida es:

$$y = 0,0004x + 224,55$$

Despejando con el volumen de carga de 174.000m³ se obtiene que:

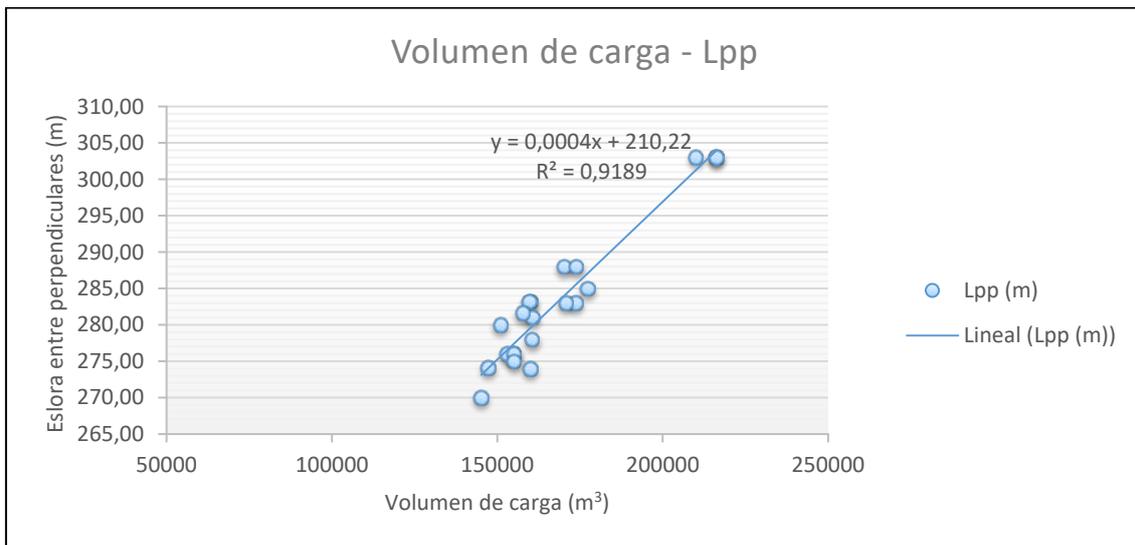
$$y = 0,0004 \times Vol_{carga} + 224,55 = 0,0004 \times 174.000 + 224,55 = 294,15m$$

Por tanto, vamos a elegir una eslora de 294,15m para el buque de proyecto, valor que se encuentra dentro del rango antes mencionado. Se utilizará este dato como valor limitante para obtener el resto de características principales del buque.

3.3.2. Eslora entre perpendiculares

La eslora entre perpendiculares es una dimensión principal del buque, y es utilizada en numerosos cálculos para la obtención de coeficientes y expresiones y que dependen de esta medida.

Se realiza una relación entre el volumen de carga y la eslora entre perpendiculares, obteniéndose:



Gráfica 2. Volumen de carga Vs Lpp

La regresión lineal obtenida es:

$$y = 0,0004x + 210,37$$

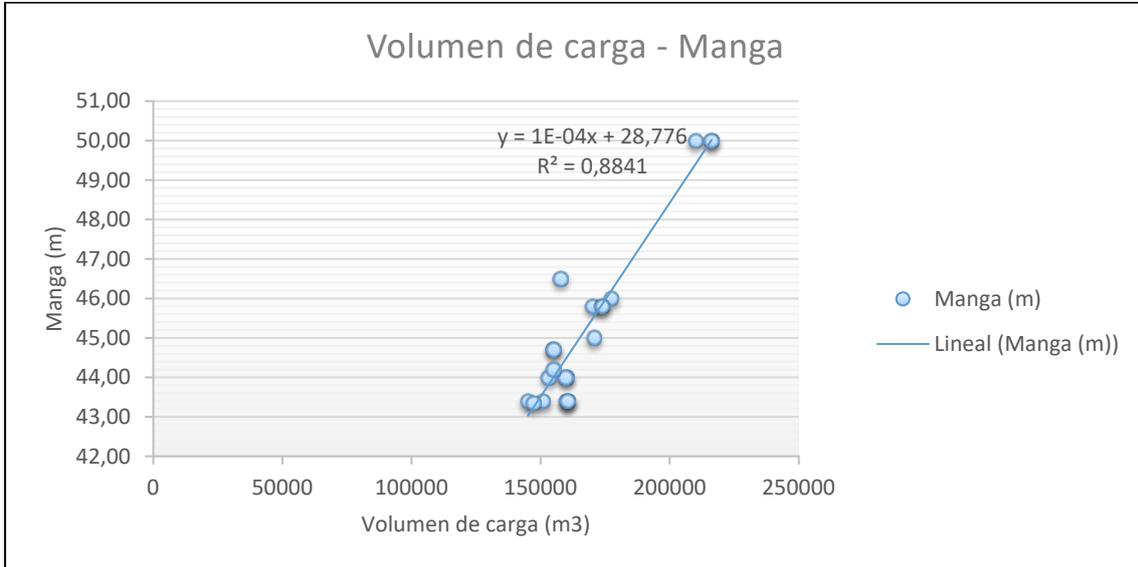
Despejando con el volumen de carga de 174.000m³ se obtiene que:

$$y = 0,0004 \times Vol_{carga} + 210,37 = 0,0004 \times 174.000 + 210,37 = 279,97m$$

Por tanto, vamos a elegir una eslora entre perpendiculares de 279,97m para el buque de proyecto.

3.3.3. Manga del buque

La siguiente regresión que se realiza es la obtenida de la relación entre el volumen de carga y la manga, pudiendo definir así la manga de nuestro buque de proyecto.



Gráfica 3. Volumen de carga Vs Manga

La regresión lineal obtenida es:

$$y = 0,0004x + 28,776$$

Despejando con el volumen de carga de 174.000m³ se obtiene que:

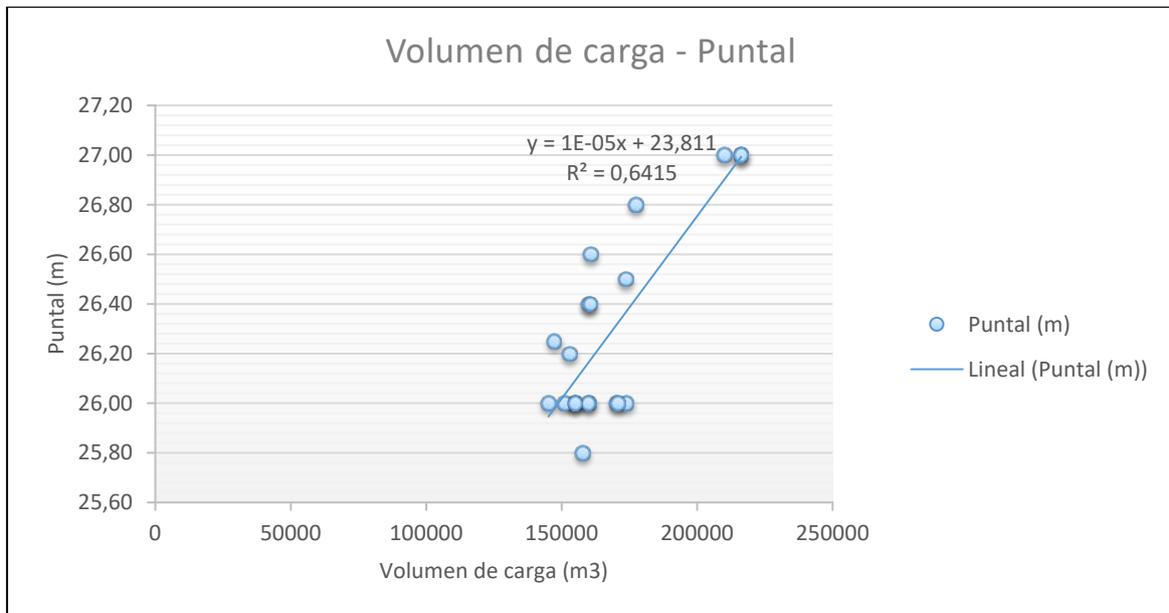
$$y = 0,004 \times Vol_{carga} + 28,776 = 0,004 \times 174000 + 28,776 = 45,7m$$

No obstante, por simetría y por facilidad de construcción a la hora de realizar una mejor distribución de la estructura en sentido longitudinal, se va a tomar una manga de 46m.

3.3.4. Puntal del buque

Para determinar el puntal del buque, igual que en los casos anteriores se va a realizar una regresión entre el volumen de carga y el puntal de los buques que aparecen en la tabla X.

Se observa que el coeficiente de ajuste no muestra una gran tendencia de aproximación entre los datos.



Gráfica 4. Volumen de carga Vs Puntal

La regresión lineal obtenida es:

$$y = 0,00005x + 23,811$$

Despejando con el volumen de carga de 174.000m³ se obtiene que:

$$y = 0,00005 \times Vol_{carga} + 23,811 = 0,00005 \times 174.000 + 23,811 = 25.55m$$

Como el coeficiente de ajuste no es suficiente para determinar con más precisión el puntal del buque, se tomarán los tres buques de capacidad de carga similar para la selección de esta dimensión.

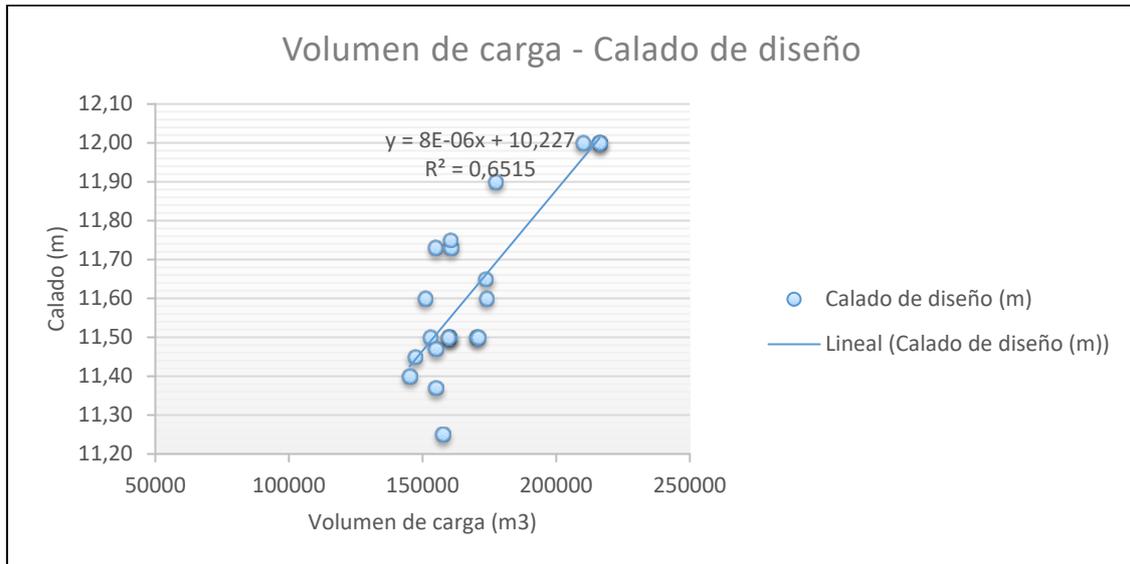
Nombre del buque	Vol. de Carga (m³)	Puntal (m)
ABDELKADER	177400	26,80
BARCELONA KNUITSEN	173650	26,50
CASTILLO DE SANTISTEBAN	173887	26,00

Tabla 3. Buques LNG - relación Vol. De carga Vs Puntal

Por tanto, el puntal de nuestro buque será de 26,50m.

3.3.5. Calado del buque

A continuación, se va a calcular el calado de diseño para nuestro buque de proyecto. Se tiene en cuenta que el calado de diseño es un factor limitante para la entrada a muchos puertos de carga y descarga, no superando este los 12m, por tanto:



Gráfica 5. Volumen de carga Vs Calado de diseño

La regresión lineal obtenida es:

$$y = 8E - 06x + 10,227$$

Despejando con el volumen de carga de 174.000m³ se obtiene que:

$$y = 8E^{\wedge} - 06 \times Vol_{carga} + 10,227 = 8E^{\wedge} - 06 \times 174.000 + 10,227 = 11,62m$$

Al igual que en el caso anterior, se comprueba que los tres buques con capacidades de carga similares tienen unos calados de:

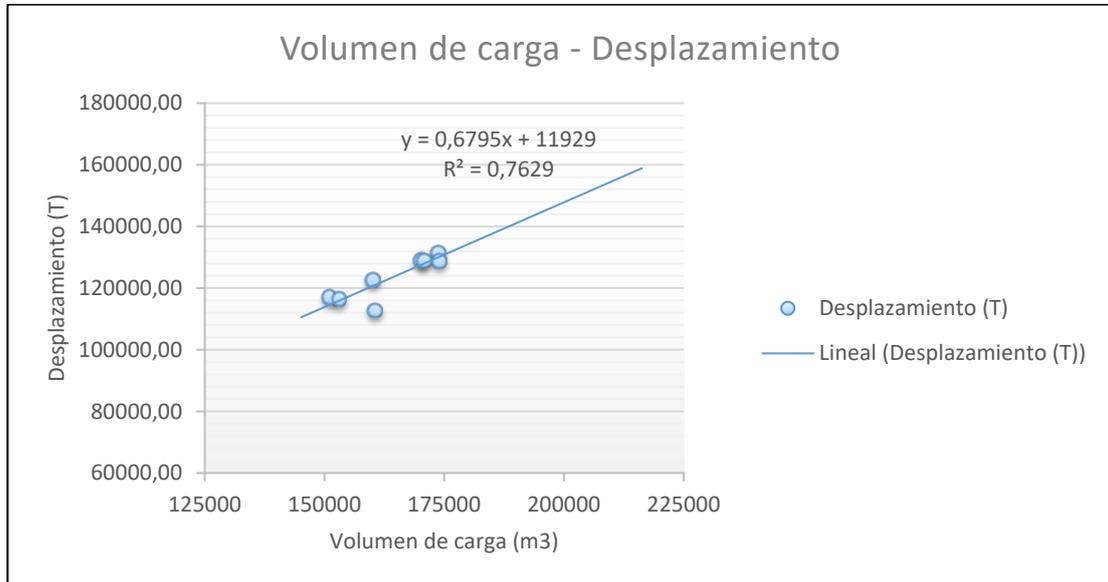
Nombre del buque	Vol. de Carga (m3)	Calado (m)
ABDELKADER	177400	11,90
BARCELONA KNUITSEN	173650	11,65
CASTILLO DE SANTISTEBAN	173887	11,60

Tabla 4. Buques LNG - relación Vol. De carga Vs calado

Por tanto, se comprueba que el calado obtenido mediante la recta de regresión se encuentra entre estos valores, por lo que se considerará como calado del buque de proyecto 11,65m.

3.3.6. Desplazamiento del buque

Del mismo modo que en los casos anteriores, se calcula el desplazamiento relacionándolo con el volumen de carga, por tanto:



Gráfica 6. Volumen de carga Vs Desplazamiento

La regresión lineal obtenida es:

$$y = 0,6795x + 11.929$$

Despejando con el volumen de carga de 174.000m^3 se obtiene que:

$$y = 0,6795 \times Vol_{carga} + 11.929 = 0,6795 \times 174000 + 11.929 = 130.162 \text{ T}$$

Por tanto, el desplazamiento de nuestro buque será de 130.162 T.

3.4. Coeficientes adimensionales

A continuación, se van a calcular los coeficientes adimensionales que definen las formas del buque. Las expresiones que se utilizarán en este apartado se han tomado del libro “Proyecto básico del buque mercante” [13], mencionado en la bibliografía.

3.4.1. Coeficiente de bloque

El coeficiente de bloque es la relación entre el volumen ocupado por la carena sumergida del buque y el de un paralelepípedo imaginario circunscrito a esta. Este paralelepípedo se dimensiona con la eslora, la manga y el calado del buque.

El coeficiente de bloque tiene una gran influencia sobre la resistencia al avance y sobre la capacidad de carga, y, en menor medida, sobre la estabilidad, maniobrabilidad y otras consideraciones.

Por tanto, se calcula el coeficiente de bloque como:

$$CB = \frac{\nabla}{L_{pp}BT}$$

Para ello, se necesita calcular el volumen de carena, que se obtiene a partir del desplazamiento, y suponiendo una densidad del agua de 1.025 T/m³; por tanto:

$$\nabla = \frac{\Delta}{\rho} = \frac{130162}{1.025} = 126.990 \text{ m}^3$$

Finalmente, resolviendo la expresión para el cálculo del coeficiente de bloque se obtiene para el buque de proyecto un valor de:

$$CB = 0,846$$

3.4.2. Coeficiente de la maestra

El coeficiente de la maestra define la relación entre las áreas de la sección maestra y la del rectángulo que la circunscribe, siendo el área de sección maestra la sección transversal de un buque en el punto de mayor manga, y que generalmente coincide o está muy próxima a la sección media.

Para calcular el coeficiente de la maestra se tiene que:

$$CM = \frac{A_{\phi}}{BT}$$

Debido a que no se conocen las formas del casco aún, en este punto del proyecto, no es posible conocer el área de la maestra. Por tanto, se hallará el coeficiente de la maestra de forma estimada mediante la expresión de Kerlen [13]:

$$CM = 1.006 - 0,0056 \times CB^{-3.56}$$

Por tanto, despejando se tiene que:

$$CM = 1.006 - 0,0056 \times 0,84^{-3.56} = 0,996$$

3.4.3. Coeficiente prismático

Se define como coeficiente prismático C_p a la relación entre el volumen de la carena y el volumen de un prisma cuya base tiene igual área que la sección maestra y de longitud su eslora.

Se calcula el coeficiente prismático como:

$$CP = \frac{CB}{CM}$$

Por tanto, se tiene que:

$$CP = \frac{0.846}{0.996} = 0.850$$

3.4.4. Coeficiente de flotación

Se define como la relación entre el área de una flotación con el rectángulo circunscrito. Para la determinación del CWP se emplea la fórmula de aproximación de Schneekluth que se hace referencia en el libro "Proyecto básico del buque mercante" [13]. Por tanto:

$$CWP = \frac{1 + 2 * CB}{3}$$

Despejando se obtiene:

$$CWP = \frac{1 + 2 * CB}{3} = 0,898$$

Recopilando de todos los cálculos realizados, mediante regresiones, se tiene a modo de resumen que las características principales y coeficientes de formas de nuestro buque objeto de proyecto son:

Resumen dimensiones principales	
Eslora L (m)	294,15
Manga (m)	46,00
Puntal (m)	26,50
Calado de diseño (m)	11,65
Lpp (m)	279,97
Desplazamiento (T)	130.162

Tabla 5. Resumen dimensiones principales

Coefficientes principales	
Coefficiente de bloque	0,846
Coefficiente de la maestra	0,996
Coefficiente prismático	0,850
Coefficiente flotación	0,898

Tabla 6. Resumen dimensiones principales

3.5. Generación de las formas del buque

Una vez se han calculado las dimensiones principales y coeficientes de formas del buque, se obtendrá con la ayuda de Maxurf Modeller, un software para cálculos de arquitectura naval, las formas de un casco que se asemeje a las dimensiones y formas de nuestro buque de proyecto, con el fin de obtener la resistencia al avance y poder calcular el sistema propulsivo del barco.

Este programa dispone de una base de datos de buques ya definidos, entre los que se encuentra un buque del tipo LNG.

Como las dimensiones del buque seleccionado no coinciden con las del buque proyecto, se ha de llevar a cabo una serie de transformaciones del mismo.

En primer lugar, se lleva a cabo la transformación paramétrica del buque. El programa permite seleccionar una serie de parámetros que permanecen fijos o cuya variación es despreciable, dejando por otra parte parámetros libres para que se pueda ajustar de manera automática.

En este caso los datos introducidos al programa han sido: el Coeficiente Prismático, el Coeficiente de la Maestra así como la eslora, la manga y el calado de diseño.

Al fijar dichos valores, el programa recalcula el buque, produciéndose unas pequeñas variaciones en algunos de los datos.

Finalmente, el programa con los datos introducidos y a partir del buque definido en la base de datos, es capaz de calcular unas formas de un casco que se asemejarán a las de nuestro buque; de manera que permitirá obtener mediante otro módulo del propio software, un estudio propulsivo del buque objeto de proyecto y calcular así la propulsión del barco.

También hay que llevar a cabo una serie de modificaciones del casco ya que al realizar dicha transformación tanto la zona de proa como la popa no son acordes al tamaño del buque.

Estas modificaciones del casco se hacen mediante los puntos de control del casco.

Una vez que ya se han realizados las variaciones de la forma del casco ha de recalcularse los coeficientes.

Se muestra a continuación las formas del buque que se tendrán como objeto de estudio para el proyecto.

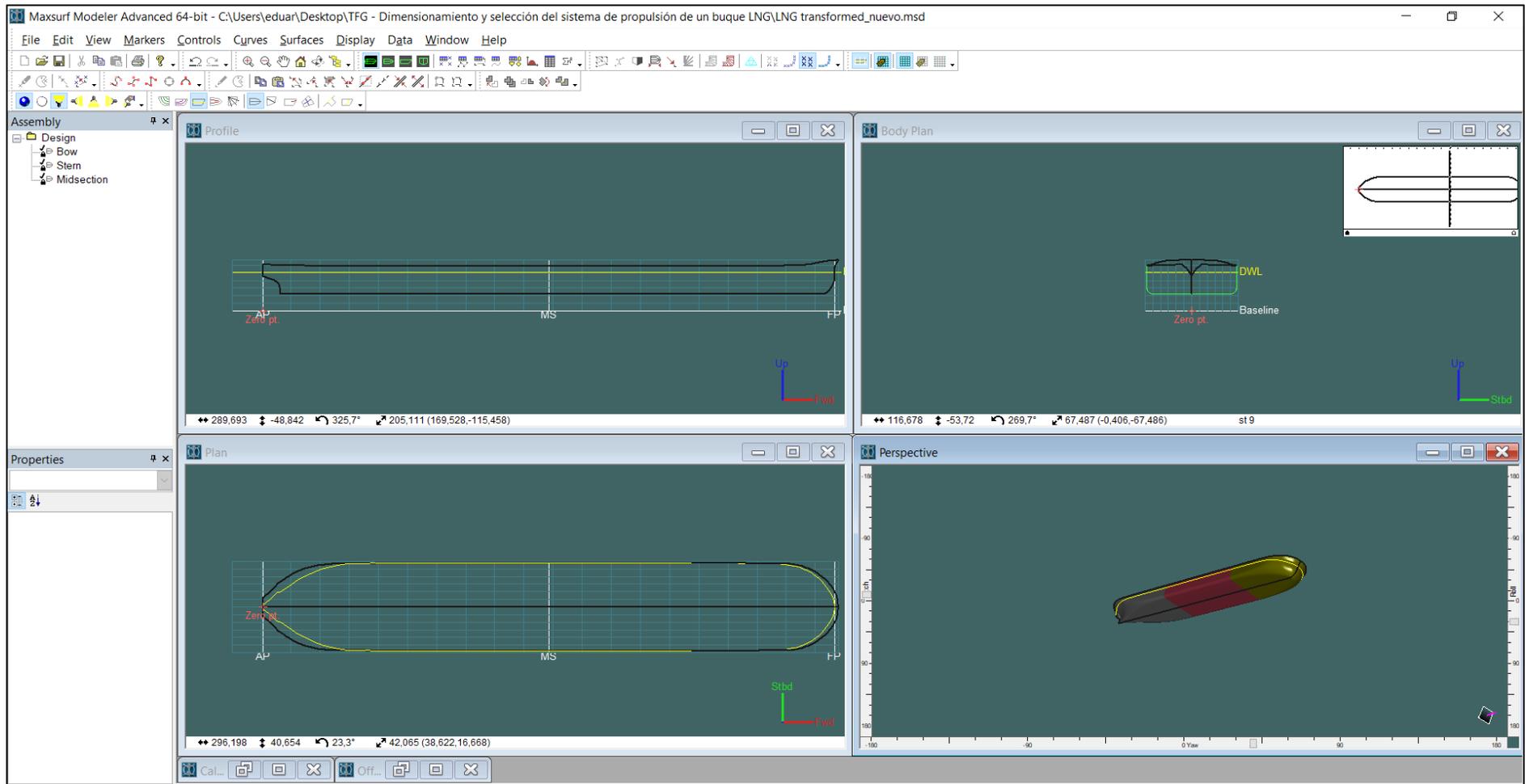


Figura 20. Interface de Maxsurf para la obtención del modelo.

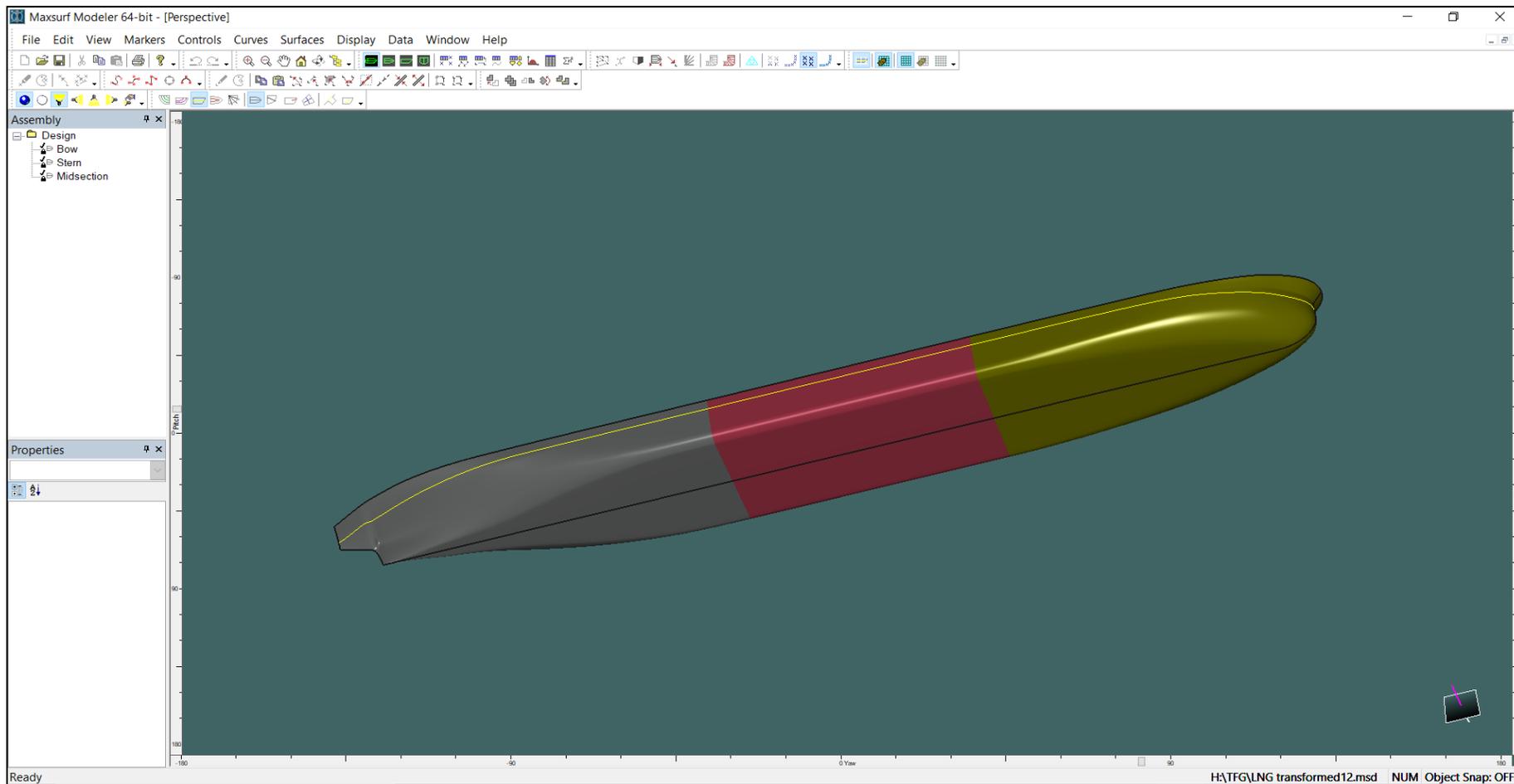


Figura 21. Modelo de las formas del casco simuladas por Maxsurf.

Hydrostatics at DWL			
	Measurement	Value	Units
1	Displacement	136751	t
2	Volume (displaced)	133415,35	m ³
3	Draft Amidships	20,422	m
4	Immersed depth	11,650	m
5	WL Length	294,150	m
6	Beam max extents on WL	46,000	m
7	Beam max on WL	46,000	m
8	Wetted Area	17702,765	m ²
9	Max sect. area	530,559	m ²
10	Sect. area amidships	530,557	m ²
11	Prismatic coeff. (Cp)	0,855	
12	Block coeff. (Cb)	0,846	
13	Max Sect. area coeff. (Cm)	0,990	
14	LCB length	156,533	from z
15	LCB %	53,215	from z
16	VCB	14,819	m
17	KB	14,819	m
18	BMt	15,452	m
19	BML	582,153	m
20	GMt corrected	30,271	m
21	GML	596,972	m
22	KMt	30,271	m
23	KML	596,972	m
24	Precision	Medium	60 sta

Figura 22. Hidrostáticas del modelo generado por Maxsurf

En los valores de las curvas hidrostáticas que proporciona el programa se puede observar que a mayoría de los datos fijados se han mantenido, otros en cambio han sufrido pequeñas variaciones.

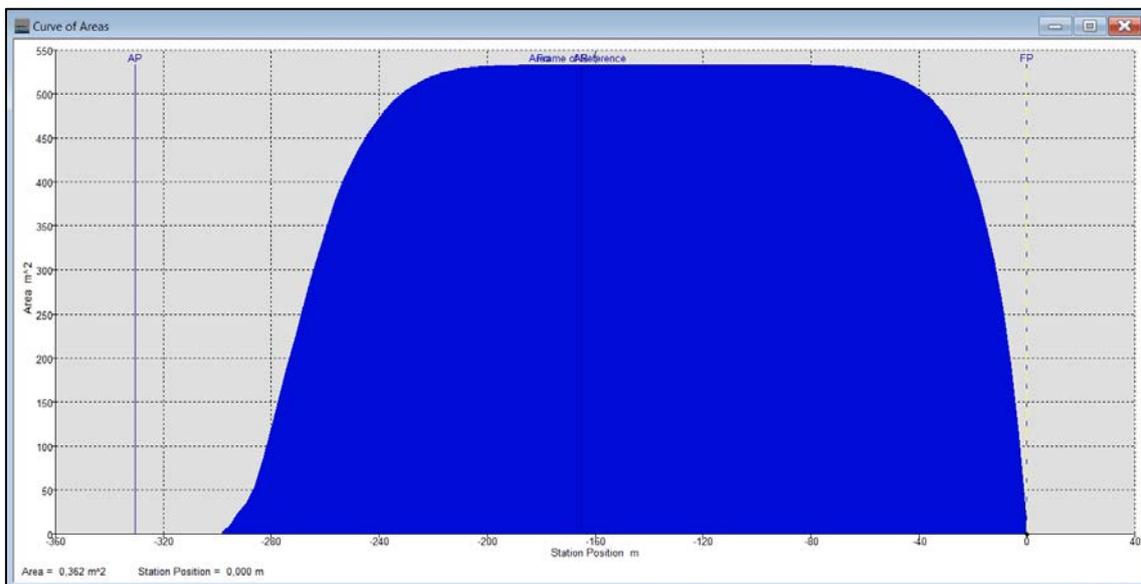


Figura 23. Distribución de áreas por Maxsurf.

3.6. Estimación de la potencia propulsora

Este apartado es de suma importancia debido a la dificultad que supondría las modificaciones que se le tendrían que hacer al buque, una vez terminado, si este no alcanza la velocidad recogida en las especificaciones del proyecto.

El método más fiable a la hora de calcular la resistencia al avance es mediante ensayos con modelos en un canal de experiencias hidrodinámicas, método que se sale fuera de los objetivos de este proyecto, y no es posible realizar dada la necesidad de un canal de experiencias para poder realizarlo.

Otra alternativa sería la de usar herramientas numéricas como los CFD, aunque estos programas pueden dar resultados dispares si no se conocen muy bien las condiciones de contorno, y necesitan también ser validados mediante pruebas en canal.

El buque objeto de proyecto, que se va a diseñar debe ser autopropulsado, y, además, según la especificación de partida, a una velocidad de 18.5 nudos al 90% de la potencia del motor. Por consiguiente, se debe calcular la resistencia total que debe vencer el buque mientras que se desplaza.

A continuación, se exponen varios métodos para evaluar la potencia propulsora de un buque en la fase del proyecto inicial, en que no se conocen muchas características del mismo, y en cálculos de optimización de las características principales.

Se consideran dos clases de métodos: la primera consiste en una simple fórmula con muy pocos parámetros, que determina en primera aproximación la potencia propulsora a la velocidad de proyecto del buque, y es aplicable a la primera pasada de la espiral de proyecto. Los métodos de la segunda clase son más desarrollados, especialmente el de J. Holtrop & G.G.J. Mennen, y utilizan las dimensiones principales y varios parámetros de formas de la carena del buque.

Estos métodos son aplicables a pasadas posteriores de la espiral de proyecto, y también se pueden incorporar en programas de definición y optimización de las características principales del buque.

Los métodos de J. Holtrop & G.G.J. Mennen y de L.K. Kupras permiten calcular la potencia para una amplia gama de velocidades, por encima y debajo de la velocidad de proyecto.

3.6.1. Método de D.G.M. Watson

Según esta fórmula, que viene recopilada en el capítulo 3.5 del libro “Proyecto Básico del Buque Mercante”, la potencia desarrollada por el motor directamente acoplado es igual a:

$$PB = \frac{0,889 DISW^{\frac{2}{3}} \left(40 - \frac{LPP}{61} + 400(K - 1)^2 - 12 CB \right)}{15000 - 1.81 N \sqrt{LPP}} V^3$$

Donde:

K: Constante de la fórmula de Alexander.

CB: $K - 0.5 V / \sqrt{3,28 LPP}$

V: Velocidad en nudos

PB: Potencia desarrollada por el motor directamente acoplado, en HP.

N: R.P.M. del motor propulsor.

Para obtener K, se utiliza la siguiente gráfica extraída del mismo libro.

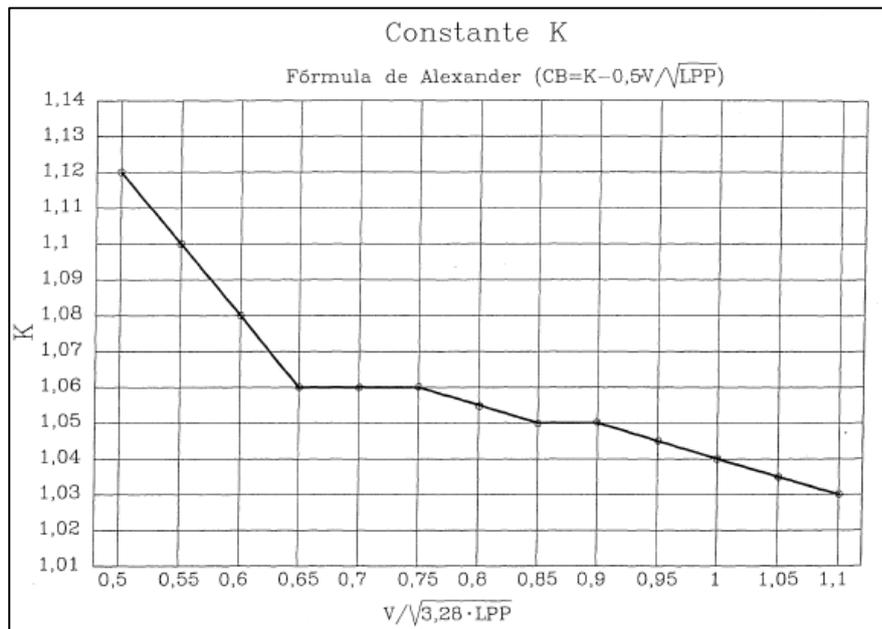


Figura 24. Coeficiente K de Alexander

Sustituyendo en la fórmula de Alexander, se tomó de la gráfica como valor de K=1.03.

Se estima las revoluciones del motor en 75 rpm.

Por tanto, sustituyendo con los valores en la expresión para el cálculo de la potencia, se obtiene que:

$$PB = \frac{0,889 DISW^{\frac{2}{3}}(40 - \frac{LPP}{61} + 400(K - 1)^2 - 12 CB)}{15.000 - 1,81 N \sqrt{LPP}}$$

Resolviendo la ecuación:

$$PB = 30.749,18 HP$$

Que en CV es:

$$PB = 31.179,67 CV$$

3.6.2. Método de L.K. Kupras

Se calcula la potencia desarrollada por el motor utilizando el siguiente procedimiento que se recoge en el capítulo 3.5 del libro “Proyecto Básico del Buque Mercante” [13].

Para comenzar se calcula la VB o velocidad límite que es aquella a partir de la cual comienza a crecer rápidamente la resistencia al avance pero que por debajo de su valor se mantiene el coeficiente que la rige casi sin cambios significativos. Se calcula mediante la expresión:

$$VB = (3,08 - 2,54 Cb) \sqrt{LPP}$$

Despejando se obtiene:

$$VB = (3,08 - 2,54 Cb) \sqrt{LPP}$$

$$VB = 15,56$$

A dicha velocidad la potencia de remolque necesaria es:

$$PE = \frac{C \times \Delta^{2/3} \times VB^3}{427,1}$$

El valor de C, según el método de Kupras vale 0.71 para cualquier coeficiente de bloque, con lo que sustituyendo en la ecuación anterior se obtiene:

$$PE = 16.098,15 HP$$

La potencia absorbida por la hélice se obtiene dividiendo la potencia de remolque por el rendimiento cuasi-propulsivo.

$$PDB = \frac{0,0023725 \times (1 + x) \times 0,71 \times DISW^{2/3} \times VB^3}{ETAD}$$

Siendo ETAD el rendimiento cuasi propulsivo.

El rendimiento cuasi-propulsivo se obtiene como:

$$ETAD = ETA0 \times ETAH \times ETAR$$

Donde:

ETA0 es el rendimiento del propulsor en aguas libres

$$ETA0 = 1,30 - 0,55 Cb - 0,00267 N$$

$$ETA0 = 0,63$$

ETAH es el rendimiento del casco.

Para $CB > 0.80$ se tiene:

$$ETAH = 0,945 + 0,11 \frac{B}{T} + 20(CB - 0.8) * (1,54 - (0,945 + 0,11 \frac{B}{T}))$$

$$ETAH = 1,41$$

ETAR es el rendimiento rotativo relativo.

$$ETAR = 1.01$$

Por tanto, sustituyendo los valores anteriores, se obtiene que el rendimiento cuasi propulsivo es:

$$ETAD = ETA0 \times ETAH \times ETAR$$

$$ETAD = 0.98$$

El factor de correlación $1+x$ se calcula por la fórmula:

$$1 + x = 0,85 + 0,00185 \frac{(1000 - 3,28LPP)^{2.5}}{100}$$

$$1 + x = 0,85$$

Finalmente, se despeja la potencia absorbida por la hélice, de manera:

$$PDB = \frac{0,0023725 \times (1 + x) \times 0,71 \times DISW^{2/3} \times VB^3}{ETAD}$$

$$PDB = 14.180,69 HP$$

Como la velocidad de servicio es distinta a la velocidad límite, se tiene que la potencia instalada en el motor debe ser de:

$$PD = PDB \left(\frac{V}{VB}\right)^{4.1667 V/VB}$$

Por tanto:

$$PD = 33.371,40 \text{ HP}$$

$$PD = 33.838,60 \text{ CV}$$

3.6.3. Método de J.Holtrop & G.G.J. Mennen

Para calcular la potencia propulsora a partir de este método, es necesario calcular primeramente la resistencia al avance ofrecida por las formas del casco. Es por ello, que para calcular de una manera más sencilla estos valores de resistencia, se utilizará el software mencionado antes Maxurf, sin embargo, esta vez se utilizará el módulo "Resistance".

Este software reflejará los valores de resistencia y potencia efectiva para las formas de nuestro buque a distintas velocidades.

Para ello, se utilizarán los datos obtenidos anteriormente y proporcionados por Maxsurf, en cual realiza los cálculos de forma interna y muestra, de forma aproximada, las resistencias al avance para el buque y formas del casco seleccionado a diferentes velocidades.

Los resultados que refleje el software se utilizarán para los futuros cálculos de este método, se obtiene así:

Speed (kn)	Froud No LWL	Froud No Vol.	Holtrop Resist (kN)	Holtrop Power (kW)
0	0	0	--	--
0,5	0,005	0,011	2	0,514
1	0,01	0,023	7,3	3,75
1,5	0,014	0,034	15,6	12,013
2	0,019	0,046	26,7	27,461
2,5	0,024	0,057	40,6	52,167
3	0,029	0,069	57,1	88,142
3,5	0,034	0,08	76,3	137,349
4	0,038	0,092	98	201,711
4,5	0,043	0,103	122,3	283,114
5	0,048	0,115	149,1	383,417
5,5	0,053	0,126	178,3	504,45
6	0,057	0,138	209,9	648,016
6,5	0,062	0,149	244	815,899
7	0,067	0,161	280,6	1010,482
7,5	0,072	0,172	319,7	1233,337
8	0,077	0,184	361,1	1486,167
8,5	0,081	0,195	405	1770,788
9	0,086	0,207	451,2	2089,045
9,5	0,091	0,218	499,8	2442,841
10	0,096	0,23	550,9	2834,179
10,5	0,101	0,241	604,5	3265,229
11	0,105	0,253	660,6	3738,401
11,5	0,11	0,264	719,5	4256,441
12	0,115	0,276	781,2	4822,543
12,5	0,12	0,287	846	5440,466
13	0,125	0,299	914,3	6114,672
13,5	0,129	0,31	986,4	6850,459
14	0,134	0,322	1062,7	7654,1
14,5	0,139	0,333	1143,9	8532,973
15	0,144	0,345	1230,5	9495,696
15,5	0,148	0,356	1323,3	10552,233
16	0,153	0,368	1423,1	11714,006
16,5	0,158	0,379	1530,8	12993,973
17	0,163	0,391	1647,3	14406,708
17,5	0,168	0,402	1773,7	15968,44
18	0,172	0,414	1911,1	17697,136
18,5	0,177	0,425	2060,7	19612,39
19	0,182	0,437	2223,7	21735,327
19,5	0,187	0,448	2401,4	24089,681
20	0,192	0,46	2595,1	26701,163

Tabla 7. Resultados método de Holtrop por Maxsurf.

A partir de estos datos, se puede representar gráficamente los siguientes valores:

- Curva de la resistencia del buque frente a la velocidad:

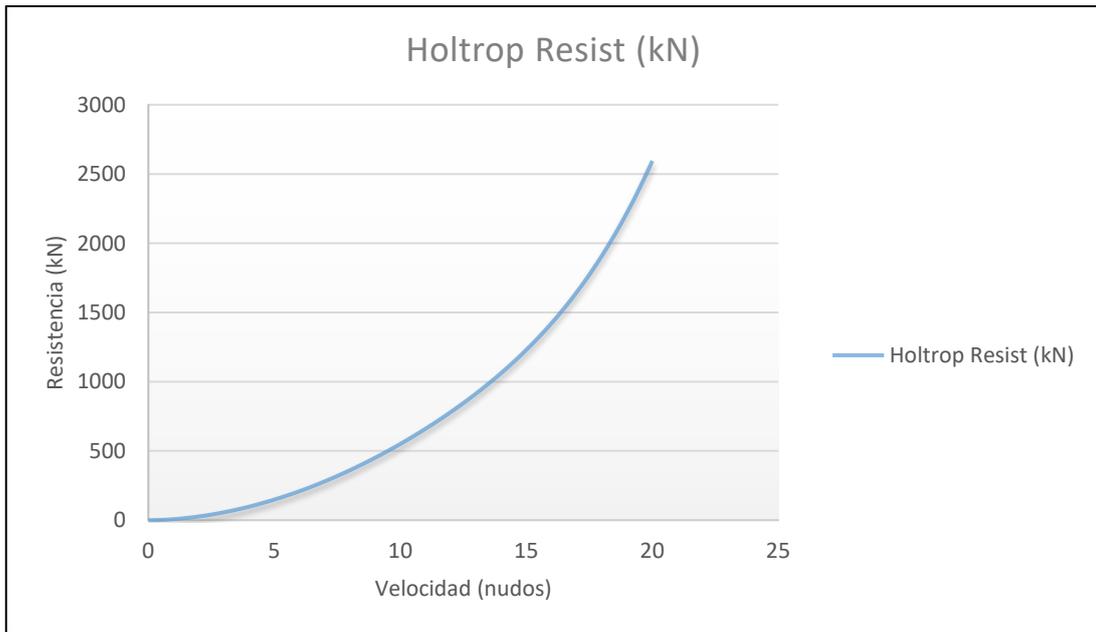


Figura 25. Resistencia al avance frente a la velocidad del buque.

- Curva de la potencia necesaria del buque frente a la velocidad:

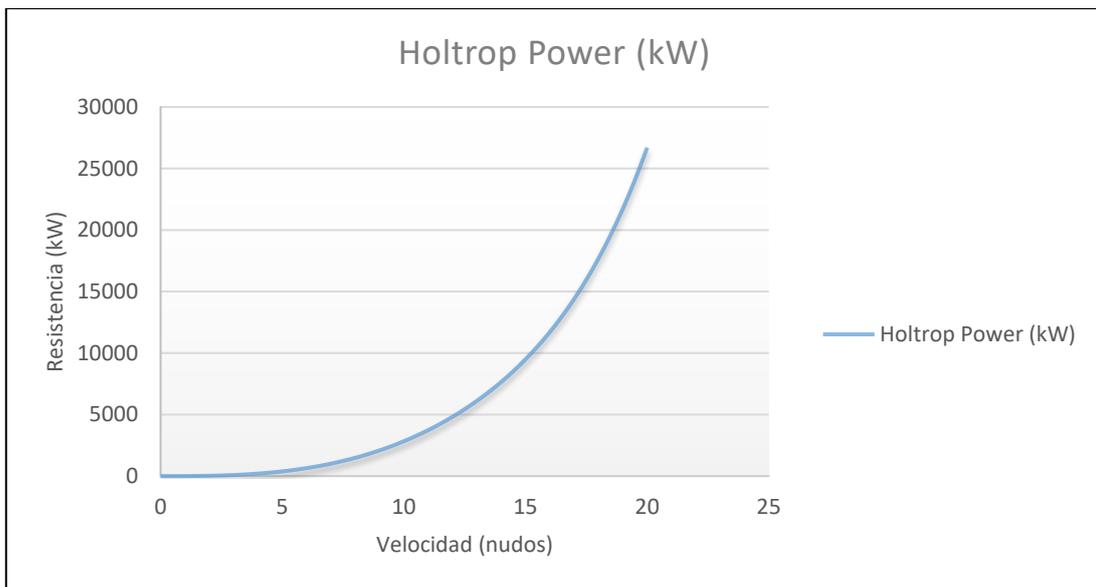


Figura 26. Potencia efectiva frente a la velocidad del buque.

Estas potencias halladas por el método de Holtrop representan la potencia efectiva (EHP), es decir, la potencia necesaria que deberán generar las hélices para propulsar el buque a dicha velocidad. En este caso la potencia de diseño del propulsor estará optimizada para navegar a la velocidad de servicio, 18,5 nudos, establecida en la especificación de partida.

De estos datos se obtiene que para una velocidad de 18,5 nudos la resistencia al avance del buque supone 2.060,7 kN y una potencia efectiva (EHP) necesaria para vencerla de 19.612,39 kW.

Esta potencia sufre una serie de pérdidas a su paso por los distintos elementos que forman el sistema propulsivo, desde su generación en el motor hasta la que finalmente suministra la hélice. Por tanto, es necesario calcular la potencia al freno, que se calcula mediante:

$$BHP = \frac{EHP}{\eta_{prop}}$$

El rendimiento propulsivo se calcula:

$$\eta_{prop} = \frac{(1 - t)}{(1 - w)} \times \eta_{rr} \times \eta_0 \times \eta_{mec}$$

El rendimiento rotativo-relativo (η_{rr}) y el rendimiento del propulsor en aguas libres (η_0) ya se ha calculado en el apartado anterior, de manera que:

$$\eta_{rr} = 0,98$$

$$\eta_0 = 0,63$$

El rendimiento mecánico se corresponde con la pérdida de la potencia que sufre en la línea de ejes, esta se estima en 1%, por lo que:

$$\eta_{mec} = 0,99$$

Solo quedaría calcular la posición longitudinal del centro de carena X_b , y se utilizará el método establecido por L. Troost y que se recoge en el libro "Proyecto Básico del Buque Mercante" [13].

$$X_b = 17,5 \times C_p - 12,5$$

Despejando a partir del C_p de nuestro buque, tenemos:

$$X_b = 2,373$$

Se ha estimado un diámetro máximo del propulsor de 9m, para los próximos cálculos.

Finalmente, se puede calcular el coeficiente de succión como:

$$t = \frac{0,25014 \times \left(\frac{B}{LWL}\right)^{0,28956} \times \left(\frac{\sqrt{B \times T}}{DP}\right)^{0,2624}}{(1 - Cp + 0,0225 \times Xb)^{0,01762}} + 0,0015 \times Cstern$$

Despejando se obtiene que:

$$t = 0,193$$

Como se expresa en la fórmula para el cálculo del rendimiento propulsivo, se debe estimar también el coeficiente de estela w , por lo que haciendo uso de la misma referencia bibliográfica que en el caso anterior, se calculará este coeficiente mediante la siguiente expresión:

$$w = C9 * C20 * CV \frac{LWL}{T(0.050776 + 0.93405 * C11 * \frac{CV}{1 - CP1})} + 0.27915 * C20 \sqrt{\left(\frac{B}{LWL}\right)(1 - CP1) + C19 * C20}$$

Para ello, se deben calcular los diferentes coeficientes que aparecen en la ecuación. Por tanto, se tiene que:

- **C8** se calcula por:

$$C8 = B * \frac{S}{LWL * D * T} \quad \text{si } \frac{B}{T} < 5$$

$$C8 = S * \frac{7 * \frac{B}{T} - 25}{LWL * D * \left(\frac{B}{T} - 3\right)} \quad \text{si } \frac{B}{T} > 5$$

Siendo: $B/T < 5$, se sustituye en la primera ecuación dando como valor:

$$C8 = 26,40$$

- **C9** se calcula por:

$$C9 = C8 \quad \text{si } C8 < 28$$

$$C9 = 32 - \frac{16}{C8 - 24} \quad \text{si } C8 > 28$$

Siendo: $C8 > 28$, se sustituye en la segunda ecuación dando como valor:

$$C9 = 26,40$$

- **C11** se calcula por:

$$C11 = \frac{T}{D} \quad \text{si } \frac{T}{D} < 2$$

$$C11 = 0,0833333 * \left(\frac{T}{D}\right)^3 + 1,3333 \quad \text{si } \frac{T}{D} < 2$$

Siendo: $T/D < 2$, se sustituye en la primera ecuación dando como valor:

$$C11 = 0,112$$

- **C19** se calcula por:

$$C19 = \frac{0.12997}{0.95-Cb} - \frac{0.11056}{0.95-Cp} \quad \text{si } Cp < 0.7$$

$$C19 = \frac{0.18567}{1.3571-Cm} - 0.71276 + 0.38648 * Cp \quad \text{si } Cp > 0.7$$

Siendo: $Cp > 0.7$, se sustituye en la segunda ecuación dando como valor:

$$C19 = 0.030$$

- **C20** se calcula por:

$$C20 = 1 + 0,015 * T$$

$$C20 = 1,017$$

- **CP1** se calcula por:

$$CP1 = 1,45 * Cp - 0,315 - 0,0225 * Xb$$

$$CP1 = 0,864$$

- **CV** se calcula por:

$$CV = (1 + k) * CF + CA$$

Para ello, será necesario calcular los factores de la ecuación, para ello se utilizará como se ha venido haciendo hasta primeramente el libro "Proyecto Básico del Buque mercante" [13].

El factor $1+k$ se calcula como:

$$1 + k = 0,93 + 0,4871 \times C(B/LWL)^{1.0681} \times (T/LWL)^{0.4611} \times (LWL/RUNL)^{0.1216} \\ \times (LWL^3/DISV)^{0.3649} \times (1 - CP)^{-0.6042}$$

LWL es la eslora a la altura de la flotación, en nuestro buque será de valor igual a la eslora total ya que si se traza a la altura del calado ($T=11.65m$) una paralela a la línea base, se comprobará que la longitud de esa eslora es igual a la eslora máxima total del buque.

Donde:

DISV = Desplazamiento del buque (T)

B = Manga del buque (m)

T = Calado de diseño (m)

CP = Coeficiente prismático

El coeficiente C se obtiene como:

$$C = 1 + 0,11 \times C_{stern}$$

Donde:

Cstern = -25 popa tipo góndola

= -0 secciones en V

= 0 secciones normales

= +10 secciones en U con popa Hogner

En nuestro buque, se tomarán secciones normales para efectos de cálculo, ya que las formas tomadas de Maxsurf se asemejan más a una sección de tipo U pero con el fondo del barco recto.

El valor de RUNL se calcula como:

$$RUNL = (1 - CP + 0.06 \times CP * Xb / (4 \times CP - 1)) / LWL$$

Despejando RUNL se obtiene que:

$$RUNL = 0,000641$$

Ahora podemos calcular el factor $1+k$, de manera que, despejando en su expresión con los valores anteriores, se obtiene:

$$1 + k = 2,524$$

A continuación, se calculará el valor de Cf, el cual depende del valor del Reynolds de nuestro sistema, calculándose mediante la siguiente expresión:

$$CF = \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2}$$

Donde Re depende de la velocidad de nuestro buque, la eslora y la viscosidad cinemática del agua, por tanto:

$$Re = (V * 0,5144) * L/\mu$$

Donde:

$$\mu = 0,00000118831 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

Por tanto:

$$Re = 2,356E + 09$$

$$CF = 0,00138$$

Finalmente, solo quedaría calcular el coeficiente de correlación del modelo (CA), el cual se calcula mediante la siguiente expresión:

$$CA = 0,006 \times (LWL + 100)^{-0.16} - 0.00205 \\ + 0,003 \times \left(\frac{LWL}{7.5}\right)^{0.5} \times CB^4 \times C2 \times (0,04 - C4)$$

Donde:

$$C4 = TF/LWL \quad \text{si } TF/LWL \leq 0.04$$

$$C4 = 0.04 \quad \text{si } TF/LWL > 0.04$$

Siendo en nuestro caso $TF/LWL > 0,04$, por tanto:

$$C4 = 0,04$$

El coeficiente $C2$, tal como se expresa en el capítulo 3.5 del libro "Proyecto Básico del Buque Mercante" [13], si no existiera bule, como es nuestro caso tal y como se refleja en las formas del modelo de Maxsurf, $C2=1$.

Despejando estos valores para calcular CA se obtiene que:

$$CA = 0,0002559$$

Finalmente, se está disposición de calcular el coeficiente de resistencia viscosa, despejando con todos los valores calculados en la expresión antes mencionada, de manera que:

$$CV = (1 + k) * CF + CA$$

Despejando:

$$CV = 0,00374$$

Una vez calculado todos estos coeficientes se puede, despejando de la expresión ya mencionada, y que se recuerda a continuación el coeficiente de estela, se obtiene que:

$$w = C9 * C20 * CV \frac{lwI}{T(0.050776 + 0.93405 * C11 * \frac{CV}{1 - CP1})} + 0.27915 * C20 \sqrt{\left(\frac{B}{LWL}\right)(1 - CP1)} + C19 * C20$$

$$w = 0,208$$

Finalmente, y a partir de todos los rendimientos calculados (pérdidas energéticas) se puede calcular el rendimiento propulsivo de manera que:

$$\eta_{prop} = \frac{(1 - t)}{(1 - w)} \times \eta_{rr} \times \eta_0 \times \eta_{mec} = 0,626$$

Rendimiento del casco:

Se calcula mediante la siguiente expresión obtenida del libro “ Proyecto Básico del Buque mercante” [13], de modo que:

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} = \frac{1 - 0.193}{1 - 0.208} = 1,019$$

Una vez se ha obtenido el rendimiento del propulsor, tal y como se ha comentado antes, dividiendo la potencia efectiva entre el rendimiento del propulsor obtendremos la potencia al freno o potencia de remolque necesaria para vencer todas las pérdidas. De manera que:

$$BHP \frac{EHP}{\eta_{prop}} = \frac{19.612,4}{0,626}$$

Dando como resultado:

$$BHP = 31305.97 \text{ kw}$$

Hay que comentar que esta potencia es la mínima necesaria para conseguir la velocidad de servicio una vez vencidas todas las pérdidas a lo largo de todo el sistema propulsivo. Sin embargo, se establece que la potencia BHP a la velocidad de servicio debe conseguirse en torno al 90% de la potencia del motor instalada (MCR), para no trabajar al 100% nunca de la potencia instalada.

Además, durante las pruebas de mar, dado que el buque está recién construido, este no presenta ningún tipo de imperfección en el casco, por lo que el rozamiento será menor, pero durante la vida útil en servicio del buque, el casco irá aumentando el rozamiento debido a las incrustaciones de animales, defectos de pintura, etc. Por lo que se debe dejar un margen extra del 5% a la potencia que se va a instalar.

Por tanto, la potencia a instalar será un 15% mayor que la calculada anteriormente, siendo esta finalmente de:

$$MCR = \frac{BHP}{\eta} = \frac{31305.97}{0.85} = 36830,55 \text{ kw}$$

$$MCR = 37346,18 \text{ CV}$$

Cabe destacar que esta potencia sería la necesaria en el caso de estimar el resto de los elementos propulsivos. Sin embargo, a continuación, se calculará el propulsor o hélice, por lo que obtendremos un valor de la potencia necesaria más real.

3.7. Cálculo de la hélice

A continuación, se van a calcular los parámetros necesarios para dimensionar la hélice y obtener así un nuevo valor más preciso de la potencia necesaria para entregarla y vencer la resistencia al avance.

➤ Diámetro máximo de la hélice (D)

El diámetro máximo de las hélices de nuestro buque vendrá limitado por las formas del casco. Para ello se estudiará el espacio disponible para albergar las unidades propulsoras teniendo en cuenta las siguientes premisas:

- Interesa que las hélices dispongan del mayor diámetro posible, ya que de esta manera aumentará el rendimiento de las mismas.
- Las hélices no deben sobresalir en ningún caso, fuera de la manga ni de la línea base con el fin de evitar posibles golpes en varadas o colisiones.

Se recuerda que se ha estimado un diámetro máximo de 9m.

Una vez tenemos una estimación de los parámetros y coeficientes de los elementos propulsivos, realizados en el apartado anterior, se procede a proyectar la hélice óptima del buque utilizando la serie B de Wageningen. Se destaca que este buque solo dispone de una sola línea de ejes. El proceso es el siguiente:

1. Se realiza una estimación del empuje de la hélice:

$$T = \frac{R}{1 - t} = \frac{2060.7}{1 - 0.193} = 2.552,33 \text{ kN}$$

2. En segundo lugar, decidiremos el número de palas (Z) que llevarán nuestros propulsores. Las series sistemáticas permiten elegir en un rango de 2 a 6 palas. A menor número de palas, mayor será el rendimiento.
Las hélices de 2 palas, por razones de resistencia, no pueden estar sometidas a cargas elevadas mientras que las hélices de 5 o 6 palas se destinan a buques con grandes potencias y hélices muy cargadas [14].

Por ello, se elegirá para nuestro buque una hélice de 4 palas.

3. Al ir el propulsor directamente acoplado al motor, las revoluciones vienen determinadas por este.

Método Bp - δ

Cabe mencionar en este punto, que los coeficientes propulsivos y otros parámetros calculados y estimados hasta ahora son:

$$\begin{aligned} \text{EHP} &= 19.612,4 \text{ KW} \\ R &= 2.060,7 \text{ KN} \\ V &= 18,5 \text{ nudos} \\ N &= 75 \text{ rpm} \\ D_{\text{max}} &= 9\text{m} \\ w &= 0,208 \\ t &= 0,193 \\ \eta_m &= 0,99 \\ \eta_o &= 0,63 \\ \eta_H &= 1,019 \\ \eta_r &= 0,98 \\ \eta_D &= 0,626 \end{aligned}$$

A partir de los parámetros anteriores, se va a calcular a proceder a predimensionar la hélice óptima para el buque, de manera que es preciso calcular una serie de parámetros para ello.

- Coeficiente de área / disco (A_D/A_0)

Define el área de la superficie desarrollada de la hélice en relación al área de su disco (circulo proyectado) [14].

Para un buen diseño de la hélice ha de procurarse que esta relación sea la mínima posible con tal que no exista cavitación peligrosa. Si se aumenta la relación A_D/A_0 disminuye el rendimiento de la hélice, debido a la mayor superficie de la pala sujeta a fricción. Así pues, se debe encontrar un compromiso entre la relación A_D/A_0 y η_o .

Un factor de 0,55 se considera bastante bueno. El coeficiente de área/disco de hélices tradicionales de 4 palas tiene poca trascendencia, por cuanto un valor alto sólo lleva a una resistencia extra en la propia hélice y tiene poco efecto en el resultado final [14].

Por tanto, se va a elegir una hélice de 4 palas con un factor área/disco de 0,55. Posteriormente se comprobará si la hélice elegida es susceptible a la cavitación.

➤ Coeficiente de potencia (B_p) y Coeficiente de Avance (δ)

Para utilizar el diagrama $B_p - \delta$ y determinar la hélice más adecuada se debe calcular el valor de B_p , conocido como coeficiente/factor de potencia (ocasionalmente la variable básica), y el valor de δ (delta), conocido como coeficiente de avance [15].

$$B_p = \frac{N \times \sqrt{SHP}}{V_A^{2.5}}$$

Donde:

SHP = potencia absorbida por la hélice en HP.

V_A = velocidad de avance de la hélice a través de la estela en nudos

$$V_A = V \times (1 - w) = 18,5 \times (1 - 0.208) = 14,66 \text{ nudos}$$

SHP es la potencia entregada a la hélice. Para estimarla se ha supuesto el rendimiento cuasi-propulsivo estimado en el apartado anterior y un margen de mar del 15%:

$$SHP = \frac{EHP}{\eta_D \times \eta_{mar}} = \frac{19612.4}{0,626 \times 0,85} = 36.830,55 \text{ kW} = 49.389,77 \text{ HP}$$

Por tanto:

$$B_p = \frac{75 \times \sqrt{36.830.55}}{14,66^{2.5}} = 17,50$$

Una vez obtenido el parámetro B_p , podemos entrar en el diagrama y obtener el parámetro δ , el rendimiento η_0 y el paso de la hélice:

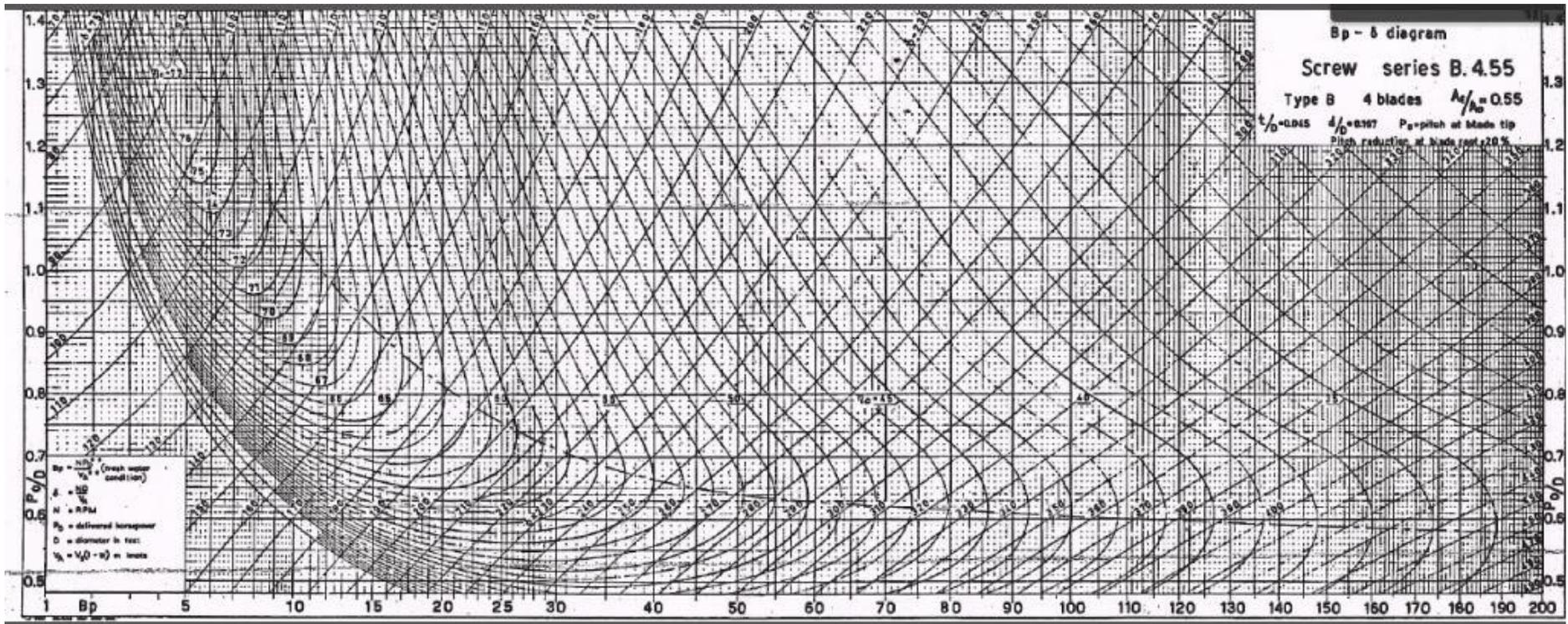


Figura 27. Diagrama B_p - δ serie Wgeningen B 4.55

Entrando en la gráfica con los parámetros anteriores se obtiene:

N (rpm)	B_p	δ	P_M/D_P	η_0
75	17,50	166	0,86	0,655

El nuevo rendimiento obtenido de la hélice en aguas libres, $\eta_o = 0.665$, permite obtener una nueva estimación del rendimiento cuasi-propulsivo que nos da:

$$\eta_D = \eta_H \times \eta_o \times \eta_r = 0,654$$

La potencia entregada a la hélice, SHP, con el nuevo rendimiento cuasi-propulsivo obtenido y un margen de mar del 15%:

$$SHP = \frac{EHP}{\eta_D} = \frac{19.612,39}{0,654 \times 0,85} = 35.306,66 \text{ kW}$$

Con este rendimiento cuasi-propulsivo, los SHP necesarios para conseguir la velocidad especificada disminuyen, haciendo necesario modificar el motor previamente seleccionado.

El ajuste del motor se considera correcto, dando la potencia necesaria para ir a la velocidad requerida en la especificación, con un margen de mar del 15%, funcionando entorno al 85% del CMCR. En el siguiente apartado se definirán las características del motor seleccionado.

➤ Diámetro de la hélice (D)

El valor δ determina el diámetro de la hélice, pero los gráficos Bp- δ reflejan los resultados de las pruebas de agua abierta sin el casco del buque delante de la hélice. Por consiguiente, tenemos que ajustar el valor de δ para reflejar la presencia del casco multiplicando

$$D = \frac{\delta \times V_A \times 12}{75} = 354,33 \text{ inch} = 8,64 \text{ m}$$

➤ Paso de la hélice (P)

La intersección de δ y Bp en el diagrama nos da una relación de paso de 0.86. Multiplicando esta relación (PM/DP) por el diámetro de la hélice, nos da el paso de la misma

$$P = 8,64 \times 0,86 = 7,43 \text{ m}$$

- Comprobar si existe cavitación

Finalmente, se debe comprobar si existe cavitación en la hélice, para ello:

- Determinar el área desarrollada por una hélice de 4 palas de 317,1 pulgadas de diámetro (8.05 m), con una relación $A_D/A_0 = 0,55$:

$$Ad = \pi \times \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times \frac{A_D}{A_0}$$

Por tanto:

$$Ad = \pi \times \left(\frac{8.64}{2}\right)^2 \times 0,55 = 38,12 \text{ m}^2$$

- Determinar la carga máxima permitida.

$$PSI = 1,9 \times V_A^2 \times Ft^{0.08}$$

Donde:

PSI = Presión en la que es probable que comience la cavitación en libras por pulgada.

Ft = Profundidad de inmersión de la línea central del eje, durante operación, en pies. (se estima Ft=26ft)

Por tanto:

$$PSI = 1,9 \times 14,66^{0.5} \times 26^{0.08} = 9,44 \text{ PSI} = 65.086,32 \text{ N/m}^2$$

- Determinar carga soportada por la hélice seleccionada:

$$PSI = \frac{326 \times SHP \times \eta_0}{V_A \times A_D}$$

Despejando se obtiene:

$$PSI = \frac{326 \times 35.306,66 \times 0,655}{14,66 \times 64.094,25} = 8,02 \text{ inch} = 55.331,77 \text{ N/m}^2$$

Al ser la carga real inferior a la carga máxima permitida, es poco probable que experimente cavitación.

➤ Características de las palas de la hélice

Se han utilizado las figuras que da el canal holandés de Wagenigen para la forma de las palas de la hélice. Estas formas están en función de la relación del área desarrollada de la hélice elegida, en nuestro caso la serie 4-55. Esto quiere decir que es para una hélice de 4 palas con una relación del área desarrollada de 0,55.

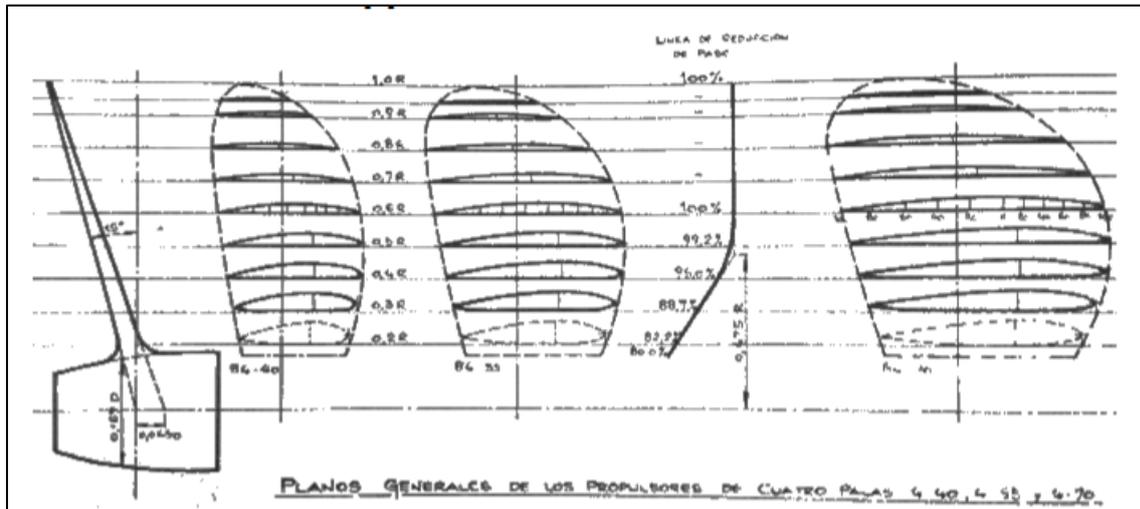


Figura 28. Modelo de palas canal Wageningen

Para conocer la longitud de la pala, primero debemos conocer el diámetro del núcleo de la hélice:

$$D_{hub} = 0,167 \times D = 0,167 \times 8,64 = 1,44m$$

Una vez hallado el diámetro del núcleo, obtenemos la longitud de las palas:

$$L_p = \frac{D - D_{hub}}{2} = \frac{8,64 - 1,44}{2} = 3,6m$$

Teniendo la longitud de la pala de la hélice y el área de cada una de ellas se puede obtener el ancho de estas.

$$A_p = \frac{Ad}{4} = \frac{38,12}{4} = 9,53 m^2$$

Una vez que se tiene el área de cada pala, con la longitud de la pala se puede estimar lo que será el ancho medio de la pala:

$$MW = \frac{A_p}{L_p} = \frac{9,53}{3,6} = 2,65m$$

Finalmente, queda definida la hélice y la potencia necesaria para instalar de una manera más precisa.

3.8. Selección preliminar del motor principal

La elección de una planta propulsora de un sólo motor presenta grandes ventajas. Partiendo de la base de que un motor de una potencia determinada es siempre más económico, a igualdad de calidades, que dos motores con la mitad cada uno de la potencia del anterior. Esto también sucede con los costes de transporte, instalación y mantenimiento, ya que, al haber más números de partes móviles, hay más piezas que mantener o sustituir.

En el mercado, los dos grandes fabricantes de motores lentos dual fuel son MAN y Wärtsilä, con los modelos ME-GI del primer fabricante que utilizan inyección de gas de alta presión, y los X-DF del segundo, utilizando la inyección de gas a baja presión.

Se ha elegido los motores X-DF de Wärtsilä ya que, al ser la inyección de gas a baja presión, los costes iniciales como los costes operativos son bastante más bajos. Esto se debe a que no requiere un compresor accionado eléctricamente de alta presión, reduciendo así considerablemente el consumo de energía inherente a estos motores, en comparación con aquellos donde la inyección de gas en la cámara de combustión se realiza a alta presión con diferentes proporciones de combustible líquido.

Wärtsilä ofrece una amplia gama de motores diésel lentos dual fuel, cubriendo un rango de potencia, diámetro y velocidad de 2,5 a 73,5 MW, 350 a 920 mm y 58 a 167 rpm, respectivamente. [15]

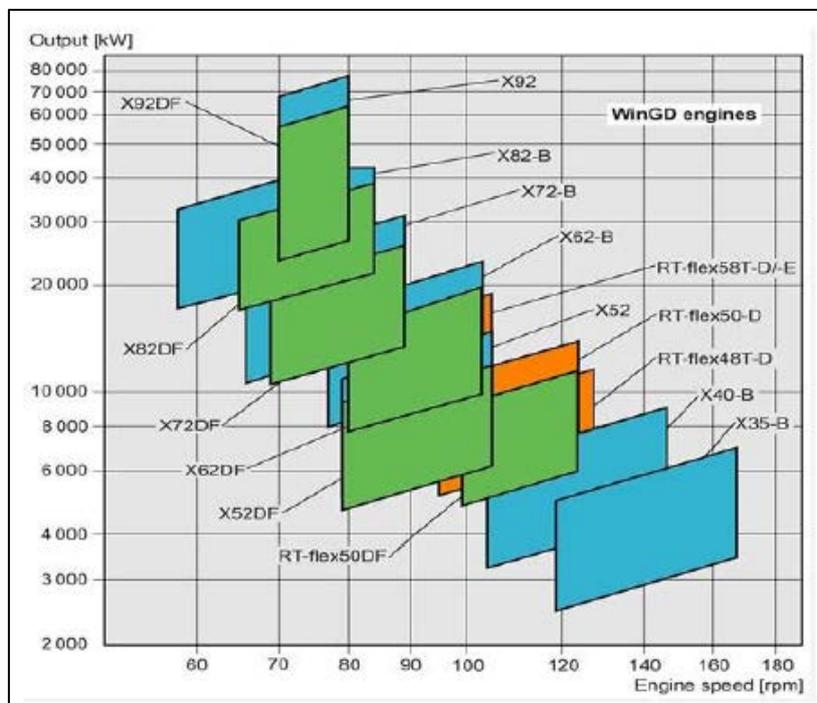


Figura 29. Catálogo 2017 Wärtsilä

Para seleccionar el motor principal, se ha utilizado un pequeño programa de la compañía Win GD, que ayudará bajo una fácil interface a la selección del motor a partir de los parámetros de potencia calculados anteriormente.

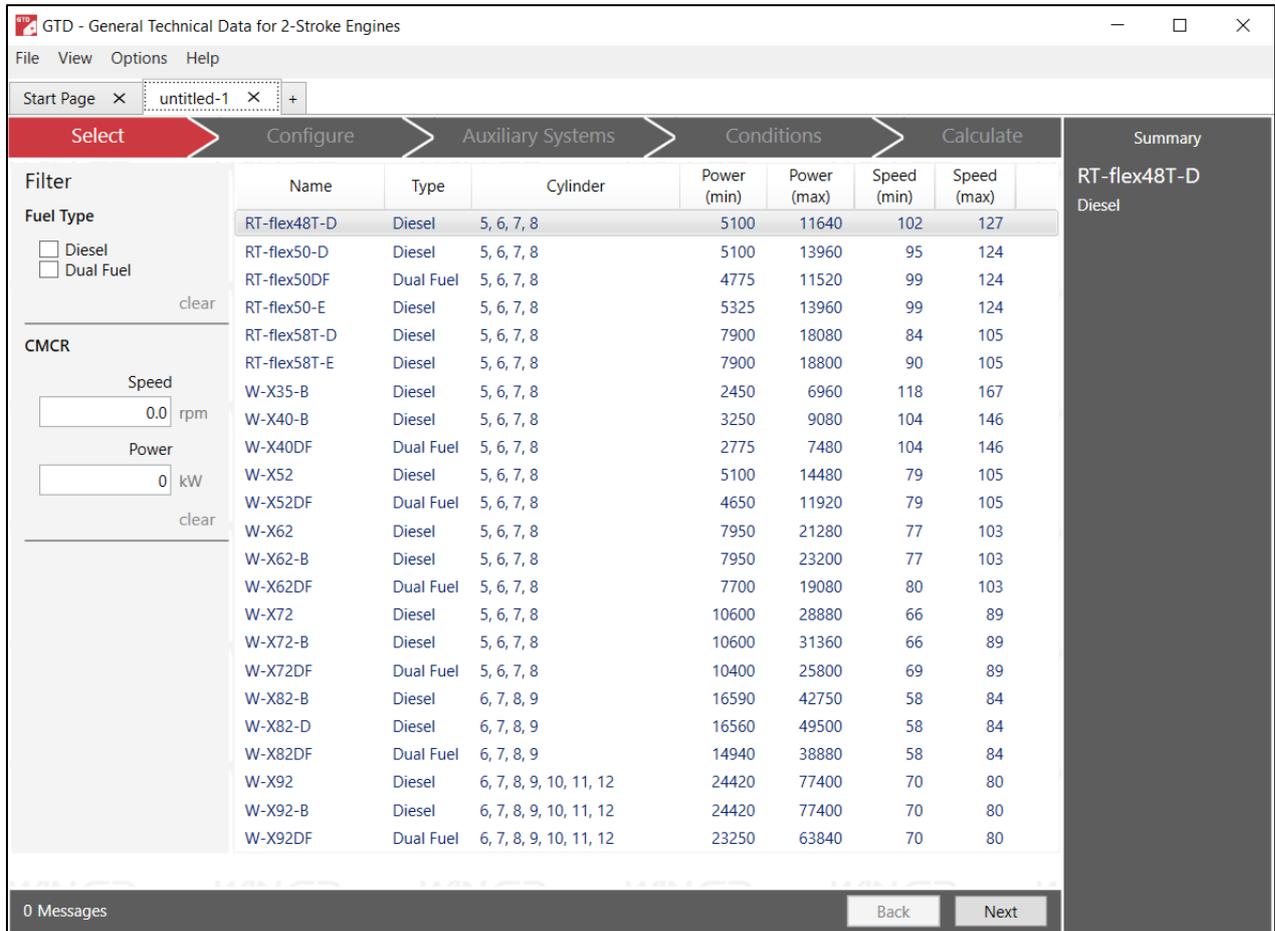


Figura 30. Interface software GTD – WindGD

Seleccionando una tipología de motores duales y una potencia necesaria de 35306,66 kw, aparecen únicamente dos motores entre los que seleccionar.

En el primero de ellos, se puede ver que la potencia del buque de proyecto es muy próxima a la potencia máxima que puede dar el motor en su versión más grande con 9 cilindros.

En el segundo caso, se puede observar que la potencia máxima del motor que puede dar con 12 cilindros está muy por encima de la necesaria.

Por tanto, con motivo de reducir en lo posible el número de cilindros del motor, ya que de esta manera se reducirá el empacho del motor, así como los costes de operación, mantenimiento y servicio del mismo, se seleccionará el segundo motor de modelo W-X92DF.

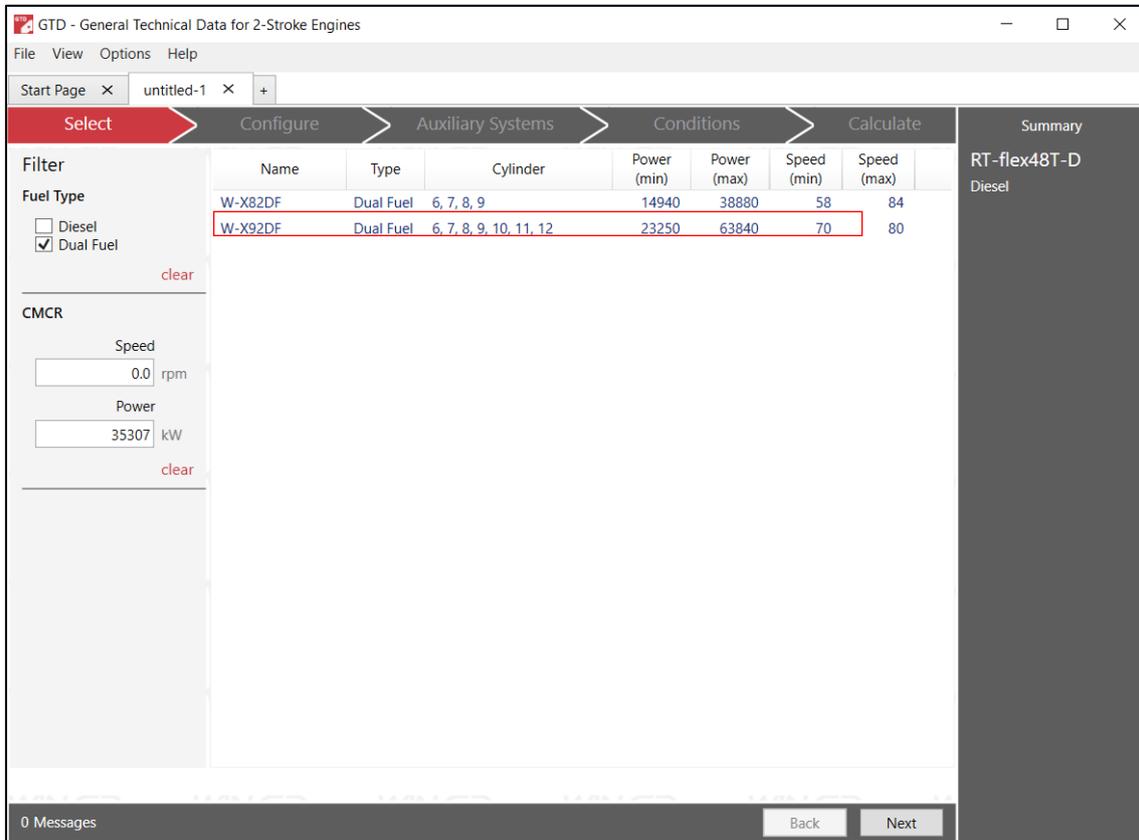


Figura 31. Selección del modelo del motor.

Una vez se ha seleccionado el modelo de motor, se pasa a configurar el número de cilindros para ajustarlo a la potencia deseada. En este caso, se ve que el valor más próximo por encima del MCR deseado es 42560 kW operando al 100% de la capacidad con un total de 8 cilindros.

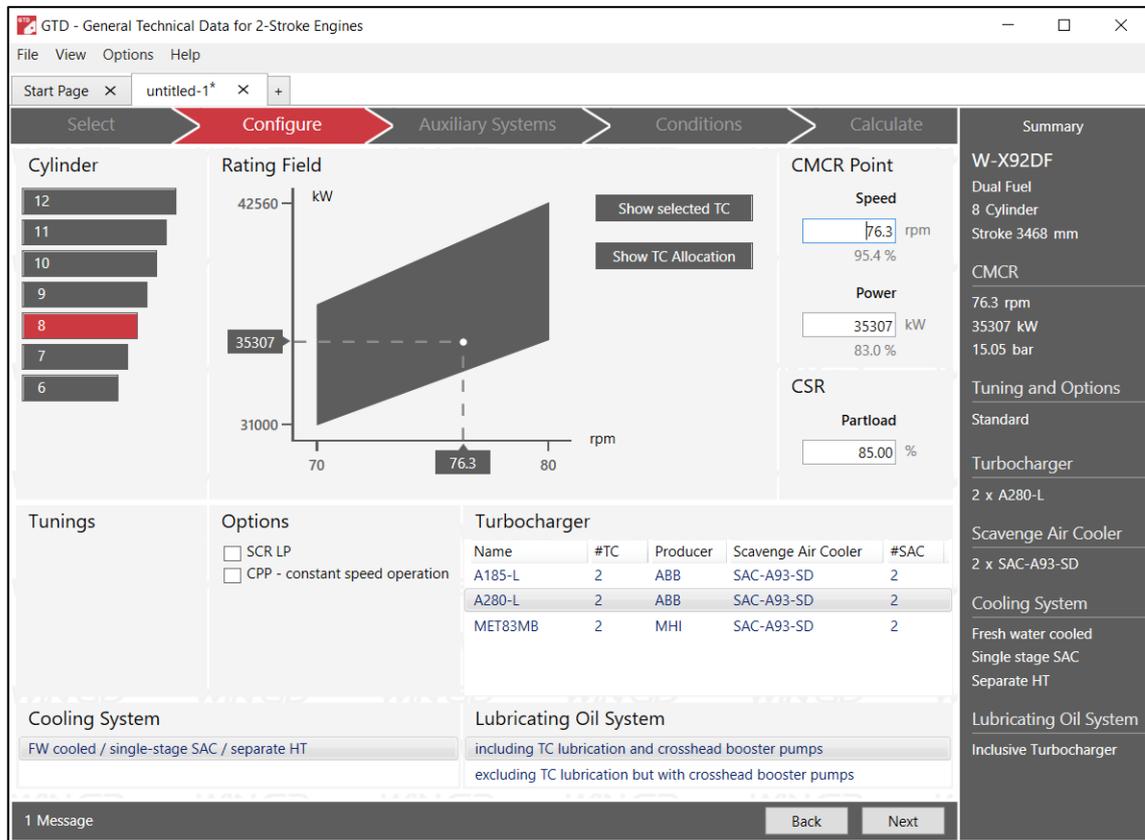


Figura 32. Selección del modelo del motor.

Como la potencia máxima de servicio del motor es de 42560 kW, es conveniente reducir la potencia del motor para que este opere a un régimen de potencia inferior al 100% y mejorar en las condiciones normales de operación con un mejor rendimiento, optimizando así el consumo específico del motor.

De modo que el derrateo (reducción de potencia de serie del motor) que se le va a realizar es del 15%, quedando así posible que el motor cubra la demanda de la potencia de servicio al 85% de la capacidad máxima del mismo. Ofreciendo así un total de:

$$BHP_{nuevo} = MCR_{real} \times derrateo = 42560 * 0.85 = 36176 \text{ kW}$$

Se comprueba que existe un pequeño margen entre la potencia de servicio necesaria real, y este nuevo que podría dar el motor con el derrateo al 85% de la capacidad máxima operativa. Por lo que está muy bien ajustado a la potencia necesaria.

El resto de las posibles configuraciones que ofrece este software no serán de uso en este apartado, ya que no son objeto de este proyecto.

A continuación, se muestra la curva de operación (mostrada en el anexo I) del motor una vez derrateado:

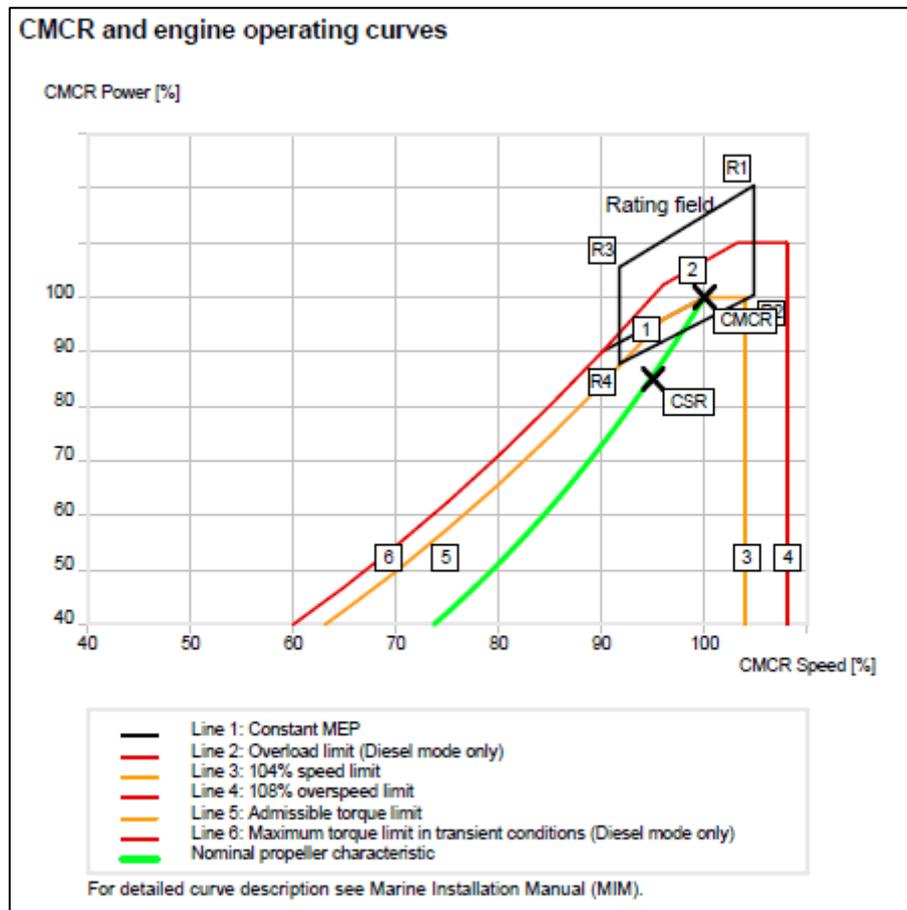


Figura 33. Características de operación del motor W7X92DF.

De esta forma queda definido el motor principal que llevará el buque, así como las características de operación del mismo.

Se recuerda que al no ser objeto de este proyecto el cálculo de los propulsores, el motor quedará definido mediante los cálculos anteriores.

3.9. Conclusiones

En este capítulo se ha visto en una primera parte el desarrollo necesario para la estimación de parámetros a partir de una base de datos.

Cabe destacar, tal y como se ha mencionado, que se ha considerado la base como significativa de la muestra como base para los cálculos posteriores.

Para la estimación de las dimensiones principales y coeficientes se han utilizado modelos de regresiones lineales que relacionaban de manera independiente el volumen de carga con cada una de las variables que se quería estimar, de esta manera se ha podido calcular de forma sencilla los parámetros de eslora, eslora entre perpendiculares, manga, puntal, calado de diseño y desplazamiento para nuestro buque de proyecto; así como los coeficientes de formas del mismo.

Una vez se han obtenido estas características, nos hemos apoyado en un software para la generación de formas y poder así estimar de forma sencilla la resistencia al avance mediante el método de Holtrop. No obstante, se ha decidido realizar de forma separada los cálculos por distintos métodos y comprar las potencias obtenidas.

Finalmente, por sencillez y fiabilidad en los cálculos, se ha tomado la potencia necesaria para el sistema de propulsión a partir de Holtrop, y mediante la cual se ha seleccionado un motor dual capaz de satisfacer las necesidades de nuestro buque.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



CAPÍTULO 4:

DIMENSIONAMIENTO MEDIANTE MATLAB

4.1. Objetivos

El objetivo de este capítulo es desarrollar una herramienta que, a partir de la base de datos de origen, poder estimar rápidamente en un futuro los valores de las dimensiones principales y coeficientes para un buque de transporte LNG.

Con motivo del tamaño de la base datos, se desarrollará un método para poder realizar un modelo capaz de parecerse una población más grande de buques de buques lo mejor posible, y definir así la complejidad (grado del polinomio) de la función subyacente, para después realizar un estudio de la base de datos mediante regresiones. Para ello, se utilizarán los métodos estadísticos necesarios para el desarrollo de este modelo.

Además, se mostrará en una sencilla interfaz gráfica la posibilidad de estimar los parámetros de dimensionamiento de un buque LNG a partir del volumen de carga y la velocidad.

4.2. Tamaño de la muestra. Base de datos

El determinar el tamaño de una muestra representa una parte esencial del método científico para poder llevar a cabo una investigación.

La muestra tiene el objeto de conseguir datos del total de una población con la ventaja de la eficiencia, considerando el tiempo y reducción de costes del estudio. De manera que, seleccionando a un reducido grupo de la población de estudio, y aplicando sobre el la investigación, los datos resultantes sean representativos de toda la población de estudio, es decir que los datos obtenidos del estudio de la muestra se puedan extrapolar en la medida de lo posible a toda la población.

En nuestro proyecto, se ha recogido una base de datos de un total de 21 buques para el transporte de LNG. Como se ha visto en el Capítulo 2 de este proyecto, a partir de esta muestra que se ha considerado representativa, se han estimado las dimensiones principales de nuestro buque de proyecto.

A fecha de principios de 2018 había un total de 478 buques operando para el transporte de LNG [16], pero la dificultad para recopilar la información necesaria para recoger todas las características principales que definen estos buques, ha hecho que las estimaciones realizadas para el cálculo de las dimensiones principales se hagan con una muestra de datos bastante pequeña.

No disponemos de datos suficientes para estimar el tamaño muestral óptimo para que la muestra sea suficientemente representativa de la población subyacente y no suponga un sesgo en cuales quiera de las características presentes en la misma, llevando así a un mal proceso de aprendizaje. Por lo cual, utilizaremos todos los datos disponibles.

A la hora de realizar una estimación de una serie de características a partir de los datos recogidos en la muestra, será necesario disponer del mayor número de datos posibles en la misma con el fin de que esta sea lo más representativa posible de la población real.

Cuando se realizan tareas de estimación, el objetivo principal es el de reducir el riesgo de predicción de nuestro modelo, el cual es una medida que nos indica en que cantidad erra nuestro modelo de predicción; y el cual a priori es desconocido. Por esa misma razón, para esta tarea se utilizan los estimadores del riesgo de predicción.

Existen muchos, pero para este trabajo se usarán principalmente dos.

- **Error empírico:** es un estimador optimista del riesgo de predicción, ya que la estimación del riesgo de predicción se realiza usando el error definido para nuestro problema y generando nuestro modelo con unos datos, para posteriormente validarlo con los mismos. Esto lo que ocasiona es que el modelo se haya entrenado con una población representante al 100% de la población con la que se comprueba su eficacia, dando como resultado valores muy optimistas del riesgo de predicción estimado.
- **Error de generalización:** es un estimador mucho menos optimista que el anterior, pues se genera el modelo a partir de unos datos, y posteriormente se valida con otros distintos, simulando así la situación real a la que nos enfrentamos, es decir, tenemos una muestra, que es una porción de la población subyacente con la que obtendremos el modelo que a posteriori trabajará con la población real.

Para poder realizar un modelo de predicción que funcione correctamente, es necesario que la muestra con la que se trabaje sea lo suficientemente representativa de la población original. En nuestro caso, al disponer de sólo 21 barcos, nos hallamos en una posición algo desventajosa. Por esta misma razón, se recurrirá a métodos que nos permitirán simular una muestra mayor a partir de la disponible, evitando en medida de lo posible el sesgo generado.

4.3. Métodos de remuestreo

Los métodos estadísticos clásicos se apoyan en modelos matemáticos de naturaleza estocástica, de tal forma que los resultados que de ellos se derivan requieren, en muchas ocasiones, complejos desarrollos analíticos, lo que ha supuesto un obstáculo para su utilización comprensiva en muchas áreas científicas.

Además, dichos desarrollos se basan en hipótesis que algunas veces no son soportadas por los datos o se obtienen resultados asintóticos que no son válidos cuando el tamaño muestral no es suficientemente elevado.

Los métodos de remuestreo (*resampling methods*) se basan en extraer muestras repetidamente a partir de un set de datos de entrenamiento, ajustando el modelo de interés para cada muestra. Se trata de métodos no paramétricos, que no requieren ninguna asunción sobre la distribución de la población.

Dos de los métodos más utilizados de remuestreo son la validación cruzada (*cross-validation*) y el *bootstrap*:

- **Validación cruzada:** puede aplicarse para estimar el test error asociado a un determinado método de aprendizaje estadístico (tanto regresión como clasificación) para evaluar el rendimiento del modelo (*model assessment*), pero también para seleccionar niveles apropiados de flexibilidad, como el grado de polinomio, etc. (*model selection*), usando el *test error rate*.
- **Bootstrap:** se puede usar en muchos contextos (como para el cálculo de la significancia estadística), comúnmente se aplica a la evaluación de la precisión de la estimación de parámetros de un determinado modelo de aprendizaje estadístico (error estándar, intervalos de confianza...).

Efron (1979) introduce la metodología Bootstrap para estimar las distribuciones de algunos estadísticos cuando el tamaño muestral es pequeño o las expresiones de dichas distribuciones son analíticamente intratables. Desde entonces numerosos autores han desarrollado métodos Bootstrap para diversos procedimientos inferenciales, tales como modelos de regresión, datos censurados, construcción de intervalos de confianza, estimación de parámetros, etc.

Los métodos de resampling o remuestreo se basan en la reproducción de los datos originales mediante diferentes métodos estadísticos. Si nuestras observaciones tienen una estructura de dependencia, ésta debe estar reflejada en los nuevos datos. Por lo tanto, los métodos variarán en función de la estructura temporal existente y como ésta se refleje en el objetivo a perseguir: estimación o predicción.

4.4. Método de Bootstrap

El bootstrap, es un modelo de método de remuestreo para estimar o aproximar la distribución muestral del estadístico o sus características. El bootstrap se basa en el principio de sustitución y en la aproximación numérica.

Los métodos bootstrap son una clase de métodos Monte Carlo no paramétricos que pretenden estimar la distribución de una población mediante remuestreo. Los métodos de remuestreo tratan una muestra observada como una población finita, y generan muestras aleatorias a partir de ella para estimar características poblacionales y hacer inferencia sobre la población muestreada [17].

La principal utilidad del empleo del Bootstrap es reducir el sesgo dentro de análisis o, en otras palabras, aproximar la varianza gracias a la realización de remuestreos aleatorios de la muestra inicial y no de la población. De este modo se hace más sencillo la construcción de modelos estadísticos mediante la creación de intervalos de confianza y contrastes de hipótesis [18].

El método Bootstrap consiste, si tenemos una muestra de tamaño N , en generar un gran número de muestras de tamaño N efectuando un muestreo con reemplazamiento de esos valores. Es como si metiésemos los valores en una urna, extraemos una papeleta, anotamos el resultado, y volvemos a colocarlo en la urna, y así hasta obtener N valores.

En esa muestra calculamos el valor del parámetro que estamos estimando. Y así repetimos el proceso un gran número Z de veces, con lo que obtenemos una distribución de valores para el parámetro en la que podemos calcular su dispersión (análogo del error estándar) y determinar unos límites de confianza utilizando esa distribución.

Aunque pueda parecer una práctica muy compleja a priori, el procedimiento en que se basa el Bootstrapping es simplemente la creación de un gran número de muestras reposicionando los datos tomando como referencia una muestra poblacional inicial. Esta técnica resulta especialmente útil en aquellas situaciones en las que las muestras con las que se cuenta son pequeñas o, como se dijo antes, si la distribución es muy sesgada. En ese sentido, ayudan a la resolución de multitud de problemas de probabilidad y estadística aplicada [18].

Una de las principales características de esta práctica es que supone un remuestreo posterior para poder obtener expresiones cerradas y solucionar la complejidad matemática de estas operaciones. Con el desarrollo de los ordenadores y herramientas tecnológicas en los últimos años se ha hecho más fácil poder contar con el uso del Bootstrapping para remuestreos complejos [18].

La técnica del remuestreo permite ir más allá a la hora de estudiar muestras de datos de una determinada población. En otras palabras, permite hacer o crear nuevos supuestos sustituyendo valores de la muestra adicionales.

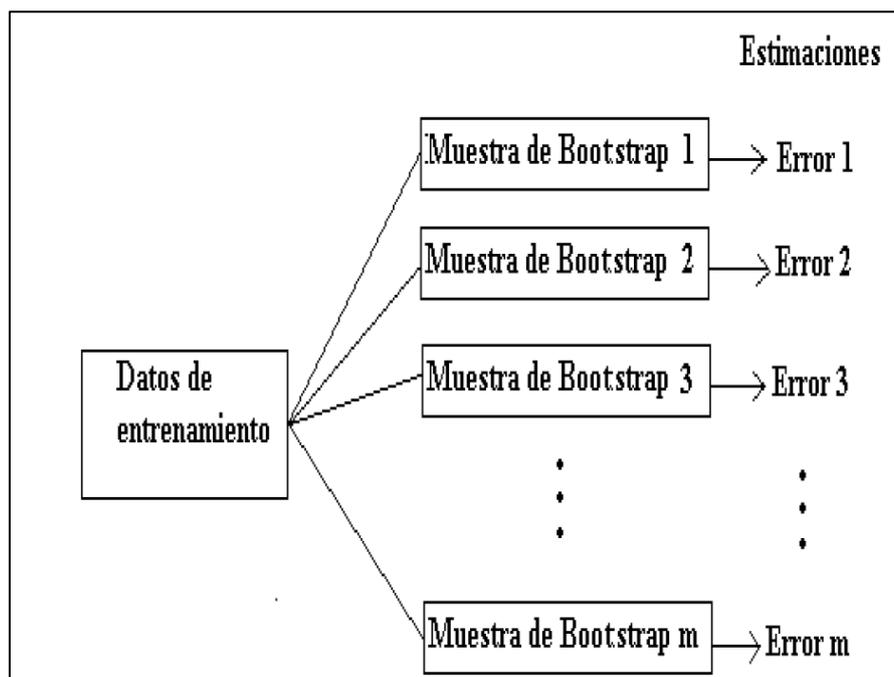


Figura 34. Esquema del método Bootstrap

El sesgo se corrige mediante las siguientes expresiones [19]:

$$\sigma_{V,Boot} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_V(i)$$

$$\sigma_{V,0.632 Boot} = 0.368\sigma_C + 0.632\sigma_{V,Boot}$$

La finalidad del bootstrapping como método de remuestreo aplicado al presente proyecto será la de obtener el grado de complejidad necesario para estudiar posteriormente mediante regresiones, de ese grado, las relaciones pertinentes entre el volumen de carga y los distintos parámetros que se quieren evaluar.

4.5. Tipos de ajuste de regresión

El análisis de regresión es una técnica usada para modelar la relación entre variables. Se desea establecer como una o varias variables dependientes se comportan respecto a una o más variables independientes [20].

Existen diversos métodos por los cuales definir una función subyacente que se aproxime a la relación entre las variables objeto de estudio. Dependiendo del grado del polinomio que se ajuste la complejidad del ajuste será mayor o menor.

Los ajustes de regresión suelen ser:

4.5.1. Ajuste por mínimos cuadrados

Dados un conjunto de pares ordenados, variable independiente, variable dependiente y una familia de funciones, se intenta encontrar la función continua, dentro de dicha familia, que mejor se aproxime a los datos (un "mejor ajuste"), de acuerdo con el criterio de mínimo error cuadrático[20].

$$\sum_{i=1}^N (y_i - \phi(x_i))^2 = \text{Mínima}$$

Definiéndose el error cuadrático como:

$$E_C(f) = \frac{\sum_{k=1}^n (e_k)^2}{n}$$

4.5.2. Ajuste lineal

Aquel proceso en el que la función subyacente que se ajusta al modelo es una recta, y por tanto satisface a la siguiente expresión:

$$f(x) = ax + b$$

4.5.3. Ajuste cuadrático

Si predecimos la variable y mediante una parábola de ecuación general:

$$y = a + bx + cx^2$$

4.5.4. Ajuste exponencial

Si predecimos la variable mediante una función exponencial de ecuación general:

$$y = ae^{bx}$$

4.5.5. Ajuste potencial

Una regresión exponencial es el proceso de encontrar la ecuación de la función exponencial que se ajuste mejor a un conjunto de datos.

Como resultado, se obtiene la siguiente ecuación del tipo:

$$y = ab^x$$

Donde $a \neq 0$.

4.6. Estimación de las dimensiones principales a partir de la muestra

Debido a la necesidad de aumentar la muestra o base de datos en la que se ha recogido una lista de buques para el transporte de LNG y en donde se muestran características de las dimensiones principales, se ha aplicado, aprovechando el potencial de Matlab, el método de Bootstrap para seleccionar el grado de complejidad necesario para posteriormente, utilizando la base de datos de partida, estimar las dimensiones principales para un buque de 174.000m³; siendo esta la capacidad que se ha definido para el buque de proyecto.

De esta forma, se conseguirá aumentar el tamaño de la muestra con el objetivo de que el estudio mediante regresiones de las dimensiones principales y a partir únicamente del volumen de carga, sea lo más fiable posible. Es por ello, que se ha aplicado un método de remuestreo previo para lograr este fin.

La recopilación del algoritmo implementado en Matlab se muestra en el Anexo II de este proyecto, donde se podrá ver aquello que se considere necesario sobre la aplicación del método.

La implementación de los algoritmos en Matlab se ha dividido en dos partes: estudio de la complejidad y estimación de los parámetros a partir de la base de datos.

➤ **Estudio de la complejidad.**

Se ha realizado es un estudio de la complejidad, mediante el cual estimamos la forma de la función subyacente por la cual se rigen los datos de la población real. Para ello nos basamos en el error de generalización.

El experimento consistirá en realizar diferentes regresiones con polinomios de distinto grado, de 1 a 3, y en las que se ha aplicado el método Bootstrap para ampliar los datos de la muestra original y poder disponer de un total de 25 muestras aleatorias basadas en esta muestra original.

Durante este proceso, se obtendrá un total de 25 muestras aleatorias que han sido formadas remplazando (de forma aleatoria) en cada iteración el 70% de los datos, con datos aleatorios de la muestra original. De esta manera, se consigue disponer de varias muestras similares a la original, sin modificar demasiado la información que contenía la primera de ellas.

Se realizan una serie de regresiones desde grado 1 hasta grado 3 con cada una de las 25 muestras, y en las cuales se entrena con un 70% de los datos y se valida con el restante; obteniendo así un error de validación (MSE^1) y generalización de cada una de ellas.

Una vez se han calculado los errores de cada muestra y en cada grado de regresión, estos se almacenan para su posterior visualización en una gráfica. Gracias a ella, se podrá comprobar cuál es el menor de los grados de los polinomios necesario para el modelo, y que se supondrá como función subyacente de la población original.

Este proceso se basa en una suposición inicial, en la cual supondremos que la función subyacente desconocida pertenece a una de las familias de funciones aproximadoras usadas.

Como existe un sesgo entre la muestra original y la nueva aleatoria, tal y como se ha comentado en el apartado anterior, este sesgo ha de corregirse mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma_{V,Boot} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sigma_V(i)$$

$$\sigma_{V,0.632 Boot} = 0.368\sigma_C + 0.632\sigma_{V,Boot}$$

¹ MSE: Mean Square Error

Como resultado de la implementación del método de Bootstrap bajo los algoritmos en Matlab, se comprueba que la complejidad o grado óptimo de ajuste para el modelo que mejor representa la población de buques es de grado 1, tal y como se muestra en la figura 35; por tanto, se utilizarán regresiones lineales para la estimación de la base de datos.

Se comprueba, además, de esta forma, que el modelo de regresiones utilizado en Excel es adecuado para nuestra población.

A continuación, se muestra la gráfica con los grados de complejidad y los errores cometidos.

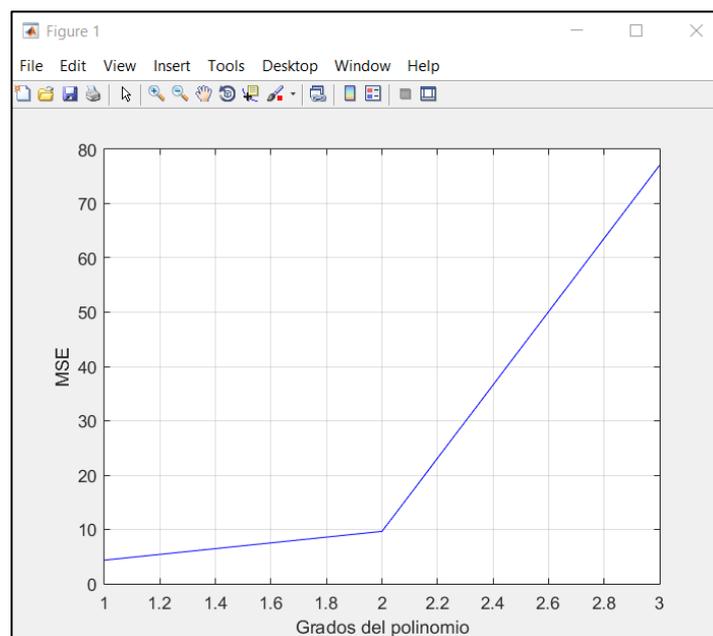


Figura 35. Estudio de la complejidad

Como se puede observar en la imagen, el mejor grado que representa al modelo, es el grado 1, siendo por tanto una regresión lineal.

Cabe mencionar que, al visualizar las muestras de la población de datos en gráficas, lo lógico sería pensar que la función subyacente fuera una función compleja, sin embargo, al comprobar que el resultado del experimento es de grado 1, puede resultar curioso, pero esto correcto. Al tener una muestra tan pequeña, es fácil reconocer que el modelo seleccionado sea el más sencillo, ya que, con tan pocos datos, apenas se pueden apreciar los detalles de la función subyacente.

➤ **Estimación de los parámetros a partir de la base de datos**

Una vez ha calculado el valor del sesgo, este se aplica a la muestra original y se hace una regresión lineal (ya se conoce el grado de complejidad adecuado) de la que finalmente se obtendrán los coeficientes de la misma, y que nos servirán para las futuras estimaciones de datos.

Finalmente, y como se ha realizado en el Capítulo 2 de este proyecto, el objetivo es dimensionar un buque LNG sabiendo que tiene un volumen de carga de 174.000m^3 y que navegará a una velocidad de diseño de 18.5 nudos.

Por tanto, una vez se conocen los coeficientes de nuestro modelo de regresión, y a partir del dato de partida del volumen de carga, Matlab puede generar de forma sencilla los parámetros de las dimensiones principales y coeficientes de nuestro buque de proyecto.

A continuación, se mostrarán las regresiones lineales obtenidas para cada una de las características que se pretenden estimar, siendo estas:

- Eslora total
- Eslora entre perpendiculares
- Manga
- Puntal
- Calado de diseño
- Desplazamiento

De manera que, se obtiene mediante Matlab las siguientes gráficas:

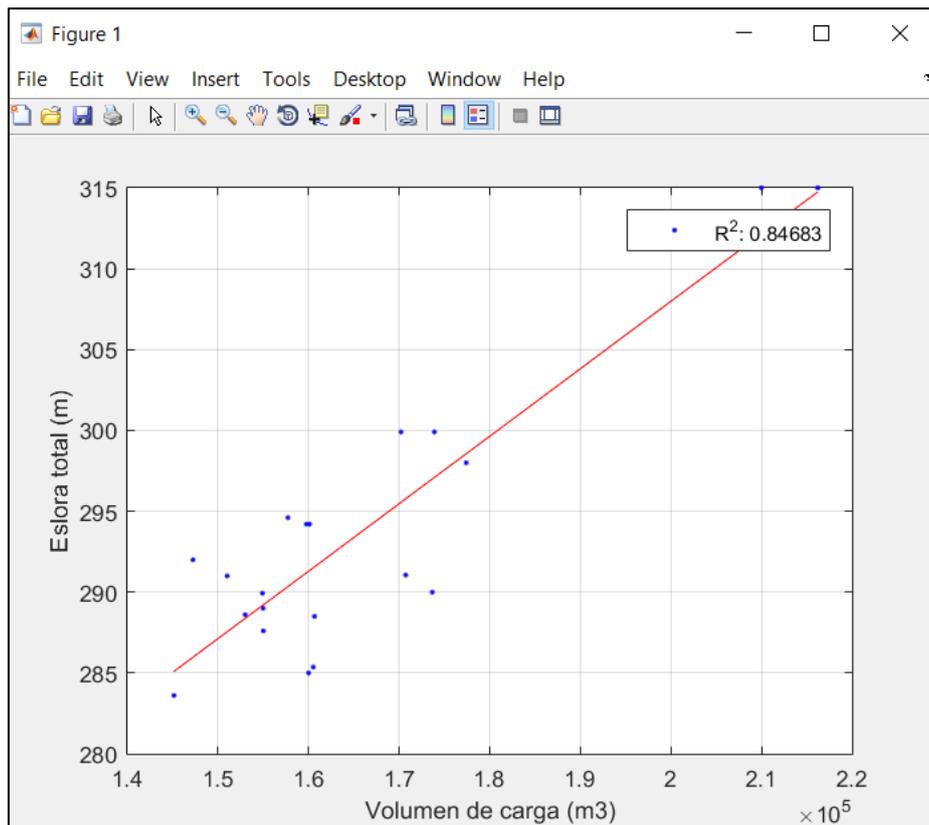


Figura 36. Relación entre el Volumen de carga y la eslora total

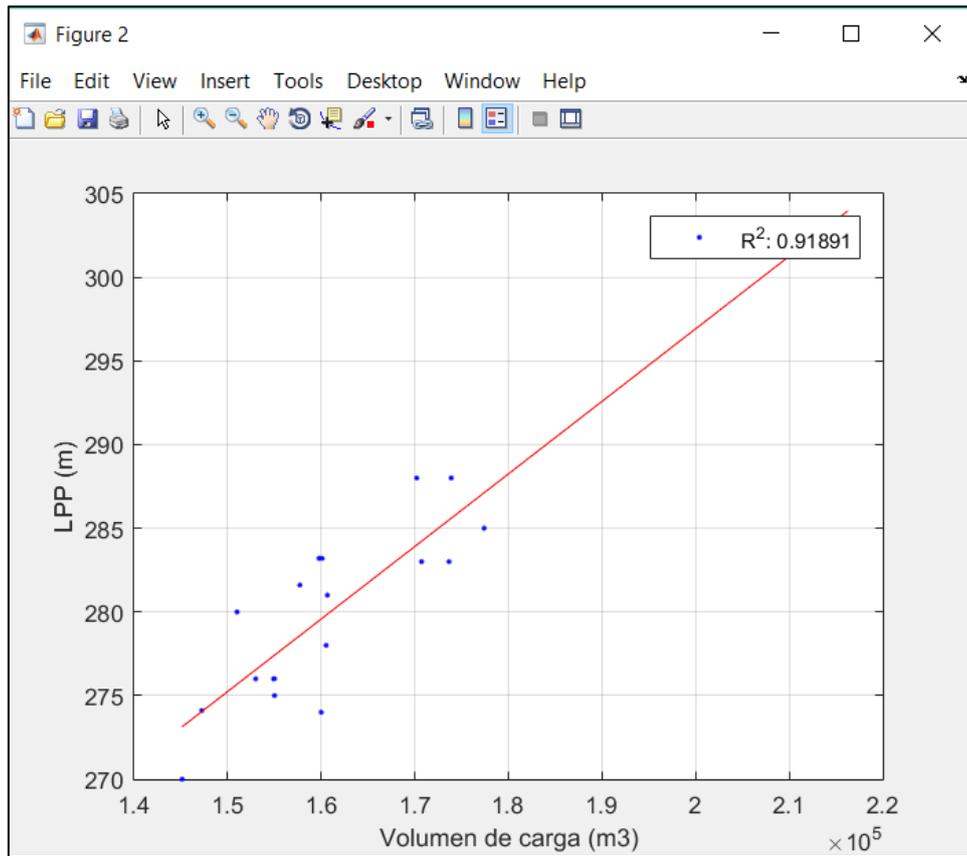


Figura 37. Relación entre el Volumen de carga y la LPP

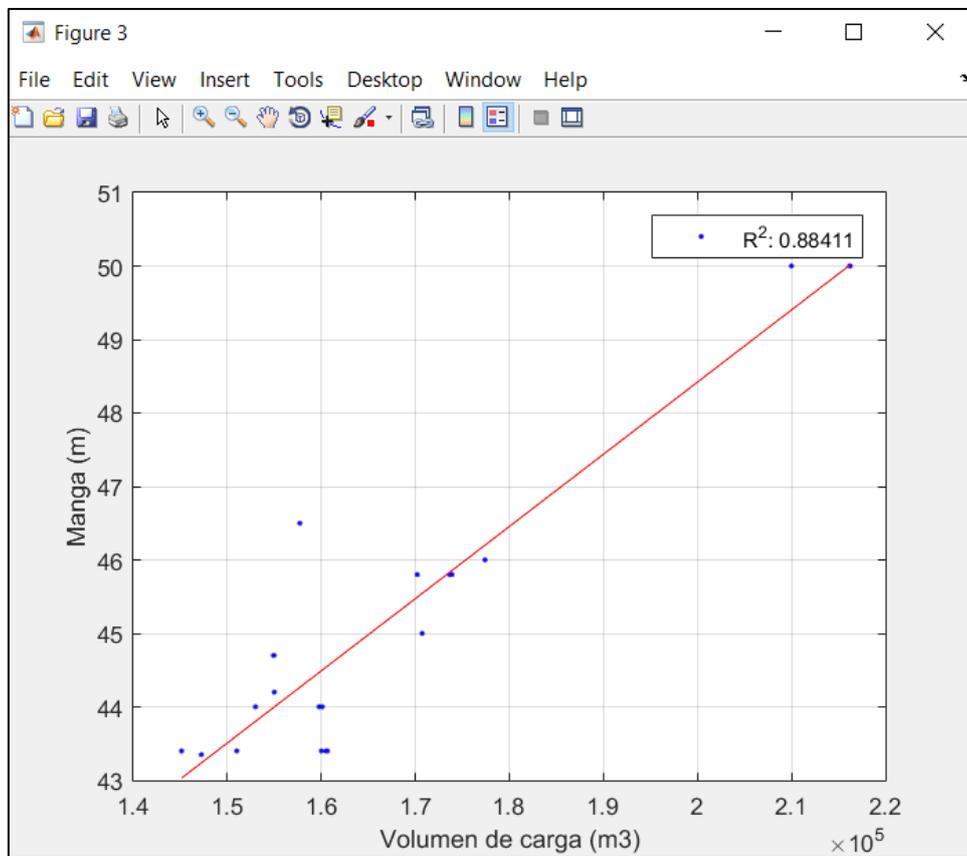


Figura 38. Relación entre el Volumen de carga y manga

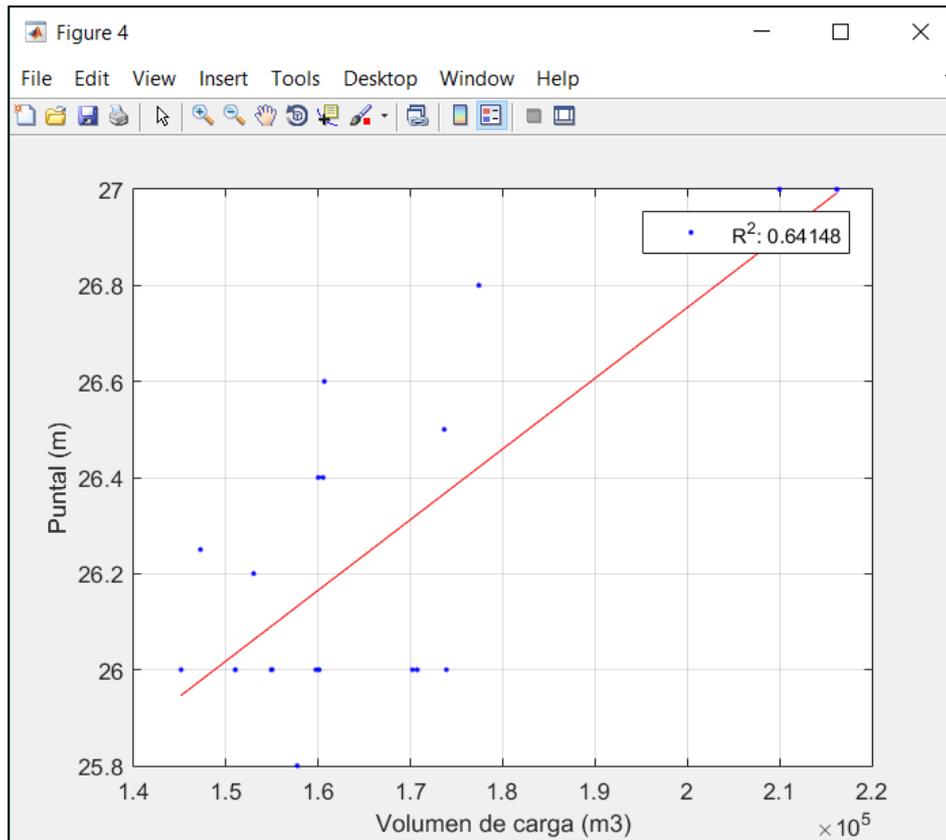


Figura 39. Relación entre el Volumen de carga y el puntal

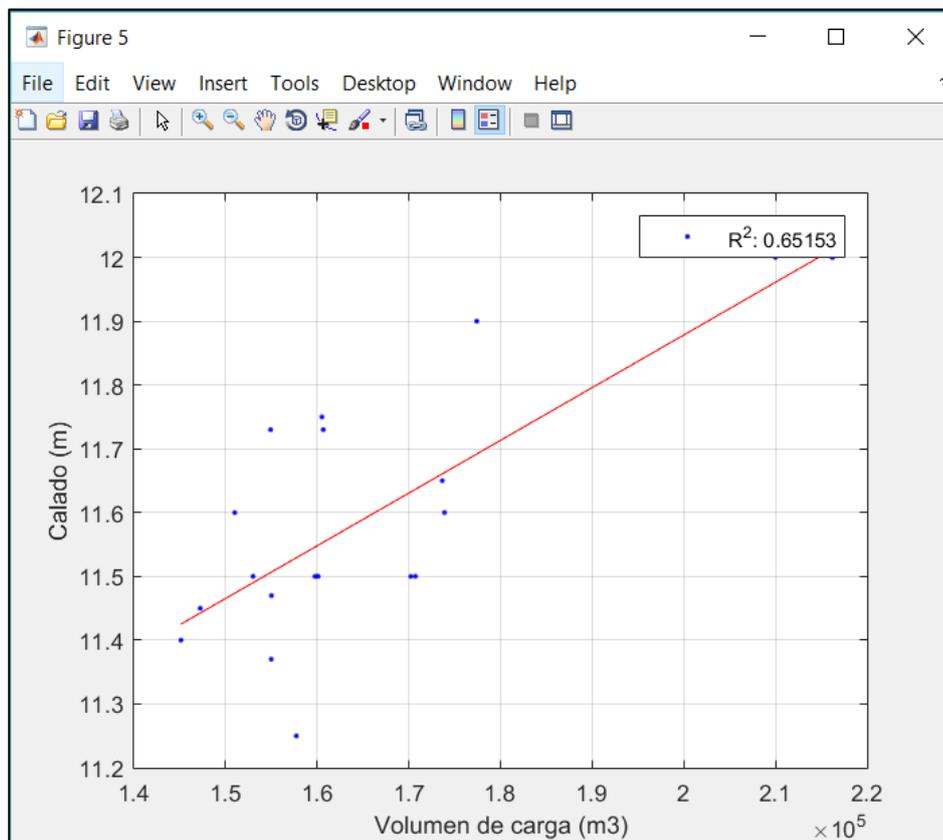


Figura 40. Relación entre el Volumen de carga y el calado

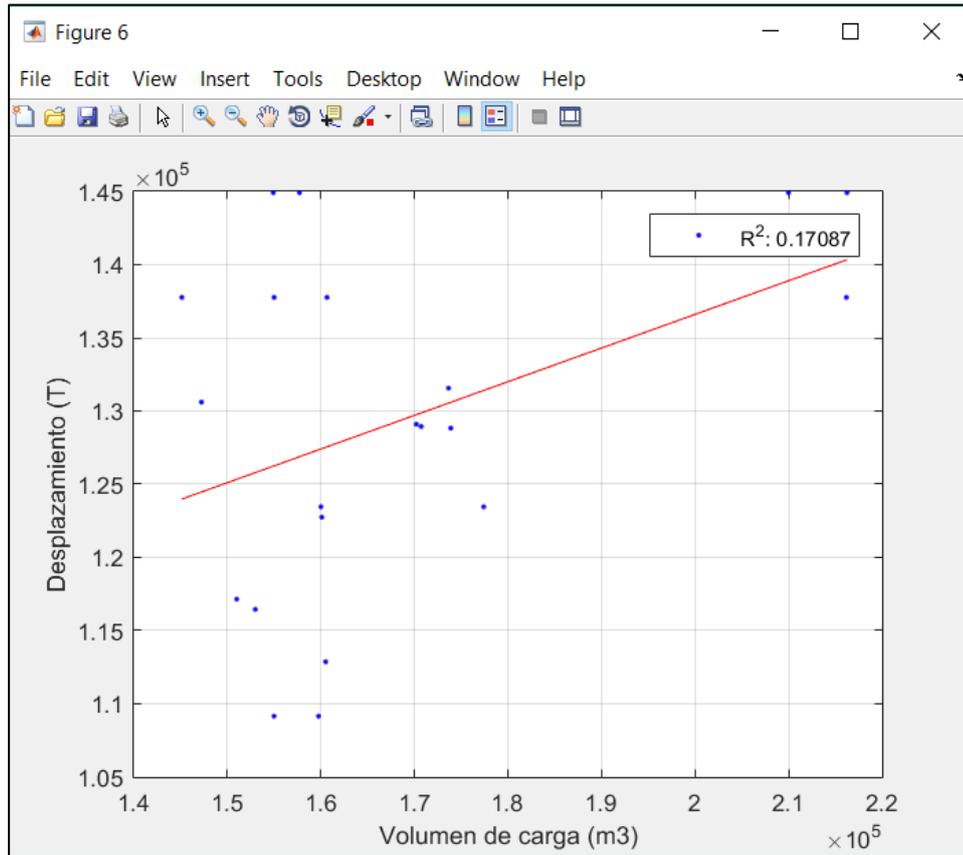


Figura 41. Relación entre el Volumen de carga y el desplazamiento

Como se ha podido observar en las gráficas anteriores, se ha realizado con el fin de estimar las dimensiones principales del barco, una serie de rectas de regresiones lineales y producto de un análisis de la base de datos inicial. Se puede decir que, gracias a los métodos aplicados para la generalización, los resultados obtenidos son más fiables que en el caso de Excel, pues únicamente considera el error empírico.

A continuación, se mostrarán las dimensiones principales y coeficientes que se han obtenido mediante Matlab:

Resumen dimensiones principales	
Eslora L (m)	297,14
Lpp (m)	285,65
Manga (m)	45,87
Puntal (m)	26,37
Calado de diseño (m)	11,66
Desplazamiento (m3)	130623

Tabla 8. Resumen Matlab de las dimensiones principales

Coefficientes principales	
Coeficiente de bloque	0,834
Coeficiente de la maestra	0,995
Coeficiente prismático	0,838
Coeficiente flotación	0,889

Tabla 9. Resumen Matlab de los coeficientes adimensionales

Si se recuerdan los datos obtenidos mediante los cálculos realizados en Excel en el Capítulo 2 de este proyecto, se observan que son muy similares a los obtenidos.

A continuación, se muestran de manera comparativa los valores de las dimensiones principales obtenidos en Excel y Matlab:

	Excel	Matlab
Resumen dimensiones principales		
Eslora L (m)	294,15	297,14
Lpp (m)	279,97	285,65
Manga (m)	46,00	45,87
Puntal (m)	26,50	26,37
Calado de diseño (m)	11,65	11,66
Desplazamiento (m3)	13.0162,00	13.0623,32
Coefficientes principales		
Coeficiente de bloque	0,846	0,834
Coeficiente de la maestra	0,996	0,995
Coeficiente prismático	0,850	0,838

Tabla 10. Comparativa entre los resultados de Matlab y Excel

Como se puede apreciar en la tabla, los resultados obtenidos en Matlab son muy parecidos a los obtenidos en Excel, lo cual confirma la exactitud de los métodos utilizados.

La ventaja de este método utilizado en Matlab, es que gracias al estudio de la complejidad, podemos afirmar que para nuestra muestra de datos, el tipo de regresión que mejor define nuestra población, es de orden 1, por lo que se comprueba que la estimación de datos obtenida en ambos métodos (Excel y Matlab) es correcta.

4.6.1. Interfaz gráfica para futuras estimaciones

A modo de presentación gráfica, y aprovechando los algoritmos implementados en Matlab, se ha desarrollado una pequeña interfaz gráfica bajo la ayuda de C++ y el framework para Gui de usuario QT + OpenCV para el tratamiento del canvas(imagen) en la que se puede estimar y ver de forma sencilla las dimensiones principales y coeficientes que tendría un buque LNG para una capacidad de carga dada, y una velocidad de diseño.

Esta interfaz se programado utilizando el módulo GUI para QT por su sencillez en la implementación del código y la visualización amigable de la interface. Gracias a esto, se ha creado una herramienta fácil e intuitiva que puede dar en el futuro una idea aproximada de las dimensiones que tendría un buque de esta índole.

A continuación, se muestra una imagen de la interfaz gráfica que mostrará nuestro programa previamente a su ejecución, y en la que se observa cómo será la salida de los resultados.

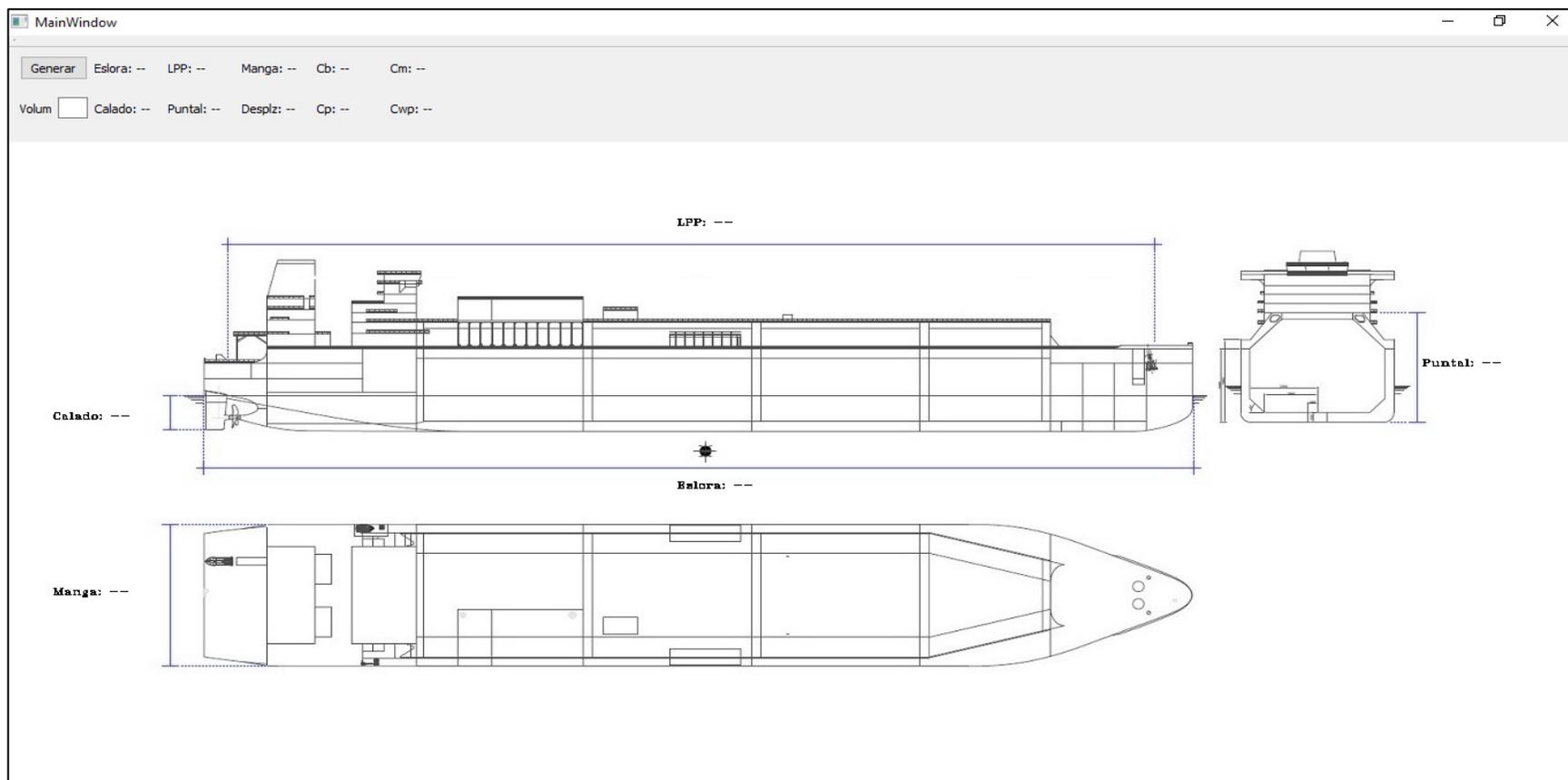


Figura 42. Interface GUI QT para estimación de dimensiones principales y coeficientes

Ingresando simplemente, los datos de la capacidad de carga igual a 174.000m^3 , se puede generar la estimación de las dimensiones principales que han sido estimadas previamente en Matlab.

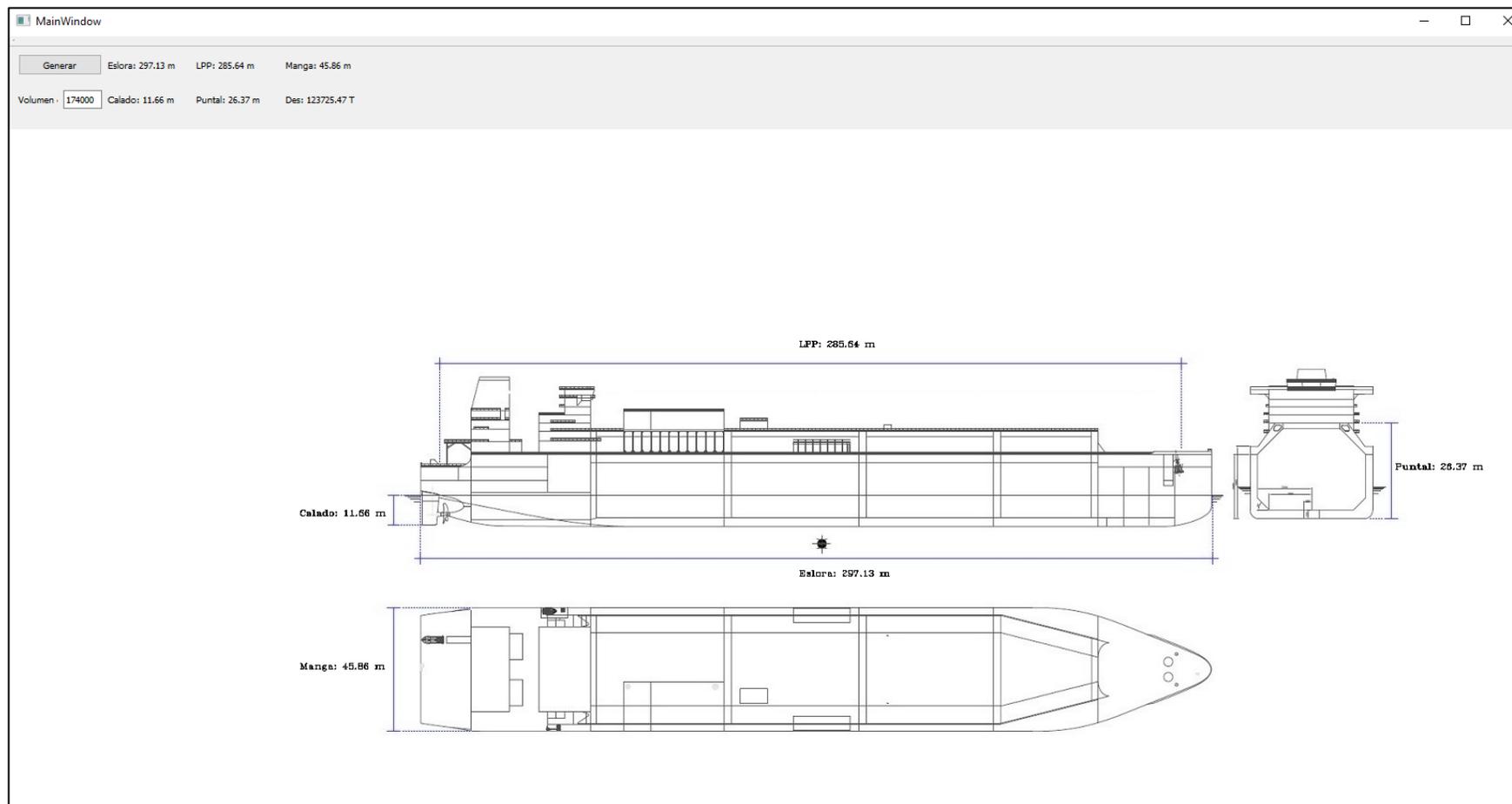


Figura 43. Estimación de las dimensiones principales y coeficientes mediante interface Qt

Gracias a esto, se puede observar de una manera más intuitiva y sencilla las dimensiones principales y coeficientes de manera aproximada que podría tener un buque LNG para una capacidad de carga y una velocidad de diseño definidas previamente.

4.7. Conclusiones

Gracias al desarrollo matemático y al potencial que proporcionan los softwares informáticos de cara a las tareas de tratamientos de datos, se ha desarrollado de una forma sencilla una herramienta capaz de estimar las dimensiones principales y coeficientes para una posible valoración en la fase de ante proyecto de un buque de transporte LNG.

Además, gracias a los métodos de remuestreo, y en concreto al Bootstrap, se han aprendido técnicas para el tratamiento de bases pequeñas de datos y su posible utilización para la estimación de características en el futuro.

Como se ha podido apreciar, no existe una gran diferencia entre los valores obtenidos mediante en Excel y en Matlab, sin embargo, cabe destacar que el uso de métodos de remuestreo hacen que el error cometido haya sido validado por la propia muestra, haciendo que tenga mayor fiabilidad en un futuro incluso para la estimación de buques que no aparecen en la muestra.

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA NAVAL Y OCEÁNICA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA



CAPÍTULO 5:

MÉTODOS MATEMÁTICOS EN EL MUNDO NAVAL

5.1. Objetivos

A lo largo de este capítulo se va a desarrollar la necesidad existente en el mundo naval de la aplicación de métodos matemáticos para el desarrollo con éxito de la ingeniería y el desarrollo del negocio de este sector.

A continuación, se tratará de mostrar la implicación de estos métodos en la propagación del oleaje y en como esto afecta al comportamiento del buque, y por tano, al diseño en su ingeniería para su optimización en las rutas de navegación.

5.2. Justificación de la necesidad de métodos matemáticos

El comportamiento del buque en la mar es una metodología que tiene como objeto el estudio de los movimientos y de los esfuerzos producidos por las olas en los sistemas marinos.

Si la excitación que actúa sobre los sistemas marinos, el oleaje, se pudiese representar de una manera determinista como una función del espacio y del tiempo, el problema del comportamiento en la mar sería un caso particular más o menos complicado del análisis del movimiento armónico forzado y amortiguado en los seis grados de libertad [20].

Dado que la descripción determinista de la superficie de la mar parece difícil incluso de imaginar, se propone para el estudio del comportamiento del buque en la mar una descripción estocástica del oleaje, en el dominio de la frecuencia y del número de longitud de onda, que permite calcular los movimientos y esfuerzos de los sistemas marinos con una fiabilidad suficiente.

Las olas que se producen en la superficie libre del mar inciden sobre el movimiento de éste y también sobre los esfuerzos que soporta la estructura del buque. Las dilatadas vidas de los grandes buques petroleros y cargueros en general, unido a los esfuerzos provocados por el movimiento de las olas, acaban fatigando los materiales apareciendo grietas que se desarrollarán progresivamente con el tiempo [20].

La mar se manifiesta en superficie de forma irregular, pero la necesidad de poder modelizar el comportamiento de los buques requiere un estudio regular o bien un estudio estadístico

Estudiar el comportamiento regular nos permite definir de forma sencilla las características del oleaje, sin embargo, una modelización seria nos llevaría a definir aspectos estadísticos de la altura de las olas, frecuencia de llegada, etc.

Es por ello, que gracias a las ecuaciones diferenciales se puede expresar la propagación del oleaje para poder predecir el comportamiento del buque en determinadas situaciones de navegación; siendo de gran importancia a la hora de elegir las rutas de navegación por las que el buque desarrollará su vida operativa.

5.3. Introducción a las ecuaciones diferenciales ordinarias

Muchos problemas básicos de las ciencias experimentales pueden ser modelados usando ecuaciones donde aparecen involucradas una función junto con sus derivadas [20].

En este caso y gracias a ellas, se utilizarán para el estudio de la propagación del oleaje y su comportamiento en la navegación del buque.

Cabe destacar que se diferencia entre dos tipos de ecuaciones según sea el movimiento que se esté analizando, cuando la ecuación o el sistema de ecuaciones diferenciales son lineales y su solución analítica puede encontrarse fácilmente mediante varios métodos matemáticos y otro tipo de ecuaciones diferenciales son las no lineales, que se utilizan en movimientos como, por ejemplo, el movimiento de oscilación del péndulo.

Una forma de resolver las ecuaciones diferenciales lineales y no lineales son los métodos numéricos.

Los métodos Runge-Kutta están entre los más utilizados para la solución de estos problemas. Aunque se pueden utilizar otros métodos numéricos para la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias como el método de los residuos ponderados y las diferencias finitas, estos métodos utilizan algoritmos complicados y algunos están restringidos a ecuaciones diferenciales lineales [20].

5.4. Ecuaciones diferenciales ordinarias lineales y no lineales

Se denomina a una ecuación diferencial ordinaria lineal cuando la función o sus derivadas están multiplicadas solamente por funciones de la variable independiente

Una ecuación diferencial ordinaria lineal de orden “n” en la variable dependiente “y” y en la variable independiente “x” es una ecuación que puede expresarse de la forma:

$$a_0(x) \frac{d^n y}{dx^n} + a_1(x) \frac{d^{n-1} y}{dx^{n-1}} + \dots + a_{n-1}(x) \frac{dy}{dx} + a_n(x)y = b(x)$$

Donde $a_0(x)$ es una función idénticamente nula.

En ingeniería la linealización es una herramienta muy adecuada para resolver problemas, ya que facilita el desarrollo de métodos matemáticos cuando estos por diversos motivos son simplificables.

5.4.1. Método de Runge-Kutta

En este apartado se verán todos los métodos que se aplicarán a la solución de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden, debido a que todas las ecuaciones diferenciales ordinarias se pueden separar en sistemas de ecuaciones diferenciales de primer orden. La forma de expresar normalmente las ecuaciones diferenciales de primer orden es de la siguiente forma[20]:

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y)$$

Con una condición de contorno $y(x_0) = (y_0)$.

La base de los métodos Runge-Kutta son las series de Taylor, la cual nos va permitir encontrar el valor de una función en un punto x , si se conocen los valores de la función y sus derivadas en un punto a . La serie de Taylor se expresa de la siguiente manera:

$$y(x) = y(a) + y'(x)(x - a) + \frac{1}{2!} y''(x - a)^2 + \dots + \frac{1}{n!} y^n(x - a)^n$$

La forma más fácil de resolver el método Runge-Kutta es mediante el método de Euler, el cual toma únicamente los dos primeros términos de la serie de Taylor.

5.5. Método de Euler

La forma de resolver el método de Euler es dividiendo el rango en varios intervalos de longitud h en el cual se quiere conocer la solución y hallamos el valor de la función al final de cada uno de los intervalos que aparecen en la siguiente imagen consideramos los dos primeros términos de la serie de Taylor, el valor de la función en los puntos x_1 y x_2 se pueden obtener de forma aproximada de la forma siguiente[20]:

$$y_1 = y(x) = y_0 + f(x_0, y_0)h$$

$$y_2 = y_1 + f(x_1, y_1)h$$

Y para el término i -ésimo se tiene:

$$y_i = y_{i-1} + f(x_{i-1}, y_{i-1})h$$

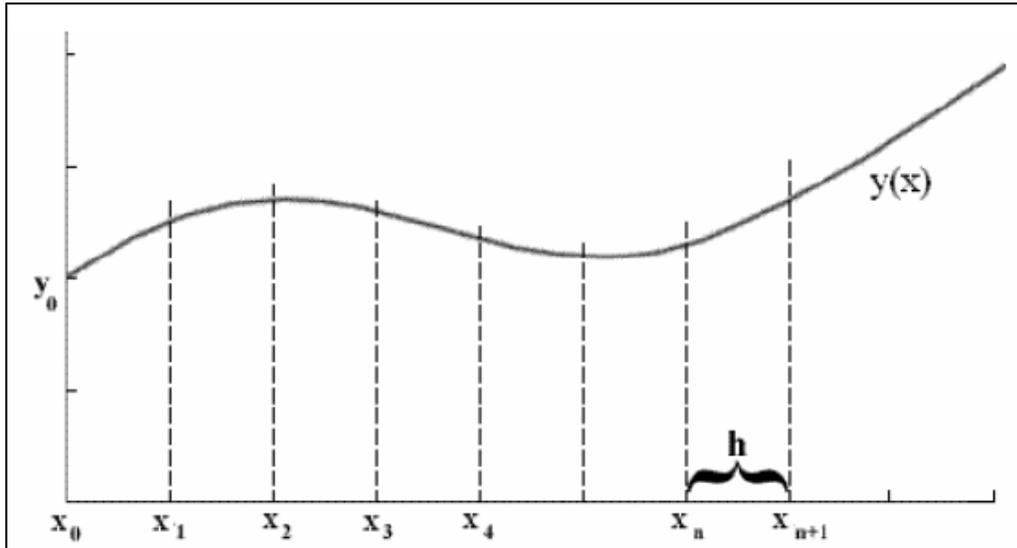


Figura 44. División del rango en que se desea conocer la solución

El error que se produce en la solución mediante el método de Euler se debe a que solo se toman los dos primeros términos de la serie de Taylor, por lo tanto, el error de “truncamiento” es proporcional a h^2 (anterior), es decir:

$$y_i = y_{i-1} + f_{i-1}h + Oh^2$$

El método de Euler se muestra en la siguiente figura:

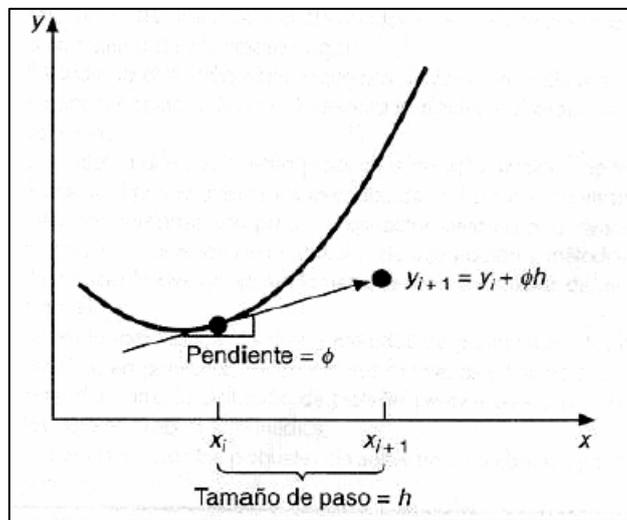


Figura 45. Método de Euler

5.5.1. Método de Heún

El método de Euler es método predictor, ya que no realiza una corrección de los valores encontrados. Este método de Heún es una mejora al método de Euler el cual incluye correcciones del valor y_i encontrado en cada paso[20].

El método se puede resumir en los siguientes pasos:

1. realizar una predicción inicial del valor y_i usando el método de Euler.
2. calcular la pendiente (f_i) en el punto x_i .
3. calcular el promedio de las pendientes f_{i-1} y f_i
4. predecir nuevamente el valor de y_i usando esta nueva pendiente.
5. repetir los pasos 2, 3 y 4 las veces que se desee.

El valor de la función en el punto x_i se puede obtener de forma aproximada mediante el método de Heún así:

$$y_1^0 = y_0 + f(x_0, y_0)h$$

(Predicción inicial)

$$y_1^1 = y_0 + \frac{f(x_0, y_0) + f(x_1, y_1^0)}{2} h$$

(primera corrección)

$$y_1^2 = y_0 + \frac{f(x_0, y_0) + f(x_1, y_1^1)}{2} h$$

(segunda corrección)

Donde el superíndice indica el número de correcciones realizadas. En forma general, el método de Heún se puede formular de la siguiente manera:

$$y_1^0 = y_{i-1} + f(x_{i-1}, y_{i-1})h$$

$$y_1^n = y_{i-1} + \frac{f(x_{i-1}, y_{i-1}) + f(x_i, y_i^{n-1})}{2} h$$

(n-esima corrección)

Aunque el valor exacto de la función en un punto x_i se alcanza cuando las correcciones son infinitas, en la práctica no es posible realizar ese número de correcciones, por lo tanto, se debe definir un criterio el cual nos indique cuando se ha obtenido un valor suficientemente exacto.

5.5.2. Método general

El método Runge-Kutta se puede escribir de forma general de la siguiente manera [20]:

$$y_i = y_{i-1} + \phi(x_{i-1}, y_{i-1}, h)h$$

Donde $\phi(x_{i-1}, y_{i-1}, h)$ se conoce como función de incremento, la cual puede interpretarse como una pendiente equivalente sobre el intervalo. La función de incremento se puede escribir así:

$$\phi = a_1k_1 + a_2k_2 + \dots + a_nk_n$$

Donde n representa el orden del método, los a_i son constantes y los h_i se definen de la siguiente manera:

$$k_1 = f(x_{i-1}, y_{i-1})$$

$$k_2 = f(x_{i-1}, p_1h, y_{i-1} + q_{11}k_1h)$$

$$k_n = f(x_{i-1}, p_{n-1}h, y_{i-1} + q_{n-1,n-1}k_{n-1}h)$$

Donde, p y q son constantes.

El método de Euler es un método de primer orden, similar al de Runge-Kutta, donde, $\phi = a_1k_1$, y $a_1 = 1$.

Por lo tanto:

$$y_i = y_{i-1} + \phi(x_{i-1}, y_{i-1}, h)h = y_{i-1} + a_1k_1h = y_{i-1} + f(x_{i-1}, y_{i-1})h$$

El método de Heún, cuando usa una sola corrección (n = 1), se puede considerar como un método Runge -Kutta de segundo orden. En este caso $a_1 = a_2 = 1/2$ y $p_1 = q_1 = 1$. Por lo tanto, la ecuación general se puede escribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} y_i &= y_{i-1} + (a_1k_1 + a_2k_2)h \\ &= y_{i-1} + (1/2f(x_{i-1}, y_{i-1}) + 1/2f(x_{i-1} + h, y_{i-1} + f(x_{i-1}, y_{i-1})h))h \\ &= y_{i-1} + \frac{f(x_{i-1}, y_{i-1})f(x_i, y_i^0)}{2}h \end{aligned}$$

El orden de los métodos Runge-Kutta está relacionado con el error de truncamiento. Por ejemplo, para los métodos de segundo orden el error de truncamiento es $O(h^3)$, en general se puede decir que un método Runge-Kutta es de orden n si tiene un error de truncamiento igual a $O(h^{n+1})$.

5.5.3. Método Runge-Kutta de Cuarto Orden

El método Runge-Kutta más popular de cuarto orden se conoce como método Runge-Kutta clásico de cuarto orden. Este método se define de la siguiente manera:

$$y_i = y_{i-1} + 1/6(k_1 + 2k_2 + 3k_3 + k_4)h$$

Donde:

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_{i-1}, y_{i-1}) \\ k_2 &= f(x_{i-1} + h/2, y_{i-1} + k_1 h/2) \\ k_3 &= f(x_{i-1} + h/2, y_{i-1} + k_2 h/2) \\ k_4 &= f(x_i, y_{i-1} + k_3 h) \end{aligned}$$

5.6. Propagación del oleaje

La importancia del estudio del oleaje se centra en dos aspectos, uno más puramente científico y otro de carácter más práctico. Desde el punto de vista científico el oleaje es uno de los mecanismos más importantes de transferencia de energía entre la atmósfera y el océano y su comprensión afecta tanto a los estudios a escala meteorológica como a escala climática. Otro aspecto importante desde el punto de vista científico incide en el estudio de la propia dinámica del oleaje y de sus mecanismos de propagación [21]. Desde el punto de vista práctico, el estudio del oleaje se enfoca en los campos de la ingeniería civil y naval, como es en el diseño de diques, buques, estructuras en alta mar, la ayuda a la toma de decisiones en la gestión costera, etc. Así el estudio del oleaje se enmarca en un área difusa que va desde las matemáticas y la física hasta la ingeniería.

Como se ha comentado anteriormente, las olas inciden sobre el esfuerzo que soporta la estructura del buque directamente. En buques de tipo petroleros, cargueros o gaseros es de gran importancia por su eslora, tener en cuenta la propagación del oleaje es uno de los requisitos estructurales que se solicitan en diseño para la resistencia del buque al cabeceo y la resistencia longitudinal sobre olas de longitudes de onda específicas.

La propagación del oleaje en sí, es el movimiento en el que las perturbaciones (olas) se desplazan, alejándose del lugar de generación [21]. Las olas individuales, con su periodo (T) y la longitud (L) se desplazan con una celeridad (c), aunque el conjunto de energía específica contenida en el oleaje se desplaza con la velocidad de la celeridad del grupo (Cg).

Existen diversos modelos que tratan de explicar el comportamiento de las olas en el mar, y los cuales se utilizan para ver sus implicaciones en el diseño y la optimización estructural de nuevos buques. Estos estudios son de gran importancia a la hora de elegir las rutas de navegación por donde el buque será operativo.

5.6.1. Teoría de Ayri

La propagación de oleaje en un fluido es un proceso no lineal. Podemos tratar sin embargo de simplificar su análisis físico y matemático con algunas consideraciones [22]:

- Para nuestro estudio del movimiento ondulatorio consideraremos que las fuerzas principales a considerar son las de gravedad y las producidas por las diferencias de presión, suponiendo que el fluido es no viscoso ($\mu = 0$) y que se pueden despreciar las tensiones tangenciales.
- Supondremos que el agua es un fluido incompresible ($\rho = 0$).
- Aceptaremos que el movimiento, en realidad tridimensional, se reduce a una componente horizontal u y otra vertical w .
- Daremos por bueno que se trata de un movimiento irrotacional $\nabla \times \vec{u} = 0$ y que podremos, por tanto, definir un potencial de velocidades tal que $\nabla\phi = \vec{u}$.
- El fondo se tomará fijo e impermeable.
- Se supondrá la ola periódica y regular y que la única fuerza exterior que tiene efecto sobre el fluido es la gravedad terrestre. La tensión superficial tampoco se tendrá en cuenta.
- El efecto de Coriolis y las pérdidas de energía por rotura de la ola son despreciables.

Tomamos pues la siguiente ecuación de la conservación del momentum para fluidos no viscosos (Ecuación de Euler):

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \frac{1}{2} \nabla(\vec{u}^2) + (\nabla \times \vec{u}) \times \vec{u} = \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{g}$$

donde \vec{u} es el campo escalar de velocidades del fluido, P es la presión hidrostática del fluido (que depende de las coordenadas x, z), \vec{g} es el vector constante de aceleración producida por la gravedad y ρ es la densidad del fluido, ∇ denota al operador vectorial.

Se ha considerado un sistema de referencia cartesiano cuyo plano xy es tangencial a la superficie de la Tierra y cuyo eje z es vertical (paralelo a un radio de la Tierra) y positivo hacia arriba, teniendo como origen la altura de equilibrio para el fluido, es decir, aquella altura en la que la superficie del fluido está imperturbada y horizontal. Así, las ondas se mueven a lo largo del plano xy y, por lo tanto, tendrán asociadas una función de onda bidimensional (que depende de dos variables). El valor de la función de onda se mide desde el cero del sistema de referencia [22].

La ecuación anterior es físicamente mucho más simple de lo que a primera vista podría parecer: el lado izquierdo no es otra cosa que un desarrollo de la

derivada total de la velocidad \vec{u} , y el derecho es la suma de las aceleraciones debidas a la variación (gradiente) de presión y a la fuerza de gravedad.

Tenemos pues una ecuación de movimiento para fluidos, pero a pesar de que sabemos que la función de onda debe ser congruente con dicha ecuación, aún desconocemos cómo obtenerla a partir de ella. Quisiéramos llegar a una ecuación de onda, compatible con la ecuación del movimiento, cuya solución fuera precisamente la función de onda. Para conseguirlo debemos recurrir, además de a la ecuación de movimiento, a la llamada ecuación de continuidad, o ecuación de conservación de masa. Esta ecuación establece que en el flujo de un fluido, si no existen vertederos o manantiales de líquido, la masa siempre debe conservarse. O en matemáticas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \times (\rho \vec{u}) = 0$$

Un caso particular de esta ecuación se da cuando el fluido es incompresible, es decir, cuando ρ no cambia con el tiempo. Con lo cual:

$$\nabla \times \vec{u} = 0$$

Así, un fluido incompresible fluye siempre de forma tal que sus líneas de flujo son siempre paralelas, es decir, no divergen ni convergen, como si fluyera “ordenadamente”

A continuación, se va exponer ahora las ecuaciones que gobiernan la propagación del oleaje en el fluido ideal.

- Ecuación de Laplace: la cumplen los flujos irrotacionales e incompresibles y considera que no hay variación ni de masa ni de volumen en el tiempo (incompresibilidad y conservación de la masa).

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0$$

- 1ª condición de contorno en la superficie libre. Considera que las partículas de agua en la superficie libre $\eta(x,t)$ permanecen en esta:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \times \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad \rightarrow \quad w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \times \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$\eta(x,t)$ es el desplazamiento medio del agua en la superficie libre con referencia al nivel medio del agua ($z = 0$) y w es la componente vertical de la velocidad.

- 2ª condición de contorno en la superficie libre (ecuación de Bernoulli).

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{P_{atm}}{\rho} + \frac{1}{2}(\nabla \phi)^2 + g\eta = 0$$

- **Condición de contorno por fondo.** La componente vertical de la velocidad ha de ser nula en las partículas del fondo. La función que delimita el fondo es $z = -h(x)$.

$$w = -u \times \frac{\partial h}{\partial x} = 0$$

- **Condición de contorno lateral.** Debido a la suposición de oleaje regular y periódico, esta condición de contorno debe expresar la periodicidad en una longitud de onda L y periodo T .

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T)$$

Solución bajo la teoría lineal

Todas las ecuaciones expuestas hasta ahora forman un sistema no lineal de ecuaciones diferenciales. A continuación, exponemos la teoría lineal de Airy que simplifica la estructura física y matemática del fenómeno para obtener aproximaciones a la solución.

Airy supone el potencial de la velocidad como el producto de los siguientes términos independientes:

$$\phi(x, z, t) = X(x) \times Z(z) \times R(t)$$

Y simplifica la 1ª ecuación de contorno considerando que la amplitud comparada con la longitud de onda es pequeña y que podemos considerar:

$$w|_{z=0} = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \times \frac{\partial \eta}{\partial x} \cong \frac{\partial \eta}{\partial t}$$

También simplifica y linealiza la 2ª ecuación de contorno en la superficie libre. Tomando el valor de la presión en la superficie libre = 0 y considerando u y w pequeñas (anulándose pues su producto) quedando:

$$\frac{\partial \vec{\phi}}{\partial t} + g\eta = 0 \quad , \quad \text{en } z = 0$$

El fondo se considera horizontal, con lo que la condición de contorno de fondo se rescribe ahora como:

$$w = -u = 0 \quad , \quad \text{en } z = -h$$

Solución del sistema de ecuaciones

El potencial de velocidad $\phi(x, z, t)$ debe ser periódico en x , y debe ser solución de la ecuación de Laplace. Una posibilidad que cumple este criterio es escribir $R(t)$ del modo siguiente:

$$R(t) = \sin(\sigma t) \quad , \quad \text{con } \sigma = \frac{2\pi}{T} \quad \text{como frecuencia angular}$$

De este modo, podemos expresar la ecuación $\phi(x, z, t)$ como $\phi(x, z, t) = X(x) \times Z(z) \times \sin(\sigma t)$, con lo que la ecuación de Laplace se reescribiría como:

$$\frac{1}{x} \times \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} + \frac{1}{z} \times \frac{\partial^2 Z}{\partial z^2} = 0$$

La única posible solución para esta ecuación en derivadas parciales mediante el método de separación de variables que cumple con la condición de periodicidad es:

$$\phi(x, z, t) = (A \cos(kx) + B \sin(kx)) \times (C \times e^{kz} + D \times e^{-kz}) \times \sin(\sigma t)$$

$$k = \frac{2\pi}{L}$$

Para determinar las constantes sólo hemos de imponer las condiciones de contorno por fondo. Con todo esto obtenemos el valor del potencial de la velocidad:

$$\phi = \frac{H}{2} \times \frac{g}{\sigma} \times \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(h+z)} \times \sin(kx - \sigma t)$$

Mediante la segunda condición de contorno en superficie libre podemos obtener el desplazamiento del nivel del agua:

$$\eta = \frac{1}{g} \times \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{z=0} = \frac{H}{2} \times \cos(kx - \sigma t)$$

Mediante la primera condición de contorno en superficie libre podemos obtener para cualquier potencial de velocidad ϕ y su superficie libre h una expresión que relaciona la frecuencia angular con el número de onda. Ésta nos permite encontrar la longitud de onda en función del periodo y el calado.

$$L = \frac{g}{2\pi} \times T^2 \times \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$$

Es muy interesante notar que, a pesar de todas las aproximaciones que hemos hecho, la teoría lineal de ondas puede predecir varias características de las olas, siempre que éstas tengan una pequeña amplitud comparada con su longitud de onda

5.7. Conclusiones

Con esta teoría se pretende mostrar la implicación del tren de oleaje y la propagación de la ola en la ingeniería y la operación de buques, ya que la longitud de onda de la ola es función del calado del barco. Y, por tanto, es de gran importancia a la hora de seleccionar la ruta de navegación, ya que, conociendo el estado de las corrientes, seleccionar una correcta ruta de navegación haciendo posible la reducción de la resistencia al avance y el consumo específico del barco.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] “Análisis y modelado del mercado de Gas en España,” 2005.
- [2] “El gas natural en España | Energía y Sociedad.” [Online]. Available: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/el-gas-natural-en-espana/>. [Accessed: 08-May-2019].
- [3] “La cadena de valor del gas natural | Energía y Sociedad.” [Online]. Available: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-1-la-cadena-de-valor-del-gas-natural/>. [Accessed: 26-May-2019].
- [4] “Transporte de GNL | Energía y Sociedad.” [Online]. Available: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-4-transporte-de-gnl/>. [Accessed: 15-Jun-2019].
- [5] “Gas natural, combustible fósil con menor impacto ambiental | CHC.” [Online]. Available: <https://www.chcuatrogas.com/blog/noticias-del-sector/gas-natural-poco-impacto-ambiental>. [Accessed: 17-Jun-2019].
- [6] OMI, “Prevención de la contaminación atmosférica ocasionada por los buques - Anexo VI Convenio MARPOL.” [Online]. Available: <http://www.imo.org/es/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Paginas/Air-Pollution.aspx>. [Accessed: 01-Jul-2019].
- [7] Xavi Colás, “Gas del ártico ruso para el mercado español | Economía | EL MUNDO,” 2017. [Online]. Available: <https://www.elmundo.es/economia/macroeconomia/2017/12/09/5a2ae10922601dbb348b4608.html>. [Accessed: 08-May-2019].
- [8] Editorial diario El Mundo, “Rusia, a la conquista del mercado mundial del gas natural licuado - Sputnik Mundo,” 2017. [Online]. Available: <https://mundo.sputniknews.com/economia/201712301075136915-rusia-gnl-gas-mundo/>. [Accessed: 15-May-2019].
- [9] “DOF - Código Internacional para Gaseros SOLAS.” [Online]. Available: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5323666&fecha=28/11/2013. [Accessed: 02-Jul-2019].
- [10] “LNG vessel construction -Advantages of membrane technology.” [Online]. Available: <http://www.liquefiedgascarrier.com/LNG-vessel-construction.html>. [Accessed: 28-May-2019].
- [11] “Tecnología marítima. LNG Iberica Knutsen,” 2014. [Online]. Available: <http://tecnologia-maritima.blogspot.com/2014/08/lng-iberica-knutsen.html>. [Accessed: 11-Jul-2019].

- [12] L. Avila and L. Rodrigo, “Tesis de Grado, 2009). Gas Natural; Uso, transporte y desarrollo de nuevas tecnologías (Capítulo III, clasificación de buques gaseros),” 2009.
- [13] R. Alvariño Castro, J. J. Azpiroz Azpiroz, and M. MeizosoFernández, *Proyecto Básico del Buque Mercante*, Fondo edit. Madrid, 1997.
- [14] J. A. L. Alfaro, “Proyectos de propulsión y sistemas marinos,” Cádiz, 2015.
- [15] MAN S.L., “Propulsion Trends in LNG Carriers. Two-stroke Engines (MAN),” 2014.
- [16] International Gas Union, “Sponsored by 2018 World LNG Report 27th World Gas Conference Edition.”
- [17] Samuel Nicolás Gil Abreu, “Bootstrap en poblaciones finitas,” 2014.
- [18] Javier Sánchez Galán, “Bootstrap - Definición, qué es y concepto | Economipedia.” [Online]. Available: <https://economipedia.com/definiciones/bootstrap.html>. [Accessed: 28-Jul-2019].
- [19] M. Á. B. Pérez, “The control of complexity,” Cádiz.
- [20] R. T. Ahuir, “PFC ESTUDIO DE LA MANIOBRABILIDAD CON MODELOS MATEMÁTICOS,” Cartagena.
- [21] J. L. Almazán Garate and M. del C. Palomino Monzón, “Descripción, medida y análisis del oleaje,” Madrid, 2000.
- [22] J. L. G. Giralt, “Teoría de Airy. Solución lineal de la ecuación de ondas.”

**ANEXO 1: CURVAS OPERACIÓN MOTOR DE
WÄRTSILA**

W8X92DF

IMO Tier II / III compliant

35307 kW 83.0% R1
76.3 rpm 95.4% R1

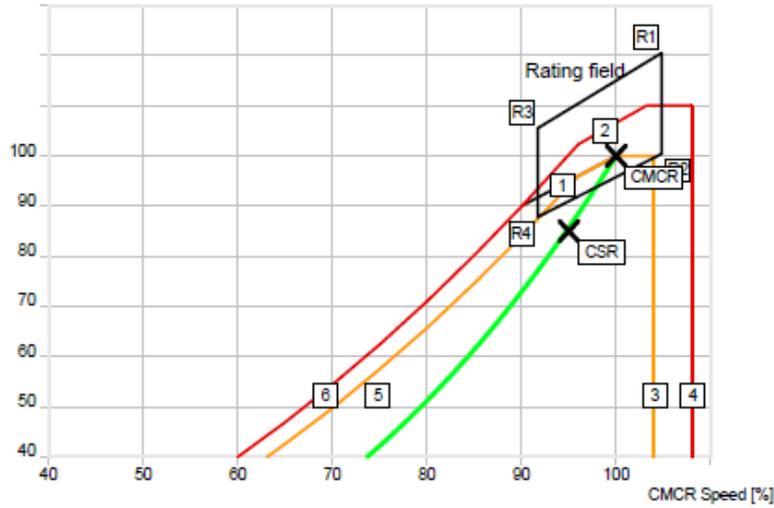
Project:
Yard / Plant:
Owner:
Created:

26.07.2019 / eduar

General Technical Data

CMCR and engine operating curves

CMCR Power [%]



- Line 1: Constant MEP
- Line 2: Overload limit (Diesel mode only)
- Line 3: 104% speed limit
- Line 4: 108% overspeed limit
- Line 5: Admissible torque limit
- Line 6: Maximum torque limit in transient conditions (Diesel mode only)
- Nominal propeller characteristic

For detailed curve description see Marine Installation Manual (MIM).

Main engine	W8X92DF
MCR (R1)	42560 kW / 80.0 rpm
CMCR	35307 kW / 76.3 rpm
CSR (85.0% of CMCR)	30011 kW / 72.3 rpm
MEP at 100% CMCR	15.1 bar

**ANEXO 2: ALGORITMOS IMPLEMENTADOS EN
MATLAB**

Dimensionamiento LNG

```

% Según una base de datos, para el dimensionamiento para un
buque de
% transporte de LNG de capacidad de carga dado.

% Los datos que se mostrarán por pantalla son, en este orden:
% 1. Eslora total
% 2. Eslora entre perpendiculares (LPP)
% 3. Manga
% 4. Puntal
% 5. Calado de diseño
% 7. desplazamiento

% Faltaría añadir las ecuaciones de cálculo que aparecen en la
memoria del
% TFG y hacen referencia a las formas del buque.

function Dimensionamiento_LNG ()

    clear all,close all,clc
%     format longEng
    format short
%     addpath('pattern');

    %##### PREPROCESADO DE DATOS
    #####%
    x = load('DATOS_DIMENS_LNG.mat');
    x = x.DATOS_DIMENS_LNG;
    x = x(:,[1 2 3 4 5 6 9]);% 1 VC,2 ESLORA TOTAL,3 LPP,4
MANGA,5 PUNTAL,6 CALADO,9 DESPLAZAMIENTO
    aux = x(:,7);%sustitución de valores NAN
    aux(isnan(aux)==1) = mean(aux(isnan(aux)==0)) +
(randi(6,length(aux(isnan(aux)==1)),1) -
3).*std(aux(isnan(aux)==0));
    x(:,7) = aux;
    x = x';%para tener los patrones por columnas
    %##### PREPROCESADO DE DATOS
    #####%

    % Datos de partida del proyecto
    Vol_Carga = 174000; % m3
    v = 18.5; % nudos

    % GENERADO GRAFICAS CON MODELO SELECCIONADO(GRADO 1 EN
TODAS)
    coeficientes = generar_coeficientes(x)

    %probamos a estimar una serie de barcos partiendo del
volumen de carga
    %de nuestros barcos
    barcos_estimados = [];
    for j = 1:size(x,2),
        barcos_estimados = [barcos_estimados
estimar_parametros(coeficientes,x(1,j))'];
    end

```

```

LNG_Dimensiones =
estimar_parametros(coeficientes,Vol_Carga)';

Vol_carga = LNG_Dimensiones(1)
Loa = LNG_Dimensiones(2)
LPP = LNG_Dimensiones(3)
Manga = LNG_Dimensiones(4)
Puntal = LNG_Dimensiones(5)
Calado = LNG_Dimensiones(6)
Desplazamiento = LNG_Dimensiones(7)

LNG_Coef = calcular_Coef(Vol_carga, Loa, LPP, Manga,
Puntal, Calado, Desplazamiento);

save ('LNG_Dimensiones','LNG_Dimensiones')
save ('LNG_Coef', 'LNG_Coef')

% Gráficas de cada una de las variables

g = 2;
SSE = ( x(g,:) - barcos_estimados(g,:))*(x(g,:) -
barcos_estimados(g,:))';
SST = ( x(g,:) - mean(x(g,:)) )*( x(g,:) - mean(x(g,:))
)';

figure,
plot(x(1,:),x(g,:),'.b');hold on;
plot(x(1,:),barcos_estimados(g,:),'-r');
xlabel('Volumen de carga (m3)')
ylabel('Eslora total (m)')
legend(['R^2: ' num2str(1-SSE/SST) ])
grid on

g= g+1;
SSE = ( x(g,:) - barcos_estimados(g,:))*(x(g,:) -
barcos_estimados(g,:))';
SST = ( x(g,:) - mean(x(g,:)) )*( x(g,:) - mean(x(g,:))
)';

figure,
plot(x(1,:),x(g,:),'.b');hold on;
plot(x(1,:),barcos_estimados(g,:),'-r');
xlabel('Volumen de carga (m3)')
ylabel('LPP (m)')
legend(['R^2: ' num2str(1-SSE/SST) ])
grid on

g= g+1;
SSE = ( x(g,:) - barcos_estimados(g,:))*(x(g,:) -
barcos_estimados(g,:))';
SST = ( x(g,:) - mean(x(g,:)) )*( x(g,:) - mean(x(g,:))
)';

figure,
plot(x(1,:),x(g,:),'.b');hold on;
plot(x(1,:),barcos_estimados(g,:),'-r');
xlabel('Volumen de carga (m3)')
ylabel('Manga (m)')

```

```

        legend(['R^2: ' num2str(1-SSE/SST) ])
        grid on

        g= g+1;
        SSE = ( x(g,:) - barcos_estimados(g,:))*(x(g,:) -
barcos_estimados(g,:))';
        SST = ( x(g,:) - mean(x(g,:)) )*( x(g,:) - mean(x(g,:))
)';

        figure,
        plot(x(1,:),x(g,:),'.b');hold on;
        plot(x(1,:),barcos_estimados(g,:),'-r');
        xlabel('Volumen de carga (m3)')
        ylabel('Puntal (m)')
        legend(['R^2: ' num2str(1-SSE/SST) ])
        grid on

        g= g+1;
        SSE = ( x(g,:) - barcos_estimados(g,:))*(x(g,:) -
barcos_estimados(g,:))';
        SST = ( x(g,:) - mean(x(g,:)) )*( x(g,:) - mean(x(g,:))
)';

        figure,
        plot(x(1,:),x(g,:),'.b');hold on;
        plot(x(1,:),barcos_estimados(g,:),'-r');
        xlabel('Volumen de carga (m3)')
        ylabel('Calado (m)')
        legend(['R^2: ' num2str(1-SSE/SST) ])
        grid on

        g= g+1;
        SSE = ( x(g,:) - barcos_estimados(g,:))*(x(g,:) -
barcos_estimados(g,:))';
        SST = ( x(g,:) - mean(x(g,:)) )*( x(g,:) - mean(x(g,:))
)';

        figure,
        plot(x(1,:),x(g,:),'.b');hold on;
        plot(x(1,:),barcos_estimados(g,:),'-r');
        xlabel('Volumen de carga (m3)')
        ylabel('Desplazamiento (T)')
        legend(['R^2: ' num2str(1-SSE/SST) ])
        grid on

end
%% GENERADO GRAFICAS CON MODELO SELECCIONADO(GRADO 1 EN
TODAS)

function barco = estimar_parametros(coeficientes,volumen_carga)
    barco = [volumen_carga];
    for i = 1:size(coeficientes,1)
        barco(1+i) =
volumen_carga*coeficientes(i,1)+coeficientes(i,2);
    end
end

function coeficientes = generar_coeficientes(x)
    coeficientes = zeros(6,2);

```

```

    for c = 2:7,
        A = [ x(1,:) ones(1,length(x(1,:))) ];
        sol = inv(A'*A)*(A'*x(c,:));
        coeficientes(c-1,:) = sol;
        y_est = A*sol; % para generar la y estimada
    %     [x(c,:) ; y_est] %para comparar el estimado con el
    real
        %mean(sqrt((y_est - x(c,:)).^2)) %para mostrar el error
    cuadratico
        %en cada regresion
    end
end

function LNG_Coef = calcular_Coef(Vol_carga, Loa, LPP, Manga,
Puntal, Calado, Desplazamiento)

% % Coeficiente de bloque
Vol_carena = Desplazamiento ./ 1.025;
Cb = Vol_carena ./ (LPP*Manga*Calado)

% % Coeficiente de la maestra
Cm = 1.006-0.0056*Cb^(-3.56)

% % Coeficiente prismático
Cp = Cb ./ Cm

% % Coeficiente de flotación
Cwp = (1+2*Cb) ./ 3;

LNG_Coef(1) = Cb;
LNG_Coef(2) = Cm;
LNG_Coef(3) = Cp;
LNG_Coef(4) = Cwp;

end

```

Selección complejidad

```

function seleccion_complejidad()

    clear all, clc
    format longEng
    addpath('pattern');

    %##### PREPROCESADO DE DATOS
    #####%
    x = load('DATOS_DIMENS_LNG.mat');
    x = x.DATOS_DIMENS_LNG;
    x = x(:, [1 2 4 5 6 3 9]);
    aux = x(:,7);

    %Para evitar la falta de datos de una de las columnas de la
    base de datos,
    % y poder tener una aproximación de los mismos, se utiliza
    un método

```

```

    % para sustituir los NaN, y para ello nos basamos en la
regla
    % 68-95-99.7. de las matemáticas.
    aux(isnan(aux)==1) = mean(aux(isnan(aux)==0)); % +
(randi(6,length(aux(isnan(aux)==1)),1) -
3).*std(aux(isnan(aux)==0));
    x(:,7) = aux;
    x = x';%para tener los patrones por columnas
    %##### PREPROCESADO DE DATOS
#####%

    %##### ANALISIS DE COMPLEJIDAD
#####%

    grados = [1:3];% grados(complejidades) que vamos a probar
    training_tam = size(x,2)*0.7;% cantidad de datos de
entrenamiento a usar
    bt = zeros(1,length(grados));

    repeticiones = 10;% numero de veces que promediaremos el
experimento
    bt_total = zeros(5,length(grados));% distribuciones de error
bootstrap para los grados dados.(5 es el numero de
caracteristicas con las que vamos a hacer regresiones)
    seleccionados = zeros(5,repeticiones);

    % realizamos el metodo bootstrap una serie de veces y para
cada
    % característica, de forma que la función nos devuelve los
MSE
    % correspondientes a los grados probados, y que
complejidades ha
    % elegido en cada ocasión.

    %25 indica cuántas muestras bootstrap se generarán en cada
ejecución de
    %la función bootstrap
    for c = 2:7,
        [bt_aux,seleccionado] =
bootstrap(x(1,:),x(c,:),training_tam,25,grados);
        bt = [bt_aux];
        seleccionados(c-1,1) = seleccionado;
        for i=2:repeticiones
            [bt_aux,seleccionado] =
bootstrap(x(1,:),x(c,:),training_tam,25,grados);
            bt = [bt; bt_aux];
            seleccionados(c-1,i) = seleccionado;
        end

        bt = mean(bt);
        bt_total(c-1,:) = bt;
    end

    bt_total;

```

```

seleccionados = mode(seleccionados');
plot(bt_total(1,:), '-b')
xlabel('Grados del polinomio')
ylabel('MSE')
% legend('MSE')
grid on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% ANALISIS DE COMPLEJIDAD
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

end

```

Bootstrap

% Aplicación del método de Bootstrap.

```

function [bt,seleccionado] =
bootstrap(x,y,training_tam,m,grades)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SEPARAMOS EN TRAINING Y TEST
error_grades = zeros(1,length(grades));
x_training = x(:,1:training_tam);
y_training = y(1:training_tam);
x_test = x(:,training_tam+1:end);
y_test = y(training_tam+1:end);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% SEPARAMOS EN TRAINING Y TEST

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% GENERAMOS M MUESTRAS BOOTSTRAP
for i = 1:m,

    [x_training,y_training] =
shuffle(x_training,y_training);% barajamos los datos
    [x_training_aux,y_training_aux] =
generar_bootstrap(x_training,y_training); %generamos una muestra
bootstrap con reemplazamiento

    A_training = [ones(size(x_training_aux,2),1)];% para
realizar la regresión usamos el método GLM
    A_test = [ones(size(x_test,2),1)];

    % generamos la matriz para GLM
    for j = 1:(grades(1)-1),
        A_training = [(x_training_aux.^j)' A_training];
        A_test = [(x_test.^j)' A_test];
    end

    % vamos completando la matriz de GLM
    % con ella vamos obteniendo los coeficientes de la curva
de grado j
    %calculamos el MSE y lo acumulamos en la estructura
error grades,
    %que guardará la acumulacion de MSEs para cada uno de
los grados.

```

```

    for j = grades,
        %ENTRENAMOS CON NUESTRA MUESTRA
        A_training = [(x_training_aux.^j)' A_training];
        A_test = [(x_test.^j)' A_test];
        sol =
inv(A_training'*A_training)*(A_training'*y_training_aux');
        %CALCULAMOS EL ERROR
        y_est = A_test*sol;
        (sqrt((y_est - y_test').^2))/size(x_test,2)
        error_grades(j-grades(1)+1) = error_grades(j-
grades(1)+1) + mean(sqrt((y_est - y_test').^2));
    end

    end

    % dividimos entre numero de muestras bootstrap los
    acumulados de los MESS
    % obtenidos
    bt = error_grades./m;

    %% CORREGIMOS EL SESGO GENERADO %%

    % necesitamos obtener el MSEs con el estimador del riesgo
    de predicción
    % llamado riesgo empírico. Consiste en entrenar y probar con
    los mismos
    % datos.
    error_grades = zeros(1,length(grades));

    A = [ones(size(x,2),1)];

    for j = 1:(grades(1)-1),
        A = [(x.^j)' A_training];
    end

    for j = grades,
        %ENTRENAMOS CON NUESTRA MUESTRA
        A = [(x.^j)' A];
        sol = inv(A'*A)*(A'*y');
        %CALCULAMOS EL ERROR
        y_est = A*sol;
        error_grades(j-grades(1)+1) = error_grades(j-
grades(1)+1) + mean(sqrt((y_est - y').^2));
    end

    bt = (error_grades).*0.368 + bt.*0.632; %aplicamos la
    corrección
    [~,seleccionado] = min(bt);
    seleccionado = seleccionado + grades(1) - 1;
end

function [gb_x,gb_y] = generar_bootstrap(training_x,training_y)

```

```
    pos_t =  
randi(size(training_x,2)/2,1,round((size(training_x,2)*0.3)) );  
    pos_bt =  
randi(size(training_x,2)/2,1,round((size(training_x,2)*0.3)) );  
    gb_x = training_x;gb_y = training_y;  
    gb_x(:,pos_bt) = training_x(:,pos_t+size(training_x,2)/2);  
    gb_y(pos_bt) = training_y(pos_t);  
end
```