

GRADO EN NÁUTICA Y TRANSPORTE MARÍTIMO

## TRABAJO FIN DE GRADO

“ESTUDIO DE VIABILIDAD Y OPERATIVIDAD BAJO  
CONDICIONES RESTRICTIVAS ESPECIALES EN  
BUQUE GASERO”

**Alumno/Alumna:** RUIZ-PRADOS DELGADO, JULIÁN

**Director/Directora:** BASTERRECHEA IRIBAR, IMANOL

**Curso:** 2017-2018

**Fecha:** LUNES, 11 DE JUNIO DE 2018

## Resumen

Durante los años de estudios universitarios he adquirido muchos conocimientos muy variados relacionados con la navegación y la náutica. No ha sido hasta finalizar el embarque como alumno de puente a bordo del buque metanero *Cádiz Knutsen*, cuando estos conocimientos se han afianzado y he podido ver su aplicación de forma directa.

En este trabajo trato, por un lado, de mostrar la dinámica que se sigue para ver si una operación de carga o descarga es viable o no, estudiando en profundidad cada uno de los grupos de restricciones por separado. Por otro lado trato de mostrar de que forma cuando una operación se sale de lo común se pone en entredicho la calidad de la formación y del reciclaje de los conocimientos de los marinos. Así como la calidad de información que recibimos en los diferentes equipos de navegación puede llevarnos a tomar malas decisiones.

*During the years of university studies I have acquired many different knowledge related to navigation and sailing skills. But It wasn't until the end of the contract as cadet onboard the methane tanker Cádiz Knutsen, when this knowledge was strengthened and I was able to see its application directly.*

*In this work I try, on the one hand, to show the dynamics that are followed to see if a loading or unloading operation is viable or not. Studying each one of the groups of restrictions separately. On the other hand, I try to show that when an operation goes beyond the ordinary, the quality of the training and the knowledge of the seafarers is compromised. As well as the quality of information that we receive in the different navigation equipment can lead us to make bad decisions.*

Unibertsitate ikasturtetan era askotako jakintzak bereganatu ditut nabegazio eta nautika arloan. Hala ere, Cadiz knutsen metaneroan praktikak egiten hasi nitzanean, ohartu nintzen ikasketa horien erabilgarritasunaz.

Lan honetan, karga eta deskargetan jarraitzen den dinamika azaltzen sahiatu nahiz, eta era berean, honek seguruak direla bermatzeko egin beharreko azterketak. Beste alde batetik, egin beharrekoak menpetik alde egiten dutenean, tripulazioaren ikasketen kalitatea eta hauen sakabanatzea auzitan jartzen da. Izan ere, jakingabeziak aukera okerrak hartzera eramane gaitzake.

### **Palabras clave**

Metanero

Gas Natural Licuado (GNL)

Gasero

Squad

CATZOC

Sloshing

Boil-off

# ÍNDICE

**Lista de tablas, ilustraciones, gráficas y acrónimos** Pág.6

**1. Introducción a los gaseros.** Pág.7

1.2 Transporte marítimo del Gas Natural Licuado. Pág.10

1.3 Materiales de construcción y aislamiento de tanques de carga. Pág. 12

1.3.1 Materiales de construcción. Pág. 12

1.3.2 Tipos de tanques de carga Pág.13

**2. LNG/c Cadiz Knutsen** Pág. 18

2.1 Particularidades del buque Pág. 18

2.2 Formas del casco Pág. 18

2.3 Funcionamiento Pág. 18

2.4 Estructura Pág. 19

2.5 Tanques de carga Pág. 20

2.6 Límites de carga de los tanques y *sloshing* Pág. 22

2.7 Sistema de contención de carga Pág. 23

2.8 Equipos de los tanques de carga Pág. 23

**3. Metodología seguida en el desarrollo del trabajo**

3.1 Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos. Pág .24

3.2 Diagrama de Gantt/cronograma, plan de proyecto y planificación. Pág. 25

#### **4. Órdenes de viaje.** Pág. 27

4.1 Características de la Operación. Pág. 28

4.2 Puertos. Pág. 28

4.3 Derrota y millas. Pág. 30

4.4 Restricciones de calado, consumo, densidad, sloshing. Pág. 31

4.4.1 Restricciones de calado. Pág. 31

4.4.2 Restricciones de consumo. Pág. 36

4.4.3 Restricción por densidad del agua. Pág. 37

4.4.4 Restricción por *Sloshing*. Pág. 37

4.5 Calculo de *Heel*. Pág. 39

4.6 Visión general de condiciones previo cálculos de carga. Pág.41

#### **5. Plan de carga y estabilidad.**

5.1 Introducción a la estabilidad y a los esfuerzos. Pág. 41

5.2 Cálculo de condición de llegada. Pág. 47

5.3 Cálculo condición previa al trasiego parcial de carga. Pág. 54

5.4 Cálculo condición salida Montoir. Pág. 60

#### **6. Conclusiones** Pág. 67

#### **7. Bibliografía.** Pág. 70

## **Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos**

### **Acrónimos:**

LPG: Liquefied Petroleum Gases

PVC: Polivinilo de Chloride

GNL: Gas Natural Liquado,

LNG: Liquefied Natural Gas

VLGC: Very Large Gas Carrier

FP: Fully-pressurized

IGC: International Gas carriers Code

MMBTU: Million British Thermal Units

ENC: Electronic Nautical Chart”

CATZOC: Category of Zone Of Confidence

NBOG: Natural Boil-off Gas

HFO: Heavy Fuel Oil

LSFO: Low Sulfur Fuel Oil

GTT Tables: Tablas de Gaztransport y Technigaz

IMO: International Maritime Organisation

OMI: Organización Marítima Internacional

DO: Diesel Oil

FW: Fresh Water

DW: Agua Destilada

## **Lista de tablas e ilustraciones:**

- Fig. 1 Sección transversal de un buque metanero de tanques tipo membrana
- Fig. 2 Conjunto de aislamientos y barreras NO 96
- Fig. 3 Ejemplo de corrugación en el interior de un tanque tipo MK III
- Fig. 4 Temperaturas interior de barreras y tanques adyacentes
- Fig. 5 Dimensiones y forma del tanque número 1
- Fig. 6 Dimensiones y forma del tanque número 2
- Fig. 7 Tabla de límites máximos de carga
- Fig. 8 Buque LNG descargando realizando operación STS en Escobar (Argentina)
- Fig. 9 Visión general del Río de La Plata y Río Paraná
- Fig. 10 Derrota entre puerto de carga y puerto de descarga
- Fig. 11 Símbolos CATZOC y su exactitud
- Fig. 12 CATZOC en Escobar
- Fig. 13 Límites de sloshing en buque Cadiz Knutsen
- Fig. 14 Empuje y peso en buques
- Fig. 15 Curva de cargas
- Fig. 16 Curva de esfuerzos cortantes
- Fig. 17 Curva de momentos flectores
- Fig. 18 Tabla de estabilidad estática condición final de llegada
- Fig. 19 Tabla de esfuerzos condición final de llegada
- Fig. 20 Tabla de estabilidad estática previo trasiego
- Fig. 21 Tabla de esfuerzos previo trasiego
- Fig. 22 Tabla de estabilidad estática salida Montoir
- Fig. 23 Tabla de esfuerzos salida Montoir
- Fig. 24 Diagrama de Gantt

## 1. Introducción a los gaseros

En términos generales, un gas licuado es la forma líquida de una sustancia que a temperatura ambiente y a presión atmosférica se encuentra en estado gaseoso.

La mayoría de los gases son hidrocarburos y el principal interés que reside en ellos es que representan la principal fuente de energía del mundo. Dicho esto y que por lo general se transportan y se aprovechan en grandes cantidades podemos imaginar la peligrosidad intrínseca de los mismos.

Son varias las mezclas de hidrocarburos generadas, transportadas y utilizadas en la industria, estando todas ellas sorprendentemente ligadas a la generación de energía y elaboración de productos. Uno de estos gases o mezcla de gases es el LPG “Liquefied petroleum gases”, se trata de propanos y butanos utilizados en forma de mezcla o por separado. El LPG está extensivamente utilizado en las industrias como fuente producción de energía para diferentes industrias o como fuente de calor para cocinar o calentar millones de hogares en el mundo. Otro producto muy utilizado derivado de hidrocarburos es el etileno. Utilizado para elaborar plásticos de polietileno, alcohol etílico o polivinilo de chloride (PVC).

En este trabajo nos centraremos exclusivamente en el Gas Natural Licuado, en adelante también denominado LNG o GNL. Explicando desde el proceso de producción hasta su puesta final al servicio del consumidor, centrándonos en especial en su transporte marítimo.

¿Qué es el LNG?

GNL o LNG es la abreviación del Gas Natural Licuado. El gas natural es una mezcla de hidrocarburos en la cual el metano es el predominante. La mezcla varía considerablemente de acuerdo con su fuente, según de donde se extraiga, cómo se haya encontrado el gas y particularmente si ha estado asociado o no a reservas de crudo.

El gas asociado a reservas de crudo es más rico porque contiene mayor concentración de etano ( $C_2H_6$ ), propano ( $C_3H_8$ ) y butano ( $C_4H_{10}$ ), teniendo todos ellos mayor poder calorífico que el metano ( $CH_4$ ). El metano puro, o en muy altas proporciones no se puede licuar por presión sin el etano, el propano y el butano y debe ser enfriado para convertirlo en líquido.

Se enfría hasta su temperatura de ebullición que es de  $-161,5\text{ }^\circ\text{C}$ . En esta condición ocupa  $1/600$  de su volumen en gas. Dado que el gas natural contiene diferentes proporciones de otros gases la temperatura de ebullición difiere de la del metano puro, siendo influenciado por la temperatura de ebullición de los otros gases en la mezcla.

El Gas Natural Licuado, es incoloro, inodoro y no tóxico. Tiene una relativa baja velocidad de inflamación, bajo porcentaje de inflamabilidad en el aire, alto punto de auto ignición y no es corrosivo.

El peso del LNG es menor que el del agua. Su componente principal, el metano, es más ligero que el aire a temperaturas superiores a  $-100^\circ\text{C}$ . El butano, propano y etano son más pesados en gas que el aire a todas las temperaturas.

La producción de LNG en el mundo se encuentra en aumento y con expectativas de seguir así en adelante. Esto se debe principalmente a que se trata de un combustible de combustión limpia.

El gas natural puede ser encontrado en diferentes lugares: grandes yacimientos petrolíferos, en pozos mezclado con el petróleo y en reservas de gas.

Cuando el gas se encuentra disuelto en el crudo presenta pequeñas cantidades de hidrocarburos más pesados, comúnmente llamados NGLs. La proporción de NGLs que contiene el gas natural varían de un lugar geográfico a otro. En función del lugar del que se ha extraído, el gas natural requiere ser tratado para eliminar los hidrocarburos más pesados así como las sustancias que no se consideren hidrocarburos de forma que se garantice que el gas natural se encuentra en una condición adecuada para ser licuado y posteriormente utilizado como fuente de energía. Para licuar el gas metano su temperatura debe ser reducida a menos  $162\text{ }^\circ\text{C}$ , su punto de ebullición a presión atmosférica.

El proceso de licuar es un ciclo de refrigeración muy complejo, consiste en una serie de compresores (accionados por turbinas de gas o motores eléctricos) e intercambiadores de calor, con la principal función de robarle temperatura al gas. A lo largo de este complejo proceso también se realizan otra serie de tareas [2]:

- eliminación de impurezas, tales como mercurio (Hg), para prevenir problemas de corrosión derivada
- eliminación de gases como sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), principalmente para prevenir problemas de corrosión y contaminación al ser quemado
- deshidratación del gas, para prevenir la congelación de partículas de agua durante el proceso de enfriado
- separación de crudo (Heavy oil)

Los procesos termodinámicos del licuado del gas son una parte prescindible en este trabajo, simplemente indicar que existen tres procesos diferentes de licuado del LNG.

- licuado por proceso de cascada
- licuado por mezcla de refrigerantes
- proceso de licuado por procesos en turbinas

## **1.2 Transporte marítimo del Gas Natural Licuado**

Una vez sabemos qué es el LNG podemos comprender la necesidad de transportarlo de forma eficiente y segura para poder abastecer todo el mundo. El mar ocupa dos terceras partes de la superficie del planeta por lo que resulta obvio que el transporte de LNG a través de él sea necesario.

Denominamos buque gasero a aquel buque que ha sido diseñado para transportar a granel gas licuado.

El abanico de buques gaseros es sorprendentemente amplio, podemos encontrar desde pequeños barcos que transportan de forma presurizada y a temperatura ambiente gas en pequeñas cantidades, desde 500 a 11000 m<sup>3</sup>, generalmente propano, butano o gases químicos. Hasta grandes buques “very large gas carriers “ (VLGCs) de mas de 80000m<sup>3</sup> de capacidad que transportan LPG y etános de forma completamente refrigerada. Así como los “Q-max” buques metaneros de mas 266,000 m<sup>3</sup> de capacidad. El transporte de gas a través del mar se realiza gracias a una flota de más de 1600 buques operando en todo el mundo. [2]

Debido a la simplicidad de construcción y al gran número de oportunidades empresariales, la mayoría de la flota de gaseros en el mundo transportan LPG a presión “fully-pressurized” (FP), distribuyendo pequeñas cantidades de gas a lo largo de la costa de prácticamente todos los países del mundo. El diseño de estos barcos “fully-pressurized” es realmente barato, debido a que el tanque en el que la carga es estibada es de acero soldado y no requiere aislamientos del tanque o de las tuberías de carga ya que es transportado a temperatura ambiente, nunca a temperaturas inferiores a 5°C bajo cero, y a presión elevada 17 o 18 bar.

Ahora bien, existe una gran diferencia en el diseño, la construcción y la operatividad de los buques gaseros en función del tipo de carga que transporte.

Podemos encontrar diferentes tipos de buques gaseros, en función del tipo de carga transportada y la forma en la ésta se encuentra durante el transporte. Tenemos seis categorías diferentes:

- fully-pressurized (FP)
- semi-refrigerated (SR)
- fully-refrigerated (FR)
- etileneros o etaneros de transporte licuado (LECs)
- buques metaneros (LNG Carriers)
- buques regasificadores (RVs)

Los buques metaneros son contruidos para transportar grandes volúmenes de gas natural licuado. Normalmente el gas se encuentra en su punto de ebullición a presión atmosférica y a una temperatura de 162°C negativos.

Los buques metaneros son relativamente jóvenes. El primer prototipo de buque metanero fue botado en 1958, el “M.V. Methane Pioneer” de tan solo 5000m<sup>3</sup> de capacidad. [3] Gracias a este prototipo y a los que le siguieron durante los años 60 se han podido estudiar las principales características que debe reunir un buque metanero:

- tipo de aislamiento y materiales de construcción de tanques
- tipo de tanques
- manejo de la carga
- instrumentación y control

### **1.3 Materiales de construcción y aislamiento de tanques de carga.**

#### **1.3.1 Materiales de construcción.**

La elección del material que forma un tanque de carga viene dictaminado por la robustez de ese material al ser expuesto a temperaturas extremadamente bajas, así como a la compatibilidad con la carga a transportar. La principal propiedad es la resistencia mecánica a bajas temperaturas ya que muchos metales se vuelven quebradizos y poco resistentes a ciertas temperaturas.

En el caso de buques diseñados para el transporte de gas natural licuado el código IGC (International gas carriers code) establece que los aceros con aleaciones de níquel, aceros inoxidables o aluminio son los materiales que presentan mejores características para la construcción de tanques de carga.

El aislamiento de los tanques de carga viene dado por dos razones muy sencillas. En primer lugar para minimizar el intercambio de calor entre la carga y los tanques y así minimizar la

generación de “boil off”, evaporación natural de parte de la carga. En segundo lugar para proteger estructuralmente al buque por los efectos de las bajas temperaturas. [8]

Por lo tanto podemos decir que los materiales utilizados para aislar los tanques de carga en buques gaseros deben reunir las siguientes características:

- conductividad térmica baja
- capacidad de soportar grandes cargas
- capacidad de resistir daños mecánicos
- ser ligeros
- no verse afectados por la carga
- proporcionar aislamiento frente al agua

La capacidad de aislar el interior del tanque frente a la entrada de agua es de extrema importancia. Una filtración de vapor de agua en el interior del tanque puede provocar una gran pérdida de la eficiencia de aislamiento. La continua condensación y congelación de partículas de agua provoca daños mecánicos en los aislamientos por lo que se debe mantener condiciones de humedad lo más bajas posibles en el interior de los tanques.

El aislamiento en los tanques de carga es aplicado en diferentes capas y utilizando diferentes materiales, dependiendo del diseño del tanque.

### **1.3.2 Tipos de tanques de carga**

En el transporte de gas existen cuatro tipos de tanques diferentes:

- tipo A prismático, utilizado en buques LPGs completamente refrigerados.
- tipo B esférico (Moss) utilizado en buques LNG
- tipo C utilizado en buques LPG semi refrigerados y de transporte de etano o etileno
- membrana utilizados en el transporte de LNG

Es decir, centrándonos en el transporte de LNG podemos encontrar dos tipos de tanques.

Tanques esféricos tipo B. Diseñados por Moss Rosenberg en 1973. Generalmente la esfera está fabricada en aluminio, ésta esfera apoya sobre un anillo denominado ecuador que se encuentra a media altura, conectando la esfera con el cilindro en el que está contenida. Debido a la forma esférica del tanque se forman grandes espacios vacíos entre el interior del casco del barco y el tanque. Estos espacios son llenados con aire seco para evitar humedad y generar daños en el casco. El espacio entre el interior del tanque y la barrera primaria, la capa aislante interior del tanque, se mantiene con gas inerte para evitar atmósferas explosivas.

Los tanques tipo B esférico presentan la desventaja de no aprovechar la forma del casco obligando a alcanzar grandes alturas, afectando a la estabilidad.

El segundo tipo de tanques que encontramos son los de membrana. Estos tanques se adaptan a la forma del casco del buque y por lo tanto no presentan espacios vacíos entre tanque y casco. Debido a que no existe este espacio aparece como medida de seguridad una segunda barrera de aislante, barrera secundaria, que aísla el casco de las bajas temperaturas. Cada una de las barreras, primaria y secundaria, consiste en una fina capa de un material capaz de absorber las contracciones térmica. La barrera primaria, entre 0,7 y 1,5 mm de grosor, es el elemento que se encuentra en contacto directo con la carga. La segunda barrera se diseña con la función de mantener una posible filtración de la carga a través de la barrera primaria, evitando que durante un periodo de tiempo la temperatura del casco no descienda lo suficiente como para afectar estructuralmente al acero del casco. La temperatura en el interior de las membranas es controlada constantemente y circula por su interior nitrógeno manteniendo una atmósfera seca e inerte.

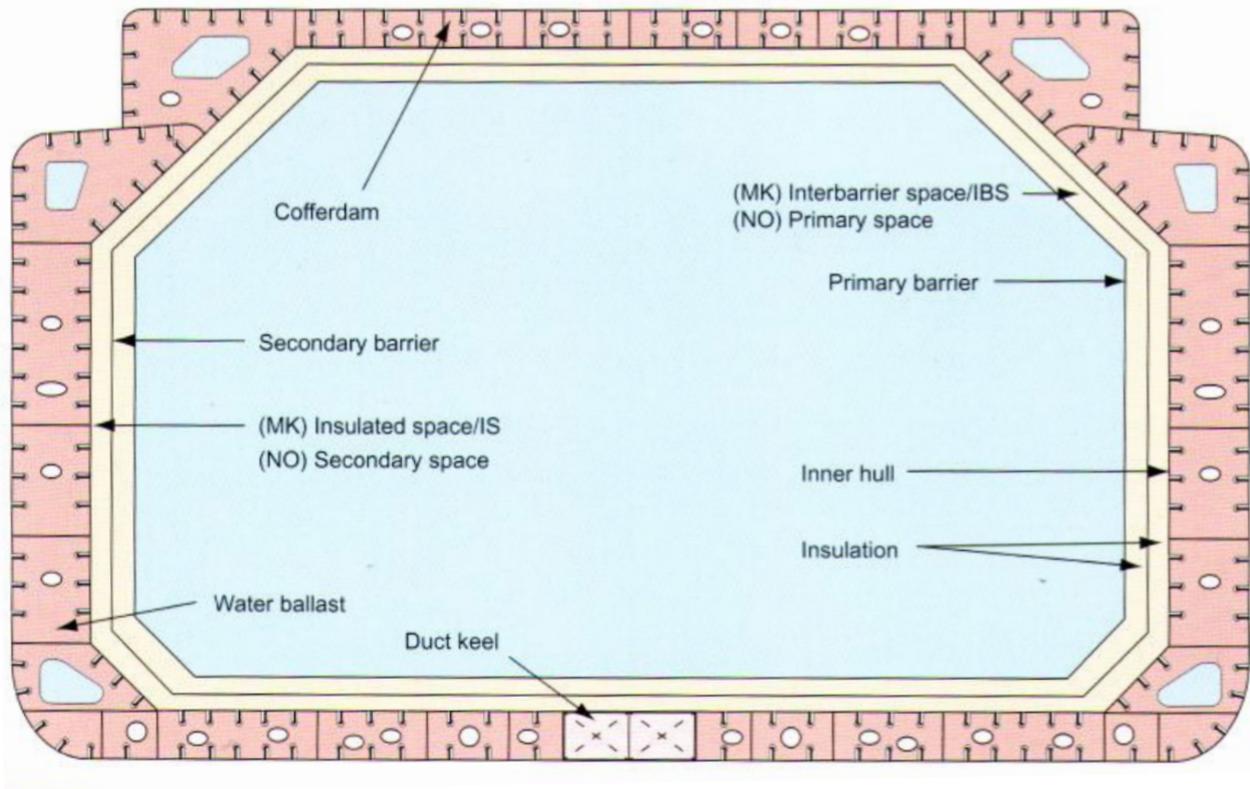


Fig.1 Sección transversal de un buque metanero de tanques tipo membrana

Existen dos tipos de membranas en la actualidad. La membrana NO 96 y la MK III. Ambas producidas por la empresa francesa GTT fusión de las empresas Gaztransport (membrana NO 96) y Technigaz (membrana MK III).

Tipo NO, este tipo de membrana consiste en una pequeña capa de invar como barrera primaria. El invar es una aleación de acero que contiene un 36% de níquel y un 0,2% de carbono. Esta fina capa se encuentra instalada sobre cajas de contrachapado, utilizadas como aislante primario. Tras estas cajas de contrachapado encontramos otra capa de invar, la barrera secundaria, idéntica a la barrera primaria. El invar es el material utilizado para la elaboración de las membranas debido a su bajo coeficiente de expansión térmica. Este coeficiente tan pequeño permite que no sea necesario instalar puntos de expansión o zonas corrugadas que permitan la dilatación del material.

En la imagen inferior vemos el sistema de barreras y aislamiento NO 96, instalado en metaneros desde 1992.

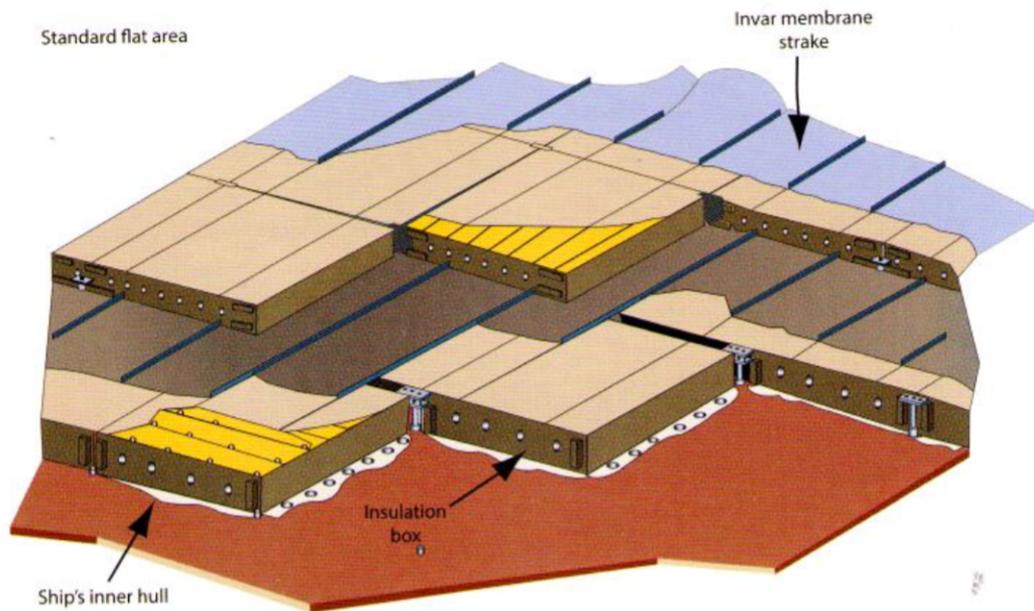


Fig.2 Conjunto de aislamientos y barreras NO 96

El segundo tipo de membrana que nos podemos encontrar es la tipo Mark III (MK III). Este tipo de barrera primaria está elaborada en acero inoxidable de 1.2mm de grosor. Debido a que el coeficiente de expansión térmica del acero inoxidable es mayor que el del invar en la barra tipo MK III encontramos, como vemos en la imagen, una serie de corrugaciones a lo largo de toda la superficie del tanque. La única función de estas ondas es permitir la expansión y contracción del acero inoxidable.



Fig.3 Ejemplo de corrugación en el interior de un tanque tipo MK III

En cuanto al aislante en los últimos diseños de buques con membrana MK III, dejamos las cajas de contrachapado para instalar una serie de paneles de espuma reforzada. Unida a estos paneles tenemos la barrera secundaria. Esta barrera se encuentra entre dos capas de espuma y no presenta corrugación, está elaborada en fibra de vidrio y aluminio, a esta capa se le llama triplex.

Es de extrema importancia entender los diferentes sistemas de aislamiento que podemos encontrar en buques gaseros. La capacidad de aislar térmicamente un tanque de carga repercute directamente en el aumento de temperatura de la carga y por lo tanto en el paso de estado líquido a estado gaseoso del gas natural que transportamos. Es decir, un buen aislante contribuye a reducir el “boil off” generado estrechamente ligado, como veremos más adelante, a la capacidad comercial del buque.

## **2. CADIZ KNUTSEN**

Tras la introducción anterior al gas natural licuado y a su transporte a continuación nos centramos en un buque en particular, el buque metanero Cadiz Knutsen.

### **2.1 Particularidades del buque**

El buque Cadiz Knutsen está diseñado para el transporte de gas natural licuado (*Liquefied Natural Gas* o LNG, por sus siglas en inglés) a  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  y a una presión cercana a la atmosférica. Este buque está ideado para la navegación por todo el mundo, excepto en las aguas de Alaska.

Ha sido construido bajo la supervisión especial de la Sociedad Clasificadora *Lloyd's Register of Shipping* y está clasificada entre otros, con los siguientes símbolos:

- Buque tipo 2G “ metano en tanques de membrana”, máxima presión 0.25 bar y mínima temperatura  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
- SFA (40) la vida del diseño de fatiga de la estructura del tanque será de 40 años y está basado en las rutas para las que está diseñado el barco.

### **2.2 Formas del casco**

El buque tiene una cubierta superior continua, una cubierta de amarre más baja y una cubierta principal que va desde la popa hasta la proa, siendo dicha proa de bulbo sin castillo. Además hay un espejo de popa de tipo aguas abiertas, un timón de tipo semicompensado y una hélice de 5 palas fijas movidas directamente por una turbina.

La sala de máquinas y la acomodación, incluyendo el puente de navegación y “el centro de control y de administración centralizada”, están localizadas a popa. El control de carga está localizado en la cubierta de tronco o *trunk deck*, sobre el tanque de carga número 4.

### **2.3 Funcionamiento**

La forma del casco, el conjunto de propulsión y los sistemas generadores de potencia están diseñados para una eficiencia propulsiva máxima y para economizar combustible teniendo en cuenta la naturaleza de los servicios requeridos, que implican una ruta de tipo línea regular entre las terminales de carga y descarga.

El buque está equipado con una propulsión única de tornillo, conducida por una turbina de vapor, vapor que puede ser generado por la combustión de fuel o la combustión parcial de la carga. También es posible la combustión conjunta de gas y fuel.

El rendimiento de propulsión que puede ofrecer la turbina es de 25200 kW y la velocidad de servicio es de 19.5 nudos. La autonomía de este buque, consumiendo únicamente fuel oil, es de aproximadamente 10200 millas a una velocidad de 19.5 nudos.

## 2.4 Estructura

La estructura del buque con respecto a los tanques de carga es de tipo doble fondo, doble casco y doble cubierta. Además existen 5 *cofferdams* transversales que separan los tanques de carga del resto de los espacios.

La estructura del casco está hecha en su mayor parte de acero templado (con bajo contenido carbónico). De acuerdo con el Código IGC, se deben usar distintos grados específicos de acero dependiendo de a la temperatura a que esté expuesta cada área. Por tanto, en el área de carga, se usa un acero especial para evitar los *cracks*, se denomina crack a la ruptura del acero provocada por un contacto directo con una sustancia a muy baja temperatura, en nuestro caso dicha sustancia es el gas natural licuado, esto ocurre porque la baja temperatura del fluido aumenta la fragilidad del acero.

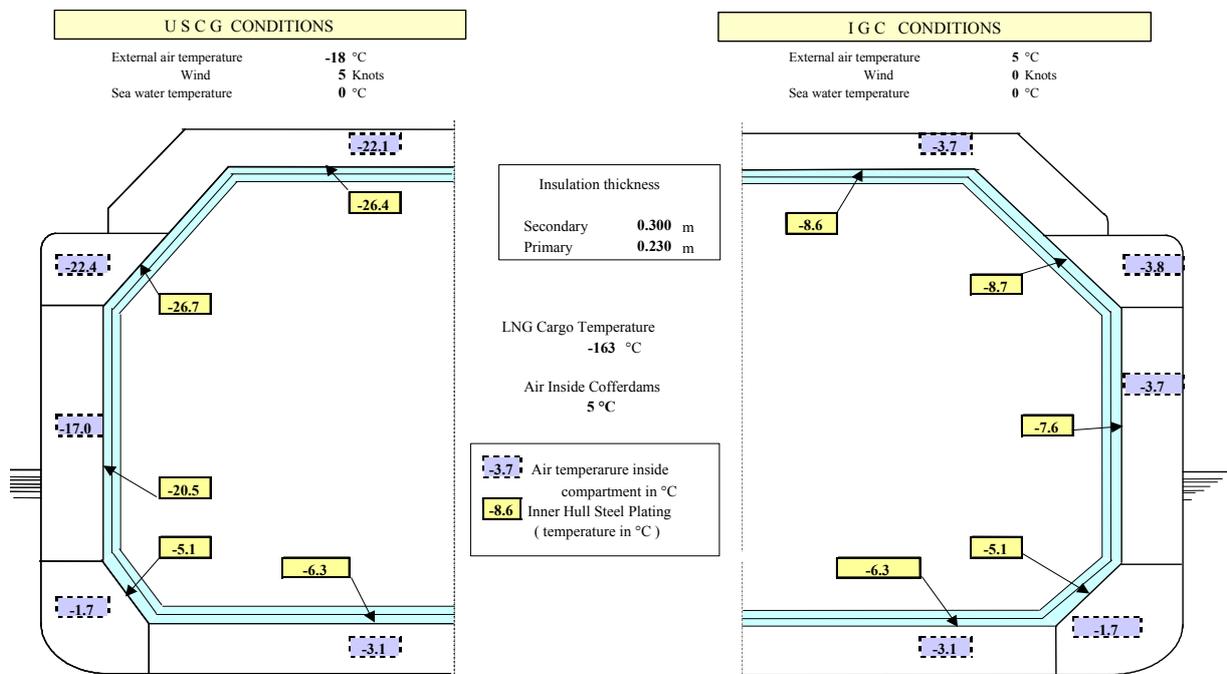


Fig.4 Temperaturas interior de barreras y tanques adyacentes

Como puede observarse en el dibujo las barreras primaria y secundaria de aislamiento de los tanques juegan un papel crucial ya que frenan prácticamente la totalidad del intercambio de temperatura, evitando así que las bajas temperaturas lleguen a propagarse hasta las planchas de acero de los mamparos de los tanques de lastre del doble casco y doble fondo. Para nuestro buque el espesor de las barreras, como se muestra en el dibujo es de 23 cm para la primaria y 30 cm para la secundaria.

## 2.5 Tanques de carga

El sistema de carga consta de 4 tanques de carga situados en el interior del casco y alineados de proa a popa, situándose el tanque número 1 a proa del barco y el tanque número 4 a popa.

Los espacios entre el interior del casco y el exterior del tanque se usan para el lastre y sirven también para proteger a éstos en caso de situaciones de emergencia, tales como abordajes o varadas.

Los tanques a su vez están separados de otros compartimentos, así como de los demás tanques, por 5 *cofferdams* transversales. El *cofferdam* número 1 se encuentra entre el tanque de carga número 1 y la parte de proa y el *cofferdam* número 5 separa la sala de máquinas del tanque número 4, los demás separan a los tanques de carga. Estos compartimentos se encuentran siempre secos.

Cada uno de los tanques de lastre, que se encuentran alrededor de los tanques de carga, está dividido en dos tanques laterales, que sirven como doble fondo del barco, babor y estribor para cada tanque. Los tanques de doble fondo se extienden a los costados de los tanques de carga. Los tanques de lastre número 4 (los situados más a popa) son usados, como en la mayoría de los buques, para controlar la escora del barco.

Todos los tanques de carga tienen forma octogonal y están orientados transversalmente según el sentido de proa a popa.

Los límites de los tanques de carga son los siguientes:

- Un plano en el fondo, paralelo a la plancha de la quilla elevado alrededor de las planchas del buque por dos planchas inclinadas, una a cada costado.

- Dos mamparos verticales que se extienden hacia arriba por medio de unas planchas inclinadas, las cuales sirven para limitar los efectos de las superficies libres del líquido cuando los tanques están llenos.
- Un plano en la parte de arriba paralela al suelo de la cubierta de tronco.

La forma del tanque de carga número uno es ligeramente diferente al resto debido a su posición en el buque. Tiene una sección poligonal y sus mamparos longitudinales son casi paralelos a las planchas del buque.

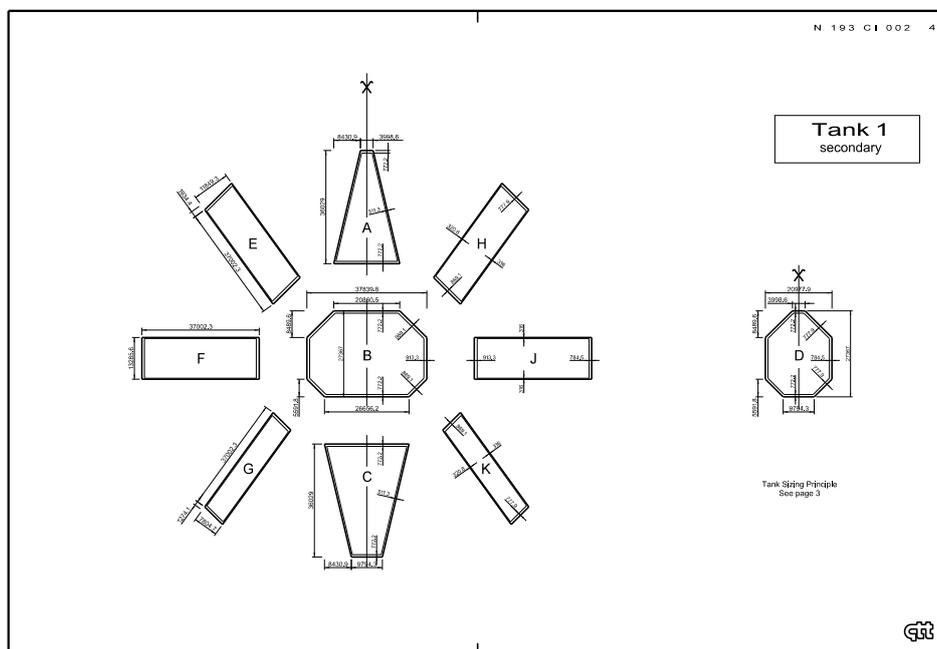


Fig.5 Dimensiones y forma del tanque número 1

El tanque 2 al igual que el tanque 3 tiene forma octogonal y son de dimensiones idénticas, ambos son los de mayor capacidad ya que coinciden en la parte media del buque. El tanque número 4 tiene la misma manga y puntal que estos dos anteriores pero posee menor eslora debido a la proximidad de la sala de máquinas y la habitación.

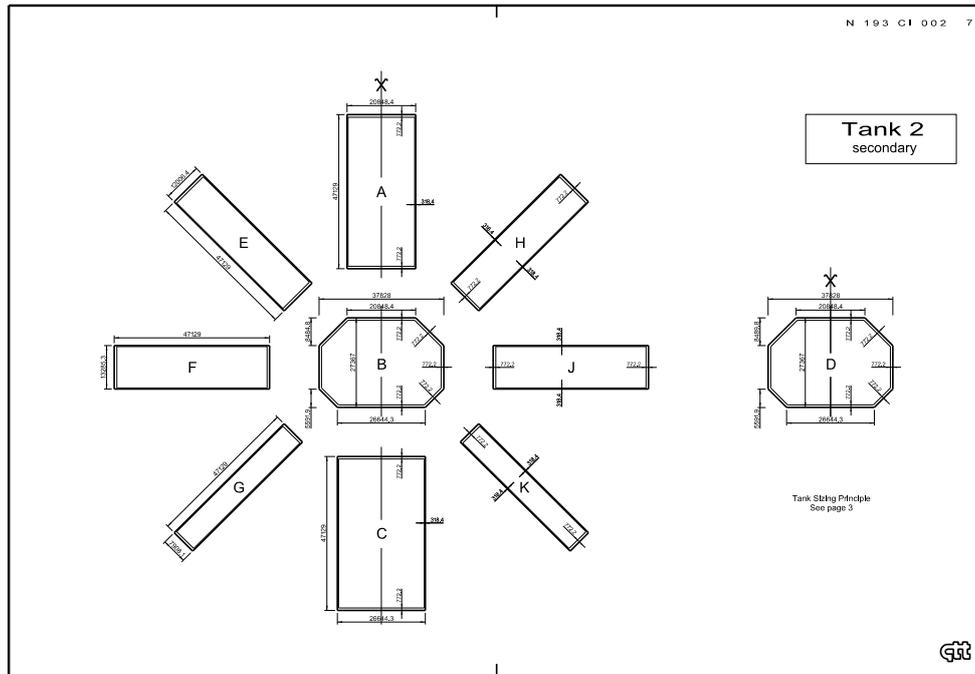


Fig.6 Dimensiones del tanque número 2

## 2.6 Límites de carga de los tanques

El límite de máxima carga es el 98.5% del volumen del tanque. Esto nos dará los siguientes límites máximos de carga:

Número de tanque	Máximo límite de carga en volumen (m <sup>3</sup> )	Máximo límite de carga en altura (m)
Tanque Núm.1	22 323.9 m <sup>3</sup>	25, 505 m
Tanque Núm.2	39 489.2 m <sup>3</sup>	25, 643 m
Tanque Núm.3	39 492.9 m <sup>3</sup>	25,639 m
Tanque Núm.4	34 733.9 m <sup>3</sup>	25, 641 m

Fig.7 Tabla de límites máximos de carga

Por lo tanto la capacidad máxima de carga es cercana a los 138000 m<sup>3</sup>.

## **2.7 Sistema de contención de carga**

Los tanques de carga de este buque son de doble membrana y su especificación de sistema de diseño es Gaz Transport No 96E.2, explicando anteriormente.

El aislamiento secundario es de 300 mm de espesor mientras que el aislamiento primario es de 230 mm de espesor.

## **2.8 Equipos de los tanques de carga**

A popa de cada uno de los tanques encontramos un domo de líquido. A través de este acceso penetran en el tanque las tuberías por las que circula el gas tanto durante la carga como durante la descarga.

A media eslora de cada tanque encontramos un domo de gas para la succión o la entrega de LNG vaporizado.

Cada tanque está equipado con:

- Dos electro-bombas de descarga de tipo sumergidas unidas a dos líneas de descarga.
- Un conducto para instalar la bomba de descarga de emergencia.
- Una electro-bomba sumergida para el reachique (*stripping*), con una línea separada de descarga.
- Una columna para medidas continuas del nivel.
- Un tubo instalado con un medidor de nivel por medio de flotador.
- Cinco sensores de temperatura a niveles diferentes.
- Dos sensores de nivel independientes para nivel alto y muy alto.

### **3. Metodología seguida en el desarrollo del trabajo**

#### **3.1 Descripción de tareas, fases, equipos o procedimientos**

La totalidad de este trabajo ha sido elaborado durante el embarque como alumno de puente a bordo del buque “LNG/c Cadiz Knutsen” entre los meses de diciembre de 2017 y junio de 2018. Entre muchos de los viajes propuestos por el fletador, el viaje Montoir - Escobar fué propuesto y estudiado muy al detalle debido a los factores especialmente particulares que se juntan. Es cierto que otros barcos de porte similar han realizado descargas en Escobar. Sin embargo en el mes de abril de 2017 se produjo uno de los accidentes más importantes de la compañía: el buque LNG/c Sevilla Knutsen varó en un atolón del océano pacífico produciendo el mayor accidente potencial jamás registrado en un buque de transporte de gas natural. Este hecho implicó que la compañía desarrollara una política muy restrictiva en cuanto a agua bajo quilla así como al estudio de la calidad de los levantamientos batimétricos. Factores que anteriormente no se tenían en cuenta y que en la actualidad producen que los estudios de viabilidad para realizar operaciones impliquen un estudio muy detallado aumentando los márgenes de seguridad.

Las fases de elaboración comienzan con la idea de acercar la realidad operativa más actual y moderna en el los buques de este tipo al lector. Durante el comienzo del embarque he tratado de buscar el aspecto mas novedoso e interesante para poder desarrollarlo ampliamente y tratar de realizar el estudio más exhaustivo posible. Mi intención ha sido tratar un tema actual y novedoso a la vez que útil para mi desarrollo como profesional. Valorando continuamente la suerte de poder acudir a gran cantidad de información y la experiencia de los profesionales que se encuentran a bordo así como la del continuo contacto con el tutor.

Las fases de este trabajo, así como el orden en que se encuentra, acompañan perfectamente las fases de mi desarrollo profesional a bordo. La redacción del mismo, por lo tanto, se ha realizado a medida que iba adquiriendo conocimientos siguiendo el siguiente esquema:

1. Fase: Estructura y funcionamiento de buques gaseros en general
2. Fase: Estructura y funcionamiento del LNG/c “CADIZ KNUTSEN”

3. Fase: Características de la operativa de un viaje de un buque gasero

4. Fase: Análisis de los factores que implican restricciones de calado, sloshing, consumo y densidad.

5. Fase: Análisis de la resistencia longitudinal y la estabilidad durante el viaje.

### 3.2 Diagrama de Gantt, plan de proyecto y planificación.

El objetivo de este cronograma es exponer el tiempo empleado en los diferentes apartados que componen la elaboración de este trabajo final de grado.

Apartados	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio
1. Introducción a los gaseros	█	█						
2. Cadiz Knutsen	█	█	█					
3. Órdenes de viaje				█	█	█	█	
3.4.1 Restricciones de calado					█		█	█
3.4.4 Restricción por Sloshing					█	█		
3.5 Calculo de Heel							█	█
4. Plan de carga y estabilidad				█	█		█	
Redacción final del trabajo								█

Fig. 24 Diagrama de Gantt

Como se puede observar la elaboración del trabajo comienza con entender y redactar qué se transporta a bordo del buque, cómo está compuesto y que otros barcos similares se pueden encontrar. A la vez que voy descubriendo las propias características del “Cadiz Knutsen”.

No es hasta principios de marzo cuando se reciben las órdenes de viaje, se realiza el estudio de los puertos, las características de la derrota y se especifican las restricciones que la operación puede encontrar. Con esta serie de datos comienzo a elaborar el plan de estabilidad y carga. Como se observa en el diagrama anterior se hace mención especial a los

apartados 4.4.1 “Restricciones de calado” y el 4.4.4 “Restricción por sloshing”, apartados que forman parte del propio punto 3. Esta mención especial se debe a la atención, estudio y dedicación empleada en el trabajo a estos apartados, que como se ve comprenden tres y dos meses respectivamente y forman una de las partes más completas e innovadoras. El apartado 4.5 “Cálculo de heel” únicamente comprende los meses finales de junio y julio, coincidiendo con el final del periodo de embarque. Este apartado no formaba parte de las órdenes de viaje recibidas por el fletador ya que en ellas no se estipulaba un viaje siguiente, simplemente se indicaba una cantidad de heel a mantener (3500m<sup>3</sup> de LNG). Pese a esto era un apartado que deseaba incluir, me resulta interesante mostrar los métodos empleados para calcular el heel necesario.

La redacción final del trabajo, tareas que incluyen la unión de los diferentes apartados, elaboración y rotulación de imágenes y este apartado han sido realizados durante finales de junio y julio.

#### **4 ÓRDENES DE VIAJE**

A continuación se muestra el correo electrónico recibido por parte del chárter informando de un posible viaje.

*Dear Capt.*

*Voyage: Loading in Montoir LNG Terminal on 01/07/2018. Discharge in Escobar GNL Terminal on 21/07/2018*

***Qty to be loaded: we need feedback from master***

*Qty to be discharged: 2,000,000 MMBtu +10%/-5%*

*Consider sailing 1. GAS ONLY and 2. DUAL FUEL*

*Heel to retain: Necessary to arrival Point Fortin Anchorage in cold condition on 03/08/2018 with minimum 400 m3 O/B. Consider only gas sailing.*

*Draft restriction in Escobar 9.7m. Water density in Escobar 1000 Kg/m3*

*LNG density: 459 kg/m3*

*23,0 for mmbtu/cbm conversion factor*

*Respect sloshing during voyage "Pilot to pilot"*

Analizando las órdenes de viaje anteriores entendemos que nos encontramos frente a un posible viaje entre Montoir y Escobar. Debemos calcular la cantidad máxima a cargar para poder descargar 2,000,000 MMBTU más un 10% o menos un 5%. Nos solicitan la preparación del viaje considerando la navegación utilizando gas como único combustible o utilizando la combinación de gas y fuel oil. Debemos calcular el *heel* a mantener para poder realizar el siguiente viaje y llegar con los tanques fríos al siguiente puerto de carga. Las restricciones son: calado en Escobar ajustado, respetar límites de *sloshing*, densidad del agua en Escobar, consumo de LNG durante el viaje y cantidad mínima a descargar.

#### **4.1 Cantidades a cargar y descargar**

En las órdenes de viaje la cantidad a descargar viene expresada en MMBTU (million of British Thermal Units). Un BTU (British Thermal Unit) es una unidad de energía. Representa la energía necesaria para aumentar un grado Fahrenheit una libra de agua, es decir 453,59 gramos. No existe una relación directa entre la energía contenida en un volumen de GNL y el volumen que éste ocupa, no todos los gases naturales tienen la misma composición y por lo tanto las mismas propiedades. Generalmente el fletador o la terminal de carga la que indica, en función de la composición del gas, el factor de conversión de MMBTUs a volumen en m<sup>3</sup>.

El chárter nos indica que el factor de conversión a utilizar para calcular la cantidad a descargar en m<sup>3</sup> es 23,0 mmbtu/m<sup>3</sup>, por lo tanto la cantidad a descargar, aplicando los márgenes, debe ser entre 82608 m<sup>3</sup> y 95650 m<sup>3</sup>.

#### **4.2 Puertos**

El puerto de carga es Montoir, Francia (47°18,20N 002°07,4W). Se trata de un puerto industrial al norte de La Loire. Controlado bajo la autoridad portuaria de Nantes-Saint Nazaire. La terminal de LNG, con dos muelles y una extensión de milla y media, puede albergar buques hasta 266000m<sup>3</sup> de capacidad y un calado máximo de 13.1m.

El puerto de descarga es Escobar, Argentina (34°14,5N 058°45,7W). Se trata de un puerto característico ya que se encuentra en el Río Paraná, afluente del Río de la Plata. La terminal de descarga es un buque LNG denominado Exemplar con planta de regasificación. Este buque se encarga de devolver el gas a sus estado gaseoso y enviarlo a tierra para su posterior distribución, por ello esta operación está considerada como *ship to ship transfer (STS)*.



Fig.8 Buque LNG descargando realizando operación STS en Escobar (Argentina)

Tras acceder a la desembocadura del Río de La Plata el practicaje es obligatorio. Desde el S de Montevideo hasta la terminal deberemos tomar diferentes prácticos y realizar 16 horas de travesía.

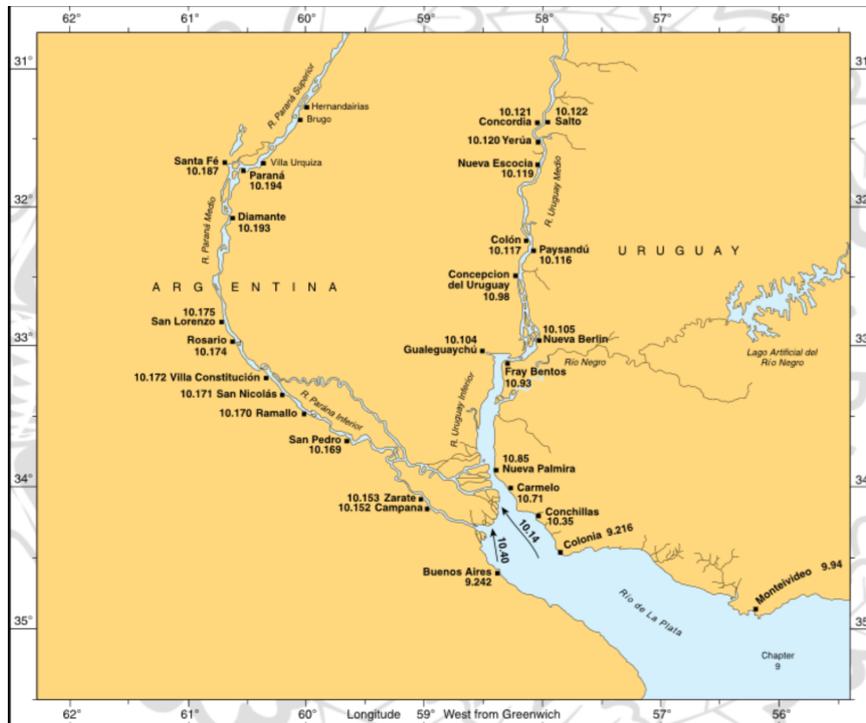


Fig. 9 Visión general del Río de La Plata y Río Paraná

Julio es un mes en el que el río Paraná tiene más caudal por lo que, según las publicaciones náuticas, se puede encontrar una media de 3 nudos de corriente. No existen peligros para la navegación notables.

### 4.3 Derrota y millas

La derrota trazada entre Montoir y Escobar es la que se muestra a continuación y la distancia entre ambos puertos de 5860 millas. Por lo tanto para realizar el viaje en las fechas acordadas la velocidad debe ser 12,5 nudos.



Fig. 10 Derrota entre puerto de carga y puerto de descarga

#### **4.4 Restricciones de calado, consumo, densidad, sloshing.**

A la hora de planificar la operación, nos encontramos con varias restricciones a tener en cuenta:

##### **4.4.1 Restricciones de calado**

La primera, reflejada en las propias órdenes de viaje, es el calado. Escobar se encuentra situado en el río de Paraná, al cual se procede tras una travesía por el Río de la Plata. Dicho tránsito tiene una sonda mínima 14 metros. El primer paso es comprobar que para un calado máximo de 9,7 metros, como establece el charter, se cumple a priori con la política de UKC (*Under keel clearance*) de la compañía. Knutsen OAS establece que en aguas confinadas el mínimo margen de agua bajo quilla debe ser un 10% del calado máximo del barco, por lo tanto con 9,7 metros de calado debemos tener al menos 10,67 metros de sonda. Por lo que el calado dado en las instrucciones de viaje por el fletador es viable y se ajusta a la política de la compañía. [12]

Otro factor a tener en cuenta estrechamente ligado a la restricción de calado anterior es el efecto del squad. Cuando un buque se desplaza sobre el agua éste ocupa un espacio que hasta ese momento se encontraba ocupado y por lo tanto ese volumen de agua debe moverse. Esa masa de agua se desplaza a una velocidad por debajo del buque lo que genera un descenso de presión y por lo tanto resulta en un aumento de calado. [9]

El principal factor que genera el squad es la velocidad de desplazamiento del barco, por lo general el squad varia en función del cuadrado de la velocidad, es decir, como regla general podemos decir que si duplicamos la velocidad de desplazamiento cuatriplicamos el efecto del squad. Es importante indicar que la velocidad a la que nos referimos es la velocidad sobre el agua, no sobre el fondo, de modo que el efecto de la corriente y la marea debe tenerse en cuenta. Otro factor importante es el coeficiente de bloque  $C_b$ . El squad varia proporcionalmente al  $C_b$ , así a mayor  $C_b$  mayor efecto del squad. El último factor relevante que debemos tener en cuenta es el coeficiente de blocage "S", es la sección transversal de la mitad de la eslora del buque por el calado máximo, dividido entre la sección transversal de

la anchura del canal por la sonda del mismo. Para realizar el cálculo del squad utilizamos la fórmula general, desarrollada por el ingeniero naval Barras Derrett en 1977. Esta fórmula recoge de forma general cualquier situación de navegación, siendo válida tanto para navegación en aguas abiertas como en aguas confinadas. [10], [11].

$$Squad [m] = \frac{Cb}{30} \cdot S_2^{\frac{2}{3}} \cdot V^{2,08}$$

Siendo:

$$S_2 = \frac{S_1}{1-S_1}$$

$$S_1 = \frac{b \cdot T}{B \cdot H}$$

- Cb; el coeficiente de bloque con calado T
- V; velocidad sobre superficie de desplazamiento del buque
- b; manga máxima sumergida
- T; calado del buque
- B; anchura del canal
- H; sonda del canal

Sabemos que la velocidad sobre el fondo durante la navegación fluvial es de máximo 7 nudos sobre el fondo, información obtenida contactando con el servicio de practica. Por otro lado, si vamos a la cartografía de la zona, vemos que la sonda mínima que encontraremos en todo el canal navegable es de 14 metros.

Para calcular el squad para nuestras condiciones consideramos:

- V = 10 nudos. Suponiendo una velocidad máxima de 7 nudos y una corriente en contra de 3 nudos.
- b = 42,5 metros

- T = 9,7 metros en aguas iguales
- Cb = 0,7802 para un calado de 9,7 metros
- B = 150 metros
- H = 14 metros, sonda mínima registrada en el canal navegable del río

Por lo tanto:

$$S_1 = \frac{42,5 \cdot 9,7}{150 \cdot 14} = 0,19631$$

$$S_2 = \frac{S}{1-S} = \frac{0,19631}{1-0,19631} = 0,24426$$

$$Squad [m] = \frac{Cb}{30} \cdot S_2^{\frac{2}{3}} \cdot V^{2,08} = \frac{0,7802}{30} \cdot 0,24426^{\frac{2}{3}} \cdot 10^{2,08} = 1,22 [m]$$

Así pues, vemos como para las condiciones extremas anteriores obtendremos un aumento del calado de **1,22 metros** debido al efecto del squad.

El cálculo anterior es válido para condición dinámica, cuando el buque se encuentra remontando el río, pero ¿afecta el squad cuando nos encontremos abarloados al buque regasificador? La respuesta es sí, recordamos que anteriormente se ha comentado que la velocidad que afecta al squad es la velocidad sobre superficie. En condiciones normales, atracados a terminales sin efectos de marea ni corriente, podríamos decir que el Squad es nulo. En Escobar cuando nos encontremos atracados mantendremos una velocidad sobre el agua de 3 nudos, debido a la corriente, y por lo tanto estaremos bajo los efectos del Squad.

Aplicando la fórmula de Barras Derrett obtenemos que el squad una vez atracados, con una velocidad sobre el agua de 3 nudos equivalente a la corriente máxima y una sonda carta de 14,2 metros es 0,10 metros

Antes de finalizar con la restricción de calado y determinar el agua bajo quilla se debe comentar otro punto, el CATZOC.

El CATZOC es un nuevo término que adquiere gran importancia en la actualidad donde la navegación con cartas electrónicas tipo ENC “Electronic Nautical Chart” se encuentra ampliamente generalizada. El CATZOC o “Category of Zone Of Confidence” es la calidad del levantamiento cartografico electrónico con el que estamos trabajando. Los datos que muestran las cartas tipo ENC están basados generalmente en información suministrada por diferentes fuentes cuya exactitud puede variar. [16]

En las cartas de papel la certeza de la información se muestra en un diagrama en la propia carta, de forma que el operador puede aplicar un margen de seguridad apropiado. Aplicando mayores márgenes de seguridad cuando el levantamiento cartografico es antiguo o la escala de la carta no es suficiente para conocer la profundidad en una zona concreta.

En las cartas ENC no encontramos un equivalente a este diagrama informativo, pero si que nos proporciona la información relativa a la exactitud del levantamiento cartografico en forma de símbolos que se muestran sobre la propia carta. En la siguiente tabla vemos los diferentes símbolos y su significado. [7], [13], [14].

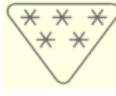
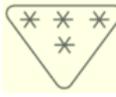
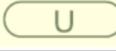
ZOC	Precisión de la posición	Precisión de la profundidad		Requerimientos de exploración	Símbolo CATZOC
A1	± 5 m + 5% profundidad	= 0,5 + 1%		La exploración comprende toda el área, todos los accidentes significativos descubiertos del fondo marino han sido detectados y han tenido sus profundidades medidas	
		Profundidad (m)	Precisión (m)		
		10	± 0,6		
		30	± 0,8		
A2	± 20 m	= 1,00 + 2%		La exploración comprende toda el área, todos los accidentes significativos descubiertos del fondo marino han sido detectados y han tenido sus profundidades medidas	
		Profundidad (m)	Precisión (m)		
		10	± 1,2		
		30	± 1,6		
B	± 50 m	= 1,00 + 2%		La exploración total del área no se logró, pueden existir accidentes desconocidos peligrosos para la navegación	
		Profundidad (m)	Precisión (m)		
		10	± 1,2		
		30	± 1,6		
C	± 500 m	= 2,00 + 5%		La exploración total del área no se logró, pueden existir accidentes desconocidos peligrosos para la navegación	
		Profundidad (m)	Precisión (m)		
		10	± 2,5		
		30	± 3,5		
D	Peor que ZOC C	Peor que ZOC C		La exploración total del área no se logró, pueden esperarse anomalías en las profundidades	
U	La calidad de los datos batimétricos aún está por evaluarse				

Fig.11 Símbolos CATZOC y su exactitud

Como vemos existen seis símbolos diferentes. Cinco y seis estrellas sobre la carta nos indica una alta exactitud en el levantamiento, se habrá utilizado equipamiento y técnicas modernas cubriendo la totalidad del fondo. Tres y dos estrellas nos indican que el levantamiento cartográfico es poco exacto mientras que el símbolo “U” nos indica que no se ha realizado un estudio sobre esa zona.

Sabemos por tanto que la calidad del levantamiento cartográfico puede implicar una variación en la profundidad que vemos en la carta y por tanto en el agua bajo quilla que mantendremos. De la misma forma el CATZOC puede implicar una variación en el Squad calculado.

Estudiando el CATZOC en la cartografía que cubre nuestra derrota observamos que durante toda la navegación fluvial la calidad del levantamiento tiene cuatro estrellas. Por lo tanto las profundidades mostradas tendrán una exactitud de 1 metro + 2% de la profundidad. Aplicando la anterior fórmula para una profundidad de 14 metros, la posible variación en la profundidad marcada en la zona puede ser de hasta 1,28 metros. Factor que debemos tener en cuenta para calcular el agua bajo quilla mínima. [6]

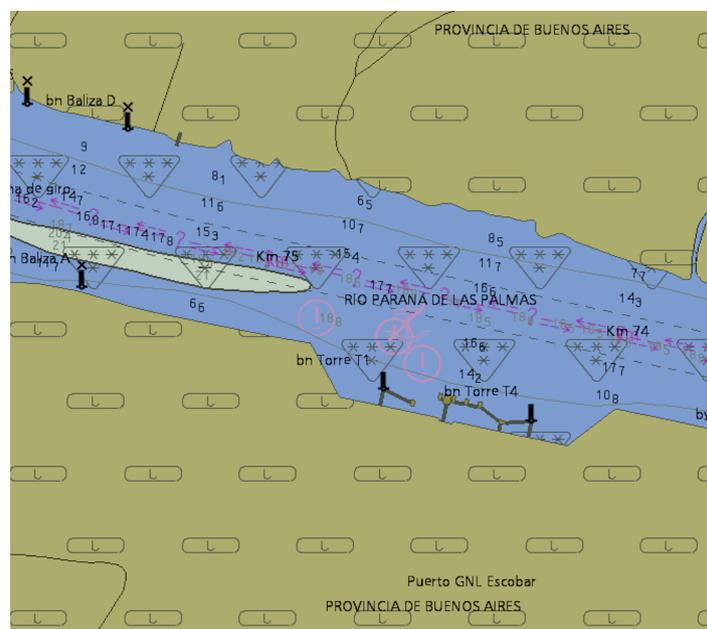


Fig. 12 CATZOC en Escobar

Si tenemos en cuenta todos los factores que afectan al UKC tanto en condiciones de navegación como una vez atracados obtenemos los siguientes valores:

$$\text{UKC dinámico} = 14 \text{ m} - (9,7 \text{ m} + 1,22 \text{ m} + 1,28 \text{ m}) = 1,8 \text{ m}$$

$$\text{UKC estático} = 14,2 \text{ m} - (9,7 \text{ m} + 0,10 \text{ m} + 1,28 \text{ m}) = 3,12 \text{ m}$$

Siendo 14,2 metros la sonda carta en la zona de atraque.

#### **4.4.2 Restricciones de consumo**

Como sabemos el gas natural licuado, pese a encontrarse en el interior de tanques muy aislados, tiende a aumentar de temperatura. Este aumento de la temperatura de la carga, sumado al movimiento durante la navegación, genera que parte pase de estado líquido a gaseoso de forma natural e inevitable. Este cambio de estado genera un aumento en la presión de los tanques que por seguridad debe ser aliviada. A bordo aliviamos la presión quemando este gas en las calderas y utilizándolo para generar el vapor que suministra energía a la turbina. En los buques metaneros existe la posibilidad de forzar la vaporización de parte de la carga “forcing” mediante una serie de calentadores que cambian a estado gaseoso parte de la carga.

Para la realización del calculo de cantidad a cargar debemos saber qué porcentaje se evapora al día de forma natural en estas condiciones de viaje, NBOG “Natural Boil-off Gas”, de forma que podamos calcular con qué cantidad debemos salir para poder llegar al destino con la cantidad requerida. Es decir, en el calculo de carga del puerto de salida se deberá tener en cuenta esa disminución de carga por consumo a lo largo del viaje desde Montoir hasta Escobar, permitiéndonos un mayor calado en la salida.

Para saber qué cantidad de boil-off se genera cuando el buque se encuentra cargado acudimos al contrato de fletamento. En él se indica que el NBOG representa el 0,013% de la totalidad de la carga a bordo en condiciones de carga y el 0,008% del total en condiciones de lastre. Por lo tanto en condiciones de carga el NBOG generado es de 210 m<sup>3</sup> al día, lo que implica que en 20 días de navegación se evaporarán 4200 m<sup>3</sup>, cantidad que deberemos sumar a la total a descargar.

Durante la navegación, como ya hemos comentado, existe la posibilidad de quemar tanto gas, fuel oil o la combinación de ambas en las calderas. En las órdenes de viaje se solicita el cálculo de navegación tanto a *only gas*, quemando únicamente gas, con la posibilidad de forzar la vaporización si el NBOG no es suficiente, como a *dual fuel*, añadiendo la cantidad necesaria de fuel al NBOG para generar la velocidad requerida.

Si acudimos a las tablas incluidas en el contrato de fletamento, donde se indican los consumos reales del barco a cada una de las velocidades, vemos como para una velocidad de 12.5 nudos, velocidad que pide el viaje, el consumo de fuel oil será 80,5 toneladas diarias. El factor de conversión HFO a LNG, obtenido igualmente del contrato de fletamento, indica que 0,475 ton de HFO equivalen a 1 m<sup>3</sup> de LNG, por lo tanto 80,5 ton de HFO equivalen a 169,5 m<sup>3</sup> de LNG. Dado que la cantidad de LNG diaria necesaria para poder realizar la velocidad del viaje es menor que el NBOG, 210m<sup>3</sup> diarios, no es necesario navegar a dual fuel ni forzar la vaporización. El viaje se realizará con gas natural evaporado de forma natural como único combustible.

#### **4.4.3 Restricción por densidad del agua**

La siguiente limitación es la densidad del agua en el puerto de descarga. Como se ha comentado previamente, Escobar se encuentra en el río Paraná, cuya densidad difiere de la tradicional de agua de mar (1,025). Esta última es la que tendremos en el puerto de carga, pero los cálculos de salida tendrán que tener en cuenta la variación de densidad una vez entrado en el río.

#### **4.4.4 Restricción por *Sloshing***

Se entiende *slosh* como el movimiento de un líquido contenido en un recipiente que a su vez se encuentra en movimiento, provocando la formación de olas que golpean el propio recipiente. Para que suceda este fenómeno el líquido debe tener superficies libres, es decir,

no presentar resistencia por el recipiente para mantenerse horizontal, perpendicular a la gravedad, durante un movimiento. [4]

Los buques metaneros, en especial los de tanque tipo membrana, presentan una importante restricción en cuanto a la cantidad de carga a bordo debido a los efectos del *sloshing*. El interior de los tanques son un espacio completamente diáfano, sin mamparos interiores, por lo que el efecto de las superficies libres es grande. Debido a esto, de realizar una navegación con los tanques de carga cargados a media capacidad el impacto de las olas generadas contra el interior de los tanques provocaría daños estructurales en las barreras tanto primaria como secundaria.

Para prevenir cualquier daño derivado del movimiento del líquido, está prohibido navegar con el nivel del líquido entre un 80% de la altura del tanque y una altura igual al 10% de la altura del tanque. [15]

Aplicando los criterios de la compañía, debemos evitar que la cantidad de carga en los tanques entre dentro de los siguientes límites, siendo válidos alturas de carga superiores o inferiores a los límites mostrados a continuación. Los valores, al no ser los tanques idénticos, son propios para cada uno:

Núm. de Tk	H (más baja)		H (más alta)	
	10% Alt. (m)	Volum. (m <sup>3</sup> )	80% Alt. (m)	Volum. (m <sup>3</sup> )
Tk Núm 1	2.627 m	1864 m <sup>3</sup>	21.017 m	19503 m <sup>3</sup>
Tk Núm 2	2.626 m	3482 m <sup>3</sup>	21.012 m	33882 m <sup>3</sup>
Tk Núm 3	2.626 m	3484 m <sup>3</sup>	21.009 m	33887 m <sup>3</sup>
Tk Núm 4	2.626 m	3063 m <sup>3</sup>	21.011 m	29807 m <sup>3</sup>

Fig. 13 Límites de *sloshing* en buque Cadiz Knutsen

Una vez conocidos los datos relativos al viaje, se procede a hacer un cálculo inicial de cantidades a cargar para responder a las órdenes de viaje del chárter.

## 4.5 Calculo de heel

El *heel* consiste en una pequeña cantidad de carga que se mantiene a bordo en un tanque tras una operación de descarga. El *heel* tiene dos funciones importantes.

Una vez descargada la totalidad de un barco debido a que no se encuentra carga en el interior de los tanques estos comienzan a calentarse, pudiendo en función del tiempo desde la descarga alcanzar temperaturas ambientales. La principal función de no descargar la totalidad de un barco es poder utilizar el *heel* para enfriar los tanques a la temperatura de recepción de la carga, al rededor de los - 150 °C. El enfriamiento consiste en pulverizar gas natural en estado líquido en el interior de cada uno de los tanques de forma que poco a poco la temperatura interior de los mismos descienda. De no tener esta reserva de carga el enfriamiento de tanques debería hacerse en la terminal de carga aumentando mucho el tiempo de la operación y los costes de la misma.

La segunda función de mantener *heel* a bordo tras una descarga es poder utilizar el *boil off* del mismo como combustible en las calderas. Dependiendo de los precios de mercado el HFO (*Heavy Fuel Oil*) puede encontrarse más caro que el LNG por lo tanto en muchas ocasiones es preferible aumentar la cantidad de *heel* de forma que el viaje al puerto de carga pueda realizarse consumiendo únicamente gas.

En las órdenes de viaje nos piden calcular el *heel* para poder llegar con los tanques listos para la recepción de la carga a Point Fortin, en Trinidad, el día 03/08/201, es decir 12 días después de terminar la descarga, realizando el viaje consumiendo únicamente gas.

Para realizar el calculo de *heel* comenzamos calculando la distancia entre ambos puertos, en este caso 3700 nm. Dado que el viaje se debe realizar en 12 días la velocidad media a realizar debe ser de 12,82 nudos. A continuación debemos aplicar el factor por resbalamiento o *slip factor*. El resbalamiento es la diferencia entre la velocidad que genera la máquina del barco y la velocidad real sobre el agua, en nuestro caso existe un 2% de diferencia, provocado por suciedad adherida al casco principalmente. Aplicando el factor por resbalamiento a la velocidad calculada anteriormente obtenemos que la velocidad que debemos generar en la máquina es de 13,1 nudos.

El siguiente paso es saber el consumo a esta velocidad en condición de lastre. Este dato viene reflejado en el contrato de fletamento o *charter party* donde se indica que el consumo de HFO a 13,1 nudos es 85,46 toneladas diarias. Otro factor importante utilizado anteriormente es la equivalencia a utilizar para la relación HFO y LNG. Recordamos que 1 tonelada de HFO equivale a 0,475 m<sup>3</sup> de LNG. De modo que el consumo de LNG diario para generar una velocidad de 13,1 nudos será 179,92 m<sup>3</sup>. Dado que la navegación se realiza en 12 días el consumo total de LNG será 2159 m<sup>3</sup>.

Ya tenemos la parte de *heel* destinada a utilizarse como combustible, a continuación debemos calcular la cantidad destinada para el enfriamiento de los tanques, la suma de ambas partes será el *heel* a dejar a bordo.

El *heel* se dejará en el tanque número 4. En 12 días los tanques que se encuentran descargados irán absorbiendo calor hasta una temperatura ambiente media de 20 °C. Dado que el tanque 4 tendrá una cantidad de líquido, a una temperatura de -162°C, la atmósfera interior no aumentará del mismo modo que la del resto de los tanques, alcanzando el tanque 4 una temperatura media de -80 °C.

Para saber la cantidad de LNG necesario para enfriar los tanques acudimos a las tablas de Gaztransport y Technigaz, *GTT Tables*. Estas tablas, proporcionadas por los fabricantes de las membranas, son propias de cada buque y nos indican la cantidad de energía en MMBTUs necesaria para desde una temperatura media del interior del tanque alcanzar la temperatura adecuada para la recepción de carga. Para nuestro caso obtenemos las siguientes cantidades:

Tanque No. 1 (20 °C) = 2157 MMBTU

Tanque No. 2 (20 °C) = 3306 MMBTU

Tanque No. 3 (20 °C) = 3306 MMBTU

Tanque No. 4 (- 80 °C) = 1278 MMBTU

Total necesario = 10047 MMBTUs

Aplicando el factor MMBTUs/LNG proporcionado por el fletador obtenemos que la cantidad necesaria de LNG para el enfriamiento será de 437 m<sup>3</sup>.

En las órdenes de viaje se indica que debemos llegar al puerto de carga con los tanques fríos y una cantidad mínima de 400 m<sup>3</sup>. Es común por parte de las terminales de carga solicitar una cantidad mínima a bordo, siendo posible el enfriado extra de los tanques en caso de haber posibles demoras en las operaciones de carga.

Sumando las cantidades anteriores determinamos que el heel total a mantener a bordo debe ser 3000 m<sup>3</sup>.

#### **4.6 Visión general de condiciones previo cálculos de carga**

Haciendo un repaso general de todas las restricciones y condiciones calculadas en los apartados anteriores se determina lo siguiente:

- calado máximo admisible en navegación fluvial 9,7 metros EK
- NBOG total durante la navegación 4200 m<sup>3</sup>
- densidad puerto descarga 1,000 t/m<sup>3</sup>
- densidad puerto de carga 1,025 t/m<sup>3</sup>
- respetar sloshing durante navegación oceánica, sloshing admisible durante navegación fluvial
- *heel* a mantener 3000 m<sup>3</sup>

### **5. PLAN DE CARGA**

#### **5.1 Introducción a la estabilidad y a los esfuerzos**

De forma previa al comienzo de los cálculos que a continuación se van a tratar se ha considerado necesario realizar una breve explicación de los conceptos relacionados tanto con la estabilidad como con los esfuerzos que afectan al buque durante las operaciones de carga, navegación y descarga.

En éste trabajo se valora la estabilidad del buque en función de los criterios de estabilidad que establece la IMO (Organización Marítima Internacional), bajo el código Internacional de Estabilidad sin avería (Código IS) en la resolución A-749 de 1993, así como en las enmiendas posteriores resolución MSC.75. (69)). El Código IS incluye principios fundamentales tales como precauciones generales contra la zozobra (criterios relativos la altura metacéntrica (GM) y las curvas de brazos adrizantes (GZ)). [5]

Así pues existen dos criterios referentes a la estabilidad que deben cumplir todos los buques. Por un lado la estabilidad estática nos indica la condición de estabilidad de un buque en un momento dado. Por otro lado tenemos los criterios de estabilidad dinámica. La estabilidad dinámica estudia la estabilidad de un buque dentro de un rango de ángulos de escora.

En cuanto a la estabilidad estática en primer lugar nos encontramos con un valor de altura metacéntrica mínima. Un buque se considera que está en equilibrio estable cuando al inclinarse éste, trata de recuperar su posición inicial. Para que esto suceda el centro de gravedad debe estar por bajo del metacentro, es decir, que la altura metacéntrica, GM, tenga un valor positivo. La posición del centro de gravedad, G, del buque se mantiene fija independientemente de que éste se encuentre con escora o no y la fuerza de gravedad se considera que actúa de forma vertical a a este punto. Al escorar, el centro de flotación (el centro de gravedad del volumen sumergido) y la fuerza de flotabilidad que actúa sobre este punto se desplaza del punto B al punto B1, generando un brazo adrizante desde el punto B1 al punto M, el cual hace recuperar la situación de estabilidad inicial. Sabiendo que el valor de GM se considera crucial para la estabilidad del barco entendemos que éste debe ser un valor continuamente monitorizado. La IMO establece en la resolución A.749 que ningún buque debe alcanzar una altura metacéntrica inferior a 0,15 metros.

El siguiente criterio referente a la estabilidad estática establece que el valor de GZ máximo se produzca por encima de los 25° de escora. GZ es la distancia perpendicular entre el centro de gravedad G y la vertical de la flotabilidad que actúa en el centro de flotación B. Mayor valor GZ indica una mayor capacidad de adrizamiento.

El tercer criterio relacionado con la estabilidad estática indica que el valor de GZ para una escora superior a 30° debe ser mayor que 0,20 metros.

Denominamos estabilidad dinámica al trabajo que se debe realizar para escorar un buque desde una posición de equilibrio hasta una inclinación isocarena cualquiera. Se debe suponer que este movimiento de giro sucede lo suficientemente lento, así consideraremos que las velocidades angulares inicial y final del buque como la resistencia de agua y aire sea nula. En estas condiciones podremos afirmar que el par escorante será igual al par adrizante.

El valor de estabilidad dinámica consiste en, partiendo de una posición de equilibrio  $\theta = 0$ , sumar los trabajos resistentes realizados por el par de estabilidad en cada instante del giro hasta una escora cualquiera  $\theta = e$ . La unidad en la que viene expresado este trabajo son toneladas metros por radianes.

En cuanto a los criterios de estabilidad dinámica la IMO establece que el área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) no será inferior a 0,055 metro-radián hasta un ángulo de escora  $\varphi = 30^\circ$  ni inferior a 0,09 metro-radián hasta  $\varphi = 40^\circ$ , o hasta el ángulo de inundación descendente  $\varphi_f$  si éste es inferior a  $40^\circ$ . Además, el área bajo la curva de brazos adrizantes (curva de brazos GZ) entre los ángulos de escora de  $30^\circ$  y  $40^\circ$ , o entre  $30^\circ$  y  $\varphi_f$  si este ángulo es inferior a  $40^\circ$ , no será inferior a 0,03 metro-radián. [1]

Cualquier buque se encuentra continuamente sometido a una variedad de esfuerzos causados por la acción de causas externas o internas, por lo que deben ser proyectados, construidos y manejados de forma que sean capaces de soportar estos esfuerzos de forma segura.

Existen tres aspectos a determinar en el estudio estos esfuerzos, los esfuerzos que actúan sobre el buque, los esfuerzos resultantes y la capacidad del buque de soportarlos.

Es obvio decir que en la mayor parte de la vida de un buque éste se encuentra en un medio permanentemente agitado y en movimiento, e incluso cuando se encuentra en aguas tranquilas está sometido a fuerzas que distorsionan su estructura, aquellas provocadas por la presión hidrostática sobre la parte sumergida, o las que derivan del peso del propio buque y de todos los elementos que transporta.

Dentro de los esfuerzos estructurales, los importantes son los esfuerzos longitudinales, es decir, las cargas que tratan de deformar el buque en su plano diametral de simetría.

Constituyen, sin duda alguna, la parte más importante del estudio de la resistencia estructural del buque, y experimentalmente se ha podido comprobar que representan aproximadamente un 60% del valor total de la carga real del mismo. La capacidad de soportar esos esfuerzos longitudinales se determina en el momento del diseño del buque y de su construcción.

En este trabajo el estudio de esfuerzos que afectan a los diferentes apartados, consiste en comprobar que los esfuerzos cortantes (shear force) y los momentos flectores (bending moment) se encuentran bajo los límites permisibles calculados en la construcción del barco. Para realizar esta comprobación debemos saber en que consisten cada uno de ellos.

En una situación de carga dada, comenzamos dividiendo el buque en diferentes secciones. A continuación estudiamos el peso total, suma de pesos fijos y pesos variables, que afectan a cada una de estas secciones de forma individual. El siguiente paso para entender en qué consisten los esfuerzos es calcular el valor del empuje en cada una de estas secciones. Una vez conocidos los pesos y los empujes de cada una de las secciones podemos imaginar cómo la relación peso/empuje difiere entre secciones. El peso en una sección comprendida en un tanque de carga será mayor que el empuje, mientras que en la acomodación o en un espacio vacío el empuje será mayor. Así nos encontramos con la siguiente condición.

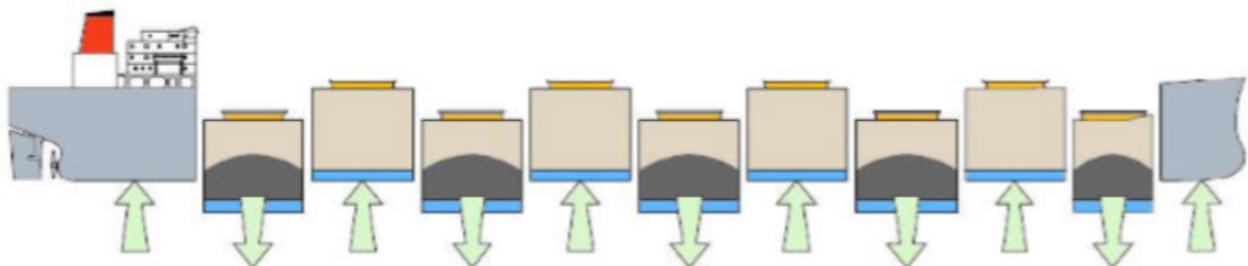


Fig.14 Empuje y peso en buques

Una vez estudiado el valor independiente de peso y empuje de cada una de las secciones se procede a elaborar la curva de cargas.

La curva de cargas representa la distancia vertical entre la curva de pesos y la curva de empujes a lo largo de la eslora del buque, es decir, la suma algebraica del valor del peso unitario con el valor del empuje unitario.

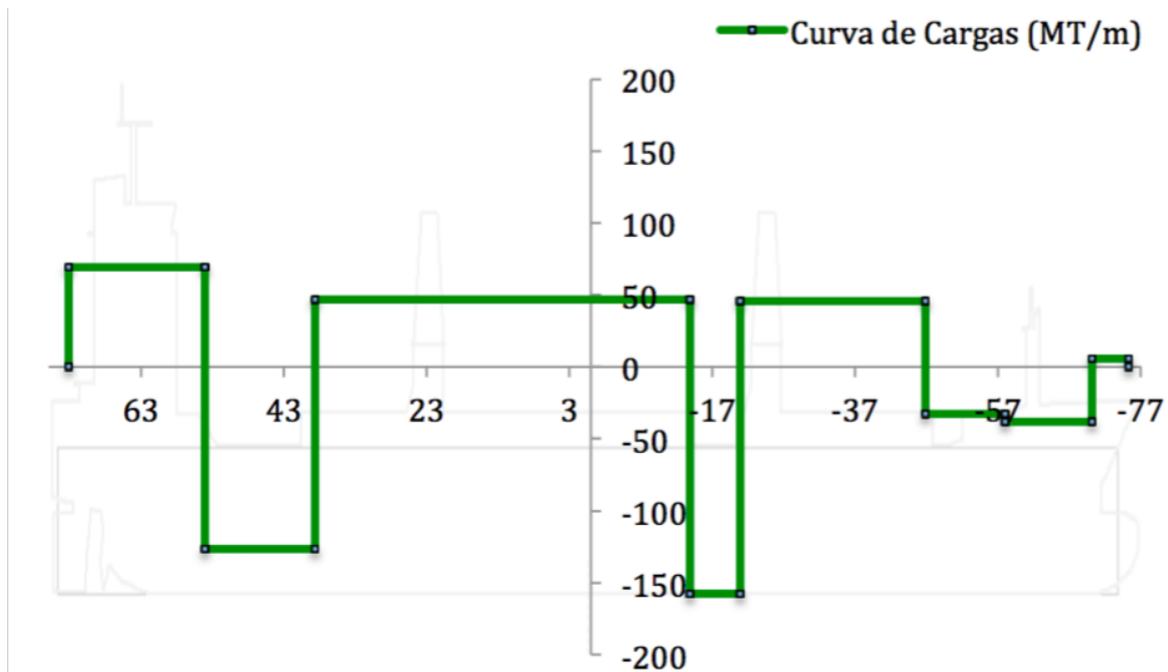


Fig.15 Curva de cargas

El valor de la curva de esfuerzos cortantes es la integración de la curva de cargas. Nos indica el valor en toneladas y la dirección de la suma de empujes y pesos en cada una de las cuadernas. Gracias a ella podemos conocer a que esfuerzos esta sometido el barco y saber si la distribución de pesos es correcta y no afecta estructuralmente el buque.

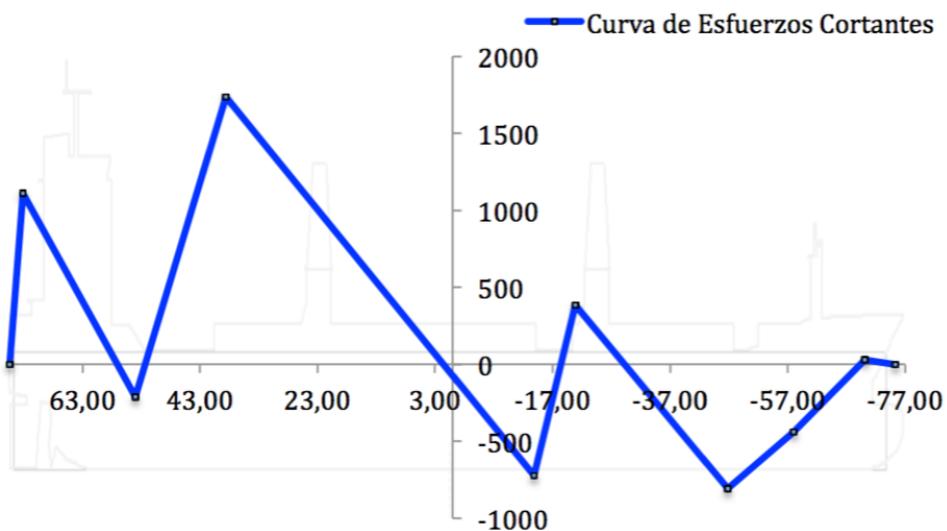


Fig.16 Curva de esfuerzos cortantes

La curva de momentos flectores es la integración de la curva de esfuerzos cortantes. Se denomina momento flector al momento de fuerza resultante de una distribución de tensiones sobre una sección transversal de un prisma flexionado. Es decir, nos indica cómo el conjunto de los esfuerzos cortantes conocidos afecta a la totalidad del buque y por lo tanto cómo responde estructuralmente, demostrando así las flexiones a las que está sometido. El valor de los momentos flectores viene dado en kilo Newton metro.

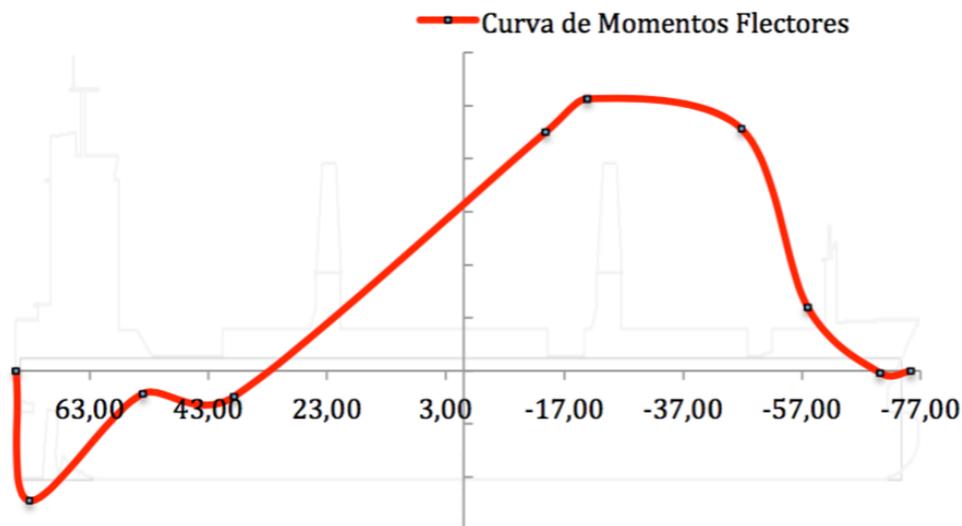


Fig.17 Curva de momentos flectores

Puede ser complejo entender si nuestro buque se encuentra cercano a los límites de esfuerzos para los que ha sido diseñado simplemente conociendo los valores de los esfuerzos y los momentos. En los programas utilizados para cálculos de carga se indica en porcentaje la cuaterna que se encuentra más próxima a alcanzar el máximo esfuerzo o momento para el que ha sido diseñada. Así una cuaterna que se encuentra al 98% en referencia a los esfuerzos cortantes nos indica que está sometida únicamente a un 2% de esfuerzo por debajo de su límite. De esta forma, conociendo los valores de esfuerzos y momentos máximos a los que está sometido nuestro barco y el lugar en el que éstos se encuentran nos da una idea de cómo se encuentra distribuida la carga y de la probabilidad de sufrir daños estructurales.

Es importante saber que estos límites, propios de cada barco, varían si éste se encuentra en puerto o navegando. Es obvio que los límites son más restrictivos en navegación, dado que las condiciones de mar y viento implican grandes variaciones en los esfuerzos a los que un

barco está sometido. Estos límites vienen dibujados con líneas discontinuas en las gráficas que en los apartados posteriores se mostrarán.

A continuación se procede a realizar los cálculos para las diferentes condiciones que afectan al viaje. Para la elaboración de estos cálculos a bordo del buque LNG/c Cadiz Knutsen se utiliza el programa informático “Loadicator”. Este programa nos permite conocer las condiciones del barco en función de la cantidad y distribución de los pesos. Indicándonos tanto calados y desplazamiento como datos referentes a la estabilidad y a los esfuerzos.

## **5.2 Cálculo de condición de llegada.**

Para el cálculo de estabilidad y carga en cada una de las diferentes condiciones que vamos a mostrar es importante indicar que siempre empezaremos a realizar los cálculos desde la condición final de llegada hacia atrás. Ya que consiste en llegar al puerto final en unas condiciones dadas y el resto del trabajo es saber cómo debemos comenzar el viaje para llegar tal y como deseamos. Así nuestros cálculos comienzan en la condición final de llegada.

A continuación se muestran las condiciones finales de llegada a Escobar.

	<b>Consolidated Report</b>	Page: 1(4)
	Condition: ARRIVAL ESCOBAR CT1 TO CT4 20 07 18	03-May-2018 20:59
Vessel: Cadiz Knutsen, Hull 103 IZAR-Astillero Puerto Real		Voyage:

Water density [t/m3] 1.000

Item	Weight, t	VMom, tm	VCG, m	LMom, tm	LCG, m	TMom, tm	TCG, m
Light ship	29685.8	502848	16.94	-407824	-13.74	0	0.00
Corr. moments	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Input cargo	41850.0	569646	13.61	923400	22.06	0	0.00
Dry stores	507.0	10022	19.77	-70931	-139.90	3375	6.66
Corr. cargo	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Heavy oil	3798.4	43628	11.49	-110838	-29.18	-11786	-3.10
Diesel oil	225.3	4081	18.12	-28483	-126.44	-45	-0.20
Fresh water	799.4	14842	18.57	-101642	-127.14	-215	-0.27
Lub.oil	73.4	1147	15.62	-8373	-114.06	1029	14.01
Ballast	1730.5	6753	3.90	-44739	-25.85	6350	3.67
Miscellaneous	60.6	179	2.95	-5831	-96.21	-61	-1.01
Non-structural	9.0	146	16.13	-908	-100.54	-3	-0.33
<b>Deadweight</b>	<b>49053.6</b>	<b>650443</b>	<b>13.26</b>	<b>551656</b>	<b>11.25</b>	<b>-1355</b>	<b>-0.03</b>
<b>Total</b>	<b>78739.4</b>	<b>1153291</b>	<b>14.65</b>	<b>143833</b>	<b>1.83</b>	<b>-1355</b>	<b>-0.02</b>

**Cargo**

Tank	Max. Vol. m3	Volume m3	Vol %	Weight t	Density t/m3	LCG m	TCG m	VCG m	FSM t*m
CT1	22653.6	15500.0	68	6975.0	0.4500	83.70	0.00	12.21	32159
CT2	40102.4	35325.0	88	15896.3	0.4500	41.09	0.00	14.63	41449
CT3	40099.6	35325.0	88	15896.3	0.4500	-8.86	0.00	14.63	41433
CT4	35264.0	6850.0	19	3082.5	0.4500	-56.04	0.00	6.29	73760
<b>Total</b>	<b>138119.5</b>	<b>93000.0</b>	<b>67</b>	<b>41850.0</b>		<b>22.06</b>	<b>0.00</b>	<b>13.61</b>	<b>188800</b>

**Heavy oil**

H8	222.5	195.5	88	193.6	0.9900	-99.20	13.81	16.65	34
H9	184.9	162.8	88	161.1	0.9900	-99.20	17.33	16.65	19
H6p	1543.6	1304.3	84	1291.3	0.9900	-87.10	-15.40	14.12	486
H6s	1757.8	585.3	33	579.5	0.9900	-90.48	15.34	10.32	684
H5	3606.3	1176.3	33	1164.6	0.9900	111.37	0.00	7.09	3887
H7	649.3	412.5	64	408.4	0.9900	-99.06	-15.32	12.87	208
<b>Total</b>	<b>7964.4</b>	<b>3836.7</b>	<b>48</b>	<b>3798.4</b>		<b>-29.18</b>	<b>-3.10</b>	<b>11.49</b>	<b>5318</b>

**Diesel oil**

D10	335.2	118.0	35	103.8	0.8800	-128.94	0.18	17.33	440
D16	58.8	42.1	72	37.0	0.8800	-124.30	3.75	18.60	6
D11	58.8	43.8	75	38.6	0.8800	-124.30	-3.75	18.67	6
D12	58.6	52.1	89	45.8	0.8800	-124.30	-1.25	19.03	6
<b>Total</b>	<b>511.4</b>	<b>256.0</b>	<b>50</b>	<b>225.3</b>		<b>-126.44</b>	<b>-0.20</b>	<b>18.12</b>	<b>456</b>

**Fresh water**

F17a	279.4	214.6	77	214.6	1.0000	-129.50	-12.04	18.49	410
F17f	258.6	188.9	73	188.9	1.0000	-124.25	-12.84	18.64	544
F18a	279.4	225.5	81	225.5	1.0000	-129.50	12.04	18.59	410

Tank	Max. Vol. m3	Volume m3	Vol %	Weight t	Density t/m3	LCG m	TCG m	VCG m	FSM t*m
F18f	106.9	90.0	84	90.0	1.0000	-124.30	9.60	18.90	38
F18fs	151.7	80.5	53	80.5	1.0000	-124.22	15.11	18.14	112
<b>Total</b>	<b>1076.1</b>	<b>799.4</b>	<b>74</b>	<b>799.4</b>		<b>-127.14</b>	<b>-0.27</b>	<b>18.57</b>	<b>1513</b>
<b>Lub.oil</b>									
L13	34.0	32.2	95	29.0	0.9000	-114.70	12.60	19.16	1
L14	73.3	46.3	63	41.7	0.9000	-113.50	15.01	13.40	44
L15	45.2	3.1	7	2.8	0.9000	-115.90	13.81	11.99	10
<b>Total</b>	<b>152.5</b>	<b>81.6</b>	<b>53</b>	<b>73.4</b>		<b>-114.06</b>	<b>14.01</b>	<b>15.62</b>	<b>55</b>
<b>Ballast</b>									
BFD	2021.5	12.7	1	13.0	1.0250	111.36	0.00	0.08	125
BAP	2324.4	258.3	11	264.7	1.0250	-125.17	0.00	11.36	15716
B1p	4683.8	52.3	1	53.6	1.0250	81.92	-2.98	0.10	741
B1s	4683.8	52.3	1	53.6	1.0250	81.92	2.98	0.10	741
B2p	6065.2	162.9	3	167.0	1.0250	39.75	-7.22	0.11	5170
B2s	6065.2	162.9	3	167.0	1.0250	39.75	7.22	0.11	5170
B3p	6524.5	199.5	3	204.5	1.0250	-7.12	-8.92	0.11	7407
B3s	6524.5	199.5	3	204.5	1.0250	-7.12	8.92	0.11	7407
BB4p	3321.3	117.0	4	119.9	1.0250	-50.32	-5.85	0.11	6167
BB4s	3321.3	117.0	4	119.9	1.0250	-50.32	5.85	0.11	6167
BW4p	2069.7	22.8	1	23.4	1.0250	-55.31	-20.07	8.61	21
BW4s	2069.7	331.2	16	339.4	1.0250	-55.51	20.09	10.08	49
<b>Total</b>	<b>49675.0</b>	<b>1688.3</b>	<b>3</b>	<b>1730.5</b>		<b>-25.85</b>	<b>3.67</b>	<b>3.90</b>	<b>54880</b>
<b>Miscellaneous</b>									
M19p	86.7	3.0	3	3.0	1.0000	-88.30	-17.33	21.83	26
M19s	86.7	2.9	3	2.9	1.0000	-88.30	17.33	21.83	26
M21	73.5	30.1	41	30.1	1.0000	-105.60	0.00	1.23	64
M22	4.7	1.9	40	1.9	1.0000	-121.08	0.00	2.27	7
M23p	110.2	21.1	19	21.1	1.0000	-83.80	-2.94	0.38	165
M24s	52.9	1.6	3	1.6	1.0000	-83.86	1.42	0.05	8
<b>Total</b>	<b>414.7</b>	<b>60.6</b>	<b>15</b>	<b>60.6</b>		<b>-96.21</b>	<b>-1.01</b>	<b>2.95</b>	<b>295</b>
<b>Non-structural</b>									
NST1	3.0	2.6	85	2.6	1.0000	-109.49	11.22	30.98	1
NST2	1.0	0.8	79	0.8	1.0000	-101.41	5.39	23.06	0
NST3	2.0	0.3	17	0.3	1.0000	-108.58	-2.54	3.29	0
NST4	27.0	1.1	4	1.1	1.0000	-107.50	-14.52	11.88	5
NST5	1.0	0.0	2	0.0	1.0000	-106.89	2.41	3.27	0
NST6	7.0	3.2	46	3.2	1.0000	-90.72	-9.35	4.99	1
NST7	4.0	1.0	25	1.0	1.0000	-97.91	11.05	17.68	0
<b>Total</b>	<b>45.0</b>	<b>9.0</b>	<b>20</b>	<b>9.0</b>		<b>-100.54</b>	<b>-0.33</b>	<b>16.13</b>	<b>7</b>

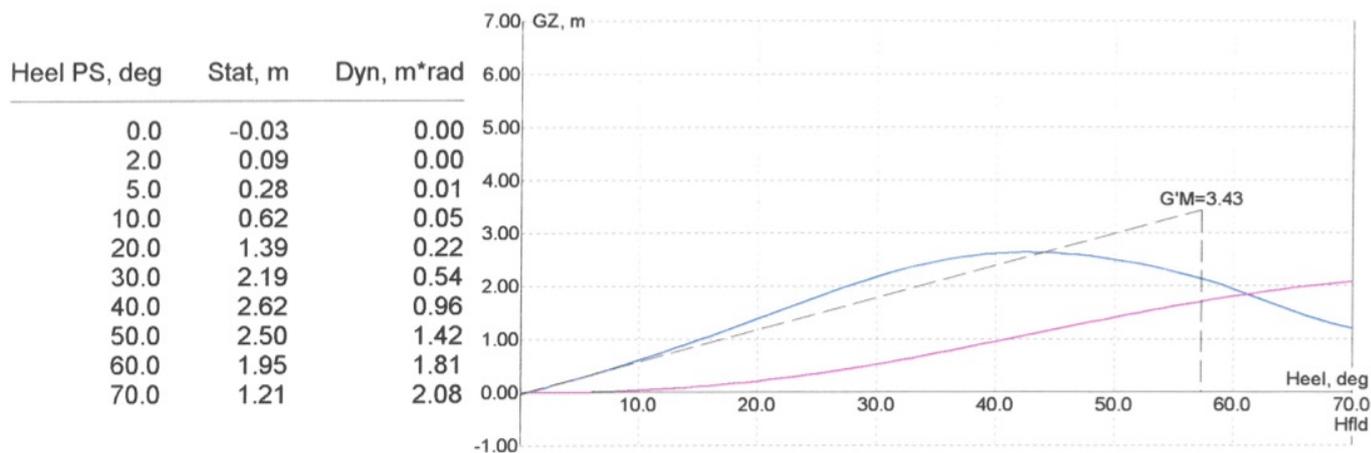
Parameter		Value	Limit
Displacement	[t]	78739.4	
Deadweight	[t]	49053.6	
Draft at FP	[m]	9.688	
Draft at midship	[m]	9.688	<= 12.578

Parameter		Value		Limit
Draft at AP	[m]	9.689		
Heel	[deg]	0.5p	<=	2.0
Trim	[m]	0.00a		
KG cor.	[m]	17.84		
KG max. predef.	[m]	Max Allowable KG	<=	21.03
GM act.	[m]	3.43	>=	0.15
FS cor.	[m]	3.19		
Rolling period	[s]	16.4		
Propeller immersion	[%]	8 !	>=	20
Weather criter.		6.76	>=	1.00
Wind heel	[deg]	1.7		
Flooding heel	[deg]	70.0		
Max. arm over 30	[m]	2.64	>=	0.20
Heel max. arm over 30	[deg]	43.0		
Max. arm pos.	[deg]	43.0	>=	25.0
Max. arm	[m]	2.64		
Stab. range	[deg]	69.5		
Area 0-30	[m*rad]	0.537	>=	0.055
Area 0-40	[m*rad]	0.964	>=	0.090
Area 30-40	[m*rad]	0.427	>=	0.030
Air draft	[m]	50.31		
Windage area	[m2]	6413		
Windage VCA	[m]	22.08		

Stability criteria according to IMO

Selected load line

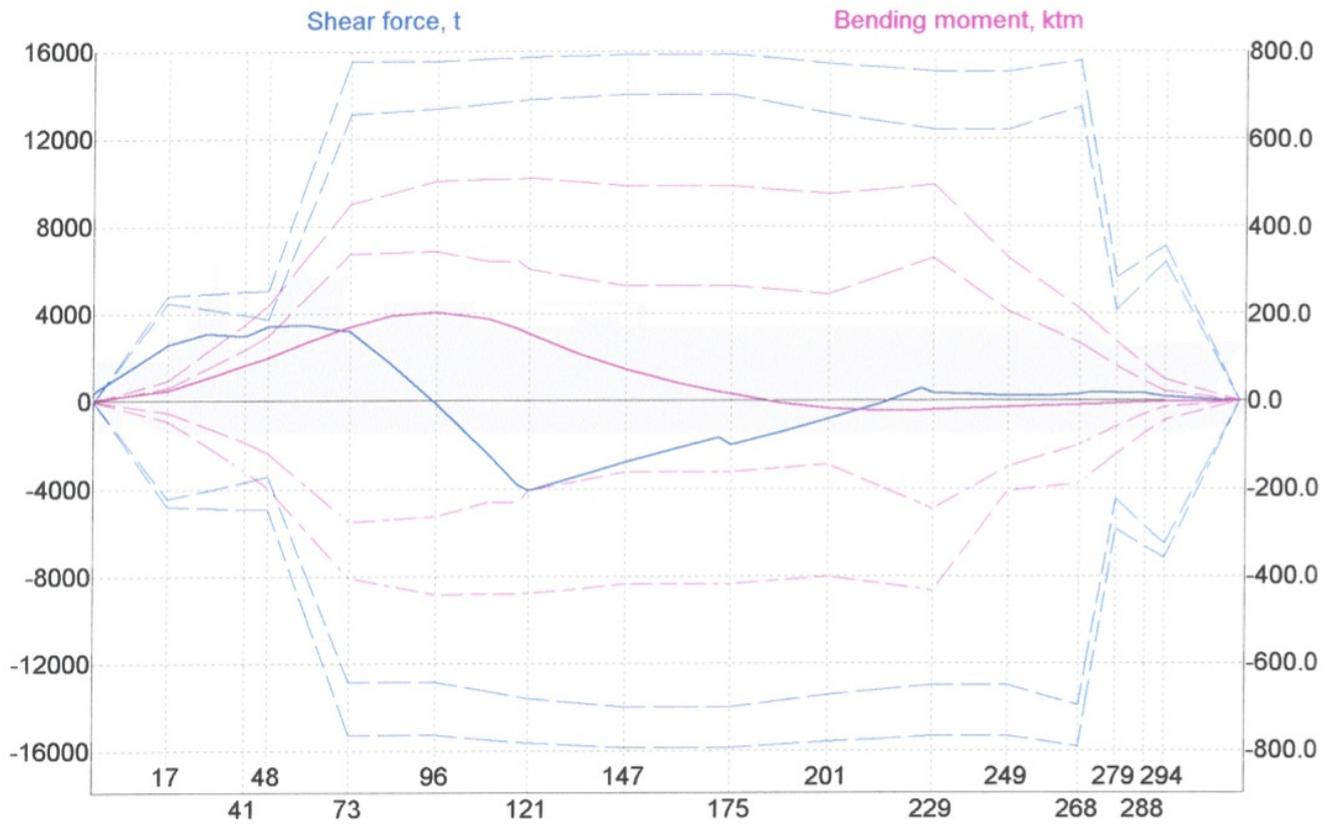
Summer Fresh Water



Frame	Loc, m	SF, t	SFsea, %	SFhar, %	BM, ktm	BMsea, %	BMhar, %
17	-121.90	2619	57.8	54.0	26.02	82.0	53.5
41	-102.70	2989	75.5	59.1	83.16	70.0	47.0
48	-97.10	3451	92.0	67.9	101.31	67.5	45.9
73	-76.85	3223	24.5	20.7	170.81	50.5	37.8
96	-55.58	-94	-0.7	-0.6	205.58	59.6	40.7
121	-32.45	-4076	-29.8	-26.0	155.66	51.4	30.4
147	-8.40	-2774	-19.8	-17.5	73.42	27.7	14.9
175	17.50	-1981	-14.1	-12.5	17.43	6.6	3.5

Frame	Loc, m	SF, t	SFsea, %	SFhar, %	BM, ktm	BMsea, %	BMhar, %
201	41.55	-817	-6.1	-5.2	-16.43	-11.3	-4.1
229	67.45	372	3.0	2.5	-18.76	-7.6	-4.3
249	85.95	247	2.0	1.6	-12.96	-8.6	-6.3
268	103.53	337	2.5	2.2	-8.42	-8.4	-4.5
279	112.57	381	9.1	6.7	-5.04	-8.5	-4.1
288	119.78	347	6.3	5.3	-2.39	-7.8	-3.2
294	124.57	215	3.4	3.0	-1.08	-7.3	-2.4

Max. SF sea [%]	92.0	at frame 48	Max. BM sea [%]	82.0	at frame 17
Max. SF sea [t]	3451		Max. BM sea [ktm]	26.02	
Max. SF harbour [%]	67.9	at frame 48	Max. BM harbour [%]	53.5	at frame 17
Max. SF harbour [t]	3451		Max. BM harbour [ktm]	26.02	



Master \_\_\_\_\_

Cargo mate \_\_\_\_\_

Para realizar el cálculo de llegada al puerto de descarga establecemos la densidad del agua en 1,000t/m<sup>3</sup> y la densidad de la carga en 0,450 t/m<sup>3</sup>. Recordamos también que el calado máximo admisible es 9,7m.

Como cualquier barco los pesos del buque se pueden dividir en dos categorías:

- Pesos fijos: aquellos que son parte del buque de forma permanente (casco, acomodación, máquina, grúas, etc)
- Pesos variables: aquellos que pueden cambiar dependiendo del viaje. (carga, lastre, combustibles, etc)

Se consideran como pesos fijos el HFO, HO, DO al ser NBOG y al no consumir fuel. En cuanto a FW lo consideramos constante durante todo el viaje, dado que se genera a bordo y se mantiene la misma cantidad continuamente.

En cuanto a los pesos variables solo nos queda la carga y el lastre.

Comenzamos repartiendo los 93000m<sup>3</sup> de carga con los que hemos calculado anteriormente que podemos llegar al destino. Considerando que parte de ellos quedaran a bordo tras la descarga, como "heel" a mantener. Cálculo que hemos realizado en el apartado 3.5 anterior.

Viendo la tabla correspondiente a la carga se observa que el volumen en cada uno de los tanques supera el volumen permitido por límites de *sloshing*. Ahora bien, estos límites deben ser indiscutiblemente respetados cuando nos encontramos en navegación de altura pero, en este caso si revisamos el correo con las órdenes de viaje, el charter nos ha permitido no respetar los límites cuando nos encontramos bajo practica, es decir durante todo el ascenso fluvial.

Vemos como la carga está distribuida de forma que en los tanques centrales, tanques 2 y 3, tenemos 35325 m<sup>3</sup>, un 88% de la capacidad total del tanque a consecuencia del *boil off* generado y utilizado como combustible durante el viaje. Esto se debe a que se ha tratado de maximizar el volumen de carga almacenada en tanques de forma que se evite el *sloshing* en la mayor parte de ellos. Gracias a esta decisión y revisando los criterios de *sloshing* para

cada uno de los tanques vemos como, en la condición de llegada, únicamente los tanques 1 y 4 se encuentran afectados por *sloshing*. Esta distribución final de la carga nos permite mantener la mayor cantidad de LNG en los dos tanques mas grandes sin necesidad de comprometer las membranas de ellos. En cuanto a los tanques de los extremos la carga se ha distribuido de forma que el buque se mantenga sin escora y en aguas iguales manteniendo un calado máximo de 9,7 metros. Como es obvio se debe minimizar al máximo la cantidad de lastre a bordo, más lastre implicaría menor cantidad de carga, por lo tanto la carga en los tanques 1 y 4 se distribuye de forma que estemos bajo el umbral del límite de calado.

Como último paso comprobamos que se cumplen los criterios de estabilidad tanto estática como dinámica.

ESTABILIDAD EN CONDICIÓN FINAL DE LLEGADA	
CRITERIO	VALOR A BORDO
GM $\geq$ 0,15	3,43
GZ MAX POR ENCIMA DE LOS 25°	43°
GZ > 0.20 PARA 30°	2.64

Fig. 18 Tabla de estabilidad estática condición final de llegada

En cuanto a los esfuerzos cortantes y los momentos flectores obtenemos los siguientes valores máximos.

ESFUERZOS CONDICIÓN FINAL DE LLEGADA					
ESFUERZO CORTANTE	PORCENTAJE	CUADERNA	MOMENTO FLECTOR	PORCENTAJE	CUADERNA
MAX EN NAVEGACIÓN	92 %	48	MAX EN NAVEGACIÓN	82 %	17
MAX ATRACADO	67.9 %	48	MAX ATRACADO	54 %	17

Fig.19 Tabla de esfuerzos condición final de llegada

Observando los resultados obtenidos se considera que la distribución de la carga para esta condición es adecuada. En primer lugar se cumple la condición de calado máximo admisible, calado máximo calculado 9,688 m en aguas iguales. Cantidad de carga a bordo, 93000 m<sup>3</sup>. En cuanto al *sloshing*, recordar que las órdenes de viaje nos impedían navegar bajo estas condiciones únicamente en aguas abiertas, dado que hemos estudiado la condición de llegada cumplimos con la condición. En cuanto a la estabilidad nos encontramos dentro de los límites establecidos por la IMO, de la misma forma que los esfuerzos son inferiores a los máximos admisibles.

### **5.3 Cálculo condición previa al trasiego parcial de carga**

Como hemos visto, en la condición final de llegada cumplimos con todos los requisitos para la navegación oceánica excepto en cuanto al *sloshing* se refiere. Ya que los tanques 1 y 4 se encuentran cargados entre los valores no permitidos para la navegación oceánica.

Para solventar este factor y poder realizar el viaje con seguridad se ha decidido realizar un trasiego parcial de la carga entre los tanques 1 y 4 de forma que se evite el *sloshing* en los cuatro tanques.

Una vez llegados a aguas tranquilas en el Río de la Plata en las proximidades del punto de prácticos y antes de comenzar la navegación fluvial deberemos trasladar 4950 m<sup>3</sup> de LNG del tanque 1 al tanque 4. Para esta operación utilizaremos la bomba de *stripping* del tanque número 1. Realizando este trasiego de carga nos encontramos con las siguientes condiciones de carga, estabilidad y esfuerzos.

	<b>Consolidated Report</b>	Page: 1(4)
	<b>Condition: ARRIVAL ESCOBAR BEFORE CT1 TO CT4</b>	03-May-2018 20:57
Vessel: Cadiz Knutsen, Hull 103 IZAR-Astillero Puerto Real		Voyage:

Water density [t/m3] 1.000

Item	Weight, t	VMom, tm	VCG, m	LMom, tm	LCG, m	TMom, tm	TCG, m
Light ship	29685.8	502848	16.94	-407824	-13.74	0	0.00
Corr. moments	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Input cargo	41850.0	604677	14.45	1234435	29.50	0	0.00
Dry stores	507.0	10022	19.77	-70931	-139.90	3375	6.66
Corr. cargo	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Heavy oil	3798.4	43628	11.49	-110838	-29.18	-11786	-3.10
Diesel oil	225.3	4081	18.12	-28483	-126.44	-45	-0.20
Fresh water	799.4	14842	18.57	-101642	-127.14	-215	-0.27
Lub.oil	73.4	1147	15.62	-8373	-114.06	1029	14.01
Ballast	8027.1	23901	2.98	-383919	-47.83	6350	0.79
Miscellaneous	60.6	179	2.95	-5831	-96.21	-61	-1.01
Non-structural	9.0	146	16.13	-908	-100.54	-3	-0.33
Deadweight	55350.3	702622	12.69	523511	9.46	-1355	-0.02
Total	85036.1	1205470	14.18	115687	1.36	-1355	-0.02

**Cargo**

Tank	Max. Vol. m3	Volume m3	Vol %	Weight t	Density t/m3	LCG m	TCG m	VCG m	FSM t*m
CT1	22653.6	20450.0	90	9202.5	0.4500	83.67	0.00	14.77	12080
CT2	40102.4	35325.0	88	15896.3	0.4500	41.09	0.00	14.63	41449
CT3	40099.6	35325.0	88	15896.3	0.4500	-8.86	0.00	14.63	41433
CT4	35264.0	1900.0	5	855.0	0.4500	-56.04	0.00	4.31	39276
Total	138119.5	93000.0	67	41850.0		29.50	0.00	14.45	134238

**Heavy oil**

H8	222.5	195.5	88	193.6	0.9900	-99.20	13.81	16.65	34
H9	184.9	162.8	88	161.1	0.9900	-99.20	17.33	16.65	19
H6p	1543.6	1304.3	84	1291.3	0.9900	-87.10	-15.40	14.12	486
H6s	1757.8	585.3	33	579.5	0.9900	-90.48	15.34	10.32	684
H5	3606.3	1176.3	33	1164.6	0.9900	111.37	0.00	7.09	3887
H7	649.3	412.5	64	408.4	0.9900	-99.06	-15.32	12.87	208
Total	7964.4	3836.7	48	3798.4		-29.18	-3.10	11.49	5318

**Diesel oil**

D10	335.2	118.0	35	103.8	0.8800	-128.94	0.18	17.33	440
D16	58.8	42.1	72	37.0	0.8800	-124.30	3.75	18.60	6
D11	58.8	43.8	75	38.6	0.8800	-124.30	-3.75	18.67	6
D12	58.6	52.1	89	45.8	0.8800	-124.30	-1.25	19.03	6
Total	511.4	256.0	50	225.3		-126.44	-0.20	18.12	456

**Fresh water**

F17a	279.4	214.6	77	214.6	1.0000	-129.50	-12.04	18.49	410
F17f	258.6	188.9	73	188.9	1.0000	-124.25	-12.84	18.64	544
F18a	279.4	225.5	81	225.5	1.0000	-129.50	12.04	18.59	410

Tank	Max. Vol. m3	Volume m3	Vol %	Weight t	Density t/m3	LCG m	TCG m	VCG m	FSM t*m
F18f	106.9	90.0	84	90.0	1.0000	-124.30	9.60	18.90	38
F18fs	151.7	80.5	53	80.5	1.0000	-124.22	15.11	18.14	112
Total	1076.1	799.4	74	799.4		-127.14	-0.27	18.57	1513

### Lub.oil

L13	34.0	32.2	95	29.0	0.9000	-114.70	12.60	19.16	1
L14	73.3	46.3	63	41.7	0.9000	-113.50	15.01	13.40	44
L15	45.2	3.1	7	2.8	0.9000	-115.90	13.81	11.99	10
Total	152.5	81.6	53	73.4		-114.06	14.01	15.62	55

### Ballast

BFD	2021.5	12.7	1	13.0	1.0250	111.36	0.00	0.08	125
BAP	2324.4	258.3	11	264.7	1.0250	-125.17	0.00	11.36	15716
B1p	4683.8	52.3	1	53.6	1.0250	81.92	-2.98	0.10	741
B1s	4683.8	52.3	1	53.6	1.0250	81.92	2.98	0.10	741
B2p	6065.2	162.9	3	167.0	1.0250	39.75	-7.22	0.11	5170
B2s	6065.2	162.9	3	167.0	1.0250	39.75	7.22	0.11	5170
B3p	6524.5	199.5	3	204.5	1.0250	-7.12	-8.92	0.11	7407
B3s	6524.5	199.5	3	204.5	1.0250	-7.12	8.92	0.11	7407
BB4p	3321.3	3188.5	96	3268.2	1.0250	-53.74	-11.56	2.63	140
BB4s	3321.3	3188.5	96	3268.2	1.0250	-53.74	11.56	2.63	140
BW4p	2069.7	22.8	1	23.4	1.0250	-55.31	-20.07	8.61	21
BW4s	2069.7	331.2	16	339.4	1.0250	-55.51	20.09	10.08	49
Total	49675.0	7831.3	16	8027.1		-47.83	0.79	2.98	42826

### Miscellaneous

M19p	86.7	3.0	3	3.0	1.0000	-88.30	-17.33	21.83	26
M19s	86.7	2.9	3	2.9	1.0000	-88.30	17.33	21.83	26
M21	73.5	30.1	41	30.1	1.0000	-105.60	0.00	1.23	64
M22	4.7	1.9	40	1.9	1.0000	-121.08	0.00	2.27	7
M23p	110.2	21.1	19	21.1	1.0000	-83.80	-2.94	0.38	165
M24s	52.9	1.6	3	1.6	1.0000	-83.86	1.42	0.05	8
Total	414.7	60.6	15	60.6		-96.21	-1.01	2.95	295

### Non-structural

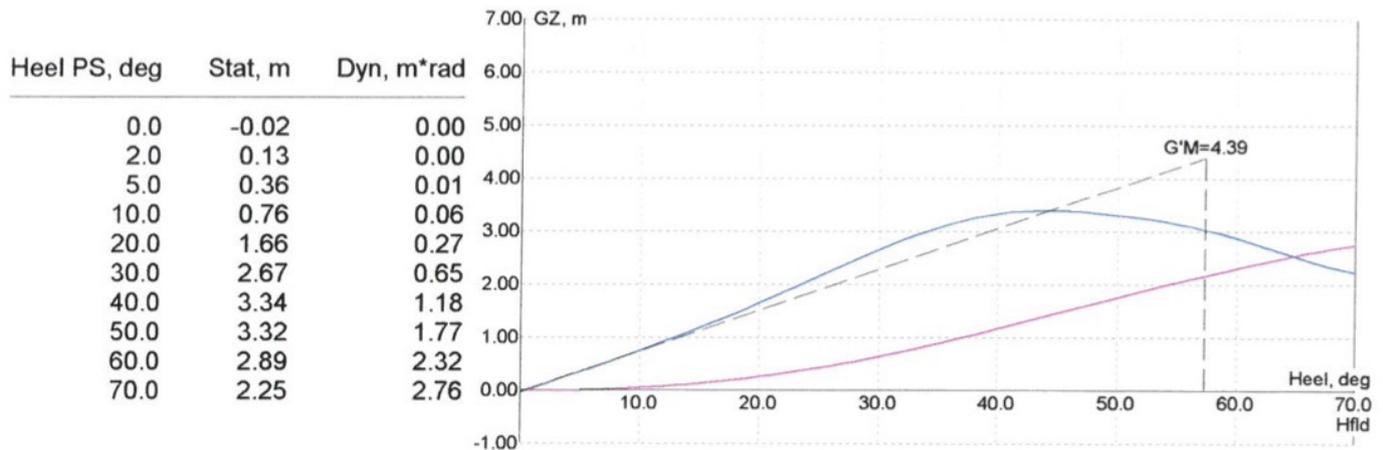
NST1	3.0	2.6	85	2.6	1.0000	-109.49	11.22	30.98	1
NST2	1.0	0.8	79	0.8	1.0000	-101.41	5.39	23.06	0
NST3	2.0	0.3	17	0.3	1.0000	-108.58	-2.54	3.29	0
NST4	27.0	1.1	4	1.1	1.0000	-107.50	-14.52	11.88	5
NST5	1.0	0.0	2	0.0	1.0000	-106.89	2.41	3.27	0
NST6	7.0	3.2	46	3.2	1.0000	-90.72	-9.35	4.99	1
NST7	4.0	1.0	25	1.0	1.0000	-97.91	11.05	17.68	0
Total	45.0	9.0	20	9.0		-100.54	-0.33	16.13	7

Parameter		Value	Limit
Displacement	[t]	85036.1	
Deadweight	[t]	55350.3	
Draft at FP	[m]	10.350	
Draft at midship	[m]	10.350	<= 12.578

Parameter		Value		Limit
Draft at AP	[m]	10.350		
Heel	[deg]	0.4p	<=	2.0
Trim	[m]	0.00f		
KG cor.	[m]	16.35		
KG max. predef.	[m]	Max Allowable KG	<=	20.56
GM act.	[m]	4.39	>=	0.15
FS cor.	[m]	2.17		
Rolling period	[s]	14.2		
Propeller immersion	[%]	16 !	>=	20
Weather criter.		6.43	>=	1.00
Wind heel	[deg]	1.3		
Flooding heel	[deg]	70.0		
Max. arm over 30	[m]	3.40	>=	0.20
Heel max. arm over 30	[deg]	44.0		
Max. arm pos.	[deg]	44.0	>=	25.0
Max. arm	[m]	3.40		
Stab. range	[deg]	69.6		
Area 0-30	[m*rad]	0.651	>=	0.055
Area 0-40	[m*rad]	1.184	>=	0.090
Area 30-40	[m*rad]	0.533	>=	0.030
Air draft	[m]	49.65		
Windage area	[m <sup>2</sup> ]	6237		
Windage VCA	[m]	22.43		

Stability criteria according to IMO

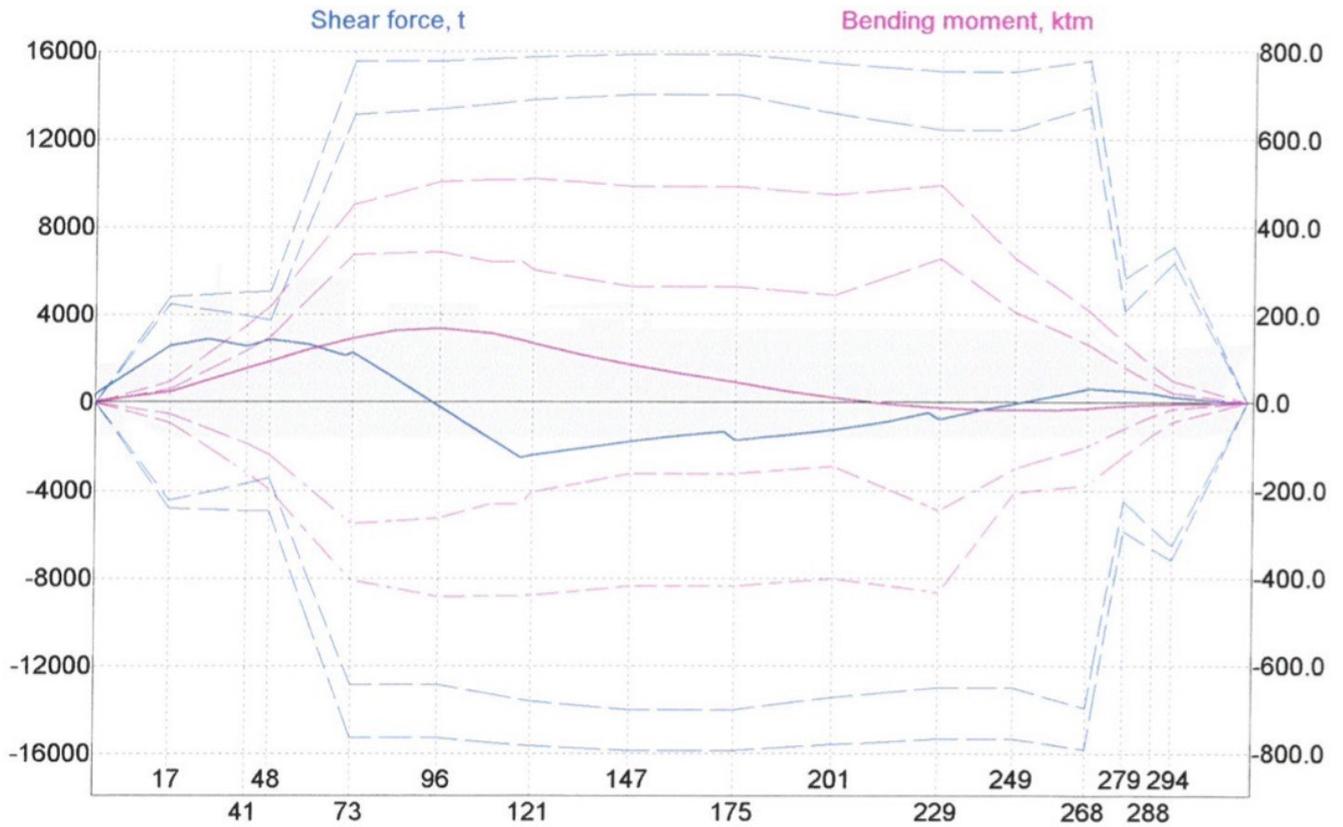
Selected load line Summer Fresh Water



Frame	Loc, m	SF, t	SFsea, %	SFhar, %	BM, ktm	BMsea, %	BMhar, %
17	-121.90	2596	57.3	53.5	25.93	81.7	53.3
41	-102.70	2564	64.8	50.7	79.27	66.8	44.8
48	-97.10	2878	76.7	56.6	94.64	63.0	42.9
73	-76.85	2288	17.4	14.7	147.08	43.5	32.5
96	-55.58	-164	-1.3	-1.1	170.12	49.3	33.7
121	-32.45	-2388	-17.5	-15.2	136.04	44.9	26.5
147	-8.40	-1763	-12.6	-11.1	86.25	32.5	17.5
175	17.50	-1699	-12.1	-10.7	47.00	17.7	9.5

Frame	Loc, m	SF, t	SFsea, %	SFhar, %	BM, ktm	BMsea, %	BMhar, %
201	41.55	-1212	-9.0	-7.8	11.78	4.8	2.5
229	67.45	-747	-5.7	-4.9	-10.21	-4.1	-2.4
249	85.95	-28	-0.2	-0.2	-16.84	-11.1	-8.2
268	103.53	620	4.6	4.0	-11.93	-11.9	-6.3
279	112.57	537	12.9	9.4	-6.59	-11.1	-5.4
288	119.78	432	7.8	6.6	-3.09	-10.1	-4.2
294	124.57	268	4.2	3.8	-1.45	-9.8	-3.2

Max. SF sea [%]	76.7	at frame 48	Max. BM sea [%]	81.7	at frame 17
Max. SF sea [t]	2878		Max. BM sea [ktm]	25.93	
Max. SF harbour [%]	58.9	at frame 29	Max. BM harbour [%]	53.3	at frame 17
Max. SF harbour [t]	2920		Max. BM harbour [ktm]	25.93	



Master \_\_\_\_\_

Cargo mate \_\_\_\_\_

Dado que este trasiego nos varía las condiciones de asiento, generando un asiento aproante, debemos lastrar los tanques de lastre 4 babor y 4 estribor al 96% de su capacidad, metiendo 3188 m<sup>3</sup> de agua en cada uno de ellos. Es obvio que esta cantidad de agua a parte de corregir el asiento y dejar el barco en aguas iguales aumenta el calado siendo éste 10,35 metros. Recordamos que la restricción de calado es 9,7 metros únicamente a lo largo de la navegación fluvial pudiendo ser mayor en la navegación oceánica.

Con tanta diferencia en la distribución de pesos es importante revisar las condiciones de estabilidad y de esfuerzos.

<b>VALORES DE ESTABILIDAD PREVIO TRASIEGO PARCIAL DE CARGA</b>	
<b>CRITERIO</b>	<b>VALOR A BORDO</b>
<b>GM &gt;= 0,15</b>	4.39
<b>GZ MAX POR ENCIMA DE LOS 25°</b>	44°
<b>GZ &gt; 0.20 PARA 30°</b>	3.4

Fig.20 Tabla de estabilidad estática previo trasiego

<b>ESFUERZOS PREVIO TRASIEGO PARCIAL DE CARGA</b>					
<b>ESFUERZO CORTANTE</b>	<b>PORCENTAJE</b>	<b>CUADERNA</b>	<b>MOMENTO FLECTOR</b>	<b>PORCENTAJE</b>	<b>CUADERNA</b>
<b>MAX EN NAVEGACIÓN</b>	76.7 %	48	<b>MAX EN NAVEGACIÓN</b>	81.7 %	17
<b>MAX ATRACADO</b>	58.9 %	29	<b>MAX ATRACADO</b>	53,3 %	17

Fig.21 Tabla de esfuerzos previo trasiego

Las condiciones de estabilidad son adecuadas, cumpliendo ampliamente con los criterios mínimos. En cuanto a los esfuerzos son correctos tanto para la navegación como atracados, incluso los esfuerzos cortantes ligeramente menores que en la condición final de llegada debido al aumento de calado.

#### **5.4 Cálculo condición salida Montoir**

Una vez realizados los cálculos de las condiciones de llegada y solventadas la mayor parte de las condiciones restrictivas especiales de este viaje debemos calcular la condición inicial del puerto de carga. Será en este punto donde se pueda dar respuesta a las órdenes de viaje ya que es en este apartado donde sabremos la cantidad a cargar necesaria.

Recordamos que la densidad del agua en el puerto de carga es de 1,025 ton/m<sup>3</sup> y que no existen restricciones de calado pero si de *sloshing*.

Partiendo de las condiciones de carga previo trasiego parcial debemos distribuir los 4200 m<sup>3</sup> de NBOG que se evaporarán y se consumirán en los cuatro tanques de carga. Es importante recordar que hemos determinado que el viaje se realizará únicamente consumiendo gas por lo tanto las cantidades de fuel oil y de diesel oil permanecerán intactas. De no ser así y el viaje realizarse en *dual fuel oil* deberíamos considerar los consumos totales para haber realizado los diferentes cálculos.

	<b>Consolidated Report</b>	Page: 1(4)
	Condition: DEPARTURE MONTOIR 01 07 18	03-May-2018 20:55
Vessel: Cadiz Knutsen, Hull 103 IZAR-Astillero Puerto Real		Voyage:

Water density [t/m3] 1.025

Item	Weight, t	VMom, tm	VCG, m	LMom, tm	LCG, m	TMom, tm	TCG, m
Light ship	29685.8	502848	16.94	-407824	-13.74	0	0.00
Corr. moments	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Input cargo	43740.0	644072	14.73	1250906	28.60	0	0.00
Dry stores	507.0	10022	19.77	-70931	-139.90	3375	6.66
Corr. cargo	0.0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Heavy oil	3798.4	43628	11.49	-110838	-29.18	-11786	-3.10
Diesel oil	225.3	4081	18.12	-28483	-126.44	-45	-0.20
Fresh water	799.4	14842	18.57	-101642	-127.14	-215	-0.27
Lub.oil	73.4	1147	15.62	-8373	-114.06	1029	14.01
Ballast	8265.4	25757	3.12	-397067	-48.04	6350	0.77
Miscellaneous	60.6	179	2.95	-5831	-96.21	-61	-1.01
Non-structural	9.0	146	16.13	-908	-100.54	-3	-0.33
Deadweight	57478.6	743873	12.94	526834	9.17	-1355	-0.02
Total	87164.4	1246721	14.30	119010	1.37	-1355	-0.02

**Cargo**

Tank	Max. Vol. m3	Volume m3	Vol %	Weight t	Density t/m3	LCG m	TCG m	VCG m	FSM t*m
CT1	22653.6	21143.0	93	9514.3	0.4500	83.64	0.00	15.14	8944
CT2	40102.4	36543.0	91	16444.3	0.4500	41.09	0.00	15.01	33799
CT3	40099.6	36543.0	91	16444.3	0.4500	-8.86	0.00	15.01	33784
CT4	35264.0	2971.0	8	1336.9	0.4500	-56.04	0.00	4.78	46584
Total	138119.5	97200.0	70	43740.0		28.60	0.00	14.73	123111

**Heavy oil**

H8	222.5	195.5	88	193.6	0.9900	-99.20	13.81	16.65	34
H9	184.9	162.8	88	161.1	0.9900	-99.20	17.33	16.65	19
H6p	1543.6	1304.3	84	1291.3	0.9900	-87.10	-15.40	14.12	486
H6s	1757.8	585.3	33	579.5	0.9900	-90.48	15.34	10.32	684
H5	3606.3	1176.3	33	1164.6	0.9900	111.37	0.00	7.09	3887
H7	649.3	412.5	64	408.4	0.9900	-99.06	-15.32	12.87	208
Total	7964.4	3836.7	48	3798.4		-29.18	-3.10	11.49	5318

**Diesel oil**

D10	335.2	118.0	35	103.8	0.8800	-128.94	0.18	17.33	440
D16	58.8	42.1	72	37.0	0.8800	-124.30	3.75	18.60	6
D11	58.8	43.8	75	38.6	0.8800	-124.30	-3.75	18.67	6
D12	58.6	52.1	89	45.8	0.8800	-124.30	-1.25	19.03	6
Total	511.4	256.0	50	225.3		-126.44	-0.20	18.12	456

**Fresh water**

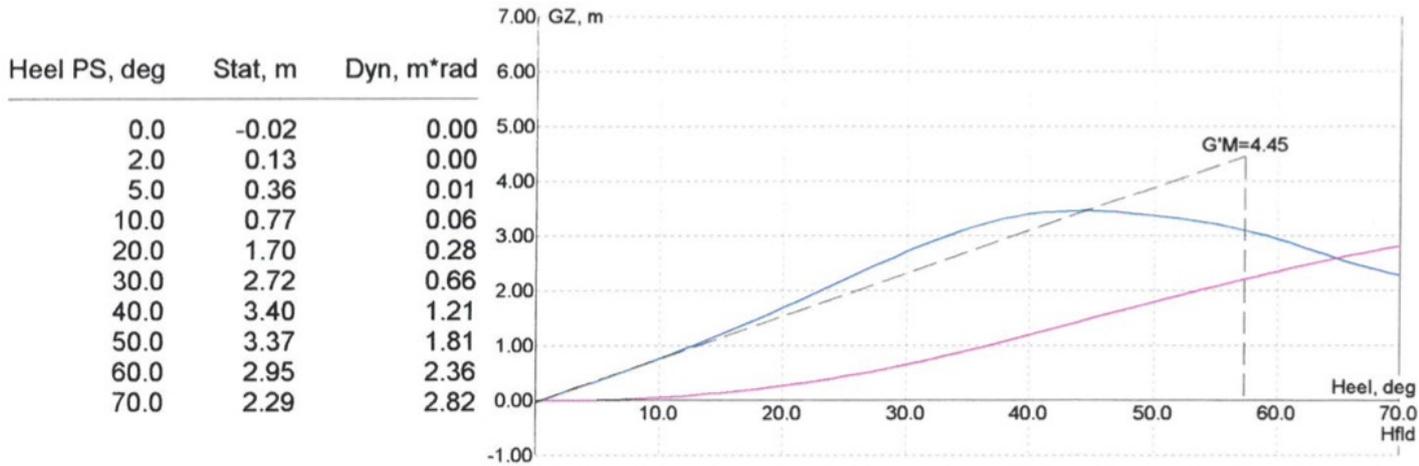
F17a	279.4	214.6	77	214.6	1.0000	-129.50	-12.04	18.49	410
F17f	258.6	188.9	73	188.9	1.0000	-124.25	-12.84	18.64	544
F18a	279.4	225.5	81	225.5	1.0000	-129.50	12.04	18.59	410

Tank	Max. Vol. m3	Volume m3	Vol %	Weight t	Density t/m3	LCG m	TCG m	VCG m	FSM t*m
F18f	106.9	90.0	84	90.0	1.0000	-124.30	9.60	18.90	38
F18fs	151.7	80.5	53	80.5	1.0000	-124.22	15.11	18.14	112
<b>Total</b>	<b>1076.1</b>	<b>799.4</b>	<b>74</b>	<b>799.4</b>		<b>-127.14</b>	<b>-0.27</b>	<b>18.57</b>	<b>1513</b>
<b>Lub.oil</b>									
L13	34.0	32.2	95	29.0	0.9000	-114.70	12.60	19.16	1
L14	73.3	46.3	63	41.7	0.9000	-113.50	15.01	13.40	44
L15	45.2	3.1	7	2.8	0.9000	-115.90	13.81	11.99	10
<b>Total</b>	<b>152.5</b>	<b>81.6</b>	<b>53</b>	<b>73.4</b>		<b>-114.06</b>	<b>14.01</b>	<b>15.62</b>	<b>55</b>
<b>Ballast</b>									
BFD	2021.5	12.7	1	13.0	1.0250	111.36	0.00	0.08	125
BAP	2324.4	258.3	11	264.7	1.0250	-125.17	0.00	11.36	15716
B1p	4683.8	52.3	1	53.6	1.0250	81.92	-2.98	0.10	741
B1s	4683.8	52.3	1	53.6	1.0250	81.92	2.98	0.10	741
B2p	6065.2	162.9	3	167.0	1.0250	39.75	-7.22	0.11	5170
B2s	6065.2	162.9	3	167.0	1.0250	39.75	7.22	0.11	5170
B3p	6524.5	199.5	3	204.5	1.0250	-7.12	-8.92	0.11	7407
B3s	6524.5	199.5	3	204.5	1.0250	-7.12	8.92	0.11	7407
BB4p	3321.3	3304.7	100	3387.4	1.0250	-53.79	-11.85	2.81	0
BB4s	3321.3	3304.7	100	3387.4	1.0250	-53.79	11.85	2.81	0
BW4p	2069.7	22.8	1	23.4	1.0250	-55.31	-20.07	8.61	21
BW4s	2069.7	331.2	16	339.4	1.0250	-55.51	20.09	10.08	49
<b>Total</b>	<b>49675.0</b>	<b>8063.8</b>	<b>16</b>	<b>8265.4</b>		<b>-48.04</b>	<b>0.77</b>	<b>3.12</b>	<b>42546</b>
<b>Miscellaneous</b>									
M19p	86.7	3.0	3	3.0	1.0000	-88.30	-17.33	21.83	26
M19s	86.7	2.9	3	2.9	1.0000	-88.30	17.33	21.83	26
M21	73.5	30.1	41	30.1	1.0000	-105.60	0.00	1.23	64
M22	4.7	1.9	40	1.9	1.0000	-121.08	0.00	2.27	7
M23p	110.2	21.1	19	21.1	1.0000	-83.80	-2.94	0.38	165
M24s	52.9	1.6	3	1.6	1.0000	-83.86	1.42	0.05	8
<b>Total</b>	<b>414.7</b>	<b>60.6</b>	<b>15</b>	<b>60.6</b>		<b>-96.21</b>	<b>-1.01</b>	<b>2.95</b>	<b>295</b>
<b>Non-structural</b>									
NST1	3.0	2.6	85	2.6	1.0000	-109.49	11.22	30.98	1
NST2	1.0	0.8	79	0.8	1.0000	-101.41	5.39	23.06	0
NST3	2.0	0.3	17	0.3	1.0000	-108.58	-2.54	3.29	0
NST4	27.0	1.1	4	1.1	1.0000	-107.50	-14.52	11.88	5
NST5	1.0	0.0	2	0.0	1.0000	-106.89	2.41	3.27	0
NST6	7.0	3.2	46	3.2	1.0000	-90.72	-9.35	4.99	1
NST7	4.0	1.0	25	1.0	1.0000	-97.91	11.05	17.68	0
<b>Total</b>	<b>45.0</b>	<b>9.0</b>	<b>20</b>	<b>9.0</b>		<b>-100.54</b>	<b>-0.33</b>	<b>16.13</b>	<b>7</b>
<b>Parameter Value Limit</b>									
Displacement	[t]			87164.4					
Deadweight	[t]			57478.6					
Draft at FP	[m]			10.352					
Draft at midship	[m]			10.350	<=	12.318			

Parameter		Value		Limit
Draft at AP	[m]	10.349		
Heel	[deg]	0.4p	<=	2.0
Trim	[m]	0.00f		
KG cor.	[m]	16.29		
KG max. predef.	[m]	Max Allowable KG	<=	20.56
GM act.	[m]	4.45	>=	0.15
FS cor.	[m]	1.99		
Rolling period	[s]	14.2		
Propeller immersion	[%]	16	>=	20
Weather criter.		6.37	>=	1.00
Wind heel	[deg]	1.2		
Flooding heel	[deg]	70.0		
Max. arm over 30	[m]	3.46	>=	0.20
Heel max. arm over 30	[deg]	44.0		
Max. arm pos.	[deg]	44.0	>=	25.0
Max. arm	[m]	3.46		
Stab. range	[deg]	69.6		
Area 0-30	[m*rad]	0.663	>=	0.055
Area 0-40	[m*rad]	1.206	>=	0.090
Area 30-40	[m*rad]	0.543	>=	0.030
Air draft	[m]	49.65		
Windage area	[m2]	6236		
Windage VCA	[m]	22.43		

Stability criteria according to IMO

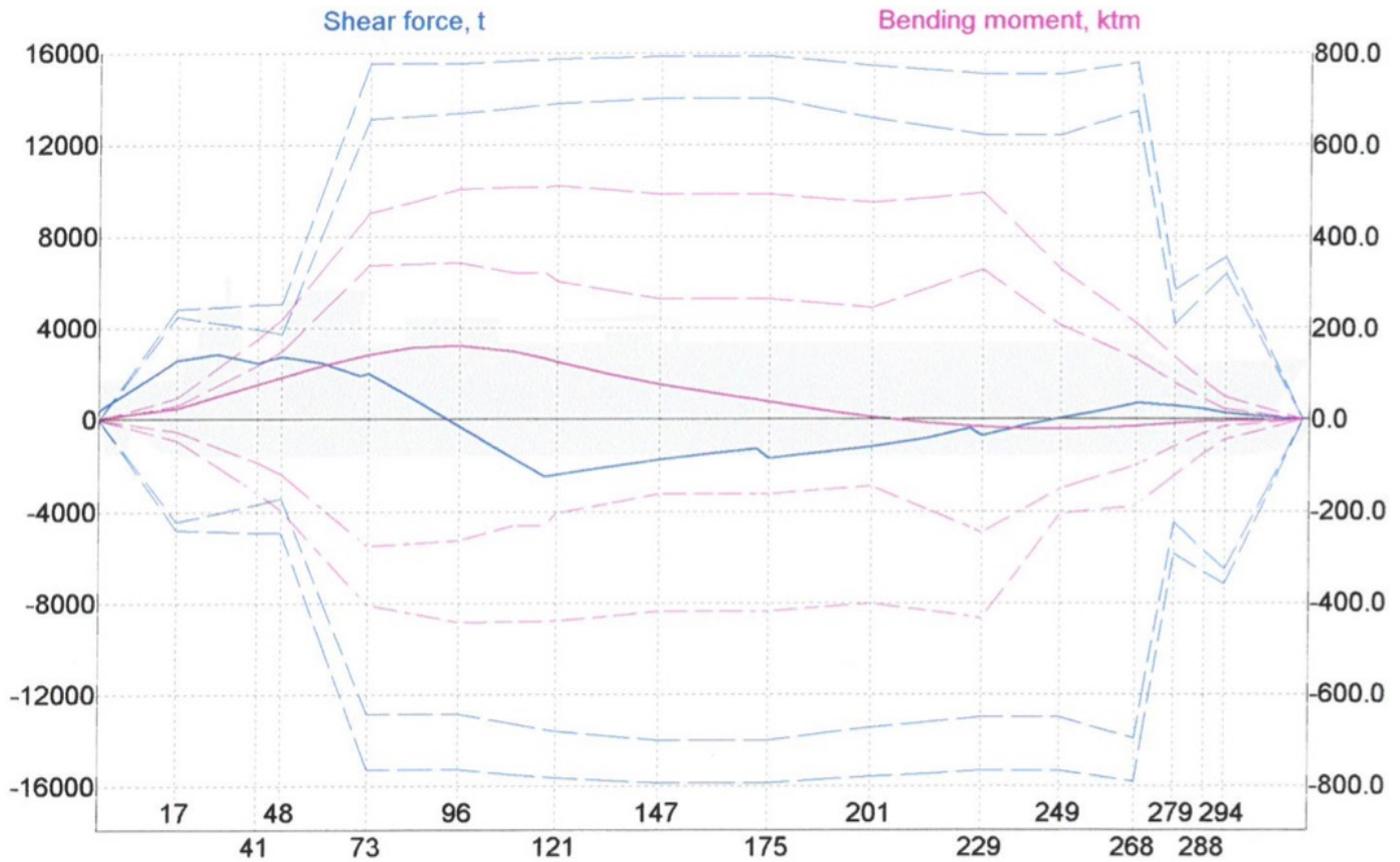
Selected load line Summer Ocean Water



Frame	Loc, m	SF, t	SFsea, %	SFhar, %	BM, ktm	BMsea, %	BMhar, %
17	-121.90	2592	57.2	53.5	25.91	81.6	53.2
41	-102.70	2502	63.2	49.4	78.75	66.3	44.5
48	-97.10	2782	74.2	54.8	93.68	62.4	42.5
73	-76.85	2048	15.6	13.2	142.70	42.2	31.6
96	-55.58	-259	-2.0	-1.7	162.21	47.0	32.1
121	-32.45	-2369	-17.3	-15.1	127.60	42.1	24.9
147	-8.40	-1726	-12.3	-10.9	78.49	29.6	15.9
175	17.50	-1675	-11.9	-10.5	40.40	15.2	8.2

Frame	Loc, m	SF, t	SFsea, %	SFhar, %	BM, ktm	BMsea, %	BMhar, %
201	41.55	-1168	-8.7	-7.5	5.99	2.4	1.3
229	67.45	-696	-5.3	-4.5	-14.47	-5.9	-3.3
249	85.95	60	0.5	0.4	-19.76	-13.1	-9.6
268	103.53	714	5.3	4.6	-13.21	-13.1	-7.0
279	112.57	592	14.2	10.4	-7.21	-12.1	-5.9
288	119.78	464	8.4	7.1	-3.40	-11.1	-4.6
294	124.57	291	4.6	4.1	-1.63	-11.0	-3.6

Max. SF sea [%]	74.2	at frame 48	Max. BM sea [%]	81.6	at frame 17
Max. SF sea [t]	2782		Max. BM sea [ktm]	25.91	
Max. SF harbour [%]	58.5	at frame 29	Max. BM harbour [%]	53.2	at frame 17
Max. SF harbour [t]	2897		Max. BM harbour [ktm]	25.91	



Master \_\_\_\_\_

Cargo mate \_\_\_\_\_

Vemos por lo tanto que la cantidad de carga a bordo son 97200 m<sup>3</sup>. Esto es la suma de los 93000 m<sup>3</sup> calculados en la condición anterior y los 4200 m<sup>3</sup> de NBOG calculados en el apartado 3.4.2 “Restricciones de consumo”.

Para facilitar la operatividad se ha mantenido la misma cantidad de agua de lastre, de hecho observando la última tabla de la segunda página vemos como el calado en el medio se mantiene en 10.35 metros, el mismo que en la condición de llegada a Escobar, antes del trasiego de carga. Como es obvio el desplazamiento y el peso muerto aumentan muy poco. 4200 m<sup>3</sup> representan una cantidad pequeña para un barco de estas dimensiones. Resaltar como hemos dicho anteriormente que en esta condición de salida nos encontramos flotando en agua salada densidad 1,025 ton/m<sup>3</sup> y por lo tanto el barco presenta una mayor flotabilidad.

Como anteriormente se realiza un estudio de las condiciones de esfuerzos y estabilidad.

<b>VALORES DE ESTABILIDAD, CONDICIÓN DE SALIDA MONTOIR</b>	
<b>CRITERIO</b>	<b>VALOR A BORDO</b>
<b>GM &gt;= 0,15</b>	4.45
<b>GZ MAX POR ENCIMA DE LOS 25°</b>	44°
<b>GZ &gt; 0.20 PARA 30°</b>	3.46

Fig. 22 Tabla de estabilidad estática salida Montoir

<b>ESFUERZOS CONDICIÓN SALIDA MONTOIR</b>					
<b>ESFUERZO CORTANTE</b>	<b>PORCENTAJE</b>	<b>CUADERNA</b>	<b>MOMENTO FLECTOR</b>	<b>PORCENTAJE</b>	<b>CUADERNA</b>
<b>MAX EN NAVEGACIÓN</b>	74.2 %	48	<b>MAX EN NAVEGACIÓN</b>	81.6 %	17
<b>MAX ATRACADO</b>	58.5 %	29	<b>MAX ATRACADO</b>	53,2 %	17

Fig. 23 Tabla de esfuerzos salida Montoir

Vemos como los valores de los esfuerzos y de la estabilidad no solo cubren perfectamente los criterios establecidos si no que son prácticamente idénticos a los de la condición de llega a Escobar, como hemos dicho la condición de carga no varía en gran medida.

Es por tanto en este punto donde finalizamos los diferentes cálculos de carga, estabilidad y esfuerzos. Vemos como la dinámica a seguir es abordar los cálculos, una vez conocida la cantidad con la que llegar por la última de las condiciones. De esta forma podemos ir avanzando por cada una de las diferentes condiciones hasta finalizar en la inicial.

Llegados a este punto podemos indicar que la cantidad a cargar será de 97200 m<sup>3</sup>.

## 6. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se han tratado en profundidad los apartados que comprenden el estudio de viabilidad de una operación. Una operación que debido a una serie de condiciones restrictivas presenta gran complejidad.

Es en este punto final cuando podemos contestar a las órdenes de viaje. Indicando que la operación es viable, cumpliendo con lo indicado en los apartados anteriores y que la cantidad a cargar en Montoir será de 97200 m<sup>3</sup>.

Una de las conclusiones y de las restricciones más importante es la restricción por calado. Son muchos de los factores que actúan sobre esta restricción. En primer lugar tenemos el margen de agua bajo quilla o *UKC*, se trata de un factor a tener en cuenta totalmente lógico, ya que a priori nos indica el margen que poseemos antes de tocar el fondo. Ahora bien, el único control real sobre este margen, si es que existe, es la política de la compañía. No todas las compañías poseen una política específica respecto a este tema. En nuestro caso, Knutsen OAS crea la política *UKC* a finales de 2017, debido a la varada ya mencionada.

Por otro lado, otro de los factores incluido en la restricción por calado es el *squad*. Como sabemos se trata de un concepto estudiado desde el siglo pasado, que sin embargo a día de hoy sigue provocando varadas y accidentes con más frecuencia de lo que se piensa. El cálculo de *squad* tanto durante la navegación como atracados, ha sido calculado utilizando la fórmula de Barras. Actualmente en los buques mercantes el cálculo se realiza mediante un programa informático, que desde mi punto de vista es muy poco exhaustivo, dada la relevancia del cálculo y los diferentes factores que afectan. Considero que de la misma forma que la Organización Marítima Internacional, *IMO* por sus siglas en inglés, regula los límites de estabilidad entre infinidad de normativas sobre temas muy diversos, debería implantar una nueva normativa que regule y afecte a todos los barcos mercantes, restringiendo el acceso y aumentando la precaución en zonas donde la probabilidad de sufrir un accidente relacionado con el efecto del *squad* sea grande. Recordamos que es uno de los factores que más accidentes sigue provocando en la actualidad.

Se ha tratado en profundidad también el CATZOC, a mi parecer el factor más trascendente. Hoy en día la navegación mediante cartas náuticas electrónicas está totalmente extendida y normalizada, en cambio es evidente la carencia de formación y conocimiento respecto a su uso y funcionamiento. Esta carencia es muy visible cuando los usuarios de estos equipos pueden llegar a poner en peligro la seguridad de un buque, por ejemplo realizando una derrota inadecuada, por no entender a la perfección el significado y la exactitud de la información que suministran estas cartas. Tanto en la planificación como durante la navegación es muy típico caer en el exceso de confianza en la información recibida, pero no debemos olvidar que la calidad de esta información estará totalmente relacionada con la calidad, en este caso, del levantamiento cartográfico. Este hecho implica otra pregunta: ¿están los métodos de levantamiento cartográfico suficientemente desarrollados y revisados? Es comprensible pensar que estos métodos de levantamiento son uno de los pilares básicos sobre los que se sustenta la navegación con cartas electrónicas, de forma que si la calidad de estos levantamientos no es adecuada la fiabilidad de estos equipos de navegación disminuye. Debemos abordar por un lado la carencia de formación y familiarización de los usuarios y por otro el rápido avance tecnológico de los equipos frente al aparente estancamiento en la calidad de los levantamientos citados. En cuanto a la carencia de formación y familiarización la solución puede pasar por incrementar la enseñanza en estos aspectos en las escuelas o mediante cursos específicos para los marinos. La mejora y el mayor control en la calidad de los levantamientos tiene una solución más compleja. Es obvio que no se utilicen muchos medios para realizar un levantamiento cartográfico de calidad en mitad de un océano, donde las grandes profundidades no suponen un peligro, sin embargo creo que se debería aumentar la frecuencia con la que se realizan estos estudios en zonas con profundidades menores y en especial en zonas donde el fondo pueda variar considerablemente en poco tiempo debido al efecto de riadas, limos y corrientes, como sucede en ríos y estuarios navegables.

En cuanto a los cálculos de carga incidir en la importancia de la organización en cada uno de los escenarios que se nos presentan. Para dar respuesta a una operación de estas características es vital conocer cada una de las particularidades que nos pueden afectar en cada uno de los escenarios, restricciones, particularidades de los puertos y las áreas de

navegación, etc. Así como entender a la perfección las órdenes de viaje que el chárter nos suministra, recordando que somos los propios marinos los que nos encargamos de la gestión técnica y náutica de la operación, y por lo tanto los responsables de garantizar que el buque realiza una operación segura.

## 7. Bibliografia

- [1] Ship stability for masters and mates. Editorial BH. C.B.Barrass, D.R. Derrett. Seventh Edition.
- [2] Liquefied gas handling principles on ships and terminals (LGHP4), SIGTO, Fourth Edition.
- [3] Natural Gas By Sea. The development of a new technology, Roger Ffooks, ) ISMN 1856090523 Wutgerbt & Co Ltd, London.
- [4] Sloshing of Partially Filled LNG carriers. R.H.M. Huijsmans, G.Tritschler, G. Gaillarde, R.P.D. Dallinga. Maritime Research Institute Netherlands, Wageningen, Netherlands.
- [5] IMO Res. A479
- [6] Admiralty “Guide to the Practical Use of ENC’s” NP231, United Kingdom Hydrographic Office, 2nd Edition 2016.
- [7] Proper Use Of ECDIS Safety Settings, Paromita Mukherjee. March 27, 2018 . [www.marineinsight.com/marine-navigation/proper-use-of-ecdis-safety-settings/](http://www.marineinsight.com/marine-navigation/proper-use-of-ecdis-safety-settings/)
- [8] LNG: what is boil-off gas and what does it do?, January 8, 2018. Chris-bignell, <https://www.fluenta.com/news/lng-boil-off-gas/>
- [9] Ship Squat Prediction for Ship/Tow Simulator by Michael J. Briggs. August 2006. US Army Corps of Engineers, Engineering Research and Development Center 3909 Halls Ferry Road Vicksburg.
- [10] Ankudinov Ship Squat Predictions. Part I: Theory, Parameters, and FORTRAN . 2009. Programs of U.S Army Engineer Research and Development Center Environmental Laboratory 3909 Halls Ferry Road, Vicksburg.
- [11] J. Svetak: Ship`s Squat .Promet Traffic Traffico, Vol. 13, 2001, No.4, 247-251.
- [12] Draft guidelines on vessel`s safe under keel clearance. Helsinki Commission of Helcom safe navigation. 4/2014.

[13] Safe Navigation with Uncertain Hydrographic Data. 06/06/2012. Group members of IHO DQWG. <https://www.hydro-international.com/content/article/safe-navigation-with-uncertain-hydrographic-data>.

[14] Improving Uncertainty Visualisation in ENCs. 01/02/2017. Stefan Gladisch, Thomas Ruth and Mathias Jonas. <https://www.hydro-international.com/content/article/improving-uncertainty-visualisation-in-encs>.

[15] An Experimental and CFD Analysis of Sloshing in a Tanker. Department of Mechanical Engineering, Guru Nanak Dev Engineering College, Ludhiana. 141006. INDIA. 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering, ICIAME 2014

[16] ECDIS, The common problems. Andrew Shannon. Holman Fenwick Willian Singapore LLP.