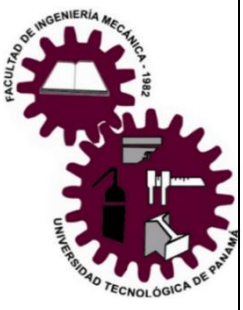


Universidad Tecnológica De Panamá

Campus Central Levi Lasso

Facultad De Ingeniería Mecánica

Proyectos Navales y Portuarios

Proyecto Final

Diseño de Buque Gasero (GNL)

Presentado por:

Roberto Castillo

Chamir de León

Presentado a:

Prof. Miguel Flores

2018

INDICE

ESTUDIO DE MERCADO 4
Impacto Ambiental 4
Cadena Integrada Del Proceso Del LNG 4
Reservas Mundiales 5
Principales Países Exportadores e Importadores De GNL 5
Evolución De La Demanda Mundial Del LNG 7
Rutas de Transporte De Gas Natural Por Vía Marítima 8
Buques LNG A Través Del Canal De Panama 9
Tipos de buques LNG 11
Construcción De Los Buques LNG 20
Estudio De Fletes 24
Competencia 25
Coste Del Flete 26
DIMENSIONAMIENTO Y MODELO MATEMATICO 27
Variables 27
Desplazamiento 27
BUQUE BASE 32
COMPARTIMENTACIÓN 33
ANÁLISIS HIDORODINÁMICO 34
Modificación Del Centro De Carena 34
Modificación Del Bulbo De Proa 36
ANÁLISIS ESTRUCTURAL 40
Esfuerzos Principales: 40
Análisis de Cargas: 40
Valores Mínimos De Escantillonado 42
Análisis Con Mars 44
Modelo en Nastran 49
ESTIMACIÓN DEL PESO EN ROSCA 52
PESO DEL ACERO 52
PESO DE HABILITACIÓN Y EQUIPO 52
PESO DE LA MAQUINARIA 53
Aproximación De Coste 53
CENTRO DE GRAVEDAD 55

FRANCOBORDO 56
CONDICIONES DE CARGA 58
Condición de Carga 1: Plena Carga 58
Condición de carga 2: Buque sin Carga 59
Condición de carga 3: Carga al 25% 60
Condición de carga 4: carga al 50% 62
ANÁLISIS HIDROSTÁTICO 64
Análisis De Equilibrio 64
ANÁLISIS DE GRANDES ÁNGULOS 66
ANEXO 70
Metodología Utilizada de Flujograma 70

ESTUDIO DE MERCADO

Buque LNG (Gas Natural Licuado)

El gas natural licuado (GNL) es gas natural que ha sido procesado para ser transportado en forma líquida. Es la mejor alternativa para monetizar reservas remotas y aisladas, donde no es económico llevar el gas al mercado directamente ya sea por gasoducto o por generación de electricidad. El gas natural es transportado en estado líquido (a presión atmosférica y a -162 °C). Se transporta en unos buques especiales llamados metaneros. El GNL es inodoro, incoloro, no tóxico, su densidad (con respecto al agua) es 0,45 y sólo se quema si entra en contacto con aire a concentraciones de 5 a 15%.

Impacto Ambiental

El gas natural tiene el menor impacto ambiental de todos los combustibles fósiles por la alta relación hidrógeno-carbono en su composición. Los derrames de GNL se disipan en el aire y no contaminan el suelo ni el agua. Como combustible vehicular, reduce las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en un 70%, y no produce compuestos de azufre ni partículas. Para la generación eléctrica las emisiones de dióxido de azufre, SO2 prácticamente quedan eliminadas, y las emisiones de CO2 se reducen en un 40%.

Todos los sistemas de producción y transporte, así como la planta de proceso, están diseñados para evitar fugas y prevenir incendios; es el caso de los sistemas de transferencia de GNL de y hacia los barcos, envío o revaporización (o regasificación) de GNL. Hay algunas diferencias de diseño respecto a las plantas de gas, pero las consideraciones ambientales, de seguridad y de salud son las mismas o más estrictas. Para transportar el gas, en grandes distancias, resulta más económico usar buques. Para transportarlo así es necesario licuarlo, dado que a la temperatura ambiente y a la presión atmosférica ocupa un volumen considerable. El proceso de licuefacción reduce el volumen del gas natural 600 veces con respecto a su volumen original. Aproximadamente la mitad de las reservas de hidrocarburos conocidas hoy son yacimientos de gas natural. El daño ambiental respecto a estas plantas es que este proceso abierto requiere de 500 millones de litros de agua diarios, los cuales se devuelven clorados y 10 grados más fríos, provocando un Impacto Ambiental Negativo afectando la biodiversidad y adulterando las aguas dulces de superficie.

Cadena Integrada Del Proceso Del LNG

Existen cuatro procesos principales que componen la cadena integrada del LNG:

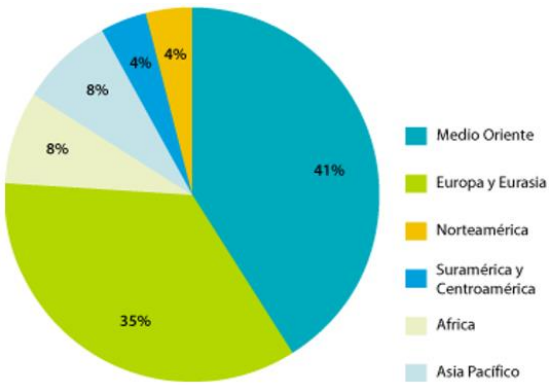
- Exploración y explotación del LNG: Comprende todas las operaciones relacionadas desde las reservas hasta las plantas de LNG
- Plantas de LNG: Incluye el tratamiento del gas natural, la licuefacción propiamente dicha y el almacenamiento de LNG.
- Transporte: Los buques metaneros llegan por transporte marino a las plataformas de descarga de las terminales de importación, en tierra firme o en áreas marinas. Si las instalaciones de atraque y la plataforma de descarga asociada son marinas, el LNG proveniente de la embarcación se bombea a través de tuberías submarinas hasta los tanques de almacenamiento aislados, emplazados en tierra firme. Los tanques de acero aislados se utilizan comúnmente con fines de almacenamiento.

- Terminales de recepción: Incluye la descarga, el almacenamiento, la regasificación y la distribución. El último eslabón de la cadena de suministro de LNG es la terminal de importación. Estas terminales descargan LNG y lo almacenan en tanques aislados hasta que esté preparado para ser sometido al proceso de regasificación.

Esquema Simplificado De Dicha Cadena

Reservas Mundiales

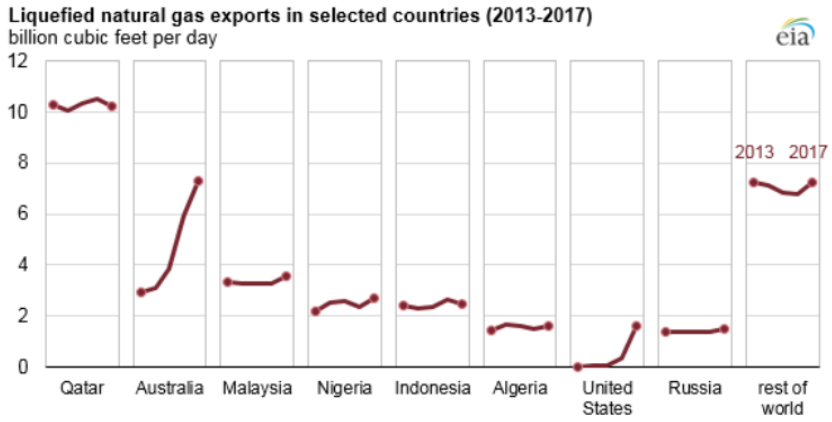
Respecto a las reservas mundiales de gas natural, éstas son aproximadamente de 145 trillones de metros cúbicos. Estas reservas están localizadas principalmente en la ex Unión Soviética y Oriente Medio. Y dentro de la ex Unión Soviética, Rusia tiene el 85% de esas reservas. En el caso de Oriente Medio, Irán es el país que tiene mayor cantidad de reservas, con un 47%.



Reservas Mundiales de Gas Natural (%)

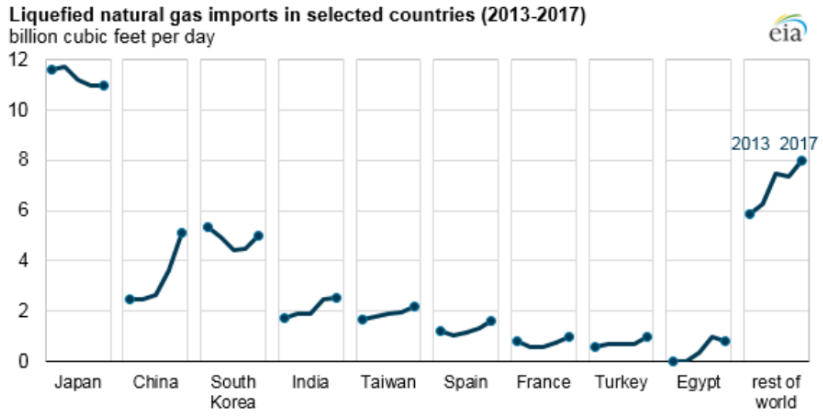
Principales Países Exportadores e Importadores De GNL

El comercio mundial de gas natural licuado (GNL) alcanzó los 38.200 millones de pies cúbicos por día (Bcf / d) en 2017, un aumento del 10% (3.5 Bcf / d) desde 2016 y el mayor aumento anual de volumen registrado, según el Informe anual sobre el comercio de GNL por la Asociación Internacional de Importadores de Gas Natural Licuado (GIIGNL). En 2017, había 19 países exportadores de GNL y 40 países importadores de GNL. Australia y los Estados Unidos se encuentran entre los países con los mayores aumentos (2.7 Bcf/d combinados) en las exportaciones de GNL de 2017.



Fuente: U.S. Energy Information Administration, based on International Group of Liquefied Natural Gas Importers, Annual Reports, 2014-18

Además de Australia y los Estados Unidos, varios otros países también aumentaron las exportaciones de GNL en 2017. El regreso al servicio de Angola LNG y los aumentos de varios países, incluidos Nigeria, Malasia, Argelia, Rusia y Brunei, agregaron otros 1.400 mmpc / d de exportaciones de GNL, más que compensar una disminución combinada de 0.6 Bcf / d en las exportaciones de Qatar, Indonesia, Noruega, Perú, los Emiratos Árabes Unidos y Trinidad.



Fuente: U.S. Energy Information Administration, based on International Group of Liquefied Natural Gas Importers, Annual Reports, 2014-18

.

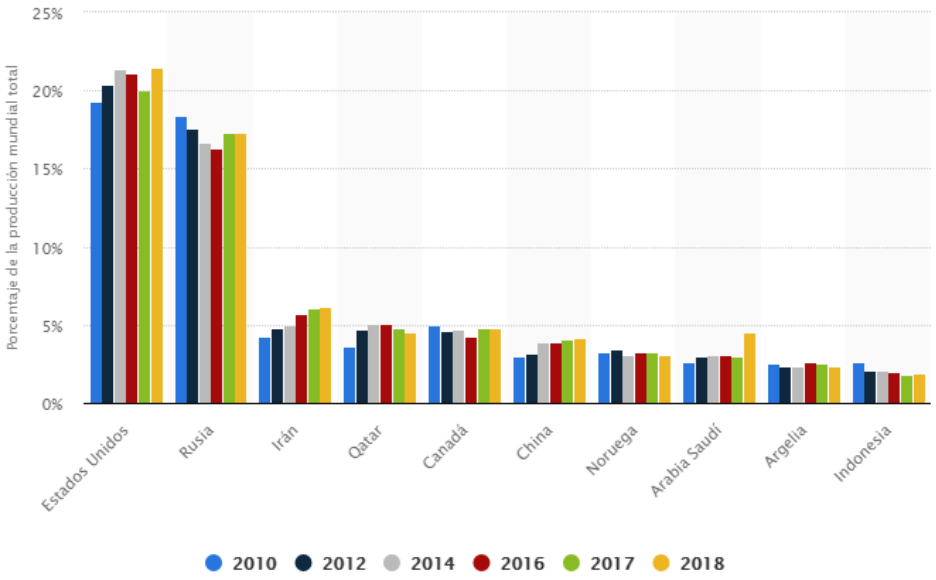
El LNG es un mercado en alza debido sobre todo a la explotación de bolsas de gas en zonas de perforación en las que previamente han agotado sus reservas de petróleo. La aparición de economías emergentes, como China o La India, han provocado un incremento continuado de la demanda de gas natural licuado. La comercialización del gas licuado está concentrándose mayoritariamente en Asia, liderarando el crecimiento de las importaciones mundiales de GNL, con el 74% (2.600mpc / d) del aumento en 2017.

Las importaciones de GNL en América del Sur (Brasil, Argentina, Chile y Colombia) se mantuvieron prácticamente sin cambios desde 2016. En América del Norte, las importaciones mexicanas de GNL aumentaron un 17% ya que el país siguió dependiendo de los suministros de GNL en medio de la disminución de la producción nacional y los retrasos en la construcción. conectando la red doméstica mexicana a las exportaciones de

gas natural desde los Estados Unidos. Las importaciones de GNL en Medio Oriente disminuyeron en un 9%, principalmente en Egipto y los Emiratos Árabes Unidos (Dubai).

Evolución De La Demanda Mundial Del LNG

En la siguiente grafica se observa estadísticamente distribución porcentual de la producción de gas natural de 2010 a 2018, por países. En el año 2018, Estados Unidos fue el principal país productor de gas natural a nivel mundial, con aproximadamente el 22% de la producción mundial, seguido de Rusia e Irán

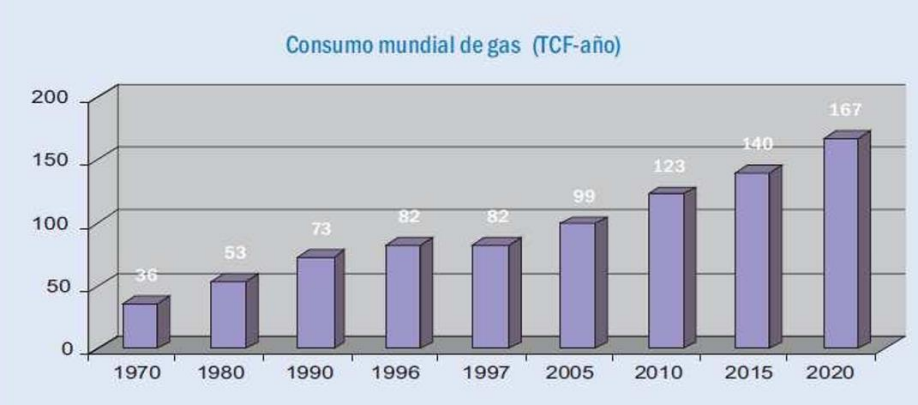


Porcentaje de la Producción Mundial

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 los competidores.

El ritmo de desarrollo de la industria mundial de GNL es cada vez mayor. Según Alexéi Belogóriev, 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.

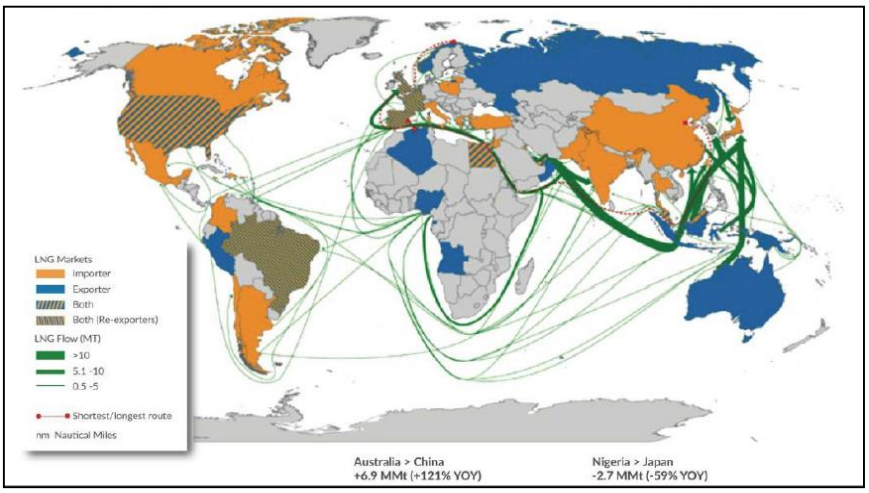
En la siguiente figura puede observarse el crecimiento histórico hasta el año 2010 de la demanda mundial de LNG, y su correspondiente pronóstico hasta el 2020.



Rutas de Transporte De Gas Natural 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. Es esencial que exista un envío marítimo de GNL y por lo tanto ciertas rutas marítimas tendrán un mayor flujo de GNL que otras.

A continuación, 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. Como puede observarse, hay un gran flujo de gas desde el Medio Oriente a países asiáticos como India, China, Japón y Corea.



Principales Rutas De Buques GNL

- 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.

- Otra ruta es desde Medio Oriente, el Archipiélago Malayo y Australia hasta países altamente industrializados del Lejano Oriente como China, Corea y Japón, a través del Océano Índico y los mares del Sureste Asiático.
- 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.

Rusia posee el primer buque GNL construido que es a la vez rompehielos, el LNG/c Christophe de Margerie. Este buque permite romper hielo de hasta 2,5 metros de espesor, permitiéndole navegar durante todo el año sin escolta de otros buques rompehielos. Este buque ha realizado rutas árticas a países como Reino Unido y China. Debido a la posición geopolítica de Rusia, mucho de su gas es transportado por gaseoductos, aunque no se descarta el transporte marítimo del mismo.

LNG/c Christophe de Margerie.

Buques LNG A Través Del Canal De Panama

El tránsito de Gas Natural Licuado (GNL) ha experimentado un crecimiento constante en los dos primeros años de operación del Canal ampliado, posicionando a la vía acuática panameña como un eslabón importante en la cadena de suministro global de esta industria.

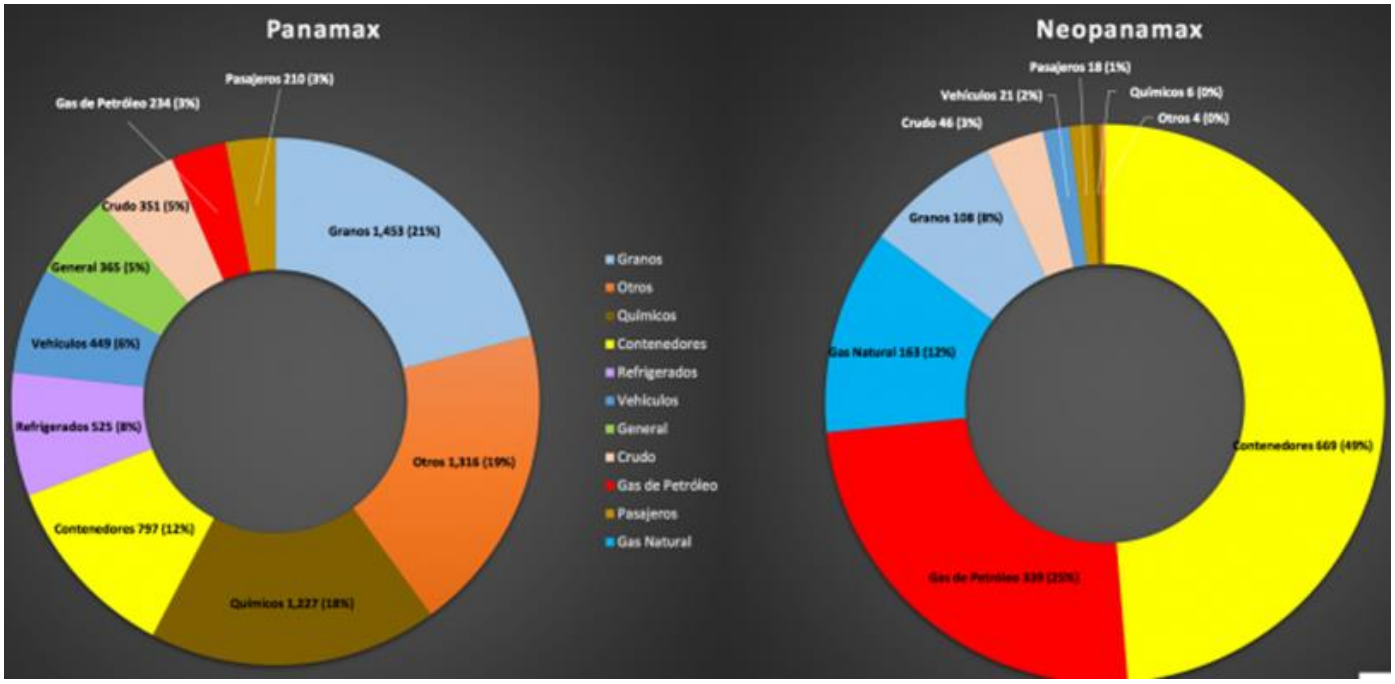
La multinacional AES y el Grupo Motta le están sacando provecho a esta oportunidad de negocio con la construcción de una planta de GNL en el Atlántico, mientras que la Autoridad del Canal de Panamá (ACP) evalúa construir una terminal de abastecimiento en el Pacífico.

El Canal ampliado ha recibido alrededor de 3,800 buques neopanamax, de los cuales el 12% corresponde a buques de GNL

No obstante, la ACP espera que el tráfico de GNL a través de la vía interoceánica crezca un 50%, aumentando de 163 tránsito a 244 tránsitos.

De acuerdo con la Organización Marítima Internacional (OMI), el mercado marítimo mundial deberá acogerse a las nuevas regulaciones de emisiones, que entrarán en vigencia el 1 de enero de 2020. La consultora estadounidense Boston Consulting Group (BCG) estima que la demanda de GNL para el transporte marítimo representará el 27% del mercado global para el 2025. En abril del año 2018 el Canal ampliado recibió al buque neopanamax “LNG Sakura”, que transportaba el primer embarque de GNL entre Estados Unidos (EE.UU.) y Japón, proveniente de la terminal de Cove Point, en Maryland. El tránsito de este buque marcó el inicio de una nueva ruta comercial entre EE.UU. y Asia

para carga de GNL procedente de la recién inaugurada terminal de Dominion Cove Point, la segunda terminal de exportación de GNL de ese país, después de Sabine Pass, que inició operaciones en el 2016.



Acumulado del Canal de Panamá por segmento de mercado

Implementación De Nuevas Rutas Para Transporte LNG

La expansión del Canal de Panamá abrió nuevas rutas para el transporte de gas natural, permitiendo el uso de economías de escala para los exportadores e importadores del producto.

El administrador de la Autoridad del Canal de Panamá (ACP), Jorge Quijano, explicó que con la vía acuática ampliada se permitirá ahorros en tiempo y citó el caso de la ruta Trinidad & Tobago a Quintero, Chile que acortaría distancia de 2.968 millas náuticas, a una velocidad de 19,5 nudos y 6,3 días de distancia usando la ruta del Canal versus el estrecho deMagallanes

También mencionó la ruta de Perú-España que a través del Canal de Panamá se ahorraría 3.740 millas náuticas con una velocidad de 19,5 nudos para 8 días en comparación con el estrello de Magallanes.

Otra de las rutas que se beneficiaría con el Canal ampliado sería la del golfo de los Estados Unidos a Japón que, en vez de irse por el Canal de Suez, podría viajar por la ruta del Canal ahorrándose 5.356 millas náuticas.

Países latinoamericanos y las naciones de América del Norte están ahora esforzándose por alentar la instalación de nuevas fuentes de energía basadas en el gas natural, con el fin de asegurar que la energía esté disponible y que sea sustentable para satisfacer la demanda en el largo plazo.

La exportación de LNG en Norteamérica se está convirtiendo en una realidad tangible y es una fuente importante de suministro para los importadores latinoamericanos. Los

compradores latinoamericanos y los vendedores norteamericanos se encuentran ahora en la etapa de forjar alianzas a largo plazo y de alcanzar un importante éxito comercial,

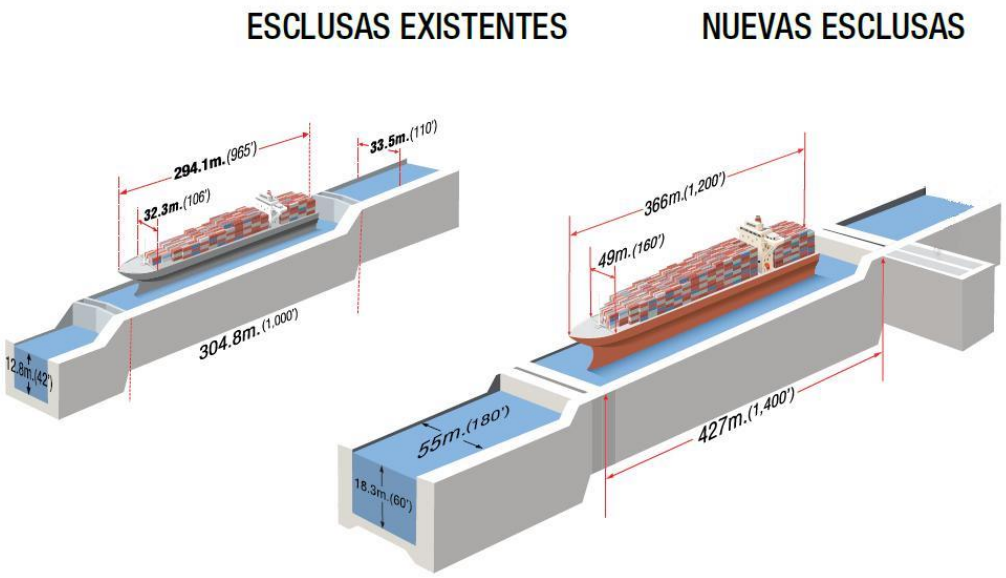
A nivel mundial, el uso de gas natural está tomando cada vez mayor importancia. Según el último informe de la Agencia Internacional de Energía (AIE), la demanda por LNG crecerá a una tasa promedio de entre 1,7% y 2% hasta 2035. Hoy, el gas natural representa el 23% del consumo energético primario global y hacia 2035 será el 28%, según estima la Agencia Internacional de Energía (AIE).

Países del cono sur como Bolivia, Perú, Venezuela tienen yacimientos de gas natural y exportan, pero también Chile, Argentina, Ecuador, Colombia, Paraguay y Uruguay cuentan con el mineral no metálico, pero son consumidores del mismo y requieren importar de otros países éste combustible

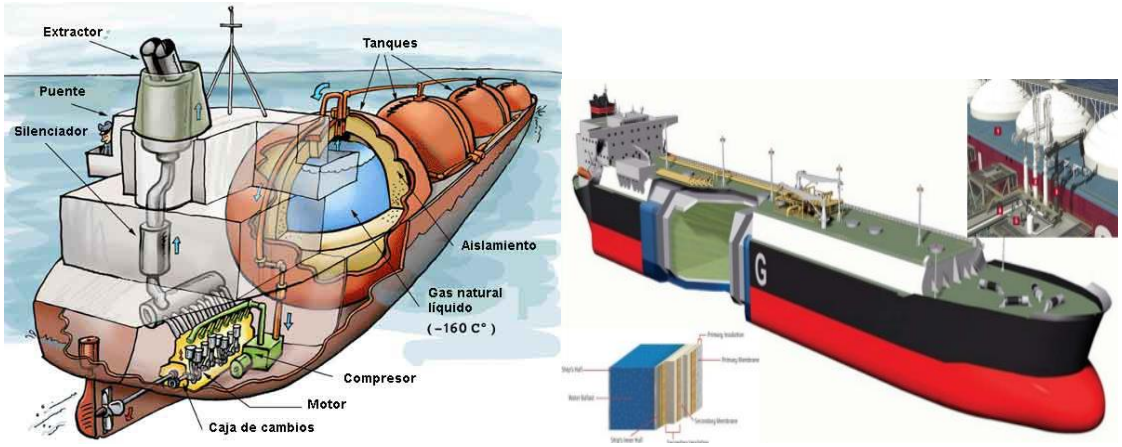
Canal Ampliado

Las nuevas esclusas tienen capacidad para atender al 98% de la flota mundial de barcos. Destacando la flota portacontenedores con la capacidad de atender entre el 97 y 98% del total. Los pedidos Neopanamax, están en alza tras la apertura de las nuevas y enormes esclusas de tres niveles que permiten el paso entre los océanos Atlántico y Pacífico.

La ampliación del canal permite el paso de los barcos Neo - Panamax, las cámaras de las nuevas esclusas construidas, miden 426,72 m (1.400 pies) de largo, por 54,86 m (180 pies) de ancho, y 18,29 m (59 pies) de profundidad, con dos compuertas rodantes a cada lado de las cámaras que son las más grandes y pesadas del mundo.



Tipos de buques LNG



Buques LNG (esféricos y de membrana)

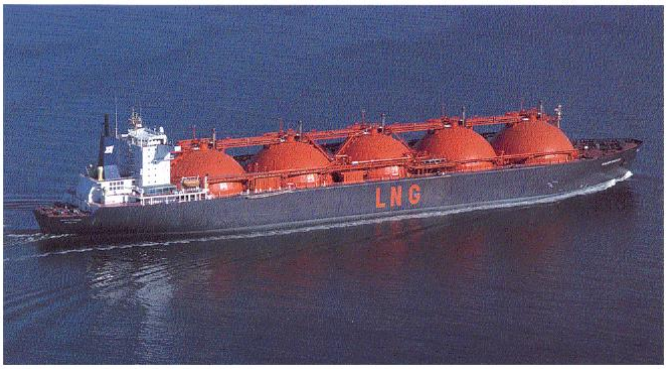
Los esféricos: son tipo Moss Rosenberg por ser diseñados por esta empresa noruega. Están construidos en acero inoxidable y son autoportantes, o sea que ellos soportan la carga. Debido a la infraestructura que deben crear los astilleros para construirlos han perdido mercado hoy en día con respecto a los de membrana. Son muy característicos por tener un sistema de contención de carga muy particular, que incluye cuatro o más grandes tanques esféricos, cuyas semiesferas destacan sobre la cubierta principal.

Los de membrana: están hoy día diseñados y licenciados por Gaz Transport & Technigaz's, que es la unión de dos empresas. El peso de la carga se trasmite al casco interior a través de las membranas y aislamientos. Tienen varios diseños, siendo los más comunes el GT-96, el Mark III y el CS1. Aproximadamente el 60% de los buques de GNL actualmente en servicio cuentan con sistemas de contención de carga de tipo membrana, destacando fácilmente de otros tipos de buque por la elevada cubierta sobre la cubierta principal, ya que debajo de ella van los tanques. Hasta ahora al ser buques de precio elevado y contratados por un período largo para transportar cargas entre dos puntos muy determinados han sido muy bien mantenidos, presentando unos índices de seguridad excelentes.

A continuación, se mencionarán algunos de estos sistemas de transportes:

-Sistema Moss-Rosenberg

A principios de los años setenta, la empresa de ingeniería naval Sener, y paralelamente los astilleros Kvaerner de Noruega, desarrollan un sistema de transporte de gas natural licuado por medio de tanques esféricos soportados por su ecuador, y construídos en aleación de aluminio (en algunos buques posteriores seconstruyeron los tanques de acero inoxidable).

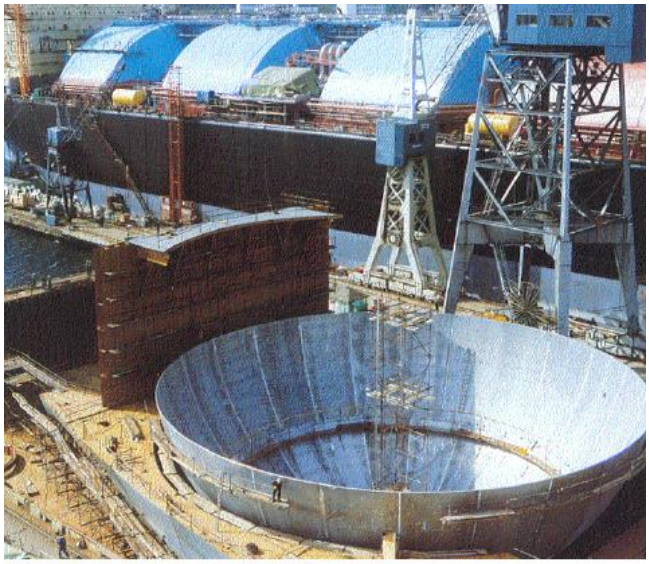


Buque de transporte de Gas Natural Licuado con sistema Moss-Rosenberg

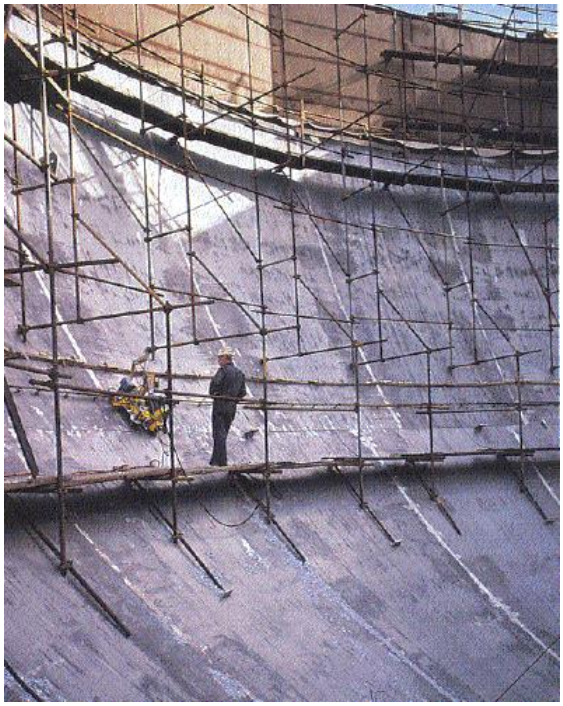
El sistema de carga Moss-Rosenberg se caracteriza por el uso de tanques esféricos autoportantes. Principalmente el material usado para su construcción es una aleación de aluminio térmica, necesaria para el transporte de gas natural licuado. Las planchas de aluminio utilizadas para la construcción del tanque es aluminio de calidad 5083-0 de acuerdo a las normas ASTM SB-209-69; la aleación de aluminio usada para la construcción de la parte superior del faldón es 5083-H reforzado también según las normas ASTM. También se utiliza acero inoxidable calidad AISI 304 N para la construcción de la parte inferior del faldón. La estructura de unión que conecta el tanque de carga de aluminio al faldón de acero inoxidable está fabricada de cuatro materiales diferentes:

Material	Espesor
Aluminio	13 mm
Titanio	2 mm
Níquel	2 mm
Acero inoxidable	20 mm
Espesor total	37 mm

La esfera y el domo se construyen a partir de planchas de aluminio soldadas. El anillo ecuatorial está mecanizado a partir de grandes piezas de aluminio. Se encuentra uniendo los hemisferios norte y sur de la esfera, por lo que los espesores del tanque de carga varían, siendo en el anillo ecuatorial de 169 mm. y de 70 mm. En el resto del tanque. Los tanques de carga están diseñados para aguantar las fuerzas dinámicas que se puedan producir a cualquier nivel de líquido en la condición normal de mar, a la vez que también están reforzados para aguantar la sobrepresión calculada para los procedimientos de descarga de emergencia.

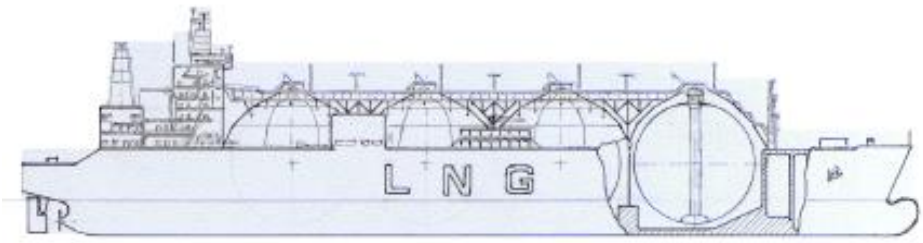


Proceso de construcción de un tanque esférico



Sistema usado para soldar las planchas de aluminio que conforman el tanque de carga

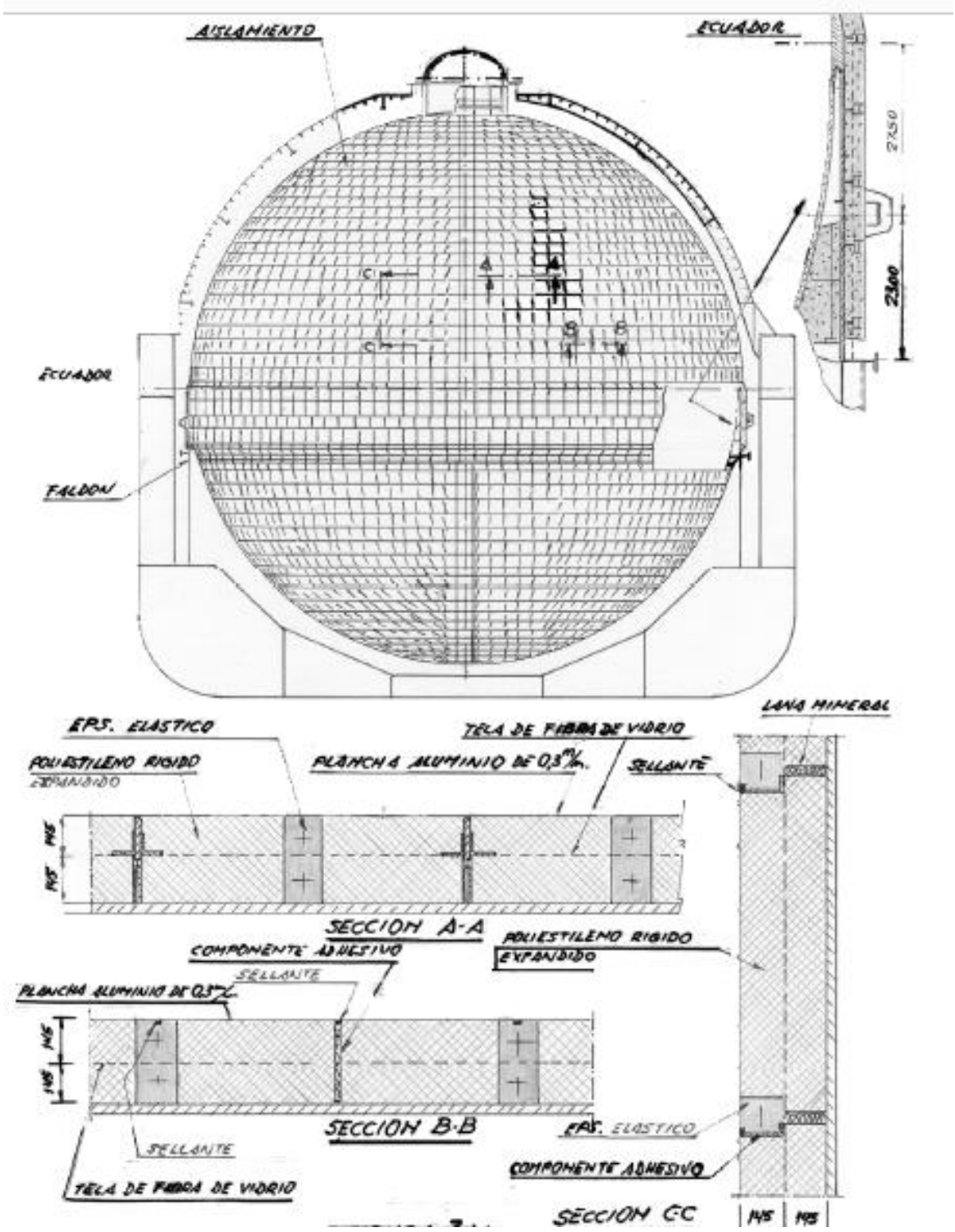
Los tanques de carga se unen y se soportan sobre el casco del buque por medio de un faldón cilíndrico. El anillo ecuatorial, es decir, la pieza que une los dos hemisferios, está construido de tal forma que conecta el tanque al faldón de soporte.



Colocación del hemisferio superior

El tanque de carga ha de estar aislado térmicamente por un método aprobado por las regulaciones IMO y por las Sociedades Clasificadoras. El método mayormente utilizado en este sistema es el uso de paneles de poliestireno, que garantizan una evaporación máxima de la carga del 0.15 % al día.

Los paneles de poliestireno usados para el aislamiento son ignífugos de acuerdo con la norma DIN 4102.IB2. La parte exterior de los paneles de poliestireno está revestida por unas finas planchas de aluminio, que sirven para que el aislamiento sea estanco al líquido en caso de que se produzca alguna pequeña grieta en la pared del tanque. De esta manera en caso de producirse cualquier pérdida en el tanque, esta fluirá por dentro del aislamiento hasta su parte inferior, donde hay un pequeño colector con un disco de ruptura, que en caso de llenarse de líquido a muy baja temperatura, un dispositivo di-metal de un punzón perforaría este disco, permitiendo el paso de gas líquido a una bandeja de acero inoxidable situada por debajo del tanque, la cual está provista de un flotador que indicará alarma en el control de carga, pudiendo achicarse este líquido por medio de un eyector alimentado por el agua de baldeo. Este sistema también se le conoce como barrera secundaria.



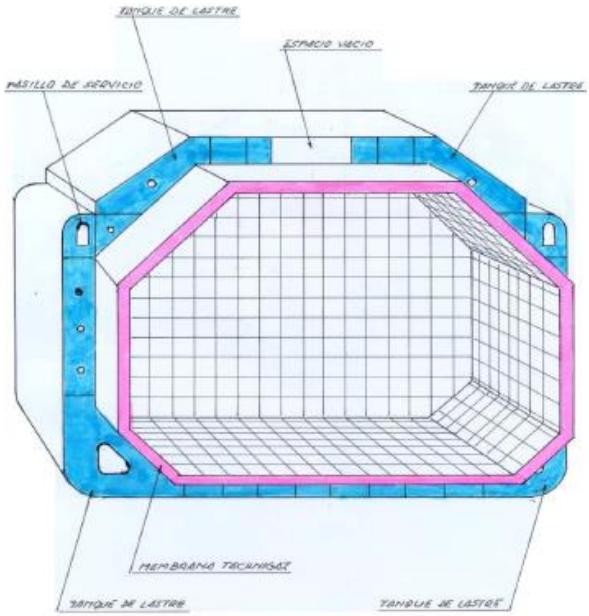
Aislamiento del tanque

-Sistema Technigaz

Este sistema se comenzó a diseñar a principios de los años 70, siendo el buque de bandera francesa “Descartes” el primero en utilizarlo.

Buque de transporte de Gas Natural Licuado con sistema Technigaz

Los tanques de carga son los espacios formados por el casco interior, delimitado por los tanques de lastre en los laterales y parte inferior, los cofferdams en la parte de proa y popa del tanque y los espacios vacíos (void spaces) en la parte superior. Estos tanques tienen forma prismática para distribuir las fuerzas de las ondas de choque producidas por el gas natural en estado líquido y de esta manera evitar roturas en la barrera primaria.



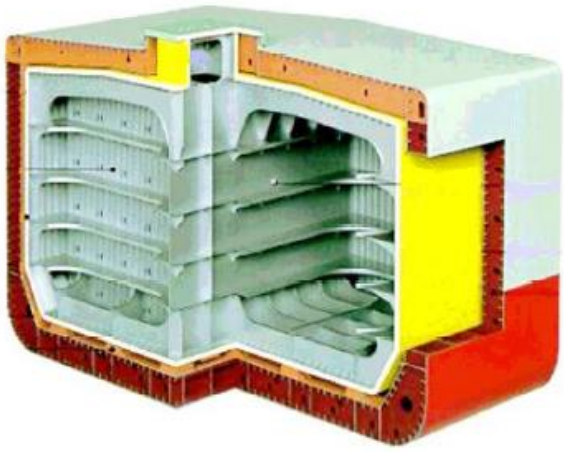
La principal característica de este sistema de transporte de gas natural licuado reside en la peculiaridad de la barrera primaria, la cual está constituída por planchas de acero inoxidable de calidad ISO 304L SS (UNE 18-8-2) corrugado, tanto longitudinalmente como transversalmente, de manera que pueda permitir la expansión y la contracción de los tanques de carga debido a los cambios de temperatura. Podemos destacar, como curiosidad, que el desarrollo de la unión de los pliegues, se hizo gracias a la ayuda de un técnico en papiroflexia. El espesor de las planchas de acero inoxidable empleado para la construcción de esta barrera primaria es de 1.2 mm, con lo que se consigue una mayor resistencia a los esfuerzos estáticos y dinámicos que se produzcan en el tanque. Del mismo modo se ve aumentado considerablemente el factor de contracción del acero

inoxidable, al ser éste directamente proporcional al espesor del material utilizado. Debido a esto se llegó a la solución de la plancha corrugada bidireccionalmente.

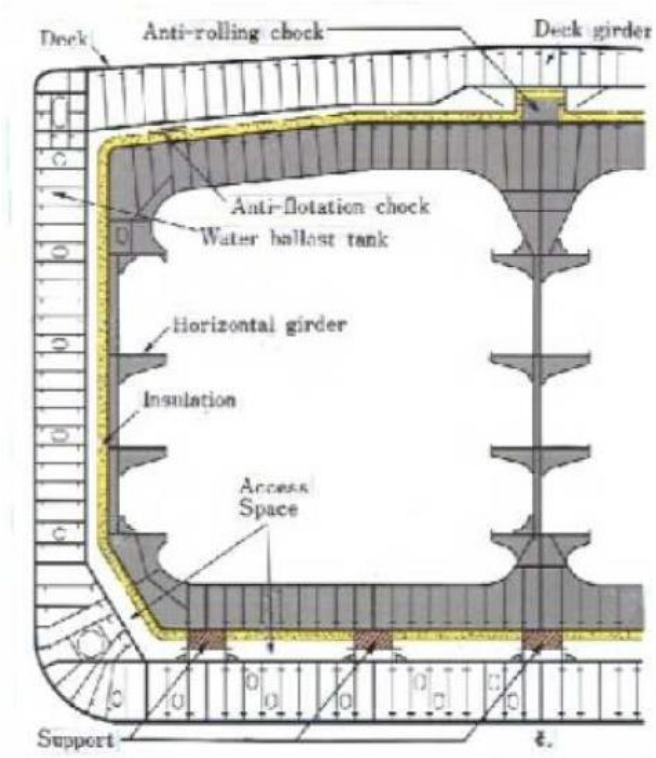
Tanque de carga, sistema Technigaz Mark II, del buque Matthew"

-Sistema IHI SPB – Prismático

Desarrollado por los astilleros Ishikawaima Harima Heavy Industries (IHI).
El material utilizado para su contrucción es una aleación de aluminio 5083 con un espesor de 15 a 35 mm. La curvatura de las vigas horizontales y verticales está diseñada para la absorción tanto de las contracciones del tanque como para cualquier tipo de presión producida por el líquido. Este sistema no presenta limitaciones por "sloshing" ni complicaciones en el viaje en lastre. Además, generan poco boíl-off y son fácilmente accesibles para su inspección y mantenimiento.



Los buques con este tipo de tanques pueden ser particularmente útiles para operaciones en zonas de mucho frío, debido a que poseen un sistema de tuberías con calefacción, y operaciones en hielo (la estructura del tanque es independiente a la estructura del buque). El tanque está subdividido por un mamparo estanco a los líquidos en la línea central y un mamparo oscilante en el interior de los 4 espacios. Gracias a esto, la frecuencia natural del líquido en el interior del tanque está lejos de la del movimiento del barco, eliminando cualquier posibilidad de resonancia entre los movimientos dela carga líquida y la nave.



Una de las características de SPB es la libre disposición del tanque. Son tanques prismáticos, pero con una mayor precisión en las formas con placas rígidas. El tanque puede ser diseñado con forma de diamante.

Esto nos permite diseñar el casco del buque, considerando en primer lugar el mejor rendimiento del casco en las condiciones de diseño, y, a continuación, diseñar los tanques siguiendo el contorno del casco, lo que nos lleva a un buque compacto con unas formas del casco ideales.

El aislamiento del tanque consiste básicamente en paneles de PUF, que están fijados mediante pernos. Entre los paneles encontramos las “cushion joints”. Estas absorben los movimientos relativos entre el tanque y el aislamiento y eliminan las tensiones térmicas en el aislamiento.

Construcción De Los Buques LNG

En los astilleros franceses Chantiers de L'Atlantique, en Saint Nazaire, se construye utilizando los sistemas de membrana, tanto Gaz-Transport como Technigaz. La utilización de estos sistemas no implica una gran dificultad técnica de construcción como el sistema Moss-Rosenberg, por lo que su construcción no necesita de una gran cualificación o preparación técnica del astillero, ya que aunque el principio de estos sistemas es más complicado, es más un proceso de ensamblaje de piezas que de construcción en sí mismo (en el sistema Moss-Rosenberg cuanto más perfectos sean los tanques mejor aislados térmicamente estarán).

En Japón, los astilleros construyen mayoritariamente con el sistema Moss-Rosenberg. Actualmente son el segundo país con más construcción de buques para el transporte de gas natural, siendo los astilleros Mitsubishi Nagasaki y Kawasaki Heavy Industries los mayores productores.

Los astilleros coreanos construyen principalmente utilizando los sistemas de membranas tanto Gaz-Transport, como Technigaz. Una de las razones es que no están tan técnicamente preparados para la construcción de los tanques esféricos, necesarios para el sistema Moss-Rosenberg. Debido a esto y a la gran cantidad de mano de obra existente en dicho país, es más rentable construir utilizando los sistemas de membranas, lo que hace que sean los buques más baratos del mercado, liderando la producción mundial de buques de transporte de gas natural licuado en la categoría de membranas. Por último tenemos los países que aun siendo constructores navales no tienen experiencia continuada en la construcción de este tipo de buques como pueden ser: Estados Unidos, Alemania, Italia y España.

En Estados Unidos se construyeron dos series de buques de transporte de gas natural licuado de 126.000 metros cúbicos de capacidad; la primera fue una serie de tres barcos, construida en Nwport News Ship & Naval Building, los cuales fueron construidos el sistema Technigaz Mark I, mientras que posteriormente General Dynamics construyó una serie de diez barcos utilizando el sistema Moss-Rosenberg.

Alemania, a finales de los 70 construyó un barco de 125.000 m3 de capacidad utilizando el sistema Moss-Rosenberg, en los astilleros HDW, situados en Papenburg. Italia construyó dos buques de 65.000 m3 utilizando el sistema Gaz-Transport a finales de los 90, en los astilleros Genova Sestri.

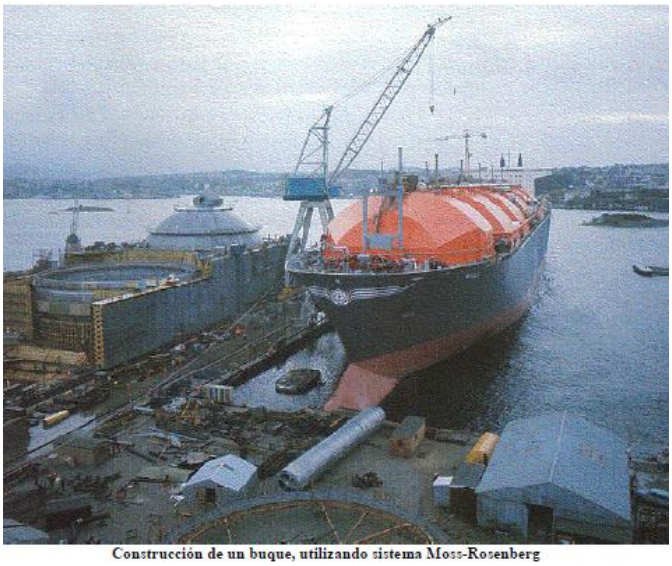
España construyó a principios de los años 70 el buque Laietá de 40.000 m3, utilizando el sistema ESSO-Aluminium del que solo se construyeron 3 unidades unidades (una en España y dos en Italia), siendo un sistema minoritario y caído en desuso. Los últimos buques LNG se construyeron en los astilleros IZAR Puerto Real e IZAR Sestao, que construyeron 3 buques cada uno para las compañías Knutsen OAS, Teekay LNG y Naviera El cano. Actualmente no tienen ningún buque en construcción, debido a que las empresas construyen sus barcos en Corea.

Comparación En Cuanto A La Dificultades Técnicas De Construcción

Los sistemas con menos complicaciones en la construcción, son los buques de membranas, y dentro de éstos, el sistema Technigaz, ya que partiendo del casco interior, formado por la parte interna de los mamparos de los tanques de lastre y los cofferdams, se construye la membrana secundaria y la membrana primaria. Esta última está constituida por planchas corrugadas de 1.2 mm de espesor, siendo más fácil de soldar que la barrera primaria usada en el sistema Gaz-Transport, que tiene 0.7 mm de espesor, añadiendo la dificultad técnica que supone el tener que soldarlas entre sí. Respecto al sistema Gaz-Transport, aparte del problema técnico que supone efectuar las soldaduras de unión de las barreras, tanto primarias como secundarias, el resto de la construcción del tanque es relativamente sencilla ya que la construcción de las membranas sigue el método de construcción modular, puesto que el resto de las piezas que conforman las barreras son construidas previamente al montaje del tanque.

Construcción de un buque con tanques de membranas

Paralelamente, el sistema Moss-Rosenberg, que a priori podría parecer el más sencillo, en la práctica resulta el más difícil, debido a la dificultad técnica que supone para un astillero la construcción de los tanques esféricos, ya que la parte inferior del tanque se construye sobra la parte del buque ya construido en grada. Una vez finalizada la parte inferior del tanque se le suelda el anillo ecuatorial, suponiendo una elevada complicación técnica la unión de dos piezas, que aun siendo del mismo material (principalmente aluminio) son de diferentes espesores, siendo el de los dos hemisferios de los tanques de 70 mm y el del anillo ecuatorial de 169 mm, A esta dificultad, posiblemente la mayor en la construcción de tanques, hay que sumarle la construcción de los hemisferios, en los que la construcción de los gajos que conforman la semiesfera resulta bastante compleja. Además, el hemisferio superior se construye en tierra, y una vez finalizado se posiciona sobre el anillo ecuatorial para proceder a la unión por medio de soldadura, con la dificultad que supone el transporte, izado y posicionamiento de semiesferas de 30 a 40 m de diámetro.

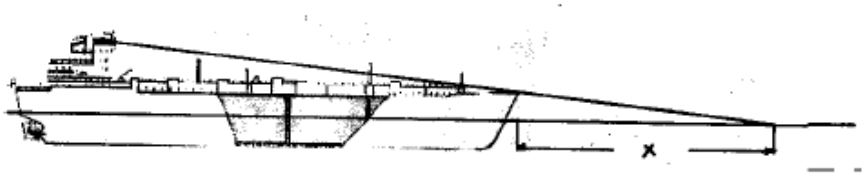


Construcción de un buque, utilizando sistema Moss-Rosenberg

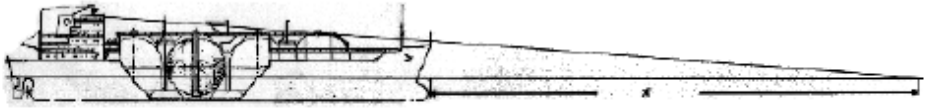
Comparación En Cuanto Al Calado Aéreo

La legislación IMO no contempla nada en cuanto al calado aéreo, pero en cambio si está perfectamente contemplada la máxima distancia de área ciega que puede tener un buque en la zona de proa para una persona situada en el puente de gobierno. Esta máxima longitud del área ciega es el resultado del producto de una constante 1.7. De esta manera para un buque por ejemplo con una eslora máxima de 290, la máxima longitud de área ciega será de 493 m. por lo que los buques construidos siguiendo el sistema Moss-Rosenberg han de ser de mayor puntal, debido a que casi la mitad de los tanques esféricos van por encima de cubierta, con lo que para poder cumplirla legislación de este aspecto, se le ha de dar más altura a la habilitación para poder colocar el puente de gobierno a la altura mínima indispensable para cumplir con este requisito.

Distancia máxima del área ciega: X = Eslora * 1.7



Perfil de un buque de membranas y su área ciega en la proa.



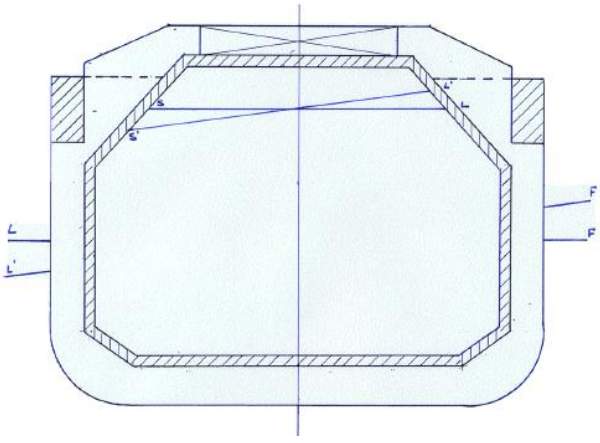
Perfil de un buque Moss-Rosenberg y su área ciega.

En cambio, los buques construidos siguiendo sistema de membrana, al ser los tanques de carga prismáticos, integrados dentro del casco del buque, la altura necesaria para poder cumplir con la reglamentación IMO referente a la longitud máxima de área ciega es menor.

Otro de los aspectos a tener en cuenta es la ruta a la que se vaya a dedicar el buque. Hay algunas rutas de tráfico de gas natural licuado, como lo es por ejemplo el canal de panamá el cual tiene varios puentes en la ruta, Esto implica que ciertos buques han tenido que sufrir modificaciones para poder acceder a la terminal, como la reducción de la altura de la chimenea o la modificación de los palos en los que están situados los radares. Esto ha llevado a que en la mayoría de estos buques se hayan instalado unos dispositivos hidráulicos de abatimiento de los palos. Hay que tener en cuenta también que en la reducción de la chimenea el reglamento SOLAS, contempla que en caso de que la salida de los gases de exhaustación de la chimenea esté por debajo del puente de gobierno se tiene que instalar un dispositivo de dispersión de dichos gases.

Comparación En Cuanto Al Efecto Del Exceso De Estabilidad En El Boil-Off

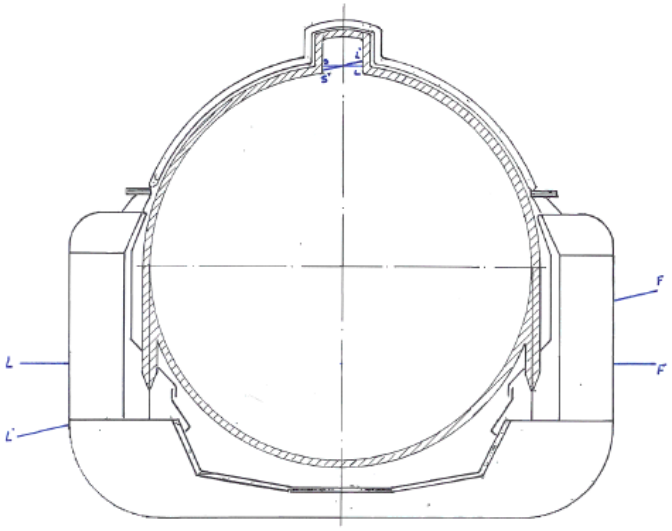
Los buques dedicados al transporte de gas natural licuado tienen exceso de estabilidad ya de proyecto, lo cual implica que sea un buque "duro", es decir, que dé balances cortos y rápidos. Dicha propiedad en los buques de membranas provoca que una vez el buque se encuentre en mar agitada y comience a balancear, aumente el boil-off o evaporación de la fase liquida de la carga. Esto es debido a que la temperatura a la que transportamos el gas natural licuado en los buques viene a ser de alrededor de -158°C y, teniendo en cuenta que la temperatura de ebullición del gas natural licuado es de -155°C aproximadamente a presión atmosférica, esto provoca que al menor balance producido por el buque la superficie del líquido en el interior del tanque se mueva, permaneciendo paralela a la teórica superficie de la mar. Esto implica que la carga esté en contacto con la parte del tanque que no contiene líquido, por lo que está a una temperatura superior a la del líquido. Teniendo en cuenta que el gas natural se transporta a una temperatura muy cercana a la temperatura de ebullición, solo con que el costado del tanque este a una temperatura superior a -155°C provocará la evaporación del líquido en contacto directo con el costado del tanque.



Como se puede ver en la figura anterior, el buque, al balancear en el mar, pasa de una flotación LF a una flotación L´F´, con lo que a su vez la superfície del líquido de la carga pasa de una superficie inicial SL a una superficie S´L´, paralela a L´F´. La cuña de líquido compuesta por el centro de la superficie y los puntos S y S´ están tocando la parte del tanque que todavía se mantiene fría por haber estado sumergida en el líquido, a diferencia de la cuña formada por el centro de la superficie del líquido y los puntos L y L´, que están tocando en este momento la parte del tanque que estaba por encima del nivel del liquido,

donde el mamparo del tanque está un poco más caliente, entre -153°C y -154°C, temperatura suficiente para producir la evaporación de la carga.

Consecuentemente esta evaporación de la carga produce un aumento de presión en el interior del tanque llegando a darse el caso de tener que evacuar gas a la atmósfera por el palo de proa para mantener la presión en tanques dentro de los límites de seguridad del sistema. Esto no sucede en los buques Moss-Rosenberg, ya que el efecto de exceso de estabilidad sobre el boil-off es menor debido a dos razones fundamentales: la primera es la forma del tanque de contención de carga, puesto que al ser esférico y cargarse hasta el 99,5% de su capacidad, la superficie expuesta a esta evaporación por contacto con la parte más caliente del tanque es menor. La segunda razón por la cual este boil-off es menor se debe al mayor espesor de los tanques de carga, siendo de 70 mm. en los hemisferios y 169mm. en el ecuador, con lo que la diferencia de temperaturas al nivel del líquido de carga es menor que en los buques de membranas.



En la figura superior se puede apreciar como la superficie expuesta a la evaporación es muy pequeña, ya que al estar autorizados a cargar al 99,5 % de la capacidad del tanque, esta superficie se encuentra en el interior del domo, por lo que si nos fijamos en las cuñas de la superficie del líquido vemos que son muy pequeñas, con lo que la diferencia de temperaturas será menor. Si a esto le añadimos el espesor de los tanques, podemos decir que la evaporación es mínima en comparación con los buques de membranas.

Estudio De Fletes

Realizamos un estudio de los distintos fletes de los buques gaseros. El cual nos servirá para hacer una aproximación del volumen de carga Optimo para dimensionar nuestro buque, por lo que la relación principal será entre el flete de la carga y la capacidad de volumen que pueden transportar los buques existentes.

A partir de ciertas páginas como la de “OXFORD institute for energi studies ”, “hellenicshippingnews” o “sciencedirect” y revistas de ingeniería y comercio marítimo, podemos obtener información útil a la hora de elegir la capacidad de nuestro buque.

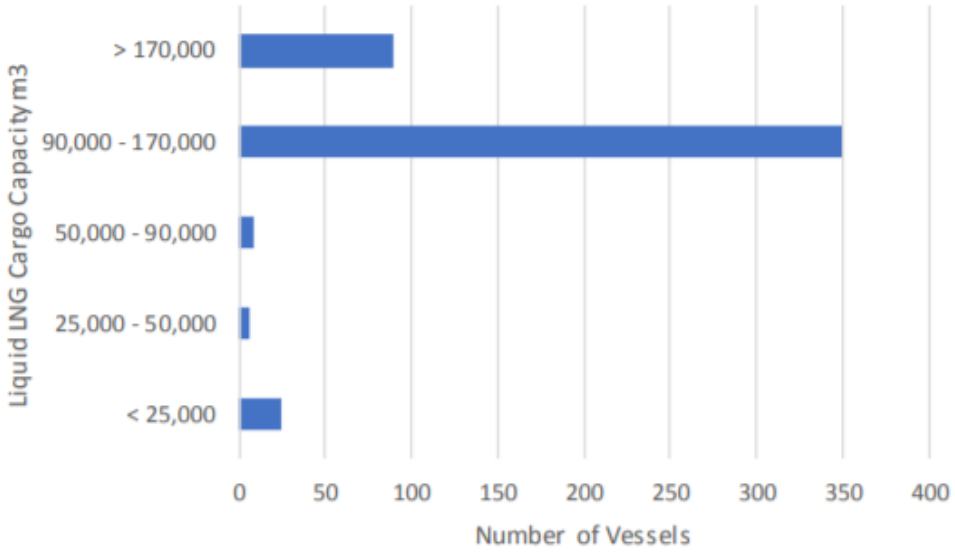
También a partir de la página “vesselfinder” obtenemos información relevante para nuestros buques analizados.

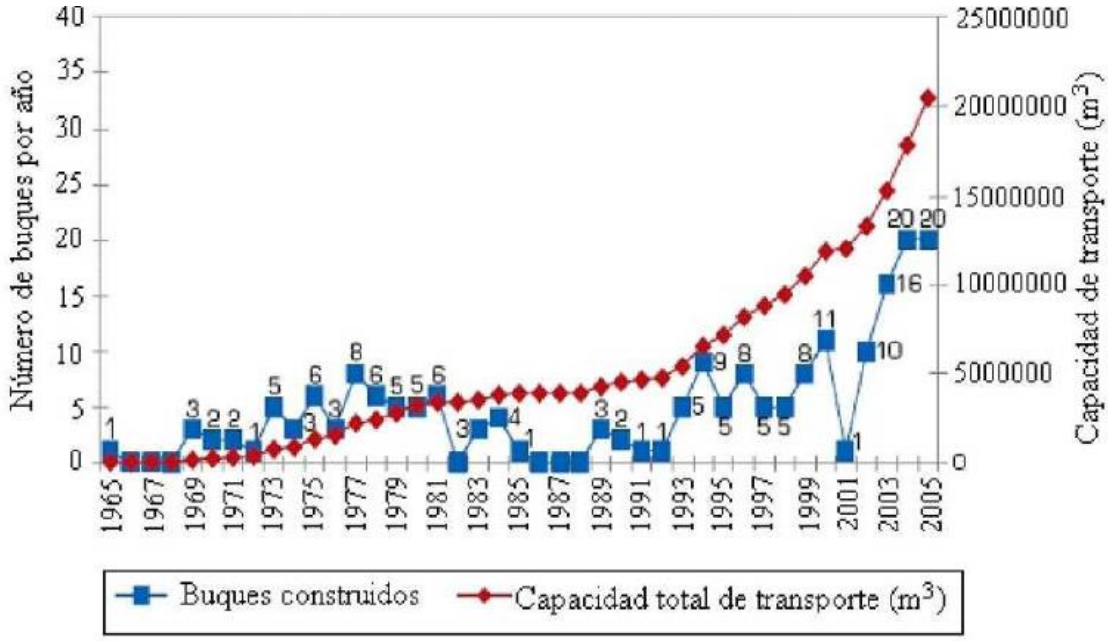
Competencia

Como primer término, a partir de la página del "OXFORD institute for energi studies " podemos observar que la mayoría de buques gaseros son de tamaño medio.

Por lo que un buque de gran tamaño nos ahorrara competencia ya que la mayoría de buques se centran en el transporte de medianas cargas y ofrecer un servicio de transporte para grandes volúmenes nos permitirá ofrecer servicios exclusivos.

Si realizamos un análisis de la flota mundial actual observamos lo siguiente:



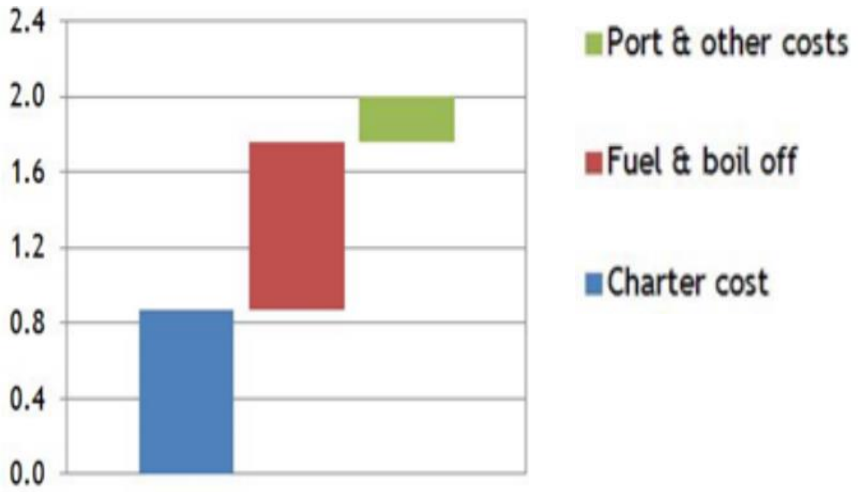


Se observa que a medida que nos acercamos a la actualidad, la capacidad de los buques ha ido aumentando, esto es un indicativo de que debemos construir un buque siguiendo

la tendencia de aumentar la capacidad, ya que la tecnología actual nos permite obtener un mejor rendimiento.

Coste Del Flete

A la hora de calcular el flete de este tipo de buques, el reparto se hace de la siguiente forma:



Como se observa, casi la mitad del coste del flete es beneficio para el armador del buque y atendiendo a esto, vemos que gran parte del coste se pierde en fuel y en elementos para el control de la mercancía. Por tanto, es fácil concluir que los costes fijos no aumentarán tanto como los beneficios en caso de aumentar la carga.

Conclusiones de Análisis de Mercado

Como se puede apreciar hemos visto que el gas natural licuado además de tener el menor impacto ambiental de todos los combustibles fósiles por la alta relación hidrógeno-carbono, se considera un combustible en el cual con el pasar del tiempo se ha incrementado su consumo mundial, debido a los avances tecnológicos en cuanto a su uso y al transporte en buques de mayores dimensiones, tomando así nuevas rutas de transporte que inciden directamente con la del canal ampliado de Panamá, proyectándose de esa manera un incremento económico en el país.

Realizando una comparación entre los buques GNL de esfera y de membrana para nuestro proyecto optamos por un buque de membrana debido al auge mundial del mismo y su facilidad de construcción en comparación con el de esfera, otro punto importante que tomamos en cuenta es el área siega en la proa del buque de membrana el cual es menor que en los buques de esfera, y a al momento de realizar cualquier maniobra se tiene un mayor alcance visual para realizar la misma.

DIMENSIONAMIENTO Y MODELO MATEMATICO

El proceso para la obtención de las dimensiones más apropiadas para nuestro buque lo hemos obtenido a partir de un modelo matemático establecido en Excel, tomando en cuenta variables de mérito y restricciones.

Este modelo parte de la hipótesis de un volumen de carga que nos dé un flete menor (obtenido de la comparación de precios del mercado) y a partir de este volumen de carga establecido, mediante las relaciones dimensionales que establecemos con ayuda de la base de datos de buques similares.

Variables

Tomando en cuenta el estudio de mercado, para esta sección tomaremos como variables de mérito el flete y el volumen de carga, analizando el mercado asiático del transporte de gas natural licuado ya que es un de las mayores potencias en el comercio de GNL. El cual nos indican que los mejores precios se obtienen para buques de tamaño entre los 165.000-170.000 m^3.

Dentro de las restricciones que nos encontramos a la hora de diseñar el buque, enumeramos las siguientes:

Principalmente las dimensiones del canal ampliado de Panamá:

- Probablemente la restricción más significativa, ya que nos restringe el tamaño de la embarcación para poder usar este canal a la hora de transportar mercancías. Las restricciones de tamaño son las siguientes:

ESLORA	366 m
MANGA	51.2 m
CALADO	15.2 m

Como segundo plano se tomará en cuenta teóricamente las siguientes restricciones:

- Restricciones Económicas: Si vamos a establecer el proyecto de un buque, este deberá ser rentable. Por este motivo, un gasto desmesurado durante su construcción provocará perdidas en el armador. Por tanto, nos planteamos un límite de dimensiones similar a los mayores buques construidos de este tipo.

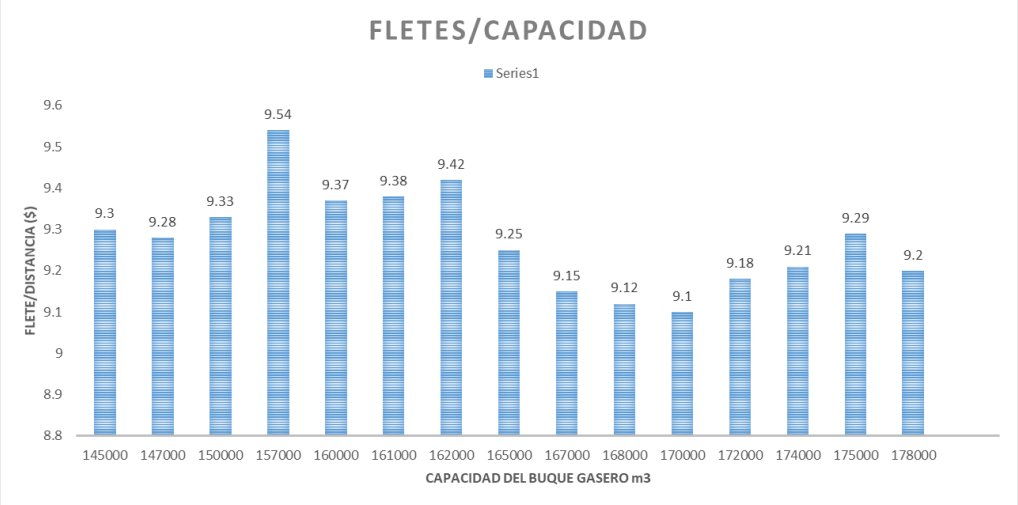
- Tamaño De Los Astilleros: Obviamente, el tamaño máximo de los diques de construcción de los astilleros influye a la hora de generar el diseño de la embarcación. Limitando de este modo las dimensiones máximas de eslora, manga y puntal

Desplazamiento

nuestro buque tendrá una capacidad de carga de:

$$V_{carga} = \mathbf{170.000\ m^3}$$

Podemos ver por medio de este grafico como se produce una baja de flete a partir de los 170.000, sin embargo, si estimamos unos costes de transporte del 80% del flete y 20% son beneficio, el volumen de carga que nos dará mayor beneficio será el de 170.000. lo veremos en las siguientes tablas.



En base a este gráfico y programando todos nuestros valores en Excel nos proporciona los valores de la relación del flete con la distancia y nos da un valor en el que podemos aproximar el coste de transporte.

Ejemplo de cómo se deriva el flete/ distancia

CAPACIDAD	DISTANCIA	FLETE	FLETE/DISTANCIA
147000	10767	100000	9.2876

VOLUMEN	FLETE/DISTANCIA	Coste transporte ($/L)
145,000	9.3	7.44
147,000	9.28	7.424
150,000	9.33	7.464
157,000	9.54	7.632
160,000	9.37	7.496
161,000	9.38	7.504
162,000	9.42	7.536
165,000	9.25	7.4
167,000	9.34	7.472
168,000	9.3	7.44
170,000	9.3	7.44
172,000	9.01	7.208
174,000	8.9	7.12
175,000	8.8	7.04
178,000	8.70	6.96
	$/litro	
Coste de transporte	8.5	
		Valor total

A partir del coste de transporte y el volumen de carga podemos obtener los gastos totales y luego realizar esa diferencia para entonces así obtener con que volumen de carga nos dará un mayor beneficio.

Volumen (L)	Coste del transporte total ($)	Gastos ($)	Beneficio ($)
162,000	1526040	1220832	305208
165,000	1526250	1221000	305250
167,000	1559780	1247824	311956
168,000	1562400	1249920	312480
170,000	1581000	1264800	316200
172,000	1549720	1239776	309944
174,000	1548600	1238880	309720
175,000	1540000	1232000	308000
178,000	1548600	1238880	309720

Podemos ver en el grafico anterior que con un volumen de 170.000 nos da un mayor beneficio.

A continuación, se adjunta una lista de los buques gaseros con grandes capacidades de carga y sus diferentes dimensiones.

Base de Datos					
Buque	V carga	L (m)	B (m)	D(m)	T(m)
Abdelkader	177400	285	46	26.8	11.9
Castillo de Santisteban	173887	280	46	26	11.5
Barcelona Knutsen	179723	279	45.8	26.5	11.95
Seri Balhaf	157720	281.6	46.5	25.8	11.15
British Emerald	155000	275	44.2	26	11.47
Trinity Arrow	154982	276	44.7	26	11.37
Fortin	154913	276	44.7	26	11.73
Express	151000	280	43.4	26	11.6
Dapeng Sung	147337	274.1	43.35	26.25	11.45
Maersk Qatar	145600	270	43.4	26	11.4
Fernando Tapias	140627	268.8	43.4	26	11.42
Hanjin Muscat	138366	268.5	43	26.2	11.3
British Trader	138200	266	42.6	26	11.35
Excelsior	138000	266	43.4	26	11.5
Berge Everett	138000	266	43.4	26	11.4
SK Summit	138000	266	43.4	26	11.3
Sestao Knutsen	138000	271	42.5	25.4	11.4
Iñigo Tapias	138000	271	42.5	25.4	11.4

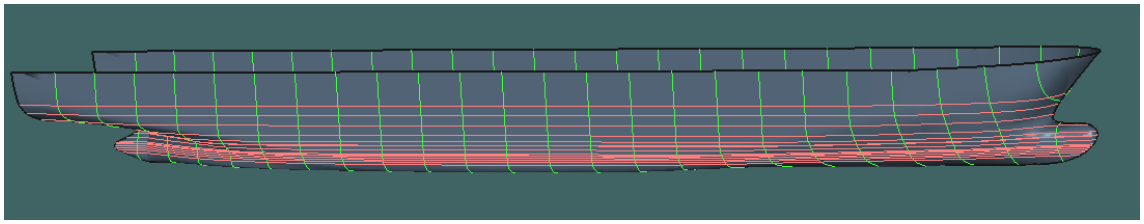
Con estos valores obtenemos nuestros máximos y mínimos para nuestro dimensionamiento.

Relaciones			
D-T	L/B	B/T	L/Vcarga^1/3
14.9	6.196	3.866	5.072
14.5	6.087	4.000	5.017
14.55	6.092	3.833	4.944
14.65	6.056	4.170	5.212
14.53	6.222	3.854	5.119
14.63	6.174	3.931	5.138
14.27	6.174	3.811	5.139
14.4	6.452	3.741	5.258
14.8	6.323	3.786	5.190
14.6	6.221	3.807	5.132
14.58	6.194	3.800	5.169
14.9	6.244	3.805	5.191
14.65	6.244	3.753	5.145
14.5	6.129	3.774	5.147
14.6	6.129	3.807	5.147
14.7	6.129	3.841	5.147
14	6.376	3.728	5.244
14	6.376	3.728	5.244

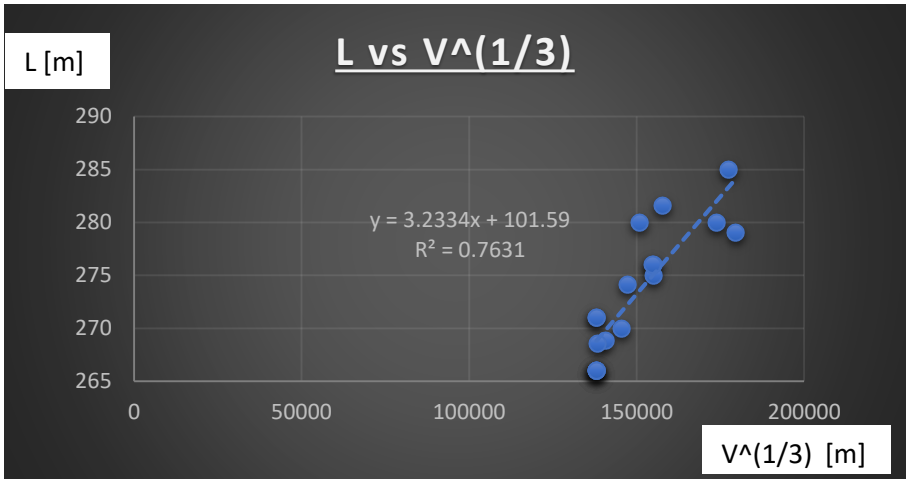
Relaciones	máximo	mínimo
L/B	6.452	6.056
B/T	4.170	3.728
L/Vcarga^1/3	5.258	4.944
Cb	0.86	0.78
Cp	0.83	0.79
Cm	0.996	0.992

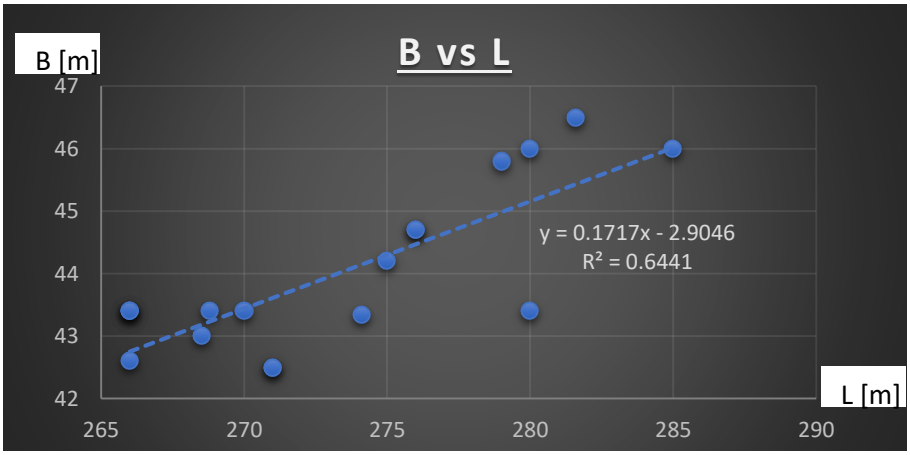
A partir del modelo matemático, las relaciones y restricciones de proyecto obtenemos entonces nuestras dimensiones para el buque GNL

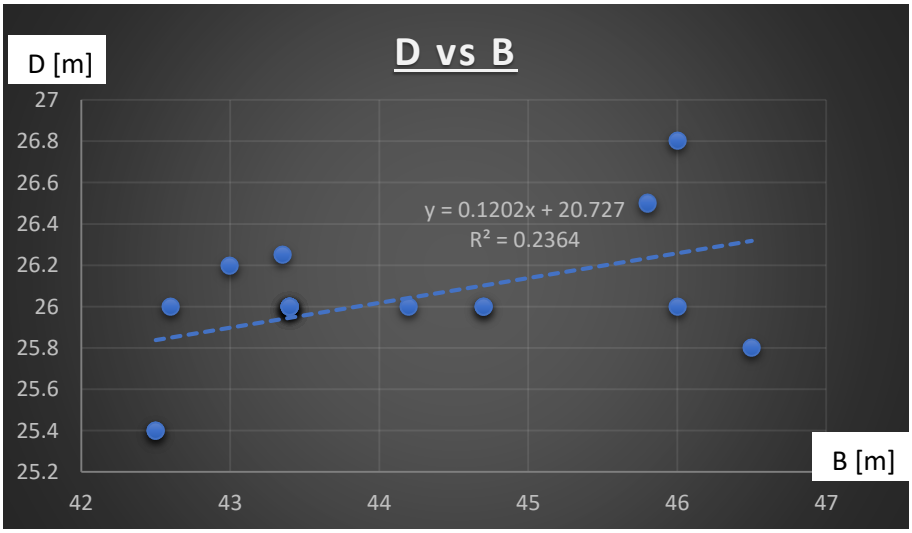
ESLORA (Lpp) [m]	273,87	m
MANGA (B) [m]	42,45	m
CALADO (T) [m]	10,74	m
PUNTAL (D) [m]	25,29	m

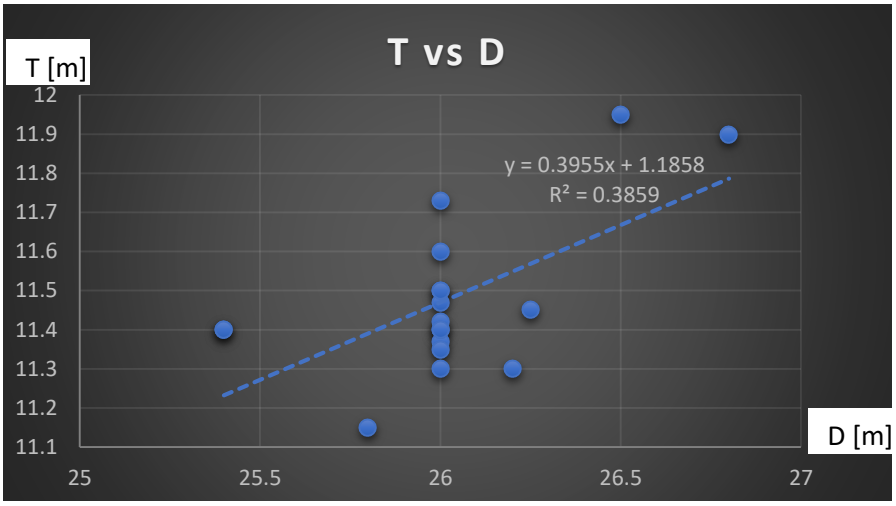


A manera comparativa realizamos regresiones lineales a partir de la base de datos, para verificar que los valores obtenidos no estén alejados de la realidad.









Dimensiones Obtenidas De Las Regresiones	
L (m)	280.7093
B (m)	45.29319
D (m)	26.17124
T (m)	11.53653

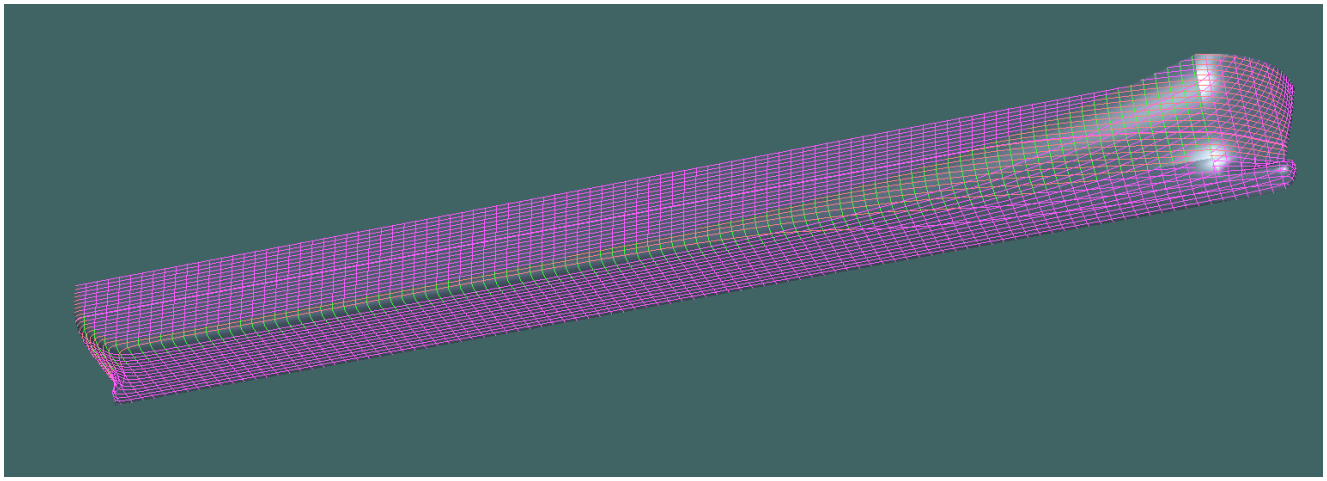
Como se puede apreciar podemos ver que los valores obtenidos con el modelo matemático son parecidos a los obtenidos con las regresiones lineales de la base de datos e incluso está dentro de las dimensiones restrictivas, por lo tanto, se puede decir que son admisibles las obtenidas con el modelo matemático.

BUQUE BASE

Con las siguientes dimensiones generaremos un modelo inicial sobre el que realizaremos las comprobaciones de diseño:

ESLORA (Lpp) [m]	273,87	m
MANGA (B) [m]	42,45	m
CALADO (T) [m]	10,74	m
PUNTAL (D) [m]	25,29	m

La forma de nuestro buque modelada con Maxsurf se muestra a continuación:

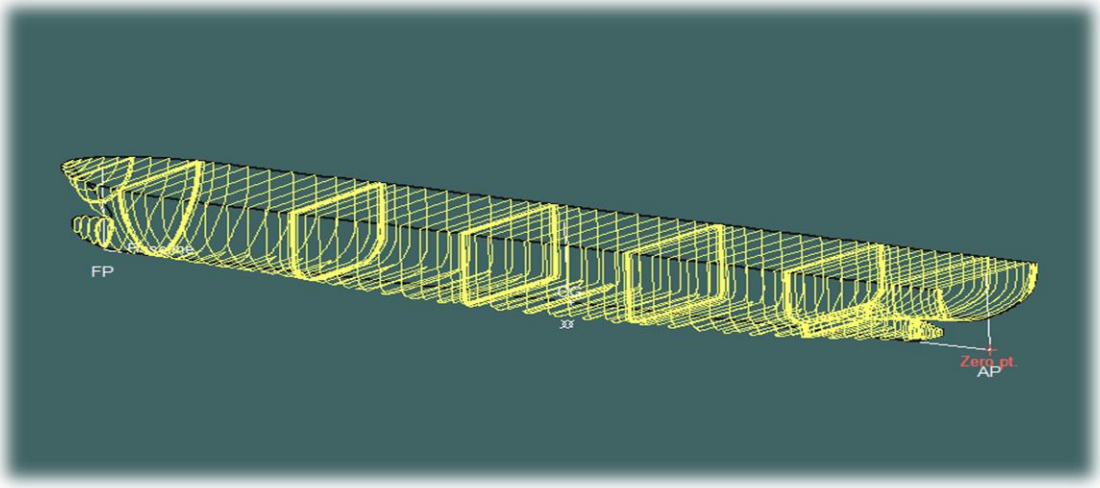


Para la creación del modelo utilizamos uno de los modelos básicos de maxsurf. En concreto el modelo del buque de carga y sobre este modelo iremos aplicando las modificaciones para finalmente obtener el buque más optimizado.

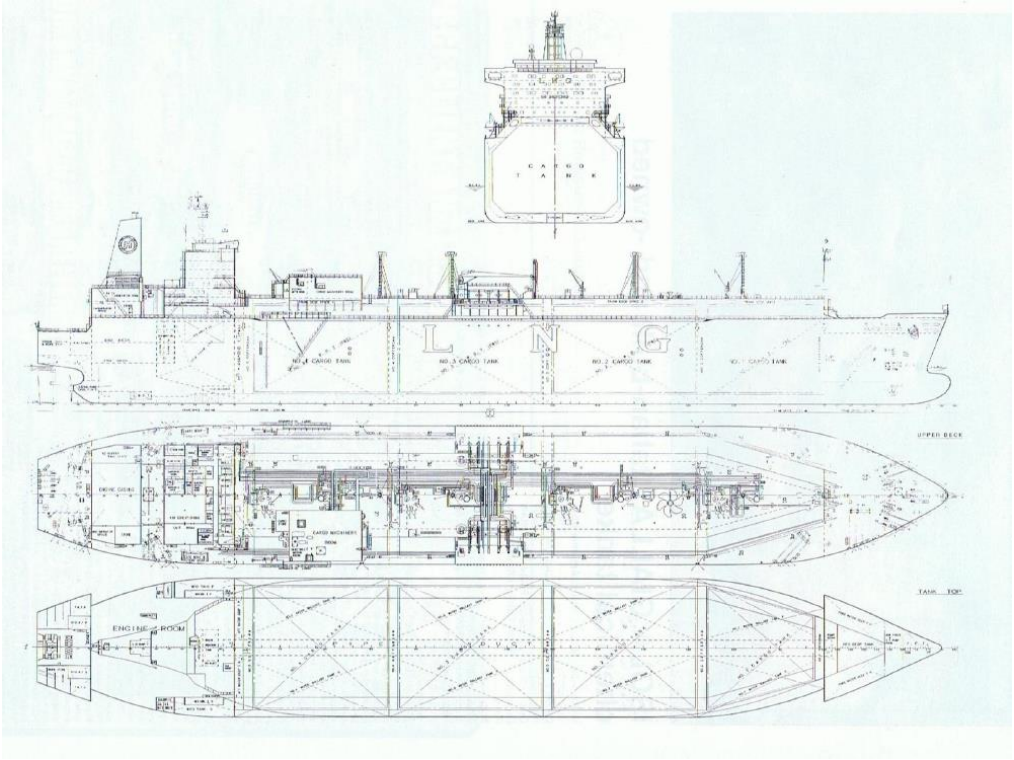
COMPARTIMENTACIÓN

Con el modelo generado en Maxsurf, y tomando como referencia la normativa Lloyd's Register establecemos la compartimentación requeridas

- Pique de popa
- Cámara de máquinas
- Local del Eje
- Espacio de bodegas
- Pique de proa



Cabe destacar que las bodegas por normativa deben estar envueltas por un cofferdam tanto entre ellas como con los mamparos límites y con el costado del buque. Un ejemplo de la disposición la podemos encontrar en los planos que mostramos a continuación:

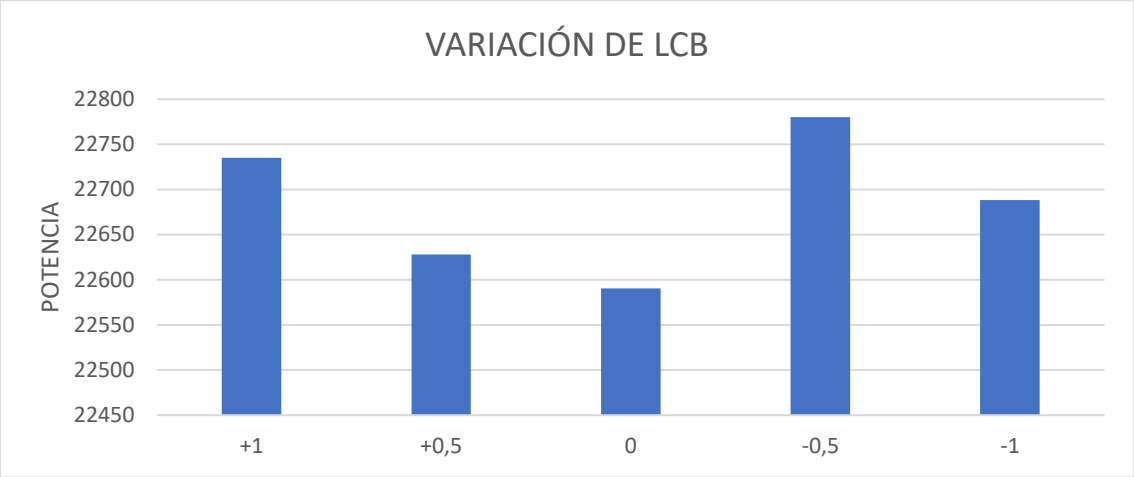


ANÁLISIS HIDORODINÁMICO

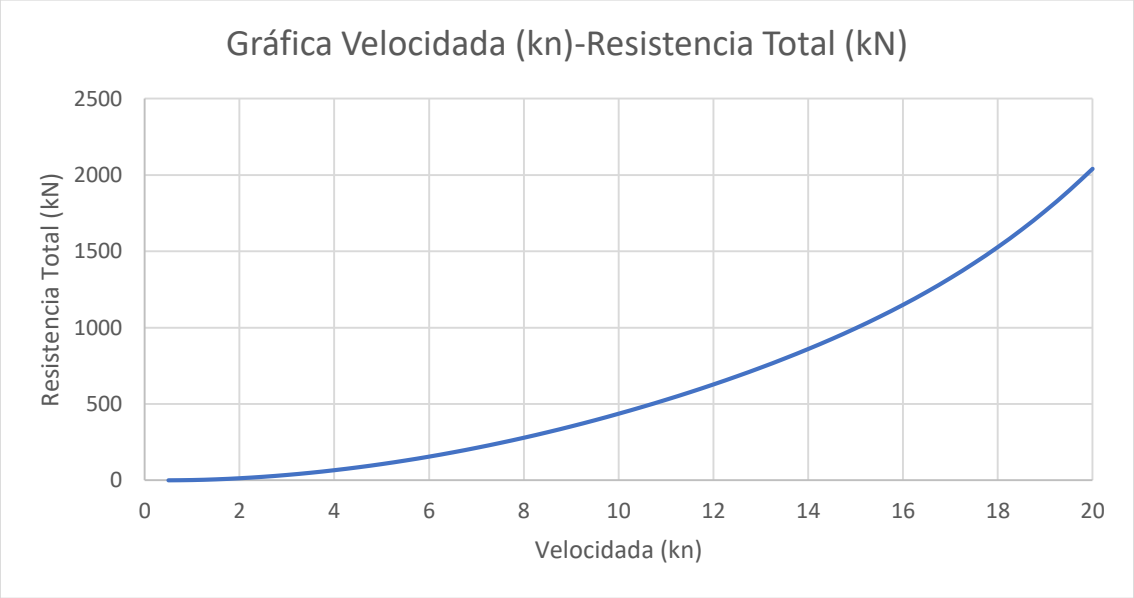
Modificación Del Centro De Carena

Para modificar el centro de carena se deben modificar las formas del buque. Para ello se modificarán las formas de popa, para aumentarlas y desviar hacia popa y hacia proa el centro de carena. El valor inicial es 49.8 % de DWL y lo trataremos como el punto 0.

LCB	Velocidad (kn)	Nº de Fr	Res. Total (kN)	Potencia (kW)
+1	20	0,19	2209,7	22735,109
+0,5	20	0,19	2199,3	22627,927
0	20	0,19	2195,6	22590,63
-0,5	20	0,19	2214,1	22780,135
-1	20	0,19	2205,1	22688,398



Realizamos un análisis del modelo básico del buque a través del Método Holtrop



Velocidad (kn)	Nº de Fr	Res. Total (kN)	Potencia (kW)
20	0,19	2195,6	22590,63

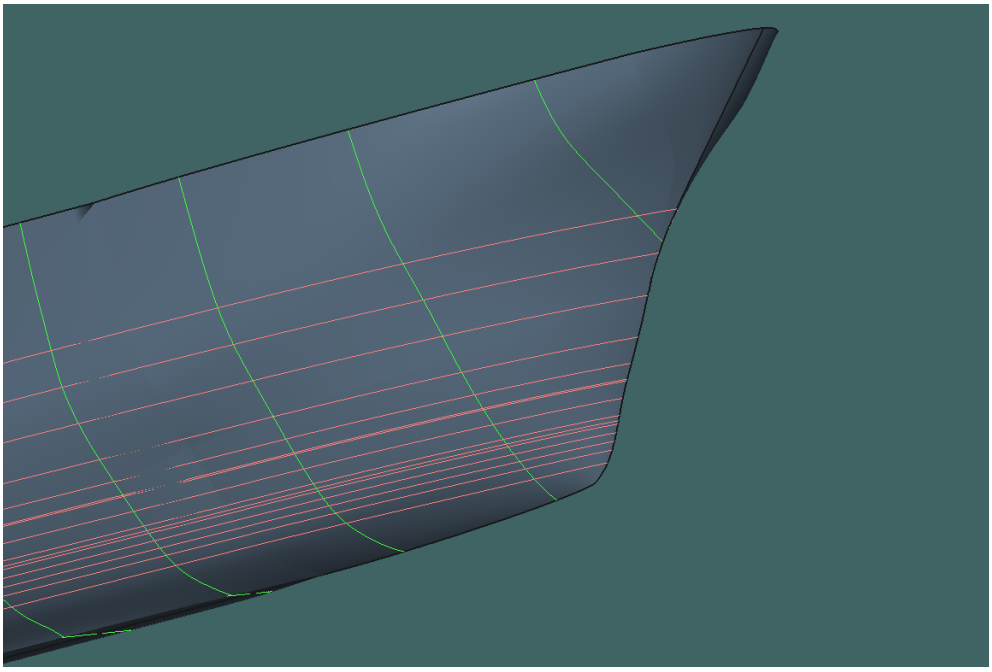
Podemos Decir entonces que

1- Hay un ligero levantamiento de la proa
2- El valor mas obtimo es el inicial
3- La modificación de formas provoca aumento de resistencia

Modificación Del Bulbo De Proa

Realizaremos ahora modificaciones en el bulbo de proa para optimizar la forma más adecuada para nuestro buque:

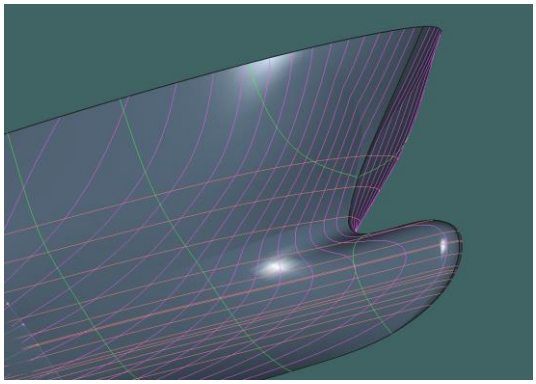
Primero analizaremos el valor de la resistencia total con el buque sin bulbo:



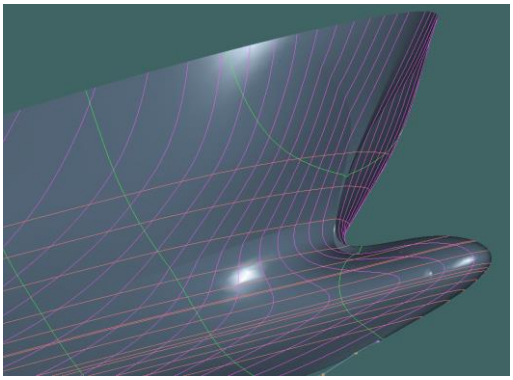
Dándonos los siguientes resultados:

	Velocidada (kn)	Nº de Fr	Res. Total (kN)	Potencia (kW)
INICIAL	20	0,19	2195,6	22590,63
SIN BULBO	20	0,2	2303,2	23697,609

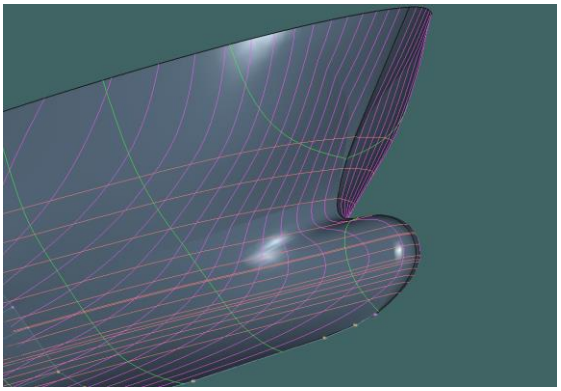
Tras esto probaremos distintas formas de bulbo para observar las que darán mejores propiedades hidrodinámicas, estas formas se muestran a continuación:



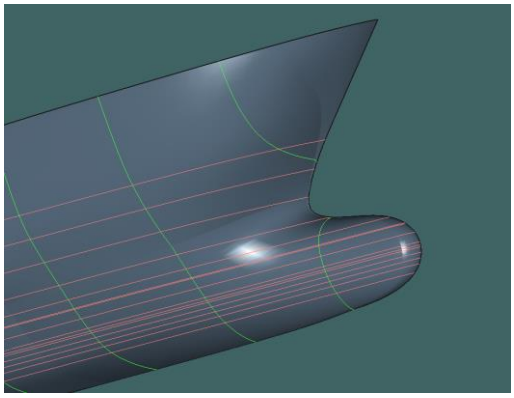
Modelo 1: sin modificar



Modelo 2: Bulbo estirado



Modelo 3: Bulbo contraido



Modelo 4: Bulbo recto

Las cualidades hidrodinámicas serán:

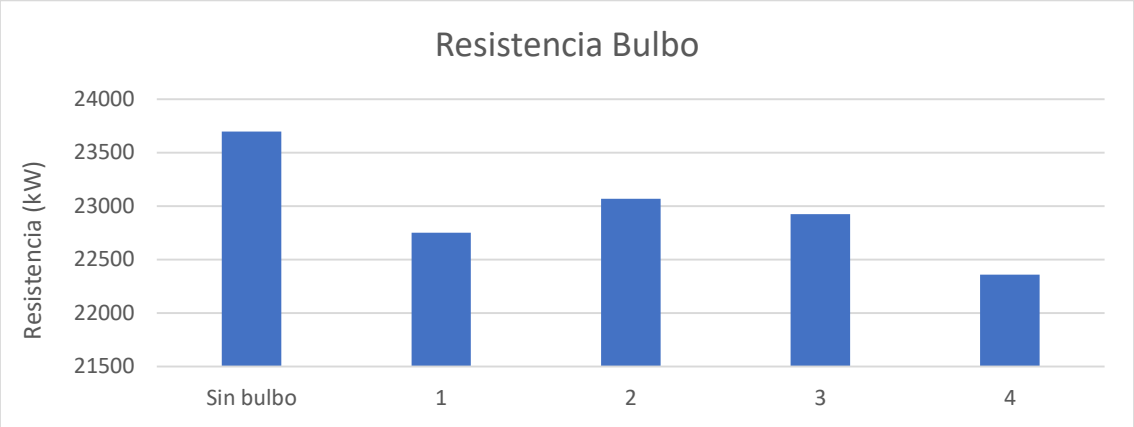
	Velocidada (kn)	Nº de Fr	Res. Total (kN)	Potencia (kW)
Modelo 1	20	0,2	2195,6	22590,63
Modelo 2	20	0,2	2242,1	23068,956
Modelo 3	20	0,2	2211,3	22751,925
Modelo 4	20	0,2	2173	22323,924

se observa lo siguiente:

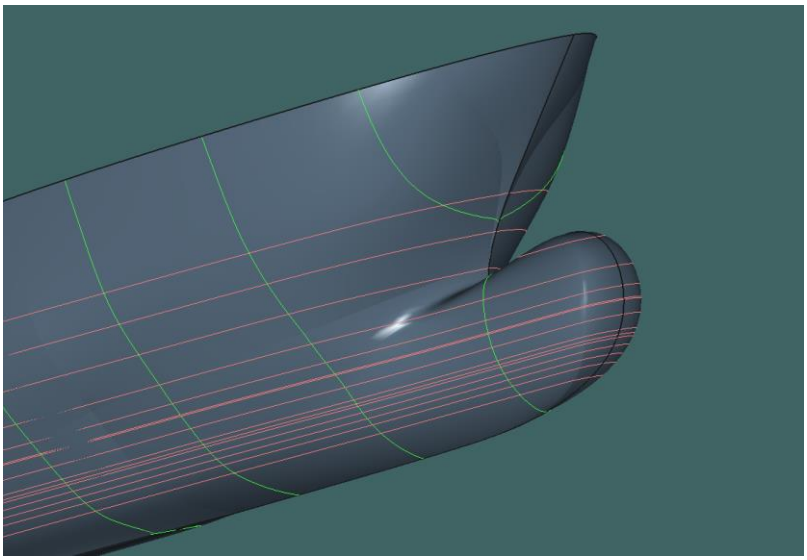
El bulbo acortado genera menor resistencia hasta cierto límite.

La anchura del bulbo puede mejorar las propiedades hidrodinámicas si se aumenta levemente.

La ligera inclinación hacia arriba genera menores resistencias



Con todos estos datos podemos generar un bulbo que satisface todos los puntos anteriores y que, tras analizar sus propiedades hidrodinámicas se observa una disminución en la resistencia total.



Velocidada (kn)	Nº de Fr	Res. Total (kN)	Potencia (kW)
20	**0,2**	**2173,2**	**22360,072**

Conclusiones

- La eslora es un elemento que aumento enormemente la resistencia total.
- Una reducción en la eslora también genera aumentos de resistencia debido a su interacción con el bulbo (*Nota: No reducir la eslora*)
- Una reducción del calado mejora la hidrodinámica del buque, esto se puede conseguir de distintas formas:
- Reducir el desplazamiento (menor peso en rosca)
- Aumento de la manga
- Modificar el buque a formas más planas

- De todas estas opciones se eligió disminuir la manga manteniendo el desplazamiento y las formas constantes.
- El puntal tiene poca relevancia en el estudio hidrodinámico
- El bulbo de proa se modificó a partir del bulbo base y sus formas dependen de las dimensiones del buque. Un mismo bulbo es ineficaz en dos buques con dimensiones diferentes.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Esfuerzos Principales:

Se considera una estructura longitudinal:

- Reducen el fenómeno de pandeo y mejora el soporte de cargas generales
- Dispone de vagras en el doble fondo, palmejares en el doble casco y esloras en las cubiertas.
- Dispone de varengas, bulárcamas y baos como refuerzos transversales primarios.
- La separación de los refuerzos primarios en la zona de carga depende de la separación entre cuadernas (700 mm)

Análisis de Cargas:

Aguas tranquilas:

- Momento flector máximo (Obtenido a partir de Stability):

$$Mflector = 8{,}2 \cdot 10^6 kN \cdot m$$

Si calculamos con la normativa:

$$\mathbf{M_{sw,H}} = 174 \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{B} \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{L}^2 \cdot (\mathrm{CB} + 0{,}7) \cdot 10^{-3} - \mathrm{M_{wv,H}}$$

$$M_{sw,H} = 8.200.000\ KNm$$

- Esfuerzo Cortante:

$$Q = -9{,}9 \cdot 10^4 kN$$

Olas:

- Momento flector (A partir de fórmula “Bureau Veritas”):

$$\mathbf{M_{wv,S}} = -110 \cdot F_M \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{L}^2 \cdot \mathrm{B} \cdot (\mathrm{CB} + 0{,}7) \cdot 10^{-3}$$

F_M: Factor de distribución de valor 1
n: Coef. De navegación de valor1
C: Parametro de Olas $\mathrm{C} = 10{,}75 - \left(\frac{300-L}{100}\right)^{1{,}5} = 10{,}61$

$$Mflector = -5{,}55 \cdot 10^6 kN \cdot m$$

- Momento vertical en olas en Hogging:

$$\mathbf{M_{wv,H}} = 190 \cdot F_M \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{L}^2 \cdot \left| \mathrm{B} \cdot \mathrm{CB} \cdot 10^{-3} \right.$$

$$M_{wv,H} = -5{,}118 \cdot 10^6 kN \cdot m$$

- Momento Horizontal en olas:

$$\mathbf{M_{wH}} = 0{,}42 \cdot F_M \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{H} \cdot \mathrm{L}^2 \cdot \mathrm{T} \cdot \mathrm{CB}$$

$$M_{wH,H} = 4{,}392 \cdot 10^6 kN \cdot m$$

- Esfuerzo Cortante:

$$\mathbf{Q_{wv}} = 30 \cdot \mathrm{F_Q} \cdot \mathrm{n} \cdot \mathrm{C} \cdot \mathrm{L} \cdot \mathrm{B} \cdot (\mathrm{CB} + 0{,}7) \cdot 10^{-2}$$

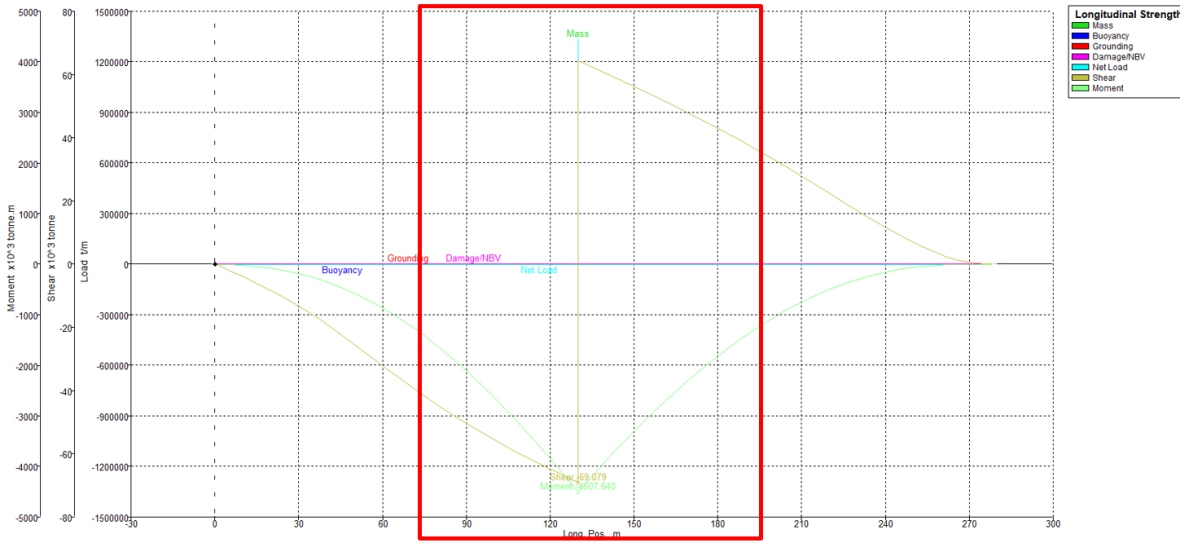
F_Q: Factor de distribución = ± 7

$$Q = 38801{,}49\ kN \cdot m$$

Todos quedan resumidos en la siguiente tabla:

Msw,H	8200000	kN·m
Qsw,H	-99000	kN
OLAS		
Mwv,S	-5566295	kN·m
Mwv,H	5118747	kN·m
MwH,H	439256,8	kN·m
Qwv	38801,49	kN
Msw,H (MAX)	8804867	kN·m

MÉTODO DEL BUQUE VIGA

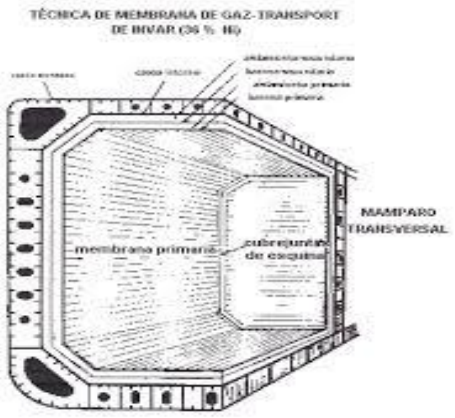


ESFUERZOS EN LA ZONA CENTRAL 0,4L

Valores Mínimos De Escantillonado

Se obtendrá mediante normativa el valor mínimo de los espesores de las distintas planchas y tras esto se comprobará si cumplen con los requerimientos de pandeo solicitados:

ESPESORES MÍNIMOS DE CHAPA		
Quilla	18,35	mm
Fondo	14,26	mm
Doble fondo	12,07	mm
Costado	14,19	mm
Doble casco	6,60	mm
Cubierta resistente y tronco	5,23	mm



Para la plancha del pantoque que se aplicará un estudio más restrictivo, dando como resultado:

Pantoque	14,82	mm

Si se calculan los espesores mínimos requeridos para el pandeo, se obtienen los siguientes datos:

QUILLA	0,016577	m
ve (Quilla)	428,2364	N/mm2
vc	202,42	N/mm2
FONDO	0,013121	m
ve (Fondo)	266,9064	N/mm2
vc	183	N/mm2
DOBLE FONDO	0,010854	m
ve (Doble fondo)	185,3516	N/mm2
vc	159	n/mm2

ESPESORES MÍNIMOS POR PANDEO		
QUILLA	0,016577 m	OK
FONDO	0,013121 m	OK
DOBLE FONDO	0,010854 m	m OK

En Excel se introduce una función condicional comparativa con los valores anteriores y comprobamos que cumple en todos los elementos.

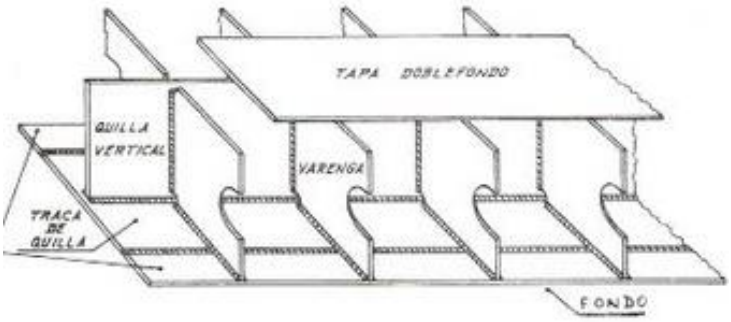
Los refuerzos primarios tendrán el siguiente escantillonado:

ESPESOR MINIMO DE ESFUERZO PRIMARIO		
t	8,30	mm
Vagra central	12,99	mm
Otras Vagras	9,09	mm
Varengas	9,74	mm
Alma de refuerzos	8,21	mm

Todo esto nos indica el valor de los refuerzos primarios.

Como resumen se adjunta el valor de los espesores principales de nuestro buque:

ESPESORES DE PLANCHAS		
QUILLA	18,35	mm
FONDO	14,26	mm
DOBLE FONDO	12,07	mm
COSTADO	14,19	mm
DOBLE CASCO	6,60	mm
CUBIERTA RESISTENTE	5,23	mm
PANTOQUE	14,82	mm

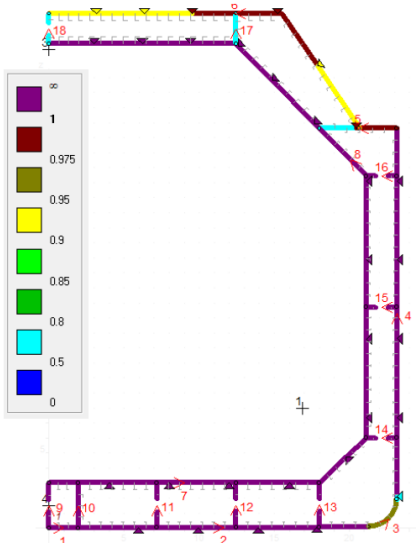


El material empleado será Acero Dulce de límite elástico de 235 MPa.

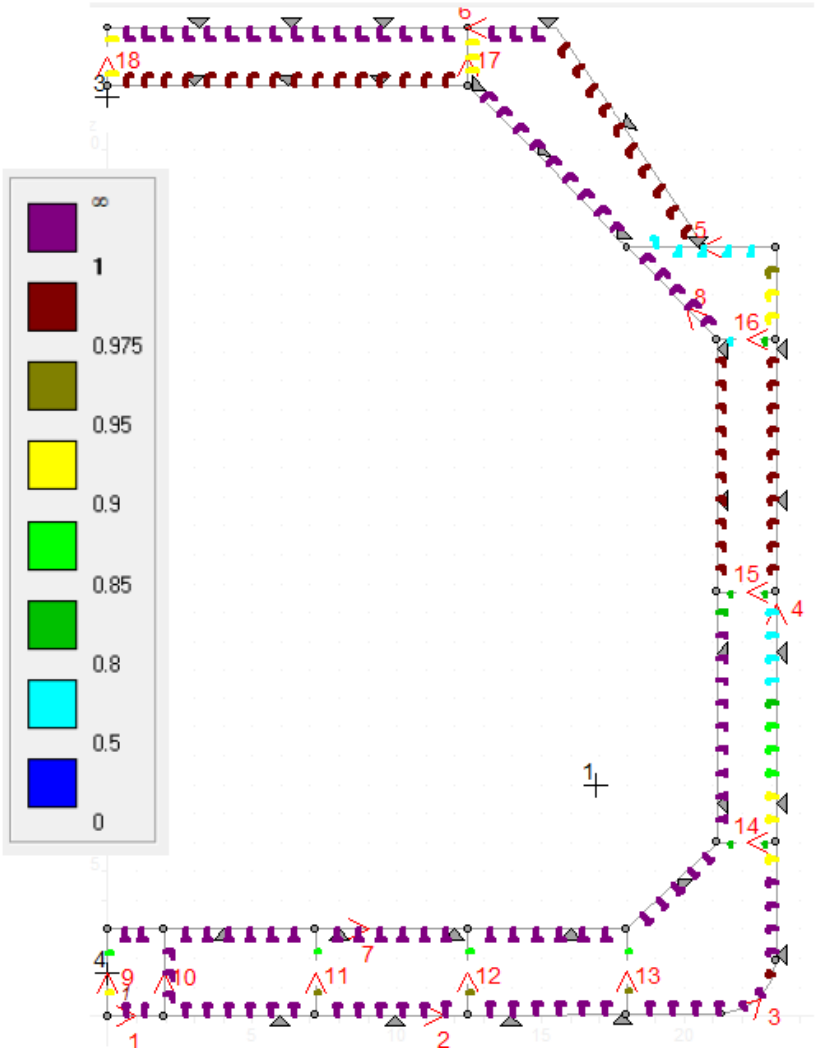
Análisis Con Mars

EL programa Mars de Bureau Veritas nos permite, mediante la introducción de los parámetros principales obtener el valor de los espesores de las cuadernas centrales. Hemos elegido perfil de los refuerzos longitudinales el T para las zonas cercanas a la flotación y obra viva y L para el resto.

Los resultados iniciales son los siguientes:



Como se aprecia en morado, ciertas zonas del fondo, doble fondo, costado y doble casco y las chapas adyacentes no cumplen con las cargas asignadas. Tampoco cumplen la mayoría de los refuerzos longitudinales, por lo que será necesario aumentar el escantillón.



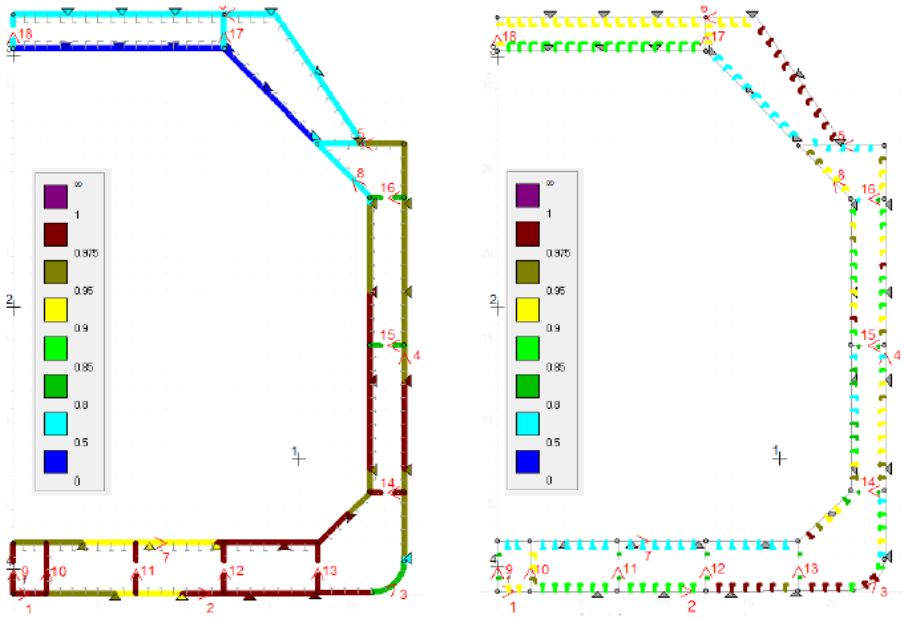
Los resultados estructurales son los siguientes:

Gross area of cross-section	9.54805	m2
Effective area of cross-section	9.54805	m2
Moment of inertia / GY axis	1814.1650	m4
Moment of inertia / GZ axis	2227.5710	m4
Neutral axis (above base line)	17.269	m
Section modulus at deck (Wp)	194.2135	m3
Section modulus at bottom (Wf)	105.0537	m3
Section modulus at Zvt	110.4139	m3

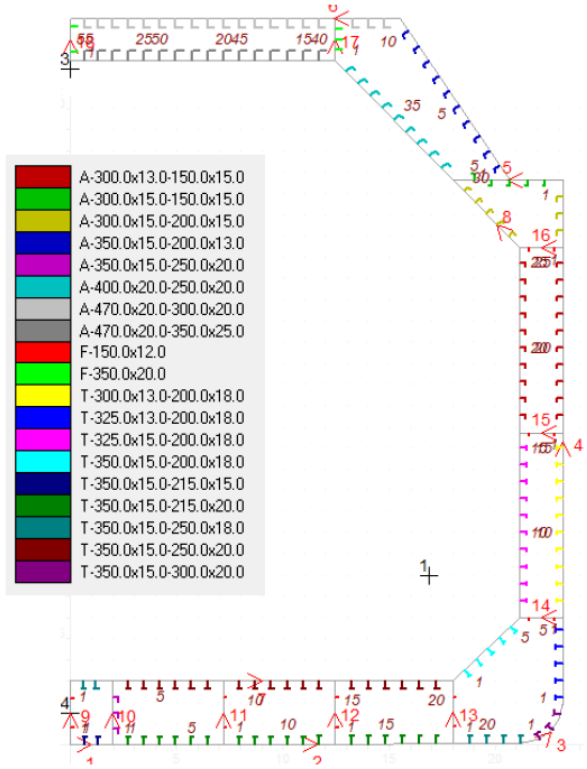
El valor del peso repartido será el siguiente:

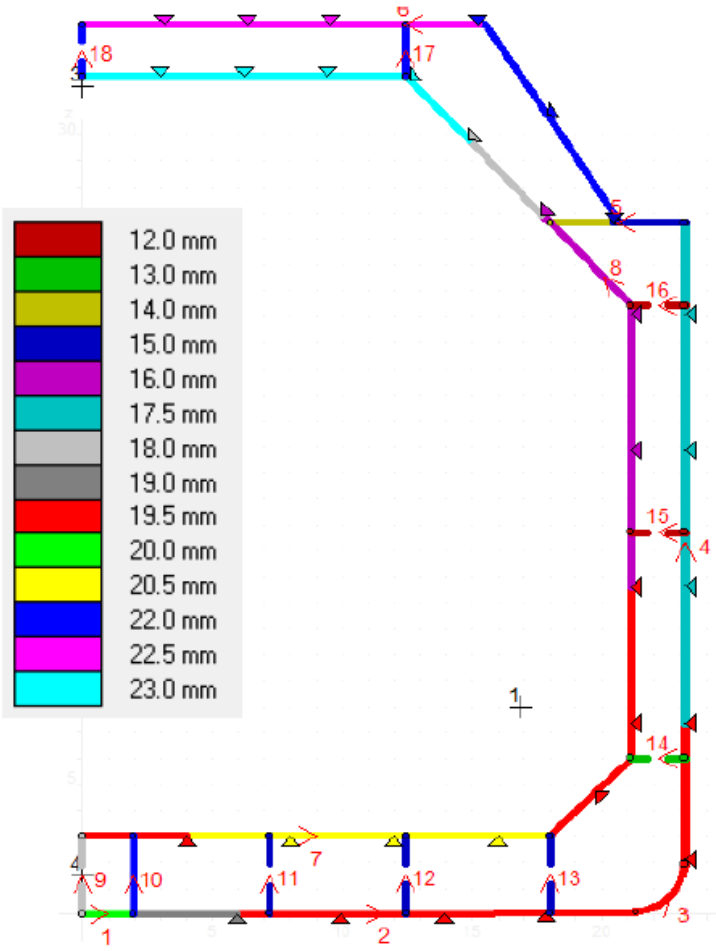
$$W_{MS} = 9{,}548\, m^2 \cdot 7{,}85\, t/m^3$$

El escantillonado final de la sección central correspondiente a 0,4L (0,2L hacia proa y 0,2L hacia popa) se hace a partir de la tensión máxima de diseño: 120 MPa



Por este motivo, el escantillón de los elementos es mayor que el calculado por el software Mars. Estas dimensiones se muestran a continuación

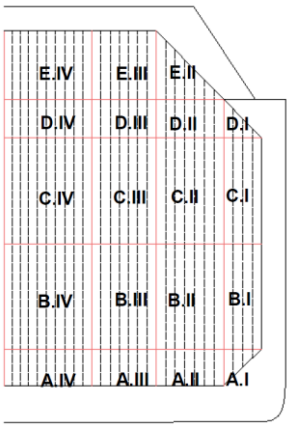




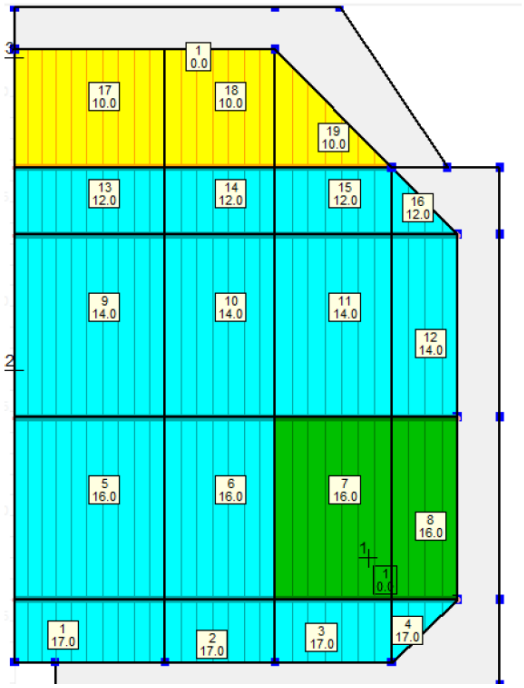
Este valor se ha ido calculando para todas las cuadernas pertenecientes a esta zona central de 0,4L, existe una separación de 700mm entre ellas en la zona de bodega y 600mm en la zona de cofferdams. Calculáremos el mamparo de los cofferdams a continuación.

Mamparo De Los Cofferdams

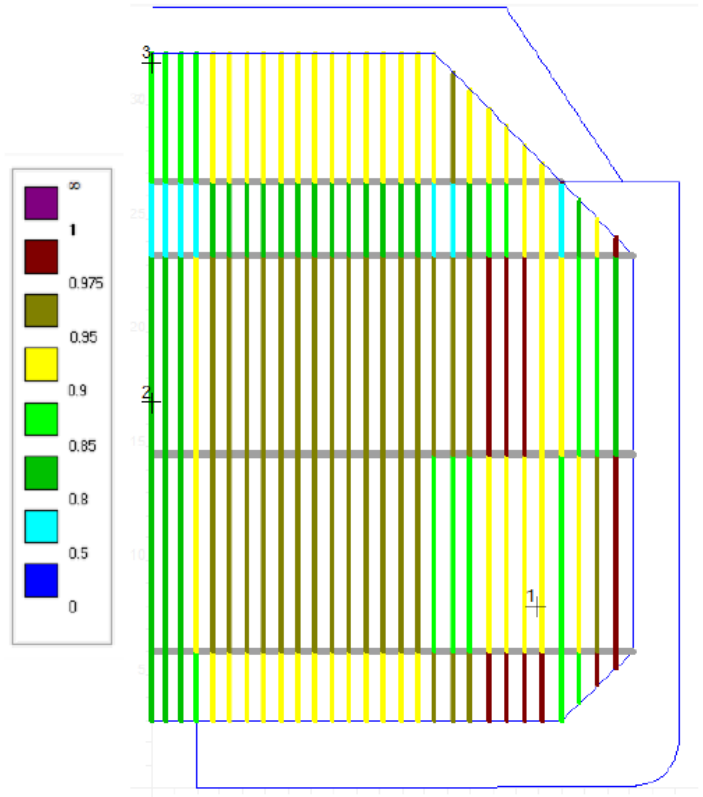
A continuación, se muestra la distribución de elemento en el mamparo del cofferdam:



El escantillonado se ha realizado a partir de los valores iniciales calculados a partir de los esfuerzos, dando los siguientes espesores:



Y los refuerzos longitudinales que forman parte del mamparo, están sometidos a los siguientes esfuerzos:



La siguiente tabla enumera el escantillonado de la plancha y de los refuerzos:

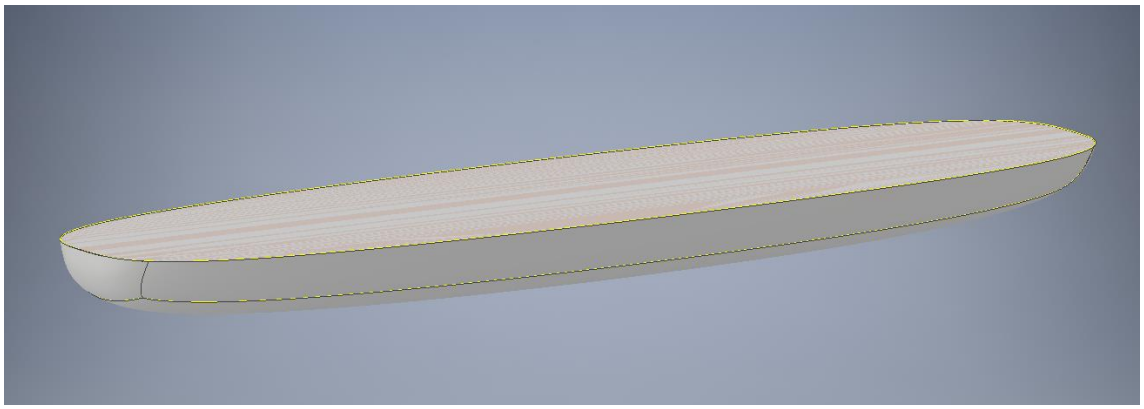
Chapa		Espesor *t* (mm)	Refuerzo T (mm)
A	I	15	500x20/ 300x20
	II		
	II		
	IV		530x20/ 350x20
B	I	16	500x20/ 300x20
	II		
	III		500x20/ 350x20
	IV		525x20/ 350x20
C	I	13	525x20/ 325x20
	II		
	II		500x20/ 300x20
	IV		500x20/ 350x20
D	I	12	300x13/ 150x10
	II		
	III		350x15/ 200x13
	IV		350x15/ 250x18
E	II	10	300x13/ 150x10
	III		
	IV		300x15/ 150x10

Conclusión

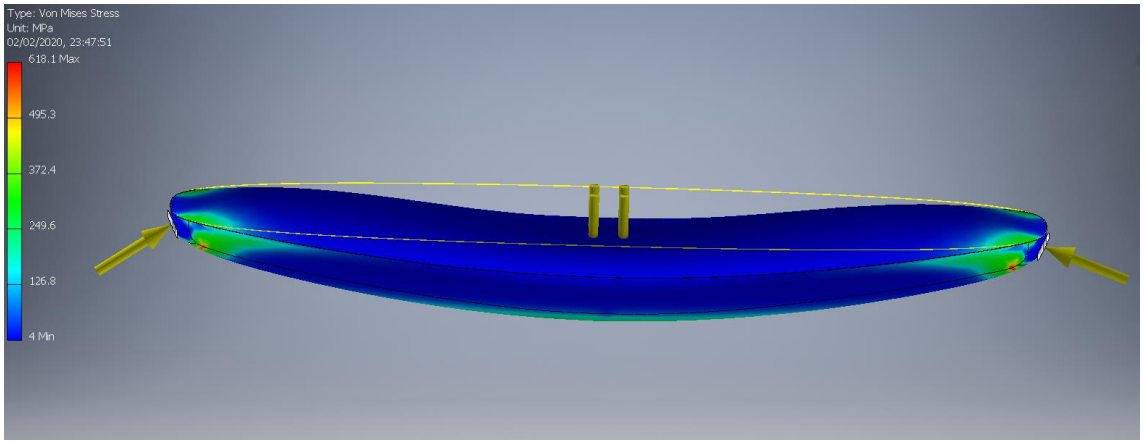
- Mediante estos datos podemos tener una estimación de los espesores y dimensiones de los refuerzos necesarios para aguantar, con un margen apropiado establecido por Bureu Veritas, todas las cargas que soportará el buque durante su navegación.
- Cabe destacar que las cargas analizadas y las curvas de momentos y esfuerzos cortantes se han obtenido a partir de una simplificación del peso del buque, debido al hecho de que no se cuenta con toda la información de pesos, por lo que puede existir una disminución en los requerimientos si continuamos con la optimización ya que nos hemos enfocado en el caso más extremo.
- Como se ha indicado, la zona central (0,4L) al se un buque metanero estará diseñado de forma uniforme, teniendo un total de 260 cuadernas con una separación de 0,7m entre cada una u de 0,6 en los cofferdams. Todas ellas tendrán las dimensiones indicadas en el escantillonado y los refuerzos longitudinales mantendrán las dimensiones de alma y ala en toda su longitud.

Modelo en Nastran

Generamos un modelo mediante el software Nastran Inventor. Este modelo, debido a las características del software, será una maqueta de 1:1000 que nos permitirá analizar los efectos estructurales sobre nuestro buque. Las formas empleadas son formas básicas:



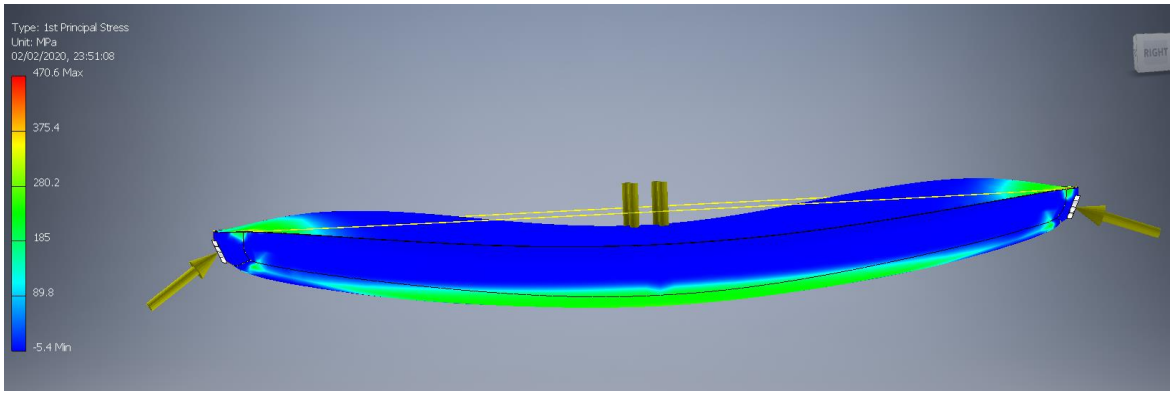
Generando un análisis con todas las fuerzas reducidas para el modelo de menor tamaño podemos generar un estudio para observar el resultado sobre el buque:



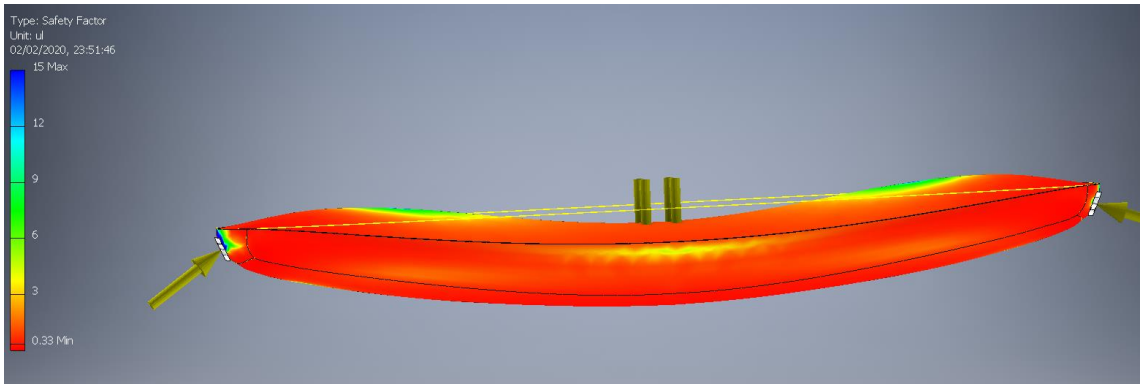
Las fuerzas generadas son un peso en la zona central, un empuje en la misma zona de sentido contrario, dos empujes en los extremos de proa y popa y las fricciones en los mismos.

Se observa que las mayores concentraciones de esfuerzos se encuentran en los extremos de proa y popa.

Cargas de Von-Mises:



Tensiones de 1er orden:



ESTIMACIÓN DEL PESO EN ROSCA

Estas ecuaciones las tomamos de apuntes de cursos navales anteriormente dados.

La ecuación para obtener el peso en rosca:

$$PR = P_{ACERO} + P_{Hab.y\ Equipo} + P_{MAQUINAS}$$

PESO DEL ACERO

Para el cálculo del peso del acero recurrimos a la siguiente fórmula:

$$P_{ACERO} = \alpha \cdot L \cdot B \cdot T$$

Utilizamos para esta fórmula las dimensiones dadas por la Licitación*: Lpp=273,9m; B=42,45m; D=25,59m* y como $\alpha = 0.13 - 0.17$ le daremos un valor de $\alpha = 0.15$.

$$P_{ACERO} = 44102.4\ t$$

PESO DE HABILITACIÓN Y EQUIPO

Para su cálculo se utilizará la expresión: $P_{HyE} = \beta \cdot LBD$, donde β es una constante con valor 0,03-0,08, se usará el valor de 0,04.

$$P_{HyE} = 0{,}03 \cdot 273{,}9 \cdot 42{,}5 \cdot 25{,}29 = 8820{,}5\ t$$

PESO DE LA MAQUINARIA

Para el cálculo del peso de los motores se emplearán los datos obtenidos de los catálogos de motores para ofrecer al menos una potencia de 17571 kW que será de 16V46DF de Wärtsila, de un peso de 235 t.

$$P_{MOT} = 3 \cdot Nº \cdot MP = 3 \cdot 2 \cdot 235 = 1410\ t$$

Para estimar el resto de los elementos de la cámara de máquinas lo estimaremos 0,8 % del peso de los motores, por tanto:

$$P_{MAQ} = P_{MOT} + P_{MOT} = 1410 + 1128 = 2538\ t$$

Peso en Rosca	Toneladas (t)
Peso de Acero	44102.4
Habilitación y equipo	8820.5
Peso de Maquinaria	2538.0

Por tanto, el peso en rosca total será:

$$PR = 44102{,}4 + 8820 + 2538 = 55460{,}88\ t$$

Aproximación De Coste

A manera demostrativa y comparativa realizaremos una aproximación del costo constructivo del buque a través de las fórmulas del libro “El Proyecto Básico del Buque Mercante” el cual nos arroja otra estimación de pesos de acero, habilitación y maquinaria, través de ecuaciones estudiadas por los autores, en muchos de los coeficientes se realizará una aproximación o se tomará un valor medio dentro del determinado rango.

El cálculo del coste de construcción se desglosará en las siguientes partidas:

-Coste del material a granel (CMg)

$$CMg = cmg \cdot W_{ST} = ccs \cdot cas \cdot cem \cdot ps \cdot W_{ST}$$

Donde:

ccs: coeficiente de coste ponderado de las chapas y perfiles de las distintas calidades de acero del buque (1,07).

Cas: coeficiente de aprovechamiento del acero (1,11).

Cem: coeficiente de incremento por equipo metálico incluido en la estructura tales como tecle, registros, escotillas, etc. (1,08)

ps: precio unitario del acero (850 €/t)

WST: peso del acero (29.631,3 t)

-Coste de los equipos (Ceq) y su montaje (CmE)

$$CEq + CmE = CEc + CEp + CHf + CEr$$

Donde:

Cec: coste de los equipos de manipulación y contención de la carga. Es una partida de difícil sistematización y se debe estudiar pormenorizadamente para cada tipo de buque.

CEp: coste de los equipos de propulsión y sus auxiliares, montaje incluido

chf: coeficiente de coste unitario de la habilitación por tripulante (aprox. 33.000 €/tripulante)

nch: nivel de calidad de la habilitación (1,10)

NT: número de tripulantes (35)

Cer: coste del equipo restante instalado

-Coste de la mano de obra (Cmo)

$$CMo = CmM + CmE$$

En este apartado incluiremos solamente el coste de montaje de material (CmM), puesto que el coste de montaje de equipos (CmE) ya lo hemos incluido en el apartado de "Coste de equipos y su montaje".

-Costes varios aplicados (Cva)

$$CVa = cva \cdot CC = cva \cdot (CMg + CEq + CmE + CMo)$$

Este apartado representa los costes para el astillero de todo aquello que sin intervenir directamente en el proceso de construcción del buque, tiene un coste directo. Estos pueden ser: Sociedades de Clasificación, ensayos en canal, representación.

Donde:

cva: representa el coeficiente de los costes varios del astillero referidos al costo de construcción del buque (0,07).

Por tanto, tendremos que el coste de construcción del buque (CC) es:

$$CC = CMg + CEq + CmE + CMo + CVa$$

Costo de la Construcción del buque	
88304934.44	€
98018477.23	$

Un detalle importante Que hay que tomar en cuenta es que la construcción de este tipo de embarcaciones es muy costosa debido a su complejidad para abastecer todos los lineamientos de seguridad que se requieran en su ensamblaje.

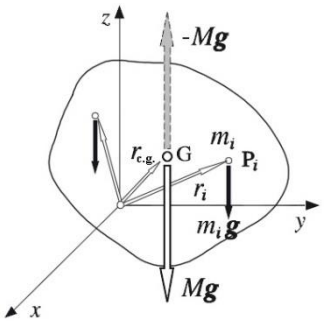
Para obtener este coste aproximado nos basamos como se dijo en el inicio de este apartado, en las ecuaciones brindadas por el libro “El Proyecto Básico del Buque Mercante” el cual obtuvimos los siguientes pesos:

Aproximación de Pesos	Toneladas (t)
Peso del Acero (Wst)	29028.198
Peso del equipo y habilit. (Woa)	2497.840
Peso de la maquinaria (Wq)	2052.149

Como se puede apreciar al comparar la tabla anterior de aproximación de pesos nos arroja valores muy diferentes del peso del acero y habilitación a los ya anteriormente descritos y esto se debe a las aproximaciones en los coeficientes ingresados en las ecuaciones; por lo tanto para tener un mayor rango de estimación de los pesos se tomó como referencia para el dimensionamiento de nuestro buque los valores obtenidos por las ecuaciones brindadas por cursos navales anteriormente dados.

Peso en Rosca	Toneladas (t)
Peso de Acero	44102.4
Habilitación y equipo	8820.5
Peso de Maquinaria	2538.0

CENTRO DE GRAVEDAD



El centro de gravedad lo determinaremos mediante el software Maxsurf y su modulo stabílity que nos permite, introduciendo los datos de las condiciones de carga, obtener la posición del centro de gravedad:

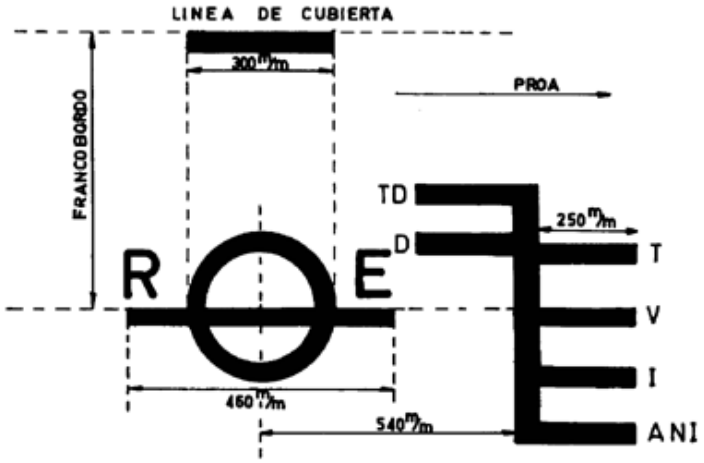
	Cantidad	Peso [t]	Peso total [t]	Volumen [L]	V. total [L]	XG	YG	ZG	FMS
Lightship	1	55.460.000	55.460.000			120.000	0.000	10.3	0.000
Bodega 1	100%	25.321.641	25.321.641	33766689.1	33766689.1	75.999	0.000	10.381	0.000
Bodega 2	100%	25.317.856	25.317.856	33761642.2	33761642.2	126.999	0.000	10.379	0.000
Bodega 3	100%	25.202.404	25.202.404	33607684.6	33607684.6	177.921	0.000	10.415	0.000
Bodega 4	100%	22.393.766	22.393.766	29862335.1	29862335.1	228.048	0.000	11.343	0.000
Total Loadcase			153.695.667	130998351.0	130998351.0	139.144	0.000	6.780	0.000
FS correction								0.000	
VCG fluid								6.780	

Se aplica el peso en rosca obtenido antes con el valor un poco hacía popa, debido al peso del motor principal, las cargas de las bodegas y el resto de elementos. Esto nos da un valor del centro de gravedad:

	XG	YG	ZG
CoG	139.144	0.000	10497

FRANCOBORDO

El cálculo de francobordo se realizará siguiendo el Convenio Internacional de Líneas de Carga y se define como: “Distancia vertical medida en el centro del buque, desde el canto alto de la línea de cubierta hasta el canto alto de la línea de carga correspondiente”



Para definir el francobordo, primero establecemos las dimensiones que debemos utilizar:

- Eslora de francobordo: 96% de la eslora total

$$L_{Fr} = 0{,}96 \cdot 273.87 = 262{,}96m$$

Eslora del buque (m)	Franco-bordo (mm)	Eslora del buque (m)	Franco-bordo (mm)	Eslora del buque (m)	Franco-bordo (mm)
222	3615	267	4240	312	4757
223	3630	268	4252	313	4768
224	3645	269	4264	314	4779
225	3660	270	4276	315	4790
226	3675	271	4289	316	4801
227	3690	272	4302	317	4812
228	3705	273	4315	318	4823
229	3720	274	4327	319	4834
230	3735	275	4339	320	4844
231	3750	276	4350	321	4855
232	3765	277	4362	322	4866
233	3780	278	4373	323	4878
234	3795	279	4385	324	4890
235	3808	280	4397	325	4899
236	3821	281	4408	326	4909
237	3835	282	4420	327	4920
238	3849	283	4432	328	4931
239	3864	284	4443	329	4943
240	3880	285	4455	330	4955
241	3893	286	4467	331	4965
242	3906	287	4478	332	4975
243	3920	288	4490	333	4985
244	3934	289	4502	334	4995
245	3949	290	4513	335	5005
246	3965	291	4525	336	5015
247	3978	292	4537	337	5025
248	3992	293	4548	338	5035
249	4005	294	4560	339	5045
250	4018	295	4572	340	5055
251	4032	296	4583	341	5065
252	4045	297	4595	342	5075
253	4058	298	4607	343	5086
254	4072	299	4618	344	5097
255	4085	300	4630	345	5108
256	4098	301	4642	346	5119
257	4112	302	4654	347	5130
258	4125	303	4665	348	5140
259	4139	304	4676	349	5150
260	4152	305	4686	350	5160
261	4165	306	4695	351	5170
262	4177	307	4704	352	5180
263	4189	308	4714	353	5190
264	4201	309	4725	354	5200
265	4214	310	4736	355	5210
266	4227	311	4748	356	5220

Si vamos a la tabla del convenio internacional de líneas de carga obtenemos que el valor del calado mínimo debe ser de 4189mm (se deberán realizar las correcciones correspondientes que se realizarán en puntos más avanzados del proyecto)

CONDICIONES DE CARGA

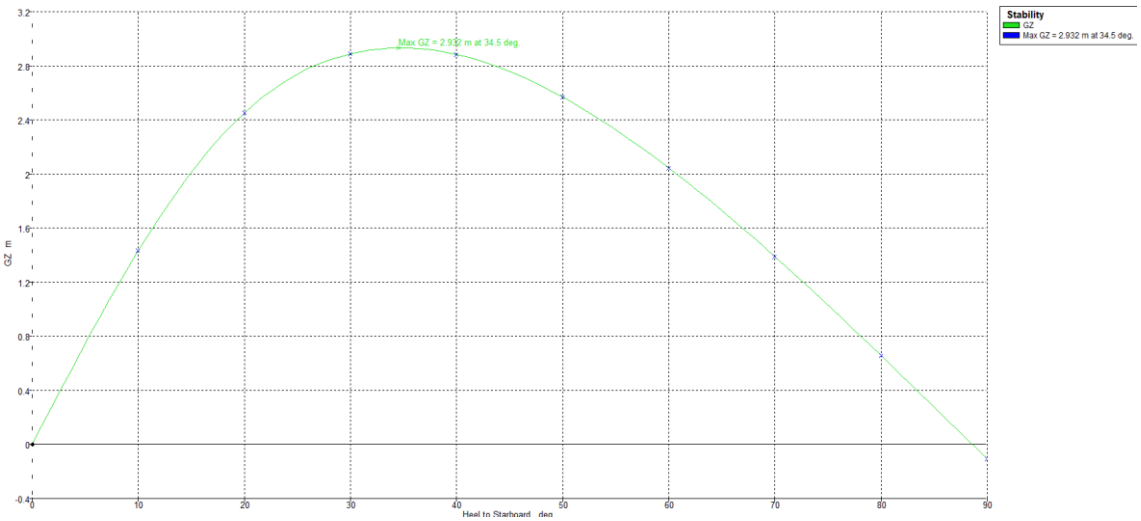
Generaremos ahora las 3 condiciones de carga restantes para calcular la estabilidad del buque.

Condición de Carga 1: Plena Carga

Es la condición que hemos visto anteriormente y sobre la cual se va a calcular las propiedades de estabilidad. Se considera entonces que el buque a plena carga y sin lastre:

	Cantidad	Peso [t]	Peso total [t]	Volumen [L]	V. total [L]	XG	YG	ZG	FMS[t·m]
Peso en rosca	1	55460.000	55460.000			120.000	0.000	10.300	0.000
Bodega 1	100%	25321.641	25321.641	33766688.9	33766688.9	75.999	0.000	10.381	0.000
Bodega 2	100%	25317.856	25317.856	33761641.9	33761641.9	126.999	0.000	10.379	0.000
Bodega 3	100%	25202.403	25202.403	33607684.5	33607684.5	177.921	0.000	10.415	0.000
Bodega 4	100%	22393.769	22393.769	29862339.8	29862339.8	228.048	0.000	11.343	0.000
TB lastre	0%	9070.559	0.000	8849326.2	0.0	168.910	18.910	1.400	0.000
TE lastre	0%	9070.559	0.000	8849326.2	0.0	168.910	-18.910	1.400	0.000
TF lastre	0%	10292.493	0.000	10041456.9	0.0	253.915	0.000	0.000	0.000
TPPp lastre	100%	10458.618	10458.618	10203529.4	10203529.4	8.485	0.000	10.533	0.000
TPPr lastre	0%	9566.366	0.000	9333039.6	0.0	268.850	0.000	0.033	0.000
Total Loadcase			164154.287	178275033.4	141201884.5	130.820	0.000	10.499	0.000
FS correction								0.000	
VCG fluid								10.499	

Como se muestra en el excel, en esta primera condición de carga se cumplen todos los requerimientos, pero debemos llenar el tanque de lastre de popa para mantener la estabilidad. A continuación, mostramos la curva GZ:



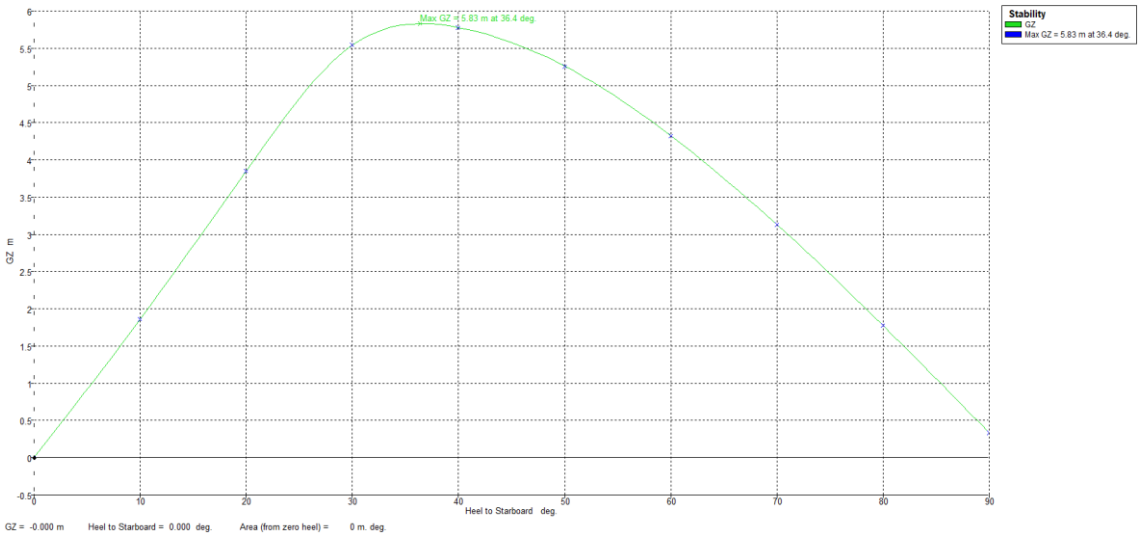
º escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
GZ m	0.000	1.393	2.177	2.338	2.233	1.966	1.541	1.005	0.406	-0.217
Area GZm.deg	0.0000	72.705	257.165	486.554	716.471	927.771	1.104.308	1.232.346	1.303.270	1.312.811
Displacement t	164.154	164.154	164.154	164.156	164.157	164.155	164.154	164.154	164.154	164.154
Draft at FP m	17.522	17.521	18.300	19.698	21.848	25.094	30.338	40.401	69.707	n/a
Draft at AP m	13.943	13.956	14.361	15.936	18.628	22.819	29.365	41.637	76.885	n/a
WL Length m	274.608	274.673	274.495	274.656	274.913	275.089	274.977	274.700	274.266	273.452
Beam max extents WL m	42.450	43.105	36.900	31.074	28.315	25.145	22.354	20.605	19.661	19.362
Wetted Area m^2	18.114.195	18.575.439	20.554.482	21.458.704	21.853.335	22.084.864	22.168.529	22.211.653	22.239.602	22.259.595
Waterpl. Area m^2	11.300.384	10.906.870	8.545.391	7.296.421	6.678.274	6.081.567	5.495.785	5.125.055	4.937.760	4.907.936
Prismatic coeff. (Cp)	0.879	0.879	0.889	0.897	0.905	0.913	0.919	0.919	0.917	0.916
Block coeff. (Cb)	0.790	0.733	0.731	0.752	0.732	0.753	0.799	0.840	0.877	0.910
LCB from zero pt. m	130.863	130.850	130.855	130.853	130.845	130.835	130.823	130.810	130.797	130.786
LCF from zero pt. m	134.154	130.281	129.034	128.549	127.159	127.453	128.517	129.399	130.170	130.916
Max deck inclination deg	0.7483	100.266	200.143	300.070	400.028	500.007	600.001	700.000	800.001	900.000
Trim angle deg	-0.7483	-0.7454	-0.8234	-0.7866	-0.6734	-0.4756	-0.2036	0.2584	15.006	900.000

Condición de carga 2: Buque sin Carga

En esta segunda condición se comprueba que se sigue cumpliendo la estabilidad aunque se produce un ligero cabeceo hacia proa. Esto se podrá evitar en el diseño mediante un sistema que amplíe el volumen de lastre en popa o que lo limite en proa

	Cantidad	Peso [t]	Peso total [t]	Volumen [L]	V. total [L]	XG	YG	ZG	FMS[t·m]
Peso en rosca	1	55.460.000	55.460.000			120.000	0.000	10.300	0.000
Bodega 1	0%	25.321.641	0.000	33766688.9	0.0	51.284	0.000	1.400	0.000
Bodega 2	0%	25.317.856	0.000	33761641.9	0.0	102.284	0.000	1.400	0.000
Bodega 3	0%	25.202.403	0.000	33607684.5	0.0	153.284	0.000	1.400	0.000
Bodega 4	0%	22.393.769	0.000	29862339.8	0.0	204.284	0.000	1.400	0.000
TB lastre	100%	9.070.559	9.070.559	8849326.2	8849326.2	119.418	19.991	11.038	0.000
TE lastre	100%	9.070.559	9.070.559	8849326.2	8849326.2	119.418	-19.991	11.038	0.000
TF lastre	100%	10.292.493	10.292.493	10041456.9	10041456.9	108.075	0.000	0.751	0.000
TPPp lastre	100%	10.458.618	10.458.618	10203529.4	10203529.4	8.485	0.000	10.533	0.000
TPPr lastre	100%	9.566.366	9.566.366	9333039.6	9333039.6	263.451	0.000	15.479	0.000
Total Loadcase			103.918.595	178275033.4	47276678.4	120.700	0.000	9.983	0.000
FS correction								0.000	
VCG fluid								9.983	

Se mantienen buenas condiciones de estabilidad y calados. A continuación, se muestra los valores y la curva GZ:



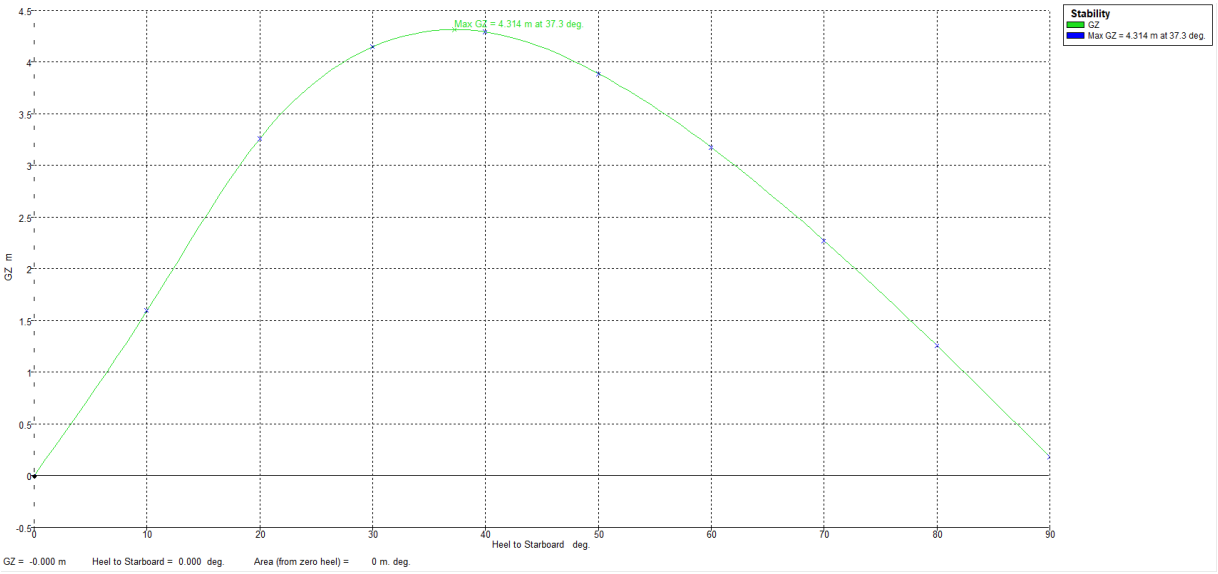
º escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
GZ m	0.000	1.860	3.853	5.540	5.777	5.260	4.324	3.131	1.776	0.333
Area GZm.deg	0.0000	92.153	376.924	854.983	1.431.373	1.987.130	2.469.135	2.843.540	3.089.903	3.195.711
Displacement t	103.919	103.919	103.919	103.922	103.918	103.919	103.919	103.919	103.919	103.919
Draft at FP m	9.989	9.871	9.478	8.605	7.462	6.030	3.905	-0.007	-11.316	n/a
Draft at AP m	10.681	10.725	10.855	11.353	12.282	13.526	15.439	19.019	29.377	n/a
WL Length m	273.153	273.241	273.235	273.092	274.575	274.846	274.881	274.841	274.687	274.946
Beam max extents WL m	42.450	43.105	45.174	38.679	32.805	29.644	27.481	26.211	24.093	22.949
Wetted Area m^2	14.969.374	14.977.999	14.997.907	15.502.231	15.656.595	15.728.119	15.774.751	15.797.281	15.791.890	15.765.979
Waterpl. Area m^2	10.775.207	10.901.068	11.246.674	9.739.882	7.922.091	6.804.279	6.108.603	5.681.488	5.413.307	5.296.417
Prismatic coeff. (Cp)	0.828	0.826	0.820	0.812	0.802	0.797	0.795	0.793	0.791	0.788
Block coeff. (Cb)	0.819	0.628	0.492	0.493	0.513	0.523	0.537	0.553	0.606	0.649
LCB from zero pt. m	120.693	120.686	120.677	120.624	120.595	120.567	120.514	120.475	120.445	120.424
LCF from zero pt. m	128.382	128.235	127.656	130.667	135.164	137.493	138.955	139.792	139.424	138.333
Max deck inclination deg	0.1448	100.015	200.018	300.037	400.062	500.074	600.073	700.059	800.034	900.000
Trim angle deg	0.1448	0.1787	0.2879	0.5747	10.077	15.670	24.103	39.718	84.472	900.000

Condición de carga 3: Carga al 25%

En la 3º condición de carga estudiaremos el caso de una carga del 25%, lo que conlleva únicamente una bodega completamente llena, con una compensación por lastre, mostramos la tabla con las distintas cargas:

	Cantidad	Peso [t]	Peso total [t]	Volumen [L]	V. total [L]	XG	YG	ZG	FMS[t·m]
Peso en rosca	1	55.460.000	55.460.000			120.000	0.000	10.300	0.000
Bodega 1	0%	25.321.641	0.000	33766688.9	0.0	51.284	0.000	1.400	0.000
Bodega 2	100%	25.317.856	25.317.856	33761641.9	33761641.9	126.999	0.000	10.379	0.000
Bodega 3	0%	25.202.403	0.000	33607684.5	0.0	153.284	0.000	1.400	0.000
Bodega 4	0%	22.393.769	0.000	29862339.8	0.0	204.284	0.000	1.400	0.000
TB lastre	100%	9.070.559	9.070.559	8849326.2	8849326.2	119.418	19.991	11.038	0.000
TE lastre	100%	9.070.559	9.070.559	8849326.2	8849326.2	119.418	-19.991	11.038	0.000
TF lastre	100%	10.292.493	10.292.493	10041456.9	10041456.9	108.075	0.000	0.751	0.000
TPPp lastre	100%	10.458.618	10.458.618	10203529.4	10203529.4	8.485	0.000	10.533	0.000
TPPr lastre	100%	9.566.366	9.566.366	9333039.6	9333039.6	263.451	0.000	15.479	0.000
Total Loadcase			129.236.451	178275033.4	81038320.2	121.934	0.000	10.061	0.000
FS correction								0.000	
VCG fluid								10.061	

En los análisis vemos que se cumple con todos los criterios. Se debe tener en cuenta que para porcentajes de carga más bajos se producen problemas, por lo que se aconseja el vaciado completo de algunos tanques, estando el restos cargados casi completamente. Se muestran a continuación los resultados y la curva GZ:

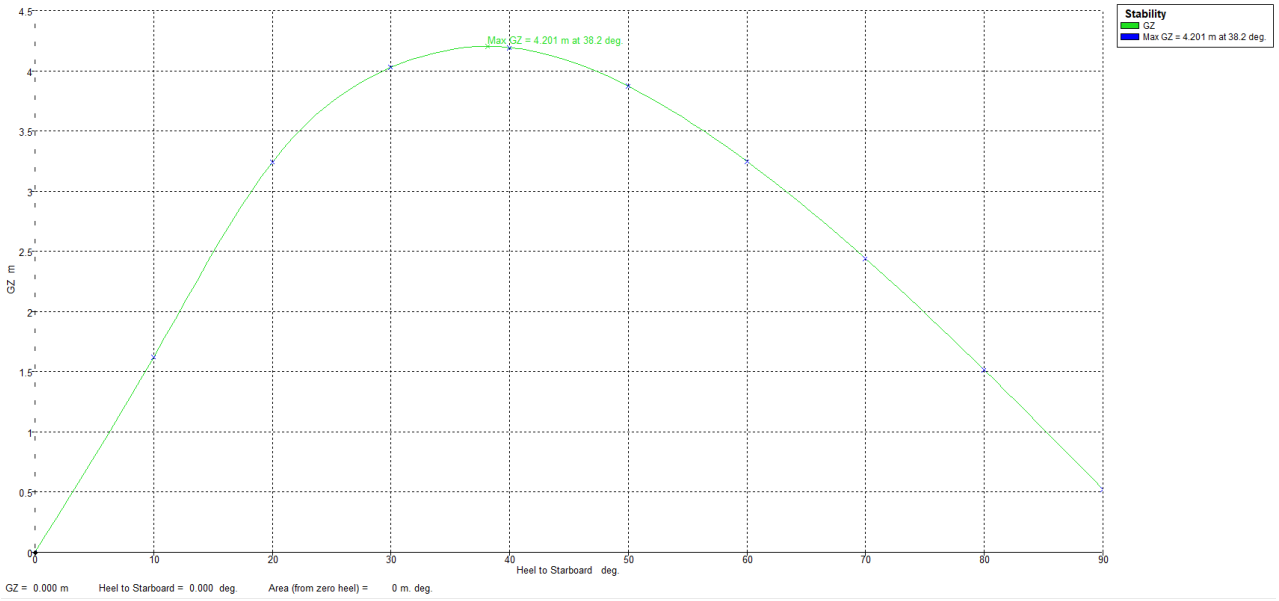


º escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
GZ m	0.000	1.596	3.260	4.146	4.291	3.890	3.177	2.275	1.257	0.183
Area GZm.deg	0.0000	78.250	324.013	701.710	1.128.825	1.541.384	1.896.599	2.170.405	2.347.691	2.419.893
Displacement t	129.236	129.236	129.236	129.241	129.236	129.236	129.237	129.237	129.237	129.236
Draft at FP m	12.115	12.015	11.663	11.258	10.862	10.406	9.871	9.127	7.273	n/a
Draft at AP m	13.084	13.125	13.333	14.645	17.088	20.530	25.772	35.521	63.490	n/a
WL Length m	273.633	273.679	273.672	273.181	273.133	273.098	274.704	274.945	275.103	275.239
Beam max extents WL m	42.450	43.105	43.223	36.625	30.091	26.312	25.481	24.595	24.471	24.511
Wetted Area m^2	16.272.636	16.283.942	16.737.490	17.860.854	18.260.825	18.360.631	18.386.611	18.395.648	18.398.011	18.395.019
Waterpl. Area m^2	10.963.403	11.105.483	10.846.007	9.201.573	7.744.666	6.663.566	6.039.122	5.640.867	5.429.570	5.370.282
Prismatic coeff. (Cp)	0.839	0.838	0.832	0.823	0.812	0.806	0.797	0.793	0.791	0.789
Block coeff. (Cb)	0.830	0.666	0.561	0.566	0.601	0.623	0.600	0.602	0.603	0.609
LCB from zero pt. m	121.919	121.920	121.914	121.866	121.836	121.782	121.725	121.693	121.663	121.650
LCF from zero pt. m	130.419	130.250	132.075	132.797	133.798	135.973	138.538	139.911	140.789	141.165
Max deck inclination deg	0.2026	100.026	200.026	300.057	400.103	500.136	600.139	700.113	800.064	900.000
Trim angle deg	0.2026	0.2321	0.3491	0.7081	13.017	21.159	33.211	55.019	115.939	900.000

Condición de carga 4: carga al 50%

	Cantidad	Peso [t]	Peso total [t]	Volumen [L]	V. total [L]	XG	YG	ZG	FMS[t·m]
Lightship	1	55460.000	55460.000			120.000	0.000	10.300	0.000
Bodega 1	100%	25321.641	25321.641	33766688.9	33766688.9	75.999	0.000	10.381	0.000
Bodega 2	0%	25317.856	0.000	33761641.9	0.0	102.284	0.000	1.400	0.000
Bodega 3	100%	25202.403	25202.403	33607684.5	33607684.5	177.921	0.000	10.415	0.000
Bodega 4	0%	22393.769	0.000	29862339.8	0.0	204.284	0.000	1.400	0.000
TB lastre	100%	9070.559	9070.559	8849326.2	8849326.2	119.418	19.991	11.038	0.000
TE lastre	100%	9070.559	9070.559	8849326.2	8849326.2	119.418	-19.991	11.038	0.000
TF lastre	100%	10292.493	10292.493	10041456.9	10041456.9	108.075	0.000	0.751	0.000
TPPp lastre	0%	10458.618	0.000	10203529.4	0.0	2.782	0.000	0.000	0.000
TPPr lastre	0%	9566.366	0.000	9333039.6	0.0	256.107	0.000	0.033	0.000
Total Loadcase			134417.656	178275033.4	95114482.7	121.579	0.000	9.705	0.000
FS correction								0.000	
VCG fluid								9.705	

Se comprueba que, al tener una carga parcia, solo dos de las 4 bodegas del buque llenas, se mantiene la estabilidad y la condición se considera aceptable. Se adjuntan los resultados y las curvas:



º escora	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
GZ m	0.000	1.623	3.241	4.028	4.193	3.871	3.248	2.440	1.513	0.524
Area GZm.deg	0.0000	79.943	326.869	697.332	1.112.651	1.519.161	1.876.977	2.162.592	2.360.990	2.463.123
Displacement t	134.417	134.418	134.418	134.421	134.418	134.418	134.418	134.418	134.418	134.418
Draft at FP m	12.372	12.269	11.915	11.576	11.290	10.959	10.598	10.215	9.438	n/a
Draft at AP m	13.730	13.775	14.073	15.596	18.350	22.332	28.419	39.742	72.229	n/a
WL Length m	273.696	273.738	273.413	273.266	273.246	273.249	274.415	274.963	275.185	275.299
Beam max extents WL m	42.450	43.105	42.055	35.728	30.028	25.731	25.084	24.381	24.256	24.630
Wetted Area m^2	16.527.918	16.538.619	17.236.567	18.329.855	18.775.750	18.892.664	18.920.852	18.924.148	18.926.451	18.923.382
Waterpl. Area m^2	10.986.741	11.130.254	10.507.169	8.949.988	7.692.388	6.636.858	6.013.419	5.623.587	5.415.883	5.366.841
Prismatic coeff. (Cp)	0.834	0.831	0.828	0.817	0.806	0.799	0.791	0.787	0.784	0.782
Block coeff. (Cb)	0.823	0.668	0.581	0.583	0.604	0.637	0.609	0.605	0.605	0.600
LCB from zero pt. m	121.578	121.563	121.558	121.512	121.485	121.424	121.365	121.330	121.299	121.284
LCF from zero pt. m	130.674	130.498	133.228	133.965	133.820	135.782	138.247	139.746	140.699	141.322
Max deck inclination deg	0.2839	100.048	200.043	300.080	400.133	500.171	600.175	700.141	800.080	900.000
Trim angle deg	0.2839	0.3149	0.4511	0.8407	14.760	23.767	37.209	61.504	129.067	900.000

Conclusiones

Las conclusiones principales que obtenemos tras estos estudios de carga son:

- Todas las condiciones de carga se han analizado según el estudio de grandes ángulos y su curva GZ da una forma correcta en todas las ocasiones.
- No se han tenido en cuenta ni los tanques de combustible, aceite… situados en su mayor parte en la cámara de máquinas debido a que estos tanques son menospreciables en tamaño y volumen comparados con los tanques de lastre y bodegas.
- Los tanques de lastre deben estar llenos al 100% o vacíos, los fenómenos de superficie libre afectan en gran medida, por lo que podría ser útil subdividir los tanques laterales y de fondo para un mejor control del lastre.
- De igual manera, los tanques de carga es mejor llenarlos al 100% o portarlos vacíos. Lo que se ha comprobado es que primero se debe llenar el tanque 1, tras este el 3, luego el 2 y finalmente el 4 consiguiendo que en todas las situaciones se mantenga una estabilidad aceptable.
- Condiciones de bajas cargas, sin llegar la bodega vacía se deben evitar ya que son las condiciones donde más nos acercamos a los límites establecidos por la normativa

ANÁLISIS HIDROSTÁTICO

Entre las propiedades importantes del modelo generado en maxsurf obtuvimos los siguientes datos:

DATOS HIDROSTÁTICOS		
Displacement	101869	t
Volume (displaced)	99384,155	m^3
Draft Amidships	10,74	m
Immersed depth	10,731	m
WL Length	273,87	m
Beam max extents on WL	42,45	m
Wetted Area	14601,288	m^2
Max sect. area	443,655	m^2
Waterpl. Area	10715,878	m^2
Prismatic coeff. (Cp)	0,82	
Block coeff. (Cb)	0,798	
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,983	
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,924	
LCB length	120,968	from zero pt. (+ve fwd) m
LCF length	127,984	from zero pt. (+ve fwd) m
LCB %	44,263	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl
LCF %	46,831	from zero pt. (+ve fwd) % Lwl

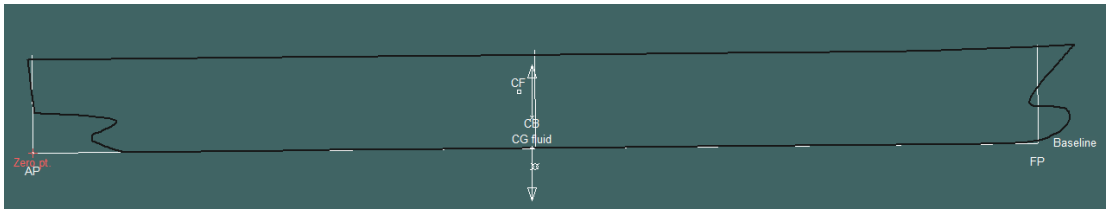
Con estas características calcularemos sus propiedades hidrostáticas y veremos si cumple con los mínimos de estabilidad requeridos.

- Añadimos la condición de carga, que en nuestro caso será de buque navegando con un calado completo y, por tanto, con la máxima capacidad posible.

- Obtendremos 2 analisis:
  - Análisis de Equilibrio
  - Análisis de Grandes ángulos

Análisis De Equilibrio

Se comprueba mediante un análisis de equilibrio básico que el buque mantiene la posición debido a sus formas y posición del centro de gravedad y carena. Debido a que hemos establecido el centro de gravedad a 134 m de la perpendicular de popa, se produce un ligero trimado de 0,557º, pero este no afecta a la estabilidad del mismo.



EQUILÍBRIO	
Draft Amidships m	15,163
Displacement t	133768
Heel deg	0
Draft at FP m	13,85
Draft at AP m	16,476
Draft at LCF m	15,205
Trim (+ve by stern) m	2,625
WL Length m	269,288
Beam max extents on WL m	40,49
Wetted Area m^2	16304,72
Waterpl. Area m^2	10466,96
Prismatic coeff. (Cp)	0,785
Block coeff. (Cb)	0,733
Max Sect. area coeff. (Cm)	0,984
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0,96
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	134,101
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	130,748
KB m	8,3
KG fluid m	0
BMt m	10,541
BML m	451,19
GMt corrected m	18,842
GML m	459,491
KMt m	18,841
KML m	459,469
Immersion (TPc) tonne/cm	107,286
MTc tonne.m	2276,056
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	43988,84
Max deck inclination deg	0,557
Trim angle (+ve by stern) deg	0,557

ANÁLISIS DE GRANDES ÁNGULOS

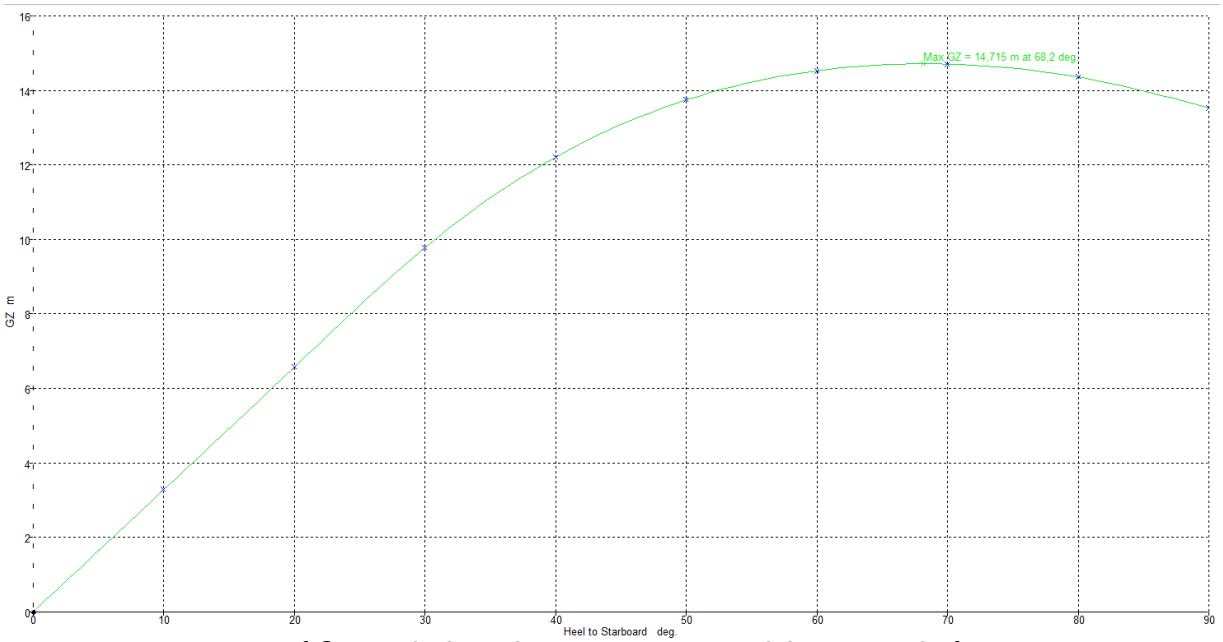
Realizamos el análisis de grandes ángulos basándonos en la normativa de la IMO 267 que analiza la estabilidad básica y los criterios de estabilidad básicos.

Para este análisis estableces un intervalo de escora desde los 0º hasta los 90º introduciendo la condición de carga completa que habíamos introducido con anterioridad, realizaremos el análisis:

GZ m	0	3,287	6,573	9,784	12,211	13,743	14,53	14,707	14,356	13,538
Area under GZ	0	16,4526	65,7095	147,8436	258,6039	389,0568	530,9796	677,6231	823,3837	963,0921
Displacement t	133768	133767	133754	133776	133767	133767	133767	133767	133778	133767
Draft at FP m	13,85	13,804	13,694	13,448	13,249	13,214	13,288	13,585	14,755	n/a
Draft at AP m	16,476	16,469	16,362	16,224	16,735	17,836	19,663	23,163	33,268	n/a
WL Length m	269,288	269,704	270,356	269,988	271,584	273,718	276,288	278,096	279,084	279,366
extents on WL m	40,49	41,115	43,089	43,901	38,609	32,624	28,861	26,6	25,449	25,397
Wetted m^2	16304,72	16293,09	16258,42	16637,5	17269,48	17498,04	17585,71	17630,42	17603,09	17621,55
Waterpl m^2	10466,96	10542,05	10760,06	10407,41	9074,593	7968,544	7222,524	6786,685	6592,324	6550,161
Prismatic c. (Cp)	0,785	0,785	0,789	0,803	0,817	0,825	0,827	0,829	0,831	0,834
Block c. (Cb)	0,733	0,655	0,557	0,507	0,539	0,607	0,667	0,722	0,774	0,776
LCB m	134,101	134,076	134,067	134,051	134,038	134,017	133,989	133,958	133,929	133,905
LCF m	130,748	131,14	132,402	137,247	139,164	139,952	140,699	141,718	142,275	142,882
Max D.I deg	0,557	10,0153	20,0068	30,0039	40,0033	50,0029	60,0023	70,0015	80,0007	90
Trim angledeg	0,557	0,5656	0,5659	0,5888	0,7395	0,9804	1,3523	2,0314	3,9216	90

267(85) Ch2 - General Criteria	2.3: IMO roll back angle					
	L, Stability calculated	269,288	m			
	B, Stability calculated	40,49	m			
	d, Stability calculated	15,163	m			
	GMf, Stability calculated	18,842	m			
	VCG, Stability calculated	0	m			
	CB, Stability calculated	0,733				
	Ak, keel area, user spec.	10,8	m^2			
	Method for k factor	Tabulated value for k				
	Evaluates to	11,8	deg			
	Intermediate values					
	B / d			2,67		
	100 Ak / L / B			0,099		
	C		IMO units	0,319		
	T		s	5,944		
	OG, Centre of gravity above WL		m	-15,163		
	X1		IMO units	0,953		
	X2		IMO units	1		
	k tabulated		IMO units	0,998		
	r		IMO units	0,13		
	s		IMO units	0,1		
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 30				Pass	
	from the greater of spec. heel angle	0	deg	0		
	to the lesser of spec. heel angle	30	deg	30		
	angle of vanishing stability	90	deg			
	shall not be less than (>=)	3,1513	m.deg	147,8436	Pass	4591,51
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 0 to 40				Pass	
	from the greater of spec. heel angle	0	deg	0		
	to the lesser of spec. heel angle	40	deg	40		
	first downflooding angle	n/a	deg			

	angle of vanishing stability	90	deg			
	shall not be less than (>=)	5,1566	m.deg	258,6039	Pass	4915,01
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.1: Area 30 to 40 from the greater of				Pass	
	spec. heel angle	30	deg	30		
	to the lesser of spec. heel angle	40	deg	40		
	first downflooding angle	n/a	deg			
	angle of vanishing stability	90	deg			
	shall not be less than (>=)	1,7189	m.deg	110,7604	Pass	6343,68
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.2: Max GZ at 30 or greater in the range from the greater of				Pass	
	spec. heel angle	30	deg	30		
	to the lesser of spec. heel angle	90	deg			
	angle of max. GZ	68,2	deg	68,2		
	shall not be less than (>=)	0,2	m	14,715	Pass	7257,5
	Intermediate values					
	angle at which this GZ occurs		deg	68,2		
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.3: Angle of maximum GZ				Pass	
	shall not be less than (>=)	25	deg	68,2	Pass	172,73
267(85) Ch2 - General Criteria	2.2.4: Initial GMt				Pass	
	spec. heel angle	0	deg			
	shall not be less than (>=)	0,15	m	18,842	Pass	12461,33



Gráfica del valor GZ para el buque básico

Conclusiones

- El buque cumple los requisitos mínimos de estabilidad
- Todas las condiciones de carga se han analizado según el estudio de grandes ángulos y su curva GZ da una forma correcta en todas las ocasiones.
- No se han tenido en cuenta ni los tanques de combustible, aceite
- Los tanques de lastre deben estar llenos al 100% o vacíos, los fenómenos de superficie libre afectan en gran medida.
- De igual manera, los tanques de carga es mejor llenarlos al 100% o portarlos vacíos. Lo que se ha comprobado es que primero se debe llenar el tanque 1, tras este el 3, luego el 2 y finalmente el 4 consiguiendo que en todas las situaciones se mantenga una estabilidad aceptable.
- Condiciones de bajas cargas, sin llegar la bodega vacía se deben evitar ya que son las condiciones donde más nos acercamos a los límites establecidos por la normativa

ANEXO

Metodología Utilizada de Flujograma