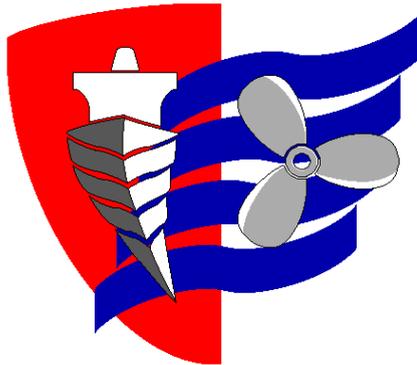


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



*Trabajo Fin de Grado*

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA DEL BUQUE SESTAO KNUTSEN EN  
FUNCIÓN DEL AISLAMIENTO DEL SISTEMA DE  
CONTENCIÓN DE LA CARGA**

---

Study and analysis of the energetic efficiency of the  
Sestao Knutsen vessel in function of the insulation of  
the cargo containment system

Para acceder al Título de Grado en

**INGENIERÍA MARINA**

Autor: Alberto Sañudo Espada

Director: Antonio Vega Omaña

Octubre - 2017

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

*Trabajo Fin de Grado*

**ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA  
ENERGÉTICA DEL BUQUE SESTAO  
KNUTSEN EN FUNCIÓN DEL AISLAMIENTO  
DEL SISTEMA DE CONTENCIÓN DE LA  
CARGA**

---

Study and analysis of the energetic efficiency  
of the Sestao Knutsen vessel in function of  
the insulation of the cargo containment  
system

Para acceder al Título de Grado en

**INGENIERÍA MARINA**

Octubre – 2017

# AGRADECIMIENTOS

Me gustaría dedicar unas líneas de agradecimiento a mis padres, así como a mi hermano y a mi novia, no sólo por facilitarme el camino para poder llegar hasta donde he llegado, sino también por mostrarme todo su apoyo desinteresado cuando más lo he necesitado.

Al resto de mi familia y a todos mis amigos porque gracias a ellos, este trayecto ha sido más fácil y ameno.

En especial al director de mi Trabajo de Fin de Grado, Antonio Vega Omaña, por su confianza, paciencia, sus consejos y por haberme ayudado siempre y cuando me ha sido necesario.

Al Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y de la Construcción Naval del que he adquirido la mayor parte de los conocimientos para la realización de este trabajo durante estos cuatro años.

A la Universidad de Cantabria por hacer posible la elaboración y exposición de este trabajo.

# ÍNDICE

|   |          |
|---|----------|
| ÍNDICE.....   | 1        |
| ÍNDICE DE FIGURAS.....                              | 4        |
| ÍNDICE DE TABLAS.....                               | 6        |
| RESUMEN.....  | 7        |
| ABSTRACT .....                                      | 8        |
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>           | <b>9</b> |
| 1.1. GENERAL.....                                   | 10       |
| 1.1.1. TÍTULO .....                                 | 10       |
| 1.1.2. DESTINATARIO .....                           | 10       |
| 1.1.3. JUSTIFICACIÓN .....                          | 10       |
| 1.1.4. OBJETO DEL PROYECTO .....                    | 11       |
| 1.2. ANTECEDENTES .....                             | 11       |
| 1.3. INTRODUCCIÓN.....                              | 12       |
| 1.4. GAS NATURAL (GN) .....                         | 12       |
| 1.5. GAS NATURAL LICUADO (GNL).....                 | 13       |
| 1.6. PROCESOS DEL GAS NATURAL .....                 | 14       |
| 1.6.1. LICUEFACCIÓN DEL GAS NATURAL.....            | 14       |
| 1.6.2. ALMACENAMIENTO DEL GAS NATURAL LICUADO ..... | 15       |
| 1.6.3. TRANSPORTE DE GAS NATURAL LICUADO.....       | 16       |
| 1.6.4. REGASIFICACIÓN DEL GAS NATURAL LICUADO ..... | 16       |
| 1.7. SEGURIDAD.....                                 | 17       |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 1.7.1.    | RIESGOS EN LA MANIPULACIÓN DE LA CARGA .....                               | 17        |
| 1.7.2.    | MEDIDAS REFERENTES A LA MANIPULACIÓN DE LA CARGA .....                     | 19        |
| 1.7.3.    | RIESGOS DURANTE LA ESTANCIA EN ASTILLERO .....                             | 21        |
| 1.8.      | BUQUES GASEROS .....   | 23        |
| 1.8.1.    | BUQUES DE TIPO 1G .....  | 23        |
| 1.8.2.    | BUQUES DE TIPO 2G .....  | 24        |
| 1.8.3.    | BUQUES DE TIPO 2PG .....   | 24        |
| 1.8.4.    | BUQUES DE TIPO 3G .....  | 25        |
| 1.8.5.    | SISTEMAS DE CONTENCIÓN DE LA CARGA .....                                   | 29        |
| 1.8.6.    | TIPOS DE TANQUES DE CARGA.....   | 30        |
| 1.9.      | DESCRIPCIÓN DEL BUQUE SESTAO KNUITSEN .....                                | 39        |
| 1.9.1.    | CARACTERÍSTICAS GENERALES.....   | 40        |
| 1.9.3.    | DISPOSICIÓN GENERAL .....  | 47        |
| 1.10.     | TANQUES DE CARGA DEL BUQUE SESTAO KNUITSEN .....                           | 48        |
| 1.11.     | SISTEMA ACTUAL DE CONTENCIÓN DE LA CARGA .....                             | 49        |
| 1.11.1.   | CONSTRUCCIÓN DEL AISLAMIENTO Y LAS BARRERAS .....                          | 51        |
| 1.12.     | SISTEMA ALTERNATIVO DE CONTENCIÓN DE LA CARGA .....                        | 54        |
| 1.12.1.   | DESCRIPCIÓN GENERAL.....   | 55        |
| 1.12.2.   | VENTAJAS DEL SISTEMA MARK V .....  | 57        |
| 1.13.     | NORMATIVA .....  | 59        |
| <b>2.</b> | <b>CÁLCULOS .....</b>  | <b>60</b> |
| 2.1.      | INTRODUCCIÓN.....  | 61        |
| 2.2.      | ELEMENTOS DE LA PLANTA DE VAPOR .....                                      | 61        |
| 2.3.      | CICLO RANKINE.....   | 69        |
| 2.3.1.    | DIAGRAMA T-S .....   | 69        |
| 2.4.      | RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA PLANTA .....                                     | 72        |
| 2.5.      | CÁLCULO DE LA POTENCIA PRODUCIDA CON AMBOS SISTEMAS DE<br>AISLAMIENTO..... | 75        |
| 2.6.      | AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA PLANTA.....                          | 80        |

|  |    |
|--|----|
| 3. CONCLUSIONES.....   | 82 |
| 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 84 |
| 5. ANEXOS.....   | 87 |
| ANEXO I: DISPOSICIÓN GENERAL DEL BUQUE SESTAO KNUITSEN.....  | 88 |
| ANEXO II: VIAJE EN CARGA CONSUMIENDO GAS MEDIANTE VAPORIZACIÓN<br>FORZADA A TRAVÉS DEL FORCING VAPORIZER ..... | 89 |
| ANEXO III: VIAJE EN CARGA CONSUMIENDO GAS MEDIANTE VAPORIZACIÓN<br>NATURAL.....                                | 90 |
| ANEXO IV: TABLAS DE LÍQUIDO SUBENFRIADO .....  | 91 |
| ANEXO V: TABLAS DE VAPOR SOBRECALENTADO .....  | 92 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1. EFECTO JOULE-THOMSON .....   | 14 |
| FIGURA 2. VISTA DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL DEL FONDO PLANO DE UN TANQUE<br>CON DOBLE PARED .....    | 15 |
| FIGURA 3. PROCESO DEL GAS NATURAL DESDE EL YACIMIENTO HASTA SU<br>DISTRIBUCIÓN.....                | 17 |
| FIGURA 4. TRIÁNGULO DEL FUEGO .....  | 18 |
| FIGURA 5. SECCIÓN DE TANQUE ESFÉRICO KVAERNER-MOSS.....  | 30 |
| FIGURA 6. TANQUES INDEPENDIENTES TIPO A.....   | 31 |
| FIGURA 7. TANQUE INDEPENDIENTE TIPO B O TIPO KVAERNER-MOSS .....                                   | 32 |
| FIGURA 8. TANQUES INDEPENDIENTES TIPO C.....   | 33 |
| FIGURA 9. SISTEMA DE MEMBRANA TECHNIGAZ .....  | 35 |
| FIGURA 10. SISTEMA DE MEMBRANA GAZ TRANSPORT .....   | 36 |
| FIGURA 11. SISTEMA GAZ TRANSPORT-TECHNIGAZ (GTT).....  | 37 |
| FIGURA 12. BUQUE SESTAO KNUITSEN .....   | 39 |
| FIGURA 13. TRUNK DECK BUQUE SESTAO KNUITSEN .....  | 39 |
| FIGURA 14. TURBINAS DE ALTA Y BAJA PRESIÓN Y REDUCTORA.....  | 41 |
| FIGURA 15. GRUPO TURBOGENERADOR .....  | 42 |
| FIGURA 16. GRUPO DIÉSEL-GENERADOR.....   | 43 |
| FIGURA 17. TURBOBOMBAS DE ALIMENTACIÓN DE LAS CALDERAS .....                                       | 44 |
| FIGURA 18. VÁLVULA AUTOMÁTICA DE PISTÓN.....   | 45 |
| FIGURA 19. VÁLVULA REGULADORA DE DESCARGA O DUMPING .....  | 45 |
| FIGURA 20. BOMBAS DE CIRCULACIÓN DE AGUA SALADA DEL CONDENSADOR<br>PRINCIPAL .....                 | 46 |
| FIGURA 21. REFUERZO DEL REVESTIMIENTO DEL TANQUE DE CARGA.....                                     | 49 |
| FIGURA 22. CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE CONTENCIÓN GAZ TRANSPORT<br>NO.96E.2 EVOLUTION SYSTEM ..... | 53 |
| FIGURA 23. MEMBRANA PRIMARIA CORRUGADA DE ACERO INOXIDABLE MARK V ....                             | 55 |
| FIGURA 24. MEMBRANA SECUNDARIA DE INVAR Y AISLAMIENTO SECUNDARIO,<br>SISTEMA MARK V .....          | 56 |
| FIGURA 25. DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO MARK V .....  | 57 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 26. ENTRADA DE AGUA SALADA Y TAPAS DE INSPECCIÓN DEL CONDENSADOR PRINCIPAL .....        | 62 |
| FIGURA 27. CONDENSADOR ATMOSFÉRICO.....  | 63 |
| FIGURA 28. GENERADOR DE AGUA DESTILADA CON CONDENSACIÓN POR AGUA DE CONDENSADO .....           | 64 |
| FIGURA 29. “GLAND CONDENSER” O CONDENSADOR DE VAHOS.....                                       | 65 |
| FIGURA 30. “L.P. HEATER” O CALENTADOR DE BAJA PRESIÓN.....                                     | 66 |
| FIGURA 31. DESAIREADOR.....  | 67 |
| FIGURA 32. VÁLVULA SPILL CON SU BY-PASS CORRESPONDIENTE Y SUS VÁLVULAS DE INCOMUNICACIÓN ..... | 68 |
| FIGURA 33. VÁLVULA MAKE UP CON VÁLVULAS DE INCOMUNICACIÓN CORRESPONDIENTES.....                | 68 |
| FIGURA 34. DIAGRAMA T-S.....   | 71 |
| FIGURA 35. ESQUEMA CICLO DE VAPOR.....   | 71 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| TABLA 1. PRODUCTOS INDICADOS EN EL CAPÍTULO 19 DEL CÓDIGO CIG .....                | 27 |
| TABLA 2. NOTAS ACLARATORIAS PARA EL RESUMEN DE PRESCRIPCIONES MÍNIMAS.             | 28 |
| TABLA 3. BARRERAS SECUNDARIAS EN RELACIÓN CON LOS TIPOS DE TANQUE DE<br>CARGA..... | 29 |
| TABLA 4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL BUQUE .....                                 | 40 |
| TABLA 5. CARACTERÍSTICAS PARTICULARES DEL BUQUE .....                              | 40 |
| TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DE LOS TANQUES DE CARGA DEL BUQUE .....                   | 48 |
| TABLA 7. TABLA COMPARATIVA ENERGÉTICA DE AMBOS SISTEMAS .....                      | 81 |

## RESUMEN

En este trabajo se ha querido realizar un estudio de la eficiencia energética de la instalación del buque Sestao Knutsen, propulsado mediante turbina de vapor, en función de la cantidad de gas evaporado de forma natural en el interior de los tanques de carga.

En primer lugar, se ha procedido a realizar los cálculos energéticos de la planta con el sistema de aislamiento de los tanques de carga que actualmente lleva el buque. Posteriormente se han desarrollado los mismos cálculos con un sistema de aislamiento propuesto con características y tecnologías más avanzadas.

La dificultad de la gestión de la carga evaporada durante los viajes en carga de dicho buque de la que he sido testigo durante mi periodo en prácticas me ha hecho deducir la necesidad de una solución a este tipo de problema.

Descartando la posibilidad de la instalación de una planta de relicuefacción de gas, dado que los buques propulsados por turbina de vapor no disponen de este tipo de instalaciones, he llegado a la conclusión de que el único modo de gestionar la carga de una manera más económica, disminuyendo así las mermas de gas durante los viajes es la sustitución o mejora del aislamiento de los tanques de carga, reduciendo la cantidad de gas evaporado de forma natural, debido al balance del barco y a la transmisión de calor a través del aislamiento.

Dicho trabajo abarca una primera parte en la que se detallan aspectos teóricos importantes para tener en cuenta durante la manipulación del gas natural (procesos del gas natural, seguridad, tipos de buques gaseros, sistemas de contención de la carga, etc.) y una segunda parte en la que se realizan los cálculos pertinentes para los dos tipos de aislamiento.

**PALABRAS CLAVE:** eficiencia energética, gas natural, aislamiento, barreras y boil-off.

## ABSTRACT

The aim of this Bachelor's final project is to carry out an energetic efficiency study of the plant of Sestao Knutsen vessel, propelled by steam turbine, according to the amount of naturally evaporated gas inside of the cargo tanks.

In the first place, it has proceeded to realize the energetic calculations of the plant with current insulation cargo tanks. After that, it has developed the same calculations with a proposed insulation system with advanced technologies and characteristics.

The difficulty of managing the evaporated cargo during the trips of that vessel of which I have seen during my cadet period has made me conclude the necessity of a solution to this kind of problem.

Apart from the possibility of installing a re-liquefaction plant, being as steam turbine-powered vessels do not have such facilities, I have concluded that the only way to manage the cargo in a more economical way, reducing the gas losses during the trip is the replacement or improvement of the insulation cargo tanks, thus decreasing the amount of naturally evaporated gas, due to the balance of the vessel and the heat transfer through the insulation.

This work includes a first part which details important theoretical details to consider during the handling of natural gas (processes, safety, types of vessels, cargo containment systems, etc.) and a second part in which the relevant calculations are made for both insulation systems.

**KEY WORDS:** energetic efficiency, natural gas, insulation, barriers and boil-off.

# 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

## 1.1. GENERAL

### 1.1.1. TÍTULO

Estudio y análisis de la eficiencia energética del buque Sestao Knutsen en función del aislamiento del sistema de contención de la carga.

### 1.1.2. DESTINATARIO

El destinatario de este proyecto es la Escuela Técnica Superior de Náutica de la Universidad de Cantabria, donde se presentará como Trabajo de fin de Grado al objeto de obtener el título de Grado en Ingeniería Marina.

### 1.1.3. JUSTIFICACIÓN

La idea de este proyecto nace en los seis meses de embarque de prácticas como alumno de máquinas para la obtención del título profesional de la marina mercante. Durante este tiempo estuve embarcado en el buque sobre el que trata este trabajo, el Sestao Knutsen.

Durante mi experiencia a bordo, invertí la mayor parte del tiempo junto al tercer oficial de máquinas, aunque también trabajé bastante tiempo con el primer y segundo oficial, así como con el cargo.

La idea de la realización de este proyecto surgió en la etapa del embarque en la que estuve trabajando con el cargo, dado que la mayoría de las veces, el principal problema que tenía el cargo en lo respectivo a la gestión de la carga, era el control de la presión en el interior de los tanques.

Ante esta situación, y teniendo en cuenta que en los buques cuyo elemento propulsor es la turbina de vapor no se instalan plantas de relicuefacción de gas que ayudan a disminuir la presión en los tanques, me planteé la idea de buscar una alternativa, como es la de hacer un estudio energético de un nuevo tipo de aislamiento para el

interior de los tanques que permita menor flujo de calor a su través, disminuyendo así el “boil-off gas”<sup>1</sup> natural de la carga.

#### 1.1.4. OBJETO DEL PROYECTO

El objeto de este proyecto es comparar el rendimiento térmico de la planta, así como la potencia disponible para propulsión y generación de energía eléctrica con la utilización del gas evaporado de forma natural del sistema de contención de la carga que dispone el buque frente a un sistema de aislamiento más novedoso que permita optimizar la carga evaporada al máximo. Mediante la mejora del aislamiento de los tanques se busca minimizar al máximo posible la evaporación natural del gas en el interior de los tanques para disminuir las mermas de la carga durante su transporte.

#### 1.2. ANTECEDENTES

El control de la presión en el interior de los tanques en el buque Sestao Knutsen se regula controlando la cantidad de gas enviado a las calderas, desaprovechándose en muchas ocasiones una cantidad de gas natural bastante significativa. El cambio del aislamiento de los tanques de carga requerirá una inversión inicial importante que se verá compensada con el posterior ahorro en combustible y en la gestión del gas natural. En lo referente al aislamiento de los tanques de carga, en los últimos años se han desarrollado nuevas tecnologías con materiales con una mayor capacidad de aislamiento que la utilizada en dicho buque, por ello he decidido hacer este estudio de un sistema más novedoso con mayor idoneidad en lo que a aislamiento se refiere.

---

<sup>1</sup> Boil-off-gas: Se trata de la gasificación de la carga debido al aumento de la temperatura.

### 1.3. INTRODUCCIÓN

Con la realización de este trabajo he querido desarrollar el impacto energético que supondrá la sustitución del aislamiento de los tanques de carga en el buque Sestao Knutsen para minimizar las mermas de gas durante su transporte, lo que aumentará la eficiencia energética total del buque.

Este nuevo aislamiento, debido a su mayor capacidad aislante de la carga tendrá la capacidad de disminuir el boil-off-gas natural del propio buque, así como la cantidad de gas licuado que se evapora debido al “sloshing”<sup>2</sup>, haciendo que sea posible mantener constante la presión en el interior de los tanques disminuyendo el consumo de gas excesivo, que actualmente está siendo desaprovechado.

En lo referente a la elección del nuevo tipo de aislamiento, he estudiado los aislamientos que llevan los buques construidos en la actualidad y he observado que el sistema de contención de la carga que se instaló en el buque Sestao Knutsen en su construcción ha sido sustituido por otro sistema más novedoso.

### 1.4. GAS NATURAL (GN)

El gas natural es aquel que se extrae de los yacimientos naturales. Dentro de su composición tiene una gran cantidad de metano, que varía en mayor o menor medida dependiendo del depósito del que haya sido extraído, llegando a alcanzar una composición de hasta el 97% en metano, junto con otro tipo de hidrocarburos que se encuentran en menor cantidad, como pueden ser etano, propano, butano y trazas de hidrocarburos más pesados.

---

<sup>2</sup> Sloshing: Es el movimiento de la carga líquida en el interior de los tanques.

El gas natural bruto contiene una cantidad bastante considerable de otro tipo de gases que no son hidrocarburos, como pueden ser el nitrógeno, el dióxido de carbono o el sulfuro de hidrógeno. Asimismo, el gas natural recién extraído se encuentra saturado de agua. El gas natural que se utiliza como combustible debe cumplir una serie de condiciones específicas, como puede ser el poder calorífico, el punto de rocío o el contenido de agua, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono. (GIIGNL, 2017).

#### 1.5. GAS NATURAL LICUADO (GNL)

El gas natural licuado está compuesto principalmente por metano, que se licúa para hacer más sencillo su transporte y almacenamiento, puesto que en su forma licuada reduce hasta en 600 veces su volumen en comparación con su forma gaseosa. Para poder transportarlo se reduce su temperatura hasta cifras cercanas a los  $-163^{\circ}\text{C}$  a una presión casi atmosférica, pues su punto de ebullición es de  $-161,6^{\circ}\text{C}$ . Tiene una densidad aproximada de  $0,78\text{ kg/m}^3$  a una presión de 1 atm y  $15^{\circ}\text{C}$  de temperatura, la cual cambia notablemente cuando hablamos de condiciones de temperaturas muy bajas. A una presión de 1 atm y  $-162^{\circ}\text{C}$  la densidad aumenta de  $0,78\text{ kg/m}^3$  hasta  $480\text{ kg/m}^3$ , debido también al cambio de estado de gas a líquido. El gas natural licuado es inodoro, incoloro y no tóxico, pero puede llegar a quemarse espontáneamente si entra en contacto con el aire en concentraciones de entre el 5 y el 15%. Tiene un poder calorífico medio de entre  $9.000$  y  $13.000\text{ kcal/m}^3$  aproximadamente, lo que hace que sea un combustible alternativo a los derivados del petróleo, puesto que es una fuente de energía limpia y respetuosa con el medio ambiente, además de segura y versátil. (MasMinerMetal, 2017).

## 1.6. PROCESOS DEL GAS NATURAL

### 1.6.1. LICUEFACCIÓN DEL GAS NATURAL

Para poder pasar el gas natural a su forma líquida después de haber sido extraído del yacimiento, se ha de enfriar hasta aproximadamente  $-161^{\circ}\text{C}$ , temperatura a la cual el metano, componente mayoritario del gas natural, se transforma a su forma líquida. El proceso de licuefacción tiene dos fases principales, en la primera fase se somete al gas a enfriamiento y condensación y la segunda, denominada “flashing”, en la que se disminuye la presión hasta casi la presión atmosférica. El proceso “flash” es un proceso en el que no se extrae ni se cede calor, es decir, es adiabático. Con este proceso flash, lo que se pretende es disminuir el punto de ebullición del líquido. Generalmente se realiza por medio de una válvula que funciona siguiendo el principio Joule-Thomson. En esta última etapa de procesamiento del gas natural licuado es en la que se producen vapores flash. La cantidad de vapores generados depende de la presión del gas, así como del tanque al que se está enviando el gas natural licuado. (GNL, 2017).

En la Figura 1 se muestra el proceso del efecto Joule-Thomson, que consiste en hacer pasar un gas a una temperatura  $T_i$  y una presión  $P_i$  iniciales a través de una membrana porosa, disminuyendo su presión final  $P_f$  y reduciendo así también su temperatura. (Castellano, 2017).

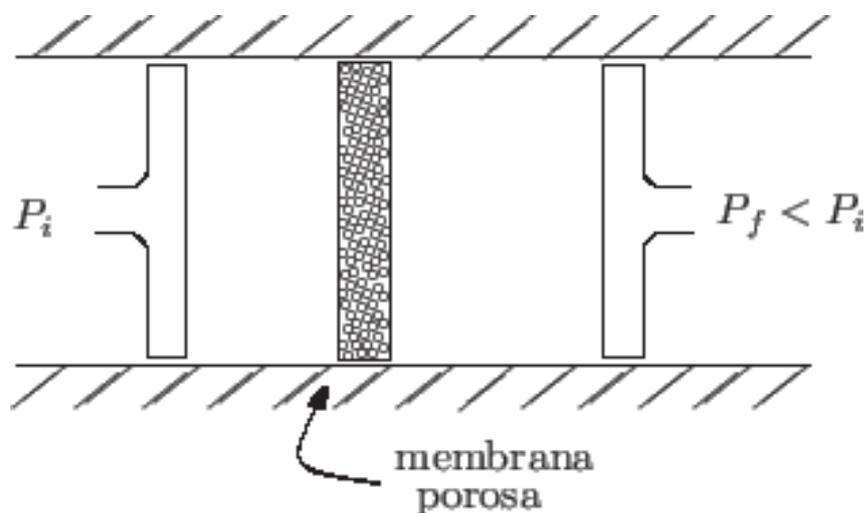


Figura 1. Efecto Joule-Thomson. Fuente: (Castellano, 2017).

Para el proceso de refrigeración, la más común es la refrigeración mecánica, compuesta por un proceso de compresión seguido de otro de expansión de vapor, aunque existen otro tipo de métodos, como la refrigeración por absorción, la cual es menos utilizada en la industria de hidrocarburos.

### 1.6.2. ALMACENAMIENTO DEL GAS NATURAL LICUADO

El gas natural licuado se almacena a  $-161^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y a una presión atmosférica en tanques especiales criogénicos que soporten temperaturas tan extremas. Estos tanques constan de doble pared, una externa de hormigón armado con un recubrimiento de acero al carbono y una interna de acero al níquel al 9%. Las consideraciones de diseño principales en la construcción de estos tanques son la seguridad y la resistencia. (MasMinerMetal, 2017).



*Figura 2. Vista de la sección transversal del fondo plano de un tanque con doble pared. Fuente: (Kobelco Welding, 2017).*

### 1.6.3. TRANSPORTE DE GAS NATURAL LICUADO

El gas natural licuado es transportado a presión atmosférica y a una temperatura que ronda los  $-160^{\circ}\text{C}$  en buques especializados para tal fin. Este tipo de buques están contruidos con doble casco, para evitar las fugas al exterior y para disminuir el intercambio de temperatura entre el interior y el exterior de los tanques de carga. Los buques destinados al transporte de gas licuado requieren de una alta tecnología de diseño en lo que a aislamiento se refiere, así como una estricta selección de materiales para la construcción del aislamiento que certifiquen el transporte seguro del gas natural licuado. (MasMinerMetal, 2017).

Aunque en esta parte profundizaré más adelante, he de señalar que el gas natural que se transporta en los buques metaneros no se somete a un proceso de refrigeración durante su transporte, por lo que el aislamiento de los tanques de carga debe ser lo más perfecto posible, evitando así entradas de calor al interior de los tanques e impidiendo su evaporación. (MasMinerMetal, 2017).

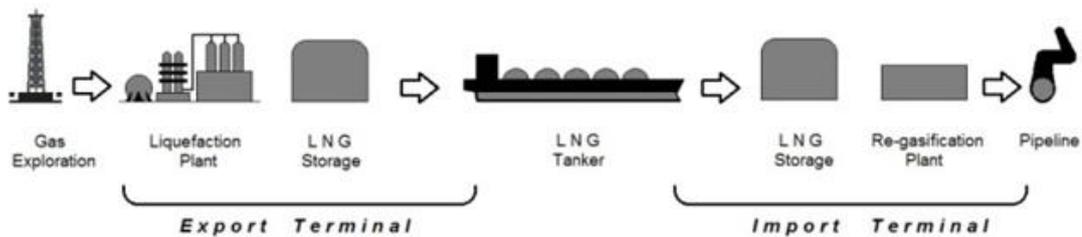
Durante el transporte es inevitable que se produzca evaporación natural del gas debido al intercambio de temperatura a través del aislamiento, así como al movimiento de balanceo del buque, que produce el denominado “sloshing” o movimiento libre de la carga en el interior de los tanques. El fenómeno de evaporación natural sumado al “sloshing” producen en los tanques el llamado “boil-off” natural, es decir, la cantidad de gas licuado que se evapora debido al aumento de la temperatura. (Unión Fenosa Gas S.A, 2017).

### 1.6.4. REGASIFICACIÓN DEL GAS NATURAL LICUADO

El buque metanero llega a la terminal de gas donde descarga el gas natural licuado que transporta a través de los propios brazos de descarga de los buques y se almacena en su forma líquida en tanques criogénicos similares a los usados en la terminal de licuefacción. En las cercanías de las terminales de descarga podemos encontrarnos con plantas de regasificación que convierten el gas natural licuado a estado gaseoso para distribuirlo mediante gasoductos a los clientes. (MasMinerMetal, 2017).

Para su distribución en la red de transporte, el gas natural licuado se transforma de nuevo a su estado gaseoso mediante un proceso físico de aumento de temperatura (a través de un intercambiador de calor de superficie con el agua de mar). El gas natural puede ser cargado en camiones cisterna que lo distribuyen por la red de carreteras hasta los destinos donde se consume. (Unión Fenosa Gas S.A, 2017).

En la Figura 3 podemos ver el proceso que sufre el gas natural desde su extracción del yacimiento, pasando por la planta de licuefacción, almacenamiento, transporte y regasificación hasta su distribución al consumidor.



*Figura 3. Proceso del gas natural desde el yacimiento hasta su distribución.*

*Fuente: (Oliveira, 2017).*

## 1.7. SEGURIDAD

### 1.7.1. RIESGOS EN LA MANIPULACIÓN DE LA CARGA

El gas natural no es un compuesto tóxico, pero es un elemento gaseoso, por lo que en su forma gaseosa puede causar asfixia debido a la falta de oxígeno en lugares cerrados donde no hay ventilación.

Los límites superior e inferior de inflamabilidad de los que he hablado antes se encuentran entre el 5 y el 15%, por lo que si entra en contacto con el aire podría llegar a ser peligroso por riesgo de inflamación.

En el interior de los tanques de carga, el gas natural no tiene demasiado peligro, pues los tanques se encuentran inertizados, es decir, la cantidad de oxígeno es despreciable, por lo que en esta situación estamos rompiendo el triángulo del fuego por el lado del comburente (oxígeno), aparte de encontrarse a temperaturas extremadamente bajas. En la Figura 4, referente al triángulo del fuego, se aprecian los 3 elementos para la generación espontánea del fuego, a parte de una fuente de ignición. Si eliminamos uno de estos 3 componentes (combustible, comburente u oxígeno y calor), eliminamos la posibilidad de que se produzca una generación espontánea del fuego.

Los principales riesgos que se pueden tener en un buque gasero son: colisión, varada, incendio, explosión y riesgos que puedan ocurrir durante las operaciones, así como nubes de gas y derrames de aceite y fuel. (BMT Marine & Offshore Surveys, 2017).



*Figura 4. Triángulo del fuego. Fuente: (Hidromec, 2017).*

### 1.7.2. MEDIDAS REFERENTES A LA MANIPULACIÓN DE LA CARGA

Las medidas que se deben tomar a bordo de un buque para obtener la seguridad necesaria cuando se opera con gas natural son: contención primaria del gas, contención secundaria, así como sistemas de seguridad. Este tipo de sistemas son muy importantes a bordo de un buque metanero. Un escape de gas natural puede causar un problema muy grave, por lo el buque estará dotado de sistemas de detección de gas allá donde lo necesite. Las contenciones primaria y secundaria deben tener unas características especiales para evitar cualquier tipo de fuga en los tanques de carga.

Se deberá tomar medidas especiales en operaciones de carga y descarga, prestando mayor atención a los manifold<sup>3</sup>, donde un escape de gas en cubierta podría comprometer la seguridad estructural del buque, pudiendo llegar a producir fracturas en la cubierta debido a las temperaturas criogénicas a las que se encuentra.

Como dato informativo de la importancia de la seguridad en los buques gaseros, en los últimos 30 años ha habido alrededor de 33.000 viajes de gas natural licuado en todo el mundo y en ninguno de ellos se ha producido un derrame significativo de gas natural. (Global Security, 2017).

Los buques gaseros disponen de sistemas de apagado de emergencia o ESD<sup>4</sup> que pueden identificar posibles problemas de seguridad y parar las operaciones. Esto limita significativamente la cantidad de gas natural licuado que pueda liberarse en la cubierta del buque. (Global Security, 2017).

---

<sup>3</sup> Manifold: Zona de conexión de los brazos de carga del buque con la terminal.

<sup>4</sup> Los sistemas ESD (Emergency Shut Down) son sistemas automáticos de los que disponen tanto los buques como las terminales de carga y descarga cuya finalidad es detener las operaciones de un modo seguro en caso de emergencia para prevenir mayores problemas.

Cuando se habla de seguridad en un buque, y más en concreto, en un buque gasero, debemos hacer hincapié en los siguientes puntos (BMT Marine & Offshore Surveys, 2017):

- Operaciones seguras que reduzcan derrames, sobrepresiones, vacíos o fugas accidentales.
- Sistemas mejorados de contención de la carga.
- Sistemas de detección de gases y detección de incendios.
- Seguridad e inspección operacional diaria hecha por la tripulación.
- Inspecciones y auditorías operacionales y de seguridad anuales hechas por los administradores del buque.
- Planes de mantenimiento preventivo de la tripulación y mantenimiento en todos los equipos.
- Estudios de longevidad para los buques destinados al transporte de gas licuado a los 20 años.
- Capacitación continua de tripulantes y administradores del buque.
- Prevención de riesgos terroristas, ISPS (International Ship Port Security): verificaciones de seguridad en la puerta principal, en el muelle y a bordo.

### 1.7.3. RIESGOS DURANTE LA ESTANCIA EN ASTILLERO

Las medidas preventivas que deben seguirse durante la estancia en astillero o dique seco en la que se realizaría la obra propuesta se rigen por el “Manual de seguridad e higiene en la construcción y reparación de buques” proporcionado por la ILO (International Labour Organization), haciendo un mayor hincapié en los puntos mencionados a continuación (Organización Internacional del Trabajo, 2017):

#### 1.7.3.1. MEDIOS DE ACCESO Y SALIDA

En este apartado se hace referencia a los medios de entrada y escape a los buques que se encuentren en dique seco, las salidas en casos de peligro o los planos de los medios de escape en el caso de la salida del buque.

En lo referente al acceso a los buques se habla de las características especiales de los medios de entrada al propio buque (escalas, escaleras, limpieza de los mismos, etc.).

#### 1.7.3.2. CALZADAS, MUELLES, PATIOS, ETC.

Este punto hace referencia al entorno del buque, los lugares por los que circulen personas o vehículos, así como pasos a nivel, pasarelas, etc.

#### 1.7.3.3. CALEFACCIÓN, ENFRIAMIENTO, ILUMINACIÓN, VENTILACIÓN

Las condiciones de iluminación, ventilación y temperatura que se puedan dar durante la estancia en astillero deben cumplir con la normativa establecida que garantice un entorno adecuado para favorecer las condiciones de trabajo de los empleados del astillero.

#### **1.7.3.4. ORDEN Y LIMPIEZA**

El orden y la limpieza son dos factores importantes en la prevención de riesgos durante el tiempo que el buque permanezca en dique. Una buena gestión de estos dos componentes puede evitar accidentes debidos a múltiples factores (tropiezos, caídas, condiciones antihigiénicas, etc.).

#### **1.7.3.5. PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS Y EXPLOSIONES**

La protección mediante equipos de contraincendios o personal especializado se deberá de llevar a cabo en lugares donde haya probabilidad de que éstos se produzcan. Durante la estancia en astillero se realizan trabajos exotérmicos (soldaduras, cortes con radiales, ...) que pueden desembocar en un incendio si no se toman las medidas pertinentes.

#### **1.7.3.6. PROTECCIÓN CONTRA LA CAÍDA DE OBJETOS**

El orden y la limpieza durante los periodos de trabajo son factores muy importantes para prevenir la caída de objetos. Pero siempre han de tomarse medidas como la colocación de redes suspendidas, evitar arrojar residuos desde lo alto o portar recipientes apropiados para pernos, tornillos o tuercas en situaciones de trabajos en altura.

#### **1.7.3.7. PROTECCIÓN CONTRA LA CAÍDA DE PERSONAS**

En este apartado se hace mención de los medios que han de tomarse para evitar la caída de personas, bien sea mediante la colocación de vallas o barandillas, sujeción mediante arneses, etc.

#### 1.7.3.8. RUIDO

El ruido generado por aparatos, tareas y demás debería mantenerse lo más bajo posible, sin exceder de los 90 decibelios en cualquier momento. En caso de que el ruido supere un nivel seguro, se deberá proveer a los trabajadores de medios de protección para los oídos, así como someter a los trabajadores a exámenes auditivos periódicos.

#### 1.7.3.9. PROTECCIÓN CONTRA LA INTEMPERIE

En climas fríos o demasiado cálidos en los que se exceda, ya sea por encima o por debajo, el confort humano, será necesario proteger a los trabajadores de la intemperie o del sol y el calor.

### 1.8. BUQUES GASEROS

Según el Código Internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel, el buque gasero está definido como todo buque de carga construido o adaptado y utilizado para el transporte a granel de cualquier gas licuado u otro producto que figure en el cuadro del capítulo 19. (OMI, 2016).

Los buques gaseros se pueden clasificar en función de la peligrosidad del producto transportado según la siguiente clasificación:

#### 1.8.1. BUQUES DE TIPO 1G

Buque gasero destinado a transportar productos indicados en el capítulo 19, que exijan la adopción de medidas preventivas de un rigor máximo para impedir escapes. (OMI, 2016).

### 1.8.2. BUQUES DE TIPO 2G

Buque gasero destinado a transportar productos indicados en el capítulo 19, que exijan la adopción de importantes medidas preventivas para impedir escapes. El buque Sestao Knutsen, objeto de este trabajo, se ubica dentro de esta categoría. (OMI, 2016).

### 1.8.3. BUQUES DE TIPO 2PG

Buque gasero de eslora menor o igual a 150 metros destinado a transportar productos indicados en el capítulo 19, que exijan la adopción de importantes medidas preventivas para impedir escapes, y en los que los productos se transporten en tanques independientes de tipo C proyectados para soportar un MARVS<sup>5</sup> de por lo menos 0,7 MPa (presión manométrica) y una temperatura de proyecto del sistema de contención de la carga igual o superior a -55°C. Un buque de estas características que tenga una eslora superior a 150m. se considera como buque de tipo 2G. (OMI, 2016).

---

<sup>5</sup> Tarado máximo admisible de las válvulas aliviadoras de presión de los tanques de carga del buque.

#### 1.8.4. BUQUES DE TIPO 3G

Buque gasero destinado a transportar productos indicados en el capítulo 19, que exijan la adopción de medidas preventivas moderadas para impedir escapes. (OMI, 2016).

En la Tabla 1 que se muestra a continuación podemos ver todos los productos indicados en el capítulo 19 del código CIG para los que están destinados a transportar los buques gaseros de tipo 1G, 2G, 2PG y 3G, así como las prescripciones especiales que se deben tomar para el transporte de cada uno de ellos, referenciando los apartados o subapartados del propio código CIG a los que haya que atenderse.

En la Tabla 2 se puede observar la explicación detallada de todas las columnas de las tablas anteriores: nombre del producto, tipo de buque, dispositivos de medición, etc.

| a<br>Nombre del producto          | c<br>Tipo de buque | d<br>Tanque de tipo C independiente prescrito | e<br>Control del espacio de vapor dentro de los tanques de carga | f<br>Detección de vapor | g<br>Dispositivos de medición | i<br>Prescripciones especiales                 |
|-----------------------------------|--------------------|---|--|-------------------------|-------------------------------|--|
| Acetaldehidato                    | 2G/<br>2PG         | -   | Inerte   | F + T                   | C                             | 14.4.2,<br>14.3.3.1,<br>17.4.1, 17.6.1         |
| Amoníaco, anhidro                 | 2G/<br>2PG         | -   | -  | T                       | C                             | 14.4, 17.2.1,<br>17.12                         |
| Anhídrido carbónico (Alta pureza) |                    | -   | -  | A                       | R                             | 17.21  |
| Anhídrido carbónico (reciclado)   |                    | -   | -  | A                       | R                             | 17.22  |
| Bromuro de metilo                 |                    | SÍ  | -  | F + T                   | C                             | 14.4, 17.2.3,<br>17.3.2, 17.4.1,<br>17.5       |
| Butadieno (todos los isómeros)    | 2G/<br>2PG         | -   | -  | F + T                   | C                             | 14.4, 17.2.2,<br>17.4.2, 17.4.3,<br>17.6, 17.8 |
| Butano (todos los isómeros)       | 2G/<br>2PG         | -   | -  | F                       | R                             |  |

|                                      |            |    |        |       |   |  |
|--------------------------------------|------------|----|--------|-------|---|--|
| Butilenos<br>(todos los isómeros)    | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R |  |
| Cargas de Mixed C4                   | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C | 14.4, 17.2.2,<br>17.4.2, 17.4.3,<br>17.6, 17.20  |
| Cloro                                |            | Sí | Seco   | T     | I | 14.4, 17.3.2,<br>17.4.1, 17.5,<br>17.7, 17.9,<br>17.13                                     |
| Cloruro de etilo                     | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C |  |
| Cloruro de metilo                    | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C | 17.2.3   |
| Cloruro de vinilideno*               | 2G/<br>2PG | -- | Inerte | F + T | C | 14.4.1, 14.4.2,<br>17.2.5, 17.6.1,<br>17.8, 17.9,<br>17.10                                 |
| Cloruro de vinilo                    | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C | 14.4.1, 14.4.2,<br>17.2.2, 17.2.3,<br>17.3.1, 17.6,<br>17.19                               |
| Dimetilamina                         | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C | 14.4, 17.2.1   |
| Dióxido de azufre                    |            | Sí | Seco   | T     | C | 14.4, 17.3.2,<br>17.4.1, 17.5,<br>17.7   |
| Etano                                |            | -  | -      | F     | R |  |
| Éter dietílico*                      | 2G/<br>2PG | -  | Inerte | F + T | C | 14.4.1, 14.4.2,<br>17.2.6, 17.3.1,<br>17.6.1, 17.9,<br>17.10, 17.11.2,<br>17.11.3          |
| Éter dimetílico                      | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C |  |
| Éter etilvinílico*                   | 2G/<br>2PG | -  | Inerte | F + T | C | 14.4.1, 14.4.2,<br>17.2.2, 17.3.1,<br>17.6.1, 17.8,<br>17.9, 17.10,<br>17.11.2,<br>17.11.3 |
| Etileno                              |            | -  | -      | F     | R |  |
| Gases refrigerantes                  |            | -  | -      | -     | R |  |
| Isopreno<br>(parcialmente refinado)* | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R | 14.4.2, 17.8,<br>17.9, 17.11.1   |

|  |            |    |        |       |   |  |
|--|------------|----|--------|-------|---|--|
| Isopreno<br>(todos los isómeros)*  | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R | 14.4.2, 17.8,<br>17.9, 17.11.1                               |
| Isopropilamina*  | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C | 14.4.1, 14.4.2,<br>17.2.4, 17.9,<br>17.10, 17.11.1,<br>17.15 |
| Metano (GNL)   |            | -  | -      | F     | C |  |
| Mezcla de butano/propano   | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R |  |
| Mezclas de<br>metilacetileno/propadieno  | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R | 17.16  |
| Monoetilamina*   | 2G/<br>2PG | -  | -      | F + T | C | 14.4, 17.2.1,<br>17.3.1, 17.9,<br>17.10, 17.11.1,<br>17.15   |
| Nitrógeno  |            | -  | -      | A     | C | 17.17  |
| Óxido de etileno   |            | Sí | Inerte | F + T | C | 14.4, 17.2.2,<br>17.3.2, 17.4.1,<br>17.5, 17.6.1,<br>17.14   |
| Óxido de propileno u óxido de<br>etileno/óxido de propileno, en<br>mezcla, con un contenido de óxido<br>de etileno de un 30%, en peso, como<br>máximo* | 2G/<br>2PG | -  | Inerte | F + T | C | 14.4.2, 17.3.1,<br>17.4.1, 17.6.1,<br>17.9, 17.10,<br>17.18  |
| Óxido de propileno*  | 2G/<br>2PG | -  | Inerte | F + T | C | 14.4.2, 17.3.1,<br>17.4.1, 17.6.1,<br>17.9, 17.10,<br>17.18  |
| Pentano<br>(todos los isómeros)*   | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R | 17.9, 17.11  |
| Penteno<br>(todos los isómeros)*   | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R | 17.9, 17.11  |
| Propano  | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R |  |
| Propileno  | 2G/<br>2PG | -  | -      | F     | R |  |

*Tabla 1. Productos indicados en el capítulo 19 del código CIG.*

*Fuente: (OMI, 2016).*

|  |   |
|--|---|
| Nombre del producto (columna a)                      | El nombre del producto se usará en el documento de expedición para toda carga que se presente para transportarse a granel. Podrá añadirse una denominación secundaria entre corchetes después del nombre del producto. En determinados casos los nombres de los productos no son idénticos a los que aparecen en ediciones anteriores del Código. |
| (Columna b)  | Suprimida   |
| Tipo de buque (columna c)                            | 1: buque de tipo 1G (2.1.2.1)<br>2: buque de tipo 2G (2.1.2.2)<br>3: buque de tipo 2PG (2.1.2.3)<br>4: buque de tipo 3G (2.1.2.4)   |
| Tanque de tipo C independiente prescrito (columna d) | Tanque independiente de tipo C (4.23)   |
| Control ambiental de los tanques (columna e)         | Inerte: inertización (9.4)<br>Seco: secado (17.7)<br>–: no se establecen prescripciones especiales en el Código   |
| Detección de vapor (columna f)                       | F: detección de vapores inflamables T: detección de vapores tóxicos<br>F+T: detección de vapores inflamables y tóxicos<br>A: asfixiante   |
| Dispositivos de medición (columna g)                 | I: indirecto o cerrado (13.2.3.1 y .2)<br>R: indirecto, cerrado o de paso reducido. (13.2.3.1, .2, .3 y .4)<br>C: indirecto o cerrado (13.2.3.1, .2 y .3)   |
| (Columna h)  | Suprimida   |
| Prescripciones especiales (columna i)                | Cuando se haga referencia específica a los capítulos 14 y/o 17, estas prescripciones se agregarán a las prescripciones correspondientes a cualquier otra columna.   |
| Gases refrigerantes                                  | Gases no tóxicos y no inflamables   |

*Tabla 2. Notas aclaratorias para el resumen de prescripciones mínimas.*

*Fuente: (OMI, 2016).*

### 1.8.5. SISTEMAS DE CONTENCIÓN DE LA CARGA

En los buques gaseros, el sistema de contención de la carga consta de barreras primaria y secundaria, aislamientos, espacios inter-barreras, además de la estructura necesaria para sustentar estos elementos mencionados.

Podemos definir la **barrera primaria** como el elemento interno concebido para contener la carga si el sistema de contención de la carga incluye dos mamparos. (OMI, 2016).

La **barrera secundaria**, por otro lado, se conoce como el elemento exterior de un sistema de contención de la carga, resistente a líquidos, concebida para proporcionar una contención temporal de toda pérdida de carga líquida que se prevea a través de la barrera primaria y para evitar el descenso de la temperatura de la estructura del buque a un nivel que comprometa la seguridad. (OMI, 2016).

| Temperatura de la carga a presión atmosférica  | Igual o superior a -10°C          | Inferior a -10°C hasta -55°C   | Inferior a -55°C                          |
|--|-----------------------------------|--|---|
| Tipo de tanque básico  | No se necesita barrera secundaria | El casco puede desempeñar la función de una barrera secundaria   | Barrera secundaria separada si hace falta |
| Integral<br>Membrana<br>Semi-membrana<br>Independiente:<br>- Tipo A<br>- Tipo B<br>- Tipo C  |                                   | Tipo de tanque que generalmente no se permite <sup>1</sup><br>Barrera secundaria total<br>Barrera secundaria total <sup>2</sup><br><br>Barrera secundaria total<br>Barrera secundaria parcial<br>No se necesita una barrera secundaria |   |
| <p><u>Nota 1:</u> Generalmente, se necesitará una barrera secundaria completa, si se permiten las cargas con una temperatura a presión atmosférica por debajo de -10°C de conformidad con lo prescrito en 4.25.1.</p> <p><u>Nota 2:</u> Cuando se trate de tanques semi-membrana que cumplen cabalmente las prescripciones aplicables a los tanques independientes de tipo B, a excepción de lo que respecta a la forma de sujeción, la Administración podrá, tras un examen especial, aceptar una barrera secundaria parcial.</p> |                                   |  |   |

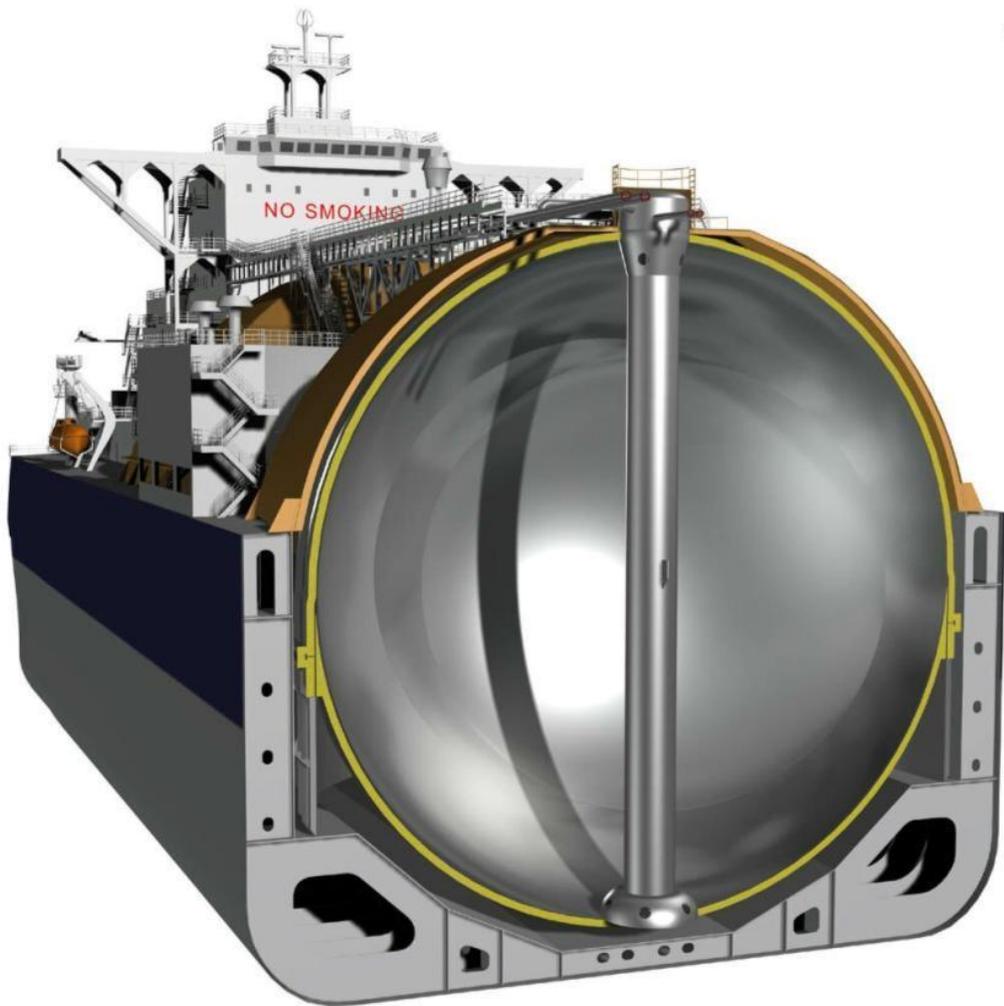
*Tabla 3. Barreras secundarias en relación con los tipos de tanque de carga.*

*Fuente: (OMI, 2016).*

En la Tabla 3 podemos ver las características estructurales que han de tener las barreras secundarias de los diferentes tanques de buques gaseros en función de la temperatura de la carga que transportan a presión atmosférica.

### 1.8.6. TIPOS DE TANQUES DE CARGA

Se entiende como tanque de carga todo recipiente hermético proyectado de modo que sea el elemento principal de contención de la carga, que incluye todos los sistemas de contención, independientemente de que estén relacionados o no con el aislamiento o con las barreras secundarias. (OMI, 2016).



*Figura 5. Sección de tanque esférico Kvaerner-Moss.*

*Fuente: (Rodríguez, Tecnología Marina, 2017).*

### 1.8.6.1. TANQUES INTEGRALES

Son parte de la estructura del casco y se ven condicionados por los esfuerzos que imponen las cargas en la estructura del casco adyacente.

### 1.8.6.2. TANQUES INDEPENDIENTES

Estos tanques son autoportantes y no forman parte integral de la estructura del casco, por lo que no contribuyen a la resistencia total del casco. Según el capítulo 4 del Código CIG, los tanques independientes se clasifican en tres tipos (Marine Insight, 2017):

- **Tipo A:** contruidos por superficies planas diseñados para una presión de vapor menor de 0,7 bar. Utilizados en buques LPG refrigerados. (OMI, 2016).

La característica más distintiva de los tanques tipo A es que el Código CIG especifica que este tipo de tanques deben tener una barrera secundaria completa y que pueda contener cualquier fuga durante al menos 15 días. (Marine Insight, 2017).



Figura 6. Tanques independientes tipo A. Fuente: (García, 2017).

- **Tipo B (Tipo Moss Rosenberg):** contruidos por superficies esféricas para una presión de vapor menor de 0,7 bar. Utilizados en buques LNG refrigerados o buques LPG. (OMI, 2016).

La superficie exterior del revestimiento del tanque está provista de un aislamiento externo y la parte del tanque por encima del nivel de la cubierta principal está cubierta por una capa protectora contra la meteorología. Un soporte tubular vertical comunica la parte superior del tanque con el fondo, donde se alojan las líneas de carga y las escaleras de acceso. Este tipo de tanque es de los más comunes en el transporte de gas natural licuado. (Marine Insight, 2017).



*Figura 7. Tanque independiente tipo B o tipo Kvaerner-Moss.*

*Fuente: (Preciado, 2017).*

- **Tipo C:** se trata de tanques a presión que no disponen de barrera secundaria. Tienen forma cilíndrica o esférica y están dispuestos horizontal o verticalmente. Utilizados en buques LPG refrigerados y también presurizados, así como también en buques LNG. (OMI, 2016).

La presión de diseño de este tipo de tanques está en rangos superiores a los 2 bar. Este tipo de tanques no requieren de barrera secundaria. Para detectar fugas de carga de los tanques, los espacios “libres de gas” se encuentran bajo una atmósfera de gas inerte que tiene colocados sensores que detectan el cambio de composición del propio gas inerte. (Marine Insight, 2017).



*Figura 8. Tanques independientes tipo C. Fuente: (García, 2017).*

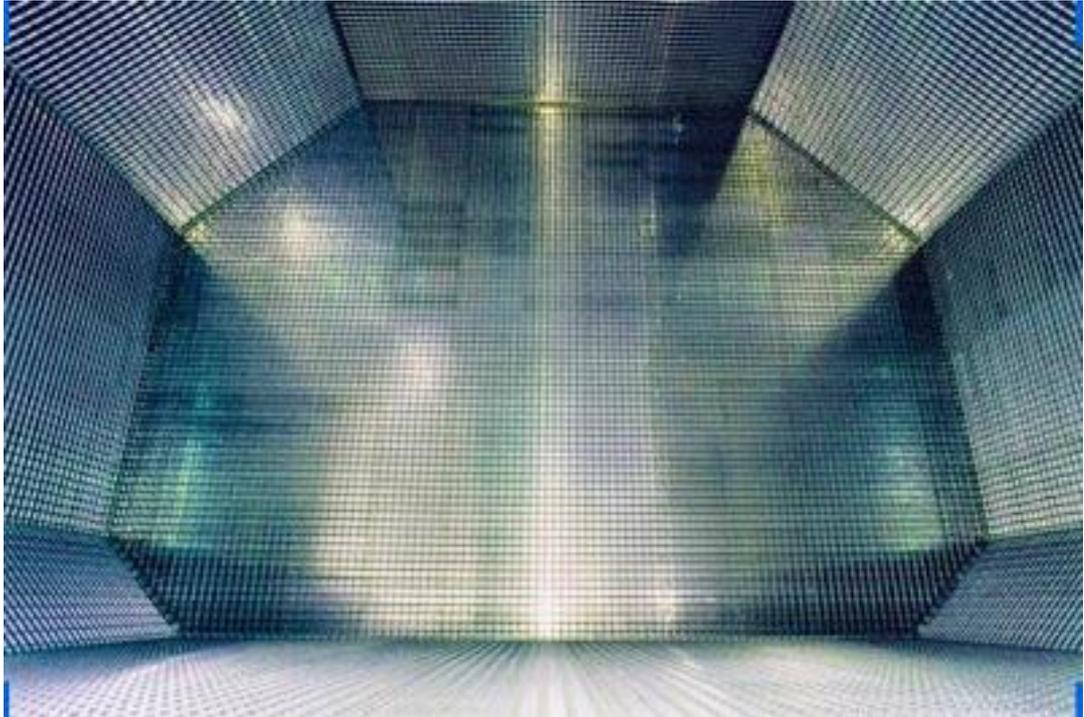
### 1.8.6.3. TANQUES DE MEMBRANA

Son tanques que carecen de sustentación propia, es decir, se soportan en la estructura del buque. Están contruidos por una barrera primaria o membrana invar (entre 0,7 y 1,5 mm de espesor) que está recubierta por un material aislante y una barrera secundaria que se apoya en la estructura del buque. (Marine Insight, 2017).

Dentro de los tanques de membrana, podemos encontrar tecnologías diferentes, como puede ser el sistema Technigaz, mostrado en la Figura 9 o el sistema Gaz Transport, representado en la Figura 10. En la Figura 11 podemos observar el sistema Gaz Transport-Technigaz, que se trata de un tipo de aislamiento que unifica los dos anteriores, utilizando características específicas de cada uno de ellos, así como también el sistema KOGAS (Korean Gas), un tipo de aislamiento bastante novedoso, aunque menos utilizado en la actualidad. El buque Sestao Knutsen sobre el que voy a hablar a continuación está dotado con el sistema Gaz Transport-Technigaz, en el que entraré en detalle más adelante.

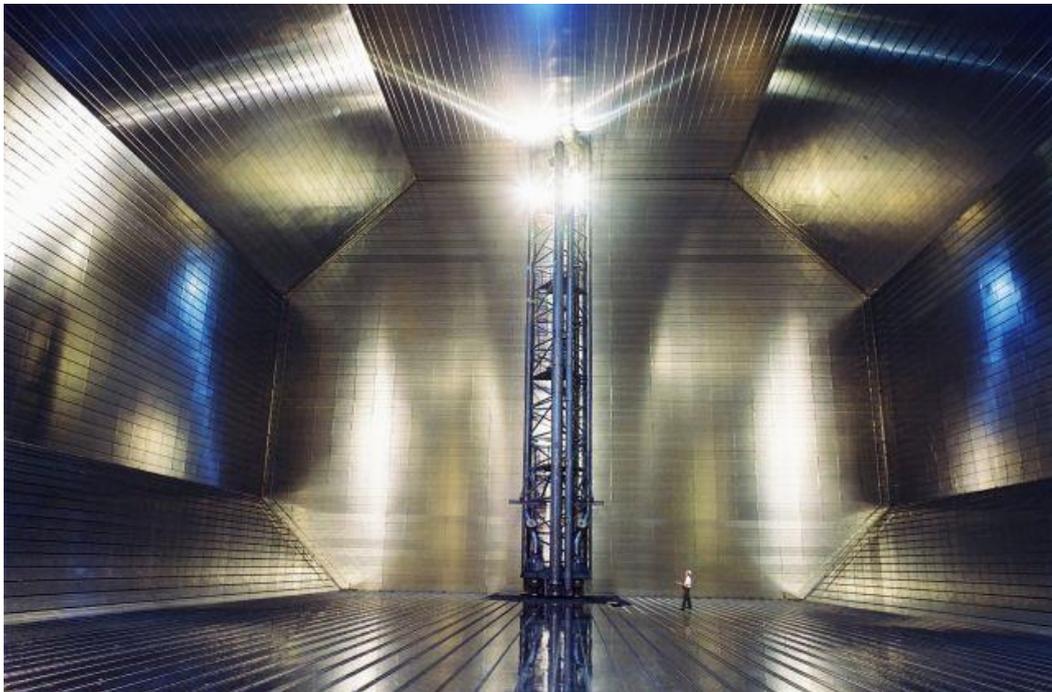
- En el sistema Technigaz la barrera primaria se compone de acero inoxidable con la superficie corrugada en forma de rejillas, de manera que así se permite la expansión y contracción de la superficie del tanque. Esa capa de acero corrugado se soporta en paneles de madera de balsa laminada entre dos capas de madera contrachapada que hacen de aislamiento. Esos paneles de madera de balsa están conectados mediante juntas de espuma de PVC. La madera contrachapada se soporta directamente por el casco del buque. (Liquefied Gas Carrier, 2017).

Entre las dos capas de aislamiento se dispone una capa de espuma aislante con láminas de fibreglass y aluminio que forman la segunda barrera, capaz de contener la carga durante 15 días en caso de que se produzca una grieta en la barrera primaria. (Liquefied Gas Carrier, 2017).



*Figura 9. Sistema de membrana Technigaz. Fuente: (Rodríguez, 2017).*

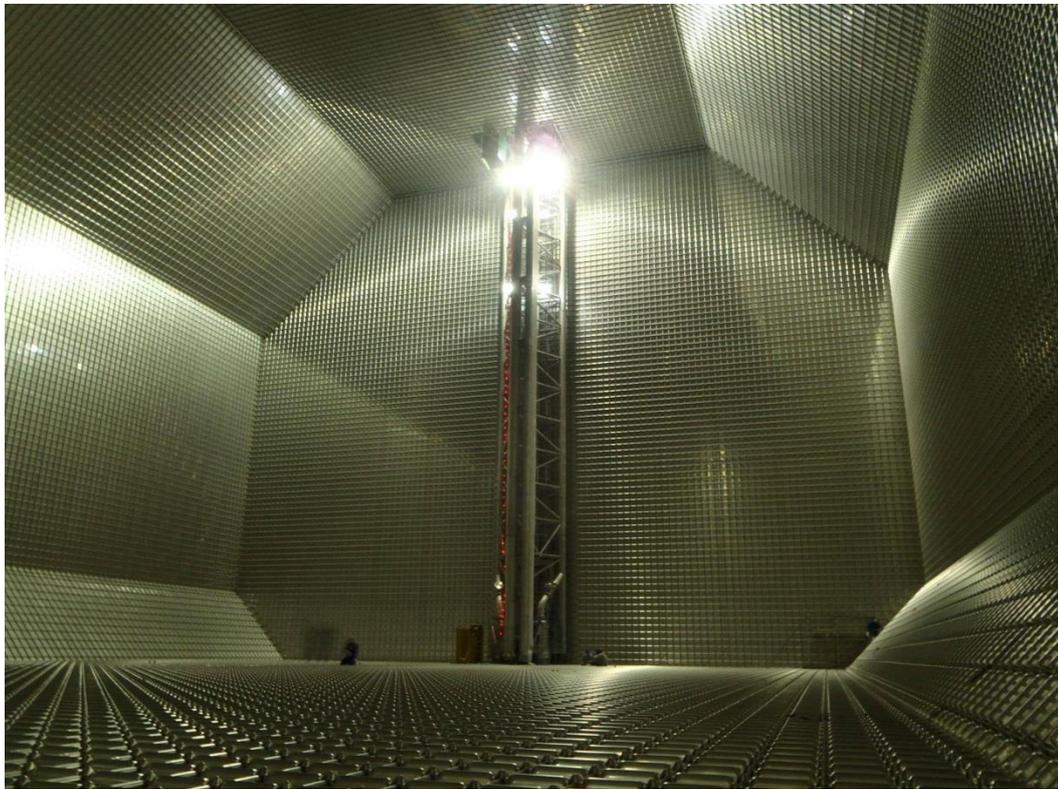
- El sistema Gaz Transport consta de dos membranas idénticas para la barrera primaria y la secundaria y están formadas por una capa de Invar comprimido de 0,7 mm de espesor. El espacio entre barreras está formado por un contrachapado relleno de perlita que hace de aislante térmico. Estos espacios se encuentran bajo una atmósfera de nitrógeno que inertiza el espacio entre barreras. El aislamiento primario tiene un grosor de 230 mm mientras que el secundario, que se apoya sobre el casco tiene un grosor de 300 mm. (Liquefied Gas Carrier, 2017).



*Figura 10. Sistema de membrana Gaz Transport. Fuente: (La Naval, 2017).*

- El sistema Gaz Transport y Technigaz es una combinación de los dos anteriores con el objeto de combinar las ventajas de ambos.

Estos sistemas están basados en una barrera primaria de Invar que se apoya en paneles de aislamiento tipo Mark III, incluyendo una barrera secundaria de membrana Triplex (una hoja de aluminio entre dos capas de fibra de vidrio). El espacio inter-barreras se encuentra bajo una atmósfera de nitrógeno a baja presión, mientras que el espacio existente entre la barrera secundaria y el casco está inertizado con nitrógeno a alta presión (Liquefied Gas Carrier, 2017).



*Figura 11. Sistema Gaz Transport-Technigaz (GTT). Fuente: (García, 2017).*

- El sistema KOGAS combina dos chapas como barrera primaria y secundaria, de acero inoxidable 304L de 2 mm de espesor, con una capa de 115 kg/m<sup>3</sup> de espuma de poliuretano como aislante. Este sistema tiene como objeto minimizar la deformación de la barrera primaria y el casco (Liquefied Gas Carrier, 2017).

#### 1.8.6.4. TANQUES DE SEMI-MEMBRANA

Se trata de tanques que no son autoportantes en condiciones de carga. El concepto de semi-membrana es una variación del sistema de membrana, con la diferencia de que la barrera principal es más gruesa que la del sistema de membrana. Estos tanques se desarrollaron para el transporte de gas natural licuado, sin embargo, el sistema se ha adoptado para utilizarse en barcos que transportan gas licuado del petróleo totalmente refrigerados. (Preciado, 2017).

## 1.9. DESCRIPCIÓN DEL BUQUE SESTAO KNUTSEN



*Figura 12. Buque Sestao Knutsen. Fuente: (Propia).*



*Figura 13. Trunk deck buque Sestao Knutsen. Fuente: (Propia).*

### 1.9.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

|                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <b>Nombre del buque</b>          | <b>Sestao Knutsen</b>  |
| <b>Puerto de registro</b>        | <b>Santa Cruz de Tenerife</b>  |
| <b>Distintivo de llamada</b>     | <b>ECBK</b>  |
| <b>Bandera</b>                   | <b>Española</b>  |
| <b>Número IMO</b>                | <b>9338797</b>   |
| <b>Sociedad de clasificación</b> | <b>Lloyds Register of Shipping</b>   |
| <b>Clase</b>                     | <b>+100A1 Liquefied Gas Tanker.<br/>Type 2G.<br/>Maximum pressure 0.25 bar.<br/>Minimum temperature -163°C.<br/>+LMC, UMS, PORT, SDA, IWS, SCM, LI, FDA,<br/>NAVI, IBS, ES, TCM, CCS</b> |
| <b>Armador</b>                   | <b>Knutsen OAS Shipping</b>  |

*Tabla 4. Características generales del buque.*

*Fuente: (Knutsen OAS Shipping, 2009).*

### 1.9.2. CARACTERÍSTICAS PARTICULARES

|  |   |
|--|---|
| <b>Eslora máxima</b>                     | <b>284 m</b>  |
| <b>Eslora entre perpendiculares</b>      | <b>271 m</b>  |
| <b>Manga de trazado</b>                  | <b>42,5 m</b>   |
| <b>Puntal hasta cubierta principal</b>   | <b>25,4 m</b>   |
| <b>Calado de diseño</b>                  | <b>11,4 m</b>   |
| <b>Calado de verano</b>                  | <b>12,3 m</b>   |
| <b>Calado en lastre</b>                  | <b>9,7 m</b>  |
| <b>Peso muerto</b>                       | <b>77.329 Tm</b>  |
| <b>Peso bruto</b>                        | <b>98.478 Tm</b>  |
| <b>Peso neto</b>                         | <b>27.143 Tm</b>  |
| <b>Capacidad de carga</b>                | <b>138.100 m<sup>3</sup></b>                            |
| <b>Sistema de contención de la carga</b> | <b>Doble membrana</b>                                   |
| <b>Potencia propulsora</b>               | <b>MCR (Maximum) 28000 kW<br/>NSR (Normal) 25200 kW</b> |
| <b>Velocidad de servicio</b>             | <b>19,5 kn</b>  |

*Tabla 5. Características particulares del buque.*

*Fuente: (Knutsen OAS Shipping, 2009).*

El equipo propulsor del buque Sestao Knutsen está formado por una turbina de vapor y una línea de ejes acoplada a una hélice. Se dispone de una turbina de alta presión (una etapa Curtis<sup>6</sup> doble y ocho etapas Rateau<sup>7</sup>), una turbina de baja presión (cuatro etapas Rateau y cuatro etapas de reacción) y una turbina de ciar (dos etapas Curtis dobles). La turbina principal es una turbina de condensación, puesto que la presión al final de la última etapa es inferior a la atmosférica. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

Éste es el sistema convencional que se ha utilizado en los buques destinados al transporte de gas licuado en los últimos 30 años, y está compuesto por (La Naval, 2017):

- Turbina Kawasaki-Izar, de 28.000 kW a 83 rpm.
- Reductora reversible tipo tándem, doble y articulada.



*Figura 14. Turbinas de alta y baja presión y reductora. Fuente: (Propia).*

---

<sup>6</sup> La turbina Curtis de dos etapas es una turbina de acción que se compone de una corona de toberas seguido de dos coronas de álabes fijos entre las que se sitúa una corona de álabes móviles.

<sup>7</sup> La turbina Rateau es una turbina de acción formada por una corona de toberas seguida de otra corona de álabes fijos.

- Línea de ejes fabricada y tubo de bocina suministrados por Sidenor.
- Hélice de cinco palas fijas y 8.700 mm de diámetro de Wärtsilä.

La planta generadora de electricidad consta los siguientes equipos con sus características específicas:

- Dos grupos turbogeneradores Mitsubishi de 3.150 kW de potencia cada uno. La turbina de vapor que los acciona consta de 6 etapas y gira a 10.000 rpm. Los alternadores acoplados al eje que mueve la turbina son de la marca ABB, giran a 1.800 rpm y suministran corriente eléctrica trifásica (60 Hz) a los cuadros eléctricos principales a 3.300 V y 689 A. Los turbogeneradores tienen “switches” para conectarlos indistintamente al cuadro eléctrico principal (3.300V) de babor o estribor. (Knutsen OAS Shipping, 2009).



*Figura 15. Grupo turbogenerador. Fuente: (Propia).*

- Un grupo diésel-generator Wärtsila de 3.100 kW de potencia y 8 cilindros que gira a 720 rpm, conectado a un alternador de la marca ABB, que a su vez se comunica directamente con los cuadros eléctricos principales, suministrando energía eléctrica a éstos a 3.300 V y 678 A. Este grupo generator, al igual que los turbogeneradores, se puede conectar indistintamente a los cuadros eléctricos principales de babor o estribor. (Knutsen OAS Shipping, 2009).



*Figura 16. Grupo diésel-generator. Fuente: (Propia).*

- Un grupo diésel-generator de emergencia MAN de 4 tiempos y 12 cilindros en V que gira a una velocidad de 1.800 rpm. El alternador al que está conectado genera una tensión de 450 V y una potencia de 550 kW. Este grupo de emergencia se puede conectar al cuadro eléctrico de emergencia (440V) y de ahí suministrar corriente eléctrica al cuadro eléctrico principal. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

Por otro lado, la planta generadora de vapor está formada por dos calderas acuotubulares, verticales, tipo D Mitsubishi MB-4E que suministran vapor sobrecalentado a la turbina principal, a los turbogeneradores y a las turbobombas de alimentación de las propias calderas. El exceso de vapor que se produzca es controlado mediante un sistema automático de condensado y es enviado al condensador principal desde el sistema de vapor desrecalentado a través de una válvula de pistón automática y dos válvulas de descarga o válvulas dumping<sup>8</sup> que son reguladoras (Knutsen OAS Shipping, 2009).



*Figura 17. Turbobombas de alimentación de las calderas. Fuente: (Propia).*

---

<sup>8</sup> Las válvulas de dumpeo o válvulas dumping alivian la presión del colector de vapor cuando este llega a su límite superior debido a que la producción de vapor es mayor que la demanda.



*Figura 18. Válvula automática de pistón. Fuente: (Propia).*

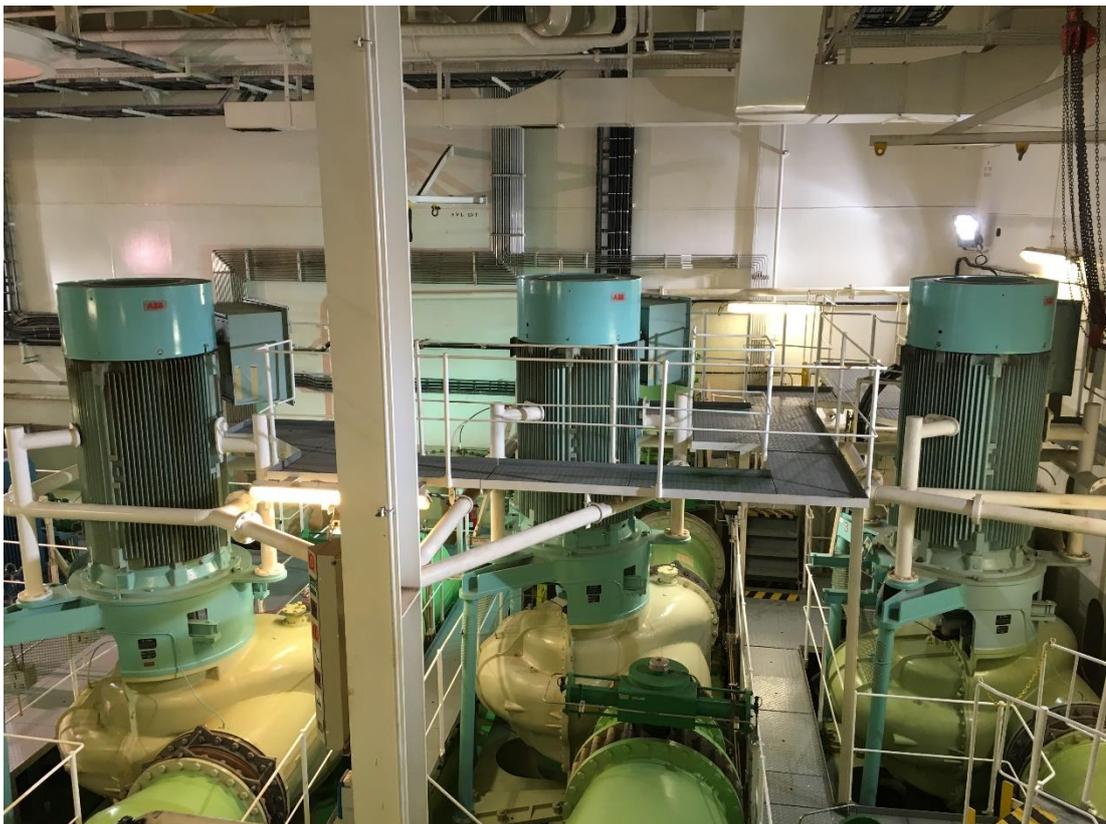


*Figura 19. Válvula reguladora de descarga o dumping. Fuente: (Propia).*

Las calderas principales tienen las siguientes características (Knutsen OAS Shipping, 2009):

- Evaporación máxima: 65.000 kg/h.
- Evaporación normal: 50.000 kg/h.
- Condiciones del vapor sobrecalentado: 61,8 kg/cm<sup>2</sup> a 515°C.
- Dispone de 3 quemadores duales de fuel y gas.

El condensador principal es de tipo horizontal, tubular, refrigerado por circulación de agua salada mediante tres bombas de circulación centrífugas de 8.000 m<sup>3</sup>/h cada una de ellas.



*Figura 20. Bombas de circulación de agua salada del condensador principal. Fuente: (Propia).*

### 1.9.3. DISPOSICIÓN GENERAL

En el Anexo I se puede observar la disposición general del buque Sestao Knutsen, en el que se diferencian claramente los cuatro tanques de carga, así como los ocho tanques de lastre dispuestos en los costados y bajo los propios tanques de carga. A proa del tanque de carga número uno se dispone un tanque almacén de fuel, la cámara de la hélice de proa o “bow thruster” y el “fore peak” o tanque de agua de lastre de proa.

A popa del tanque de carga número cuatro se dispone la sala de máquinas, así como numerosos tanques de fuel, agua, diésel o el propio “aft peak” o tanque de agua de lastre de popa.

Situada en la cubierta principal, encima del tanque de carga número cuatro, en el costado de estribor se dispone la sala de motores, así como también la sala de compresores, lugar donde se sitúan los elementos de manipulación de la carga, a excepción de las bombas de descarga de gas natural, situadas en el interior de los propios tanques de carga.

### 1.10. TANQUES DE CARGA DEL BUQUE SESTAO KNUTSEN

Este buque consta de un total de cuatro tanques de carga, numerados de proa a popa, con una capacidad total de 138.119,3 m<sup>3</sup>, aunque por seguridad, solamente se cargan hasta un 98% del total de su capacidad, pudiendo llevar una cantidad de gas natural de hasta 135.356,9 m<sup>3</sup> distribuidos en los cuatro tanques de carga.

| Tanques de Carga |                      |           |                |               |
|------------------|----------------------|-----------|----------------|---------------|
| Nº               | Compartimento        | Cuadernas | Capacidad      |               |
|                  |                      |           | Volumen (100%) | Volumen (98%) |
| CT1              | Tanque de carga Nº.1 | 229-268   | 22.653,4       | 22.200,3      |
| CT2              | Tanque de carga Nº.2 | 175-226   | 40.102,5       | 39.300,5      |
| CT3              | Tanque de carga Nº.3 | 121-172   | 40.099,6       | 39.297,6      |
| CT4              | Tanque de carga Nº.4 | 73-118    | 35.263,8       | 34.558,5      |
| Capacidad total  |                      |           | 138.119,3      | 135.356,9     |

*Tabla 6. Características de los tanques de carga del buque.*

*Fuente: (Knutsen OAS Shipping, 2009).*

### 1.11. SISTEMA ACTUAL DE CONTENCIÓN DE LA CARGA

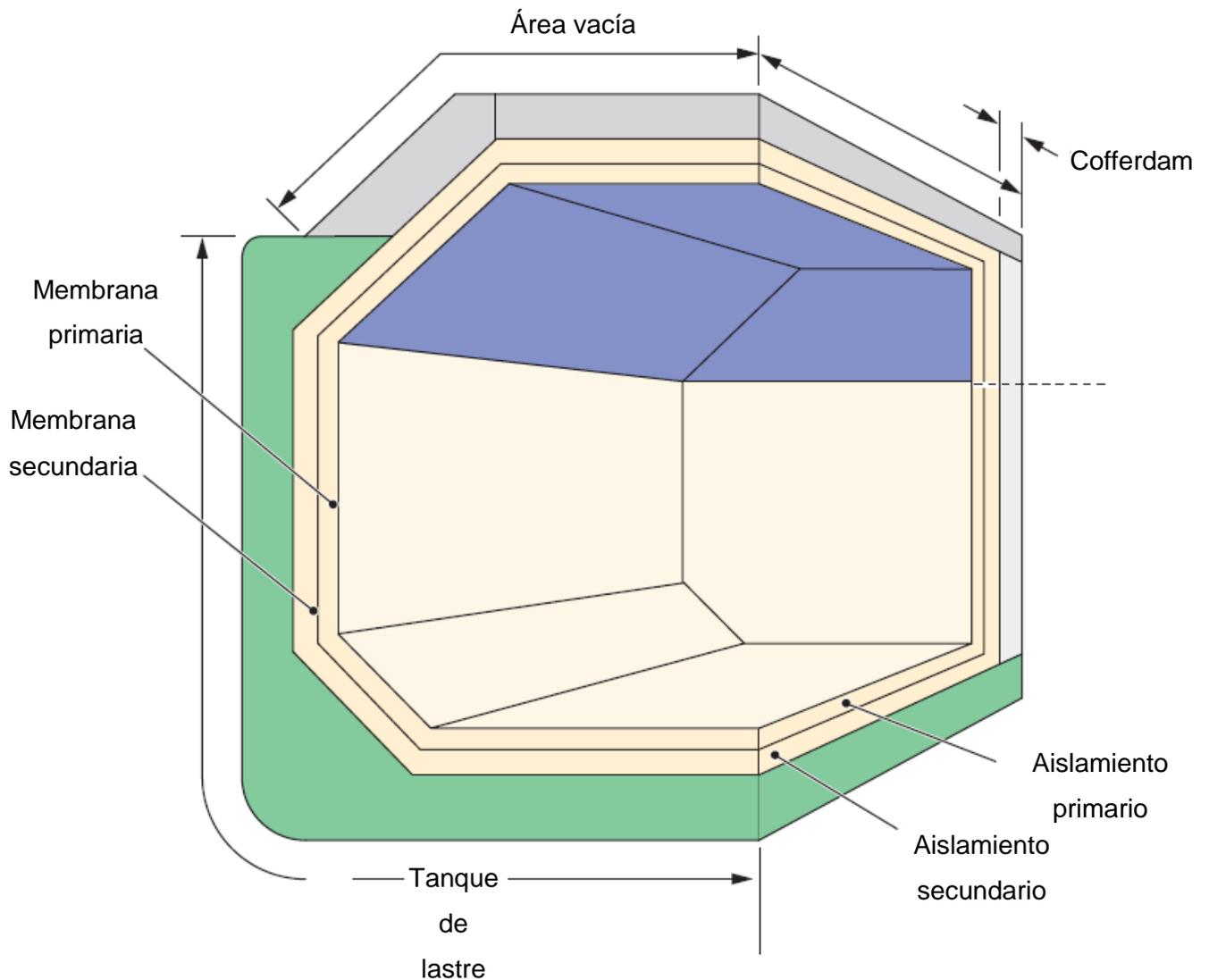


Figura 21. Refuerzo del revestimiento del tanque de carga.

Fuente: (Knutsen OAS Shipping, 2009).

En el Anexo I podemos observar la disposición de los tanques de carga del buque, los cuales tienen una sección octogonal, a excepción del tanque número uno, cuya sección es ligeramente diferente debido a la forma afinada del buque en la proa.

Los tanques de carga son de doble membrana, de diseño Gaz Transport No.96E.2 Evolution System.

En la Figura 22 se puede ver un esquema del sistema de aislamiento del que están dotados los tanques de carga del buque Sestao Knutsen.

La envoltura externa de cada tanque de carga está revestida internamente con el sistema integrado de contención y aislamiento de tanques Gaz Transport-Technigaz. Esto consiste en una membrana delgada y flexible llamada membrana primaria, que está en contacto directo con la carga, una capa de cajas de madera contrachapada llena de perlita, llamado aislamiento primario, una membrana flexible similar a la primera, llamada membrana secundaria, y una segunda capa de cajas de madera rellenas también de perlita que está en contacto con el casco interior, llamado aislamiento secundario. Este sistema de doble membrana cumple con el requisito de las regulaciones pertinentes sobre el sistema de contención de carga que proporciona dos barreras diferentes para evitar fugas de carga. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

El revestimiento del tanque consta de dos capas idénticas de membrana y aislamiento, de modo que en el caso de que se produzca una fuga en la barrera primaria, la carga estará contenida indefinidamente por la barrera secundaria. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

La función de las membranas es prevenir las fugas, mientras que el aislamiento soporta y transmite las cargas, además de minimizar el intercambio de calor entre la carga y el casco interior. La membrana secundaria, intercalada entre las dos capas de aislamiento, no sólo proporciona una barrera de seguridad entre los dos aislamientos, sino que también reduce las corrientes convectivas dentro del propio aislamiento. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

Los espacios de aislamiento primario están bajo una atmósfera de nitrógeno a una presión controlada. La presión del espacio primario nunca debe exceder la presión del tanque de carga, para evitar que la membrana primaria se colapse hacia adentro. Para evitar la contaminación del espacio de aislamiento secundario, en caso de fugas desde el tanque al espacio de aislamiento primario, es recomendable mantener la presión del espacio de aislamiento primario a 0,2 kPa por encima de la presión del espacio del aislamiento secundario. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

### 1.11.1. CONSTRUCCIÓN DEL AISLAMIENTO Y LAS BARRERAS

Las barreras primaria y secundaria son idénticas y se fabrican a partir de Invar criogénico. El Invar criogénico es una aleación metálica de acero al níquel con un coeficiente de expansión térmica muy bajo y de un grosor de 0,7 mm que tiene la capacidad de soportar temperaturas criogénicas. La composición del material Invar es la siguiente (Knutsen OAS Shipping, 2009), (Gaz Transport & Technigaz, 2017):

- Ni: 35 – 36,5%
- C: <0,04%
- Si: <0,25%
- Mn: <0,2 hasta 0,4%
- S: <0,003%
- P: <0,008%
- S + P: <0,02%
- Fe: Restante

El coeficiente de dilatación térmica es lo suficientemente bajo como para permitir el uso de láminas planas en lugar de onduladas. Toda la superficie de la membrana está así en contacto con el aislamiento de soporte, de manera que la carga que el sistema es capaz de transportar está limitada solamente por la capacidad portante del aislamiento. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

Los espacios de aislamiento primario y secundario se componen de cajas fabricadas de madera contrachapada y rellena de perlita expandida. Este sistema de aislamiento permite la libre circulación de nitrógeno, por lo que se puede realizar con facilidad la inertización de los espacios entre barreras sin ninguna dificultad. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

La perlita se obtiene a partir de una roca vítrea de origen volcánico que, cuando se calienta a una temperatura elevada, se transforma en bolas muy pequeñas. Estas bolas tienen unos diámetros que miden entre unas pocas centésimas y unas pocas

décimas de milímetro. Para obtener perlita, se debe calentar el acero por encima de la temperatura de austenización ( $727+50^{\circ}\text{C}$ ) y dejar enfriar durante el tiempo necesario para evitar la formación de bainita. La estructura celular así obtenida del proceso da a la perlita expandida su ligereza y, por tanto, sus excelentes propiedades de aislamiento. La repelencia al agua de la perlita se incrementa mediante un tratamiento con silicio. (Knutsen OAS Shipping, 2009).

El aislamiento está distribuido sobre el casco en dos áreas específicas (Knutsen OAS Shipping, 2009):

- Área reforzada localizada en la parte superior del tanque que cubre aproximadamente el 30% de la altura total del tanque. Esta área está equipada con cajas reforzadas.
- Área no reforzada que cubre aproximadamente hasta el 70% de la altura total del tanque, incluyendo el fondo del tanque. Esta área está equipada con cajas normales.

Se puede ver cómo se distribuyen las dos áreas diferentes (reforzada y no reforzada) en el interior del tanque en la Figura 21.

Las cajas que componen el aislamiento primario y secundario en el área reforzada se construyen con rigidizadores internos más gruesos para resistir los impactos que pueda producir el sloshing de líquido dentro de los tanques. Las cajas reforzadas principales tienen dos cubiertas de madera contrachapada de 12 mm de espesor sujetas con grapas. Las medidas de estas cajas están estandarizadas y son de 1 metro de ancho por 1,2 metros de largo (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

El aislamiento secundario es de 300 mm de espesor, mientras que el aislamiento primario es de 230 mm (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

Las dimensiones del aislamiento están diseñadas para que aseguren (Knutsen OAS Shipping, 2009):

- El flujo de calor en el tanque está limitado en un grado que la velocidad de evaporación es aproximadamente del 0,15% del total de la carga por día.
- El acero inoxidable del casco interior no alcance una temperatura por debajo de su valor de diseño mínimo, incluso en el caso de fallo de la barrera primaria.

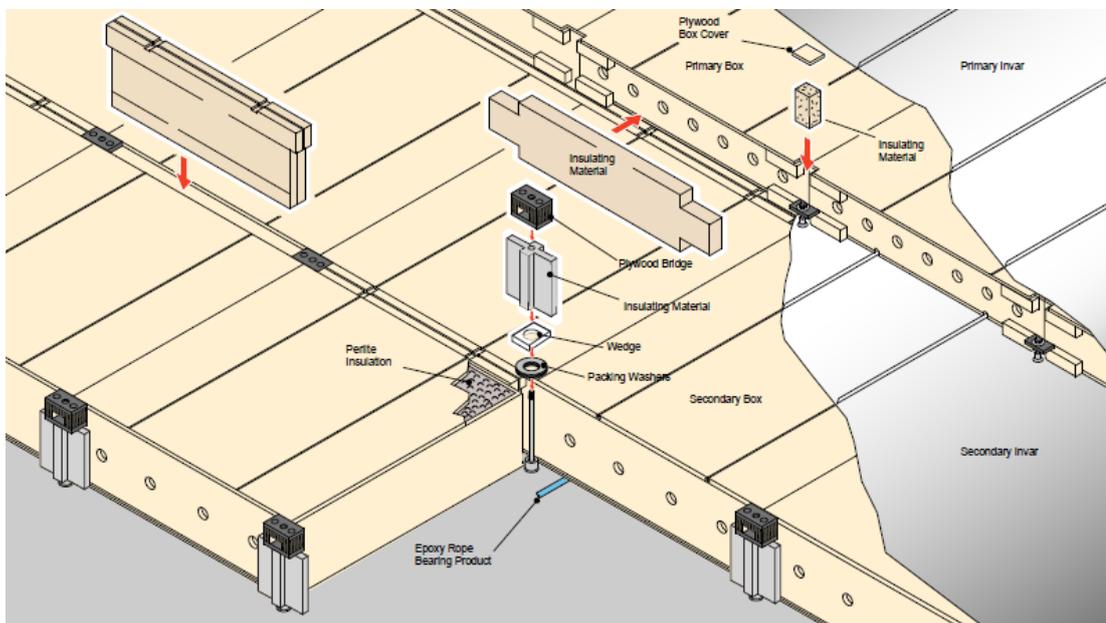


Figura 22. Construcción del sistema de contención Gaz Transport No.96E.2 Evolution System. Fuente: (Knutsen OAS Shipping, 2009).

### 1.12. SISTEMA ALTERNATIVO DE CONTENCIÓN DE LA CARGA

El principal motivo por el que se ha elegido estudiar el aislamiento No.96E.2 Evolution System de la empresa Gaz Transport & Technigaz y el sistema Mark V de la misma empresa es la diferencia de evaporación natural que hay entre los dos sistemas. El sistema actual del buque permite un flujo de calor teórico a su través que produce una evaporación natural de gas aproximada del 0,15% del total de la carga por día, lo que supone una vaporización de 202,86 m<sup>3</sup> de líquido al día en nuestro buque, el cual tiene 135.240 m<sup>3</sup> de capacidad de carga. Mientras que el sistema Mark V, cuyas características de aislamiento están más desarrolladas que el recubrimiento actual del buque permite una evaporación natural teórica menor del 0.07% del total de la carga, que supone una vaporización de menos de 94,67 m<sup>3</sup> al día, menos de la mitad que el sistema actual.

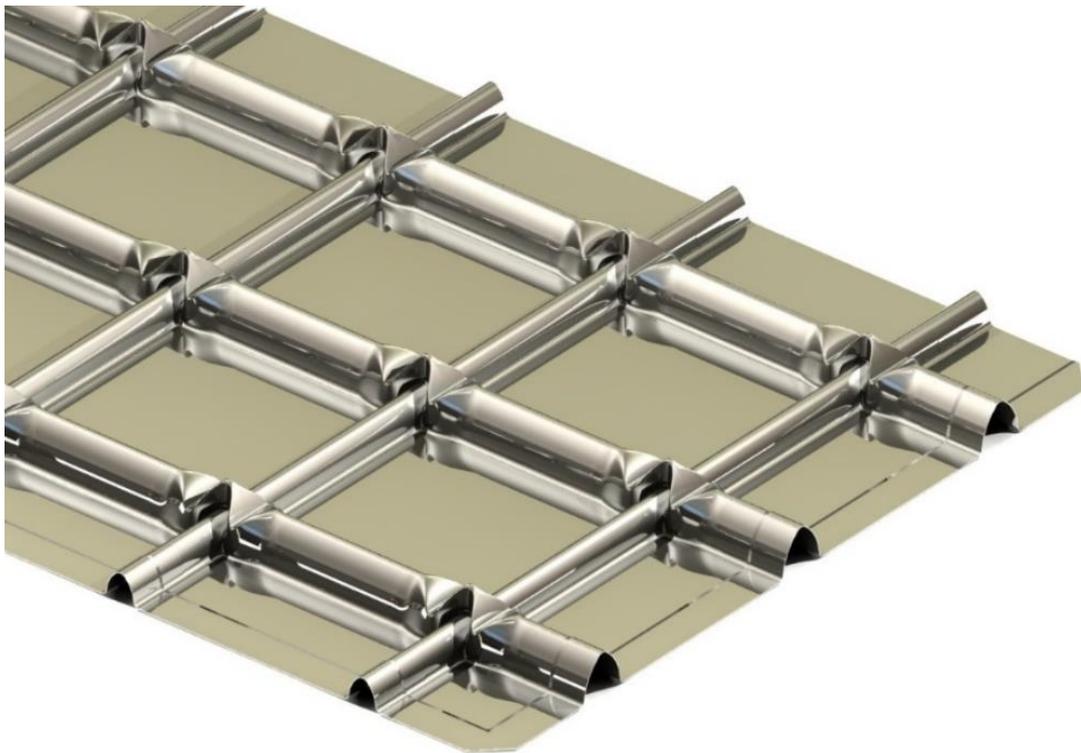
Este cambio refleja una disminución teórica de las mermas de la carga de 108,2 m<sup>3</sup> por día en viajes en carga.

El sistema de membrana Mark V es un revestimiento criogénico sustentado directamente por el casco interior del buque. Este revestimiento está compuesto de membranas metálicas (primarias y secundarias) combinadas con paneles aislantes prefabricados. Este nuevo método de aislamiento incluye una innovadora membrana secundaria ondulada de aleación de acero al níquel y ofrece una mejora garantizada de la evaporación natural diaria, que como he dicho anteriormente, resultará menor del 0,07%. Éste es un sistema de contención de carga que se adapta a todos los tamaños de buques destinados al transporte de gas licuado (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

### 1.12.1. DESCRIPCIÓN GENERAL

#### **Membrana primaria de acero inoxidable**

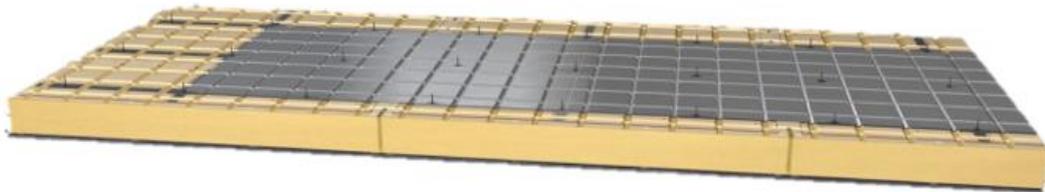
La membrana primaria del sistema Mark V es idéntica a la membrana primaria del sistema Mark III y está fabricada de acero inoxidable corrugado 304 L, cuyo grosor es de 1,2 mm. Esta membrana es la que contiene la carga de gas natural licuado y está directamente soportada y fijada al sistema de aislamiento. Las medidas de las chapas de corrugado están estandarizadas y son de 3 metros de largo por 1 metro de ancho. Este tipo de membrana se pliega para crear las corrugaciones que vemos en la Figura 23. El nudo es la intersección de las corrugaciones. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).



*Figura 23. Membrana primaria corrugada de acero inoxidable Mark V. Fuente: (Gaz Transport & Technigaz, 2017).*

### **Membrana secundaria de Invar**

La membrana secundaria está fabricada de acero al níquel corrugado con una cantidad de níquel del 36% y tiene un espesor de 0,7 mm. Esta membrana garantiza una estanqueidad total de líquidos y gases en caso de daño de la propia membrana primaria. Se coloca en los paneles de aislamiento secundario con las corrugaciones orientadas hacia el casco (Gaz Transport & Technigaz, 2017).



*Figura 24. Membrana secundaria de Invar y aislamiento secundario, sistema Mark V. Fuente: (Gaz Transport & Technigaz, 2017).*

### **Aislamiento**

El aislamiento consiste en sistemas de carga (aislamientos primarios y secundarios) hechos de paneles prefabricados en espuma de poliuretano reforzado. Los paneles primarios se sitúan entre las dos membranas, mientras que los secundarios se fijan al casco interno por medio de cuerdas de resina que tienen un doble propósito: anclar el aislamiento y extender las cargas uniformemente. Los paneles primarios están unidos a los secundarios con sistemas de anclaje mecánicos. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

En la Figura 25 podemos ver el diseño de construcción del sistema de aislamiento Mark V. En la parte superior se puede apreciar la membrana primaria de acero inoxidable. Justo debajo, entre la membrana primaria y la secundaria se ve el aislamiento primario, seguido de la membrana secundaria de Invar, apreciable en la Figura 24. Por último, en la parte más baja nos encontramos el aislamiento secundario, el cual irá fijado a la parte interior del casco del buque.



*Figura 25. Diseño del sistema de aislamiento Mark V. Fuente: (Gaz Transport & Technigaz, 2017).*

#### 1.12.2. VENTAJAS DEL SISTEMA MARK V

##### **Concepto de estrés nulo**

El patrón de ondulación ortogonal permite a ambas membranas, tanto primaria como secundaria, acomodar cualquier esfuerzo térmico o de desviación del casco y trabajar bajo el límite de fatiga, proporcionando así una vida útil excepcional. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

##### **Cargas despreciables en los bordes**

Debido a la baja tensión en ambas membranas, se pueden usar paneles de espuma prefabricados en las esquinas para anclar ambas membranas al casco y minimizar así el flujo térmico. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

### **Alta resistencia**

La espuma de poliuretano reforzada proporciona a los paneles elevadas propiedades mecánicas. La alta densidad de la espuma y de la madera contrachapada que cubren ambos lados de los paneles, para una distribución uniforme de la carga, permiten que el aislamiento resista altas presiones de impacto y absorba la energía resultante del movimiento del líquido. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

### **Concepto modular**

Este sistema modular requiere componentes prefabricados estandarizados que se pueden acomodar a cualquier forma y capacidad de tanques y están diseñados para técnicas de producción en masa y fácil montaje. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

### **Seguridad**

Los dos espacios de aislamiento independientes poseen una atmósfera de nitrógeno permanente. La integridad de ambas membranas está monitorizada constantemente mediante la detección de gases hidrocarburos en el nitrógeno. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

### **Bajo índice de boil-off**

La cantidad de boil-off natural generado se reduce aumentando el espesor del aislamiento (en este caso se encuentra por encima de 480 mm, una cifra bastante superior a los 270 mm de espesor de los que se componía el sistema Mark III), disminuyendo el porcentaje de evaporación por debajo del 0,07% del volumen total de carga del buque por día. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

## **Fiabilidad**

Todos los materiales utilizados en el sistema de aislamiento Mark V han sido probados en navegación mediante otro tipo de tecnologías de la empresa Gaz Transport y Technigaz. El sistema Mark V ha obtenido la aprobación general de las principales sociedades de clasificación. (Gaz Transport & Technigaz, 2017).

### **1.13. NORMATIVA**

La normativa que se ha seguido para la realización de este proyecto es la siguiente:

1. 2009, IMO, MSC.285(86). INTERIM GUIDELINES ON SAFETY FOR NATURAL GAS-FUELLED ENGINE INSTALLATIONS IN SHIPS.

Además de eso, el Código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel (Código CIG) es el encargado de regular la temática relacionada con el sector de los buques que transporten gases licuados a granel para garantizar la seguridad de la tripulación, del buque y de la carga, así como también del medioambiente. Este código establece criterios de seguridad durante su construcción en relación con la peligrosidad del producto transportado, considerando así la robustez que necesita dicho buque para soportar la carga en condiciones normales. (Larrucea, 2017).

Dicho código consta de 19 capítulos, además de 5 apéndices y es aplicable a todo buque que transporte gas licuado enumerado en el capítulo 19, independientemente de sus dimensiones.

El código CIG vigente actualmente fue redactado a principios de los años '70, sucediendo al Código para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel (CG) y fue dotado de carácter obligatorio mediante la resolución MSC.6(48) en junio de 1983, habiendo sido reeditado en 1993 y adquiriendo enmiendas durante todo este tiempo hasta volver a ser editado en 2016. (Larrucea, 2017).

## 2. CÁLCULOS

## 2.1. INTRODUCCIÓN

En este apartado del proyecto se procederá a realizar el análisis y cálculo del rendimiento térmico de la planta, de la potencia producida con la evaporación natural de gas y la comparación de estos parámetros para los dos sistemas de aislamiento.

Como punto de partida, se describirán los elementos que forman parte de la planta de vapor, además del ciclo Rankine en el que está basado esta planta, así como el diagrama termodinámico de la propia planta.

## 2.2. ELEMENTOS DE LA PLANTA DE VAPOR

### - *Calderas*

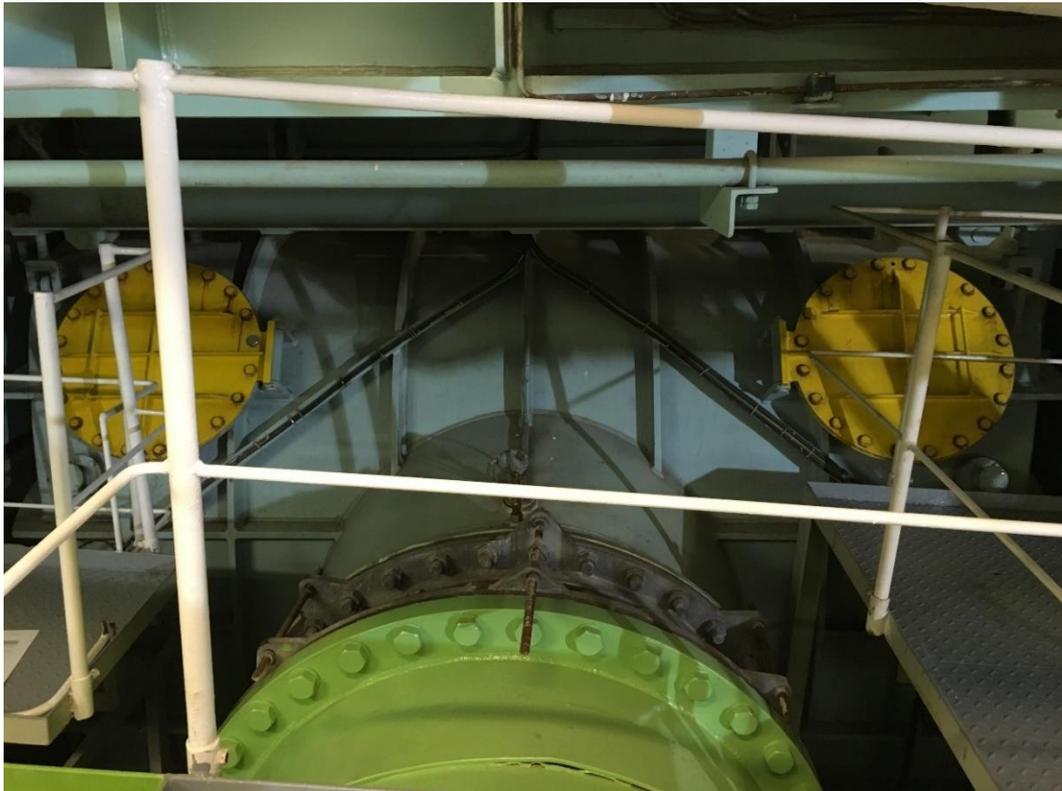
Dos calderas principales generan vapor sobrecalentado necesario que es enviado a la turbina, turbobombas y turboalternadores. Parte de este vapor sobrecalentado se hace pasar por los desrecalentadores internos de la caldera para servicios auxiliares. El vapor sobrecalentado producido tiene una presión de 61,8 kg/cm<sup>2</sup>. En el sistema de vapor nos encontramos con válvulas reductoras, que disminuyen la presión de ese vapor hasta 16 kg/cm<sup>2</sup>, 9 kg/cm<sup>2</sup>, 2,7 kg/cm<sup>2</sup> y 0,1 kg/cm<sup>2</sup> para servicios auxiliares (calefacción de tanques, eyectores de vacío del condensador principal, generadores de agua destilada, etc.).

### - *Turbinas de propulsión*

El buque dispone de una turbina de alta presión, una turbina de baja presión y una turbina de ciar destinadas a propulsión. Mostradas anteriormente en el apartado 1.9.2.

*- Condensador principal*

El condensador principal es el elemento de la planta que condensa, como su propio nombre indica, los vapores de exhaustación de la turbina principal, los turbogeneradores y el vapor desrecalentado de dumpeo, ya mencionado anteriormente en el apartado 1.9.2. El vacío de diseño del condensador es igual a 722 mmHg a una temperatura del agua de mar de 24°C. Está situado debajo de la plataforma de las turbinas de alta y baja presión.



*Figura 26. Entrada de agua salada y tapas de inspección del condensador principal.*

*Fuente: (Propia).*

*- Turbobombas de alimentación de la caldera*

Dos turbobombas que consumen vapor a 60 kg/cm<sup>2</sup> y 510°C, cuyo vapor de exhaustación a una presión de 2,7 kg/cm<sup>2</sup> se utiliza como suministro del vapor auxiliar. Estas turbinas que accionan las bombas de alimentación de las calderas son turbinas de contrapresión, puesto que sus últimas etapas tienen una presión superior a la atmosférica. Mostradas anteriormente en el apartado 1.9.2.

*- Turboalternadores*

Dos turbogeneradores que son accionados mediante vapor a  $59,8 \text{ kg/cm}^2$  y  $510^\circ\text{C}$  y que generan una potencia de 3.150 kW, cuyo vapor de exhaustación es enviado directamente al condensador principal. Las turbinas de los turboalternadores son turbinas de condensación. Mostrados anteriormente en el apartado 1.9.2.

*- Condensador atmosférico*

Se trata de un condensador que se encuentra a una presión atmosférica y que puede ser utilizado en caso de que el condensador principal se encuentre fuera de servicio.



*Figura 27. Condensador atmosférico. Fuente: (Propia).*

*- Tanque atmosférico de drenajes*

Este tanque sirve de colector de retornos de condensado de algunos de los servicios auxiliares, como puede ser el sistema de calefacción de los tanques de fuel-oil o aceite. El tanque atmosférico de drenajes está dotado de un tanque de observación que permite ver si existe alguna contaminación del agua de condensado.

*- Generador de agua destilada refrigerado mediante agua de condensado*

Cuando se encuentra en funcionamiento hace la función del primer calentador del agua de condensado. El vapor de agua se condensa intercambiando energía calorífica con el agua de condensado procedente del condensador principal impulsado por las bombas de condensado y hace que se caliente dicha agua.



*Figura 28. Generador de agua destilada con condensación por agua de condensado.*

*Fuente: (Propia).*

- *Condensador de vahos*

El condensador de vahos es el segundo calentador del agua de condensado que nos encontramos cuando el generador de agua destilada está en funcionamiento. En él se produce el intercambio de calor entre el agua de condensado y el vapor de eyectores del condensador principal que mantienen el vacío.



*Figura 29. "Gland condenser" o condensador de vahos. Fuente: (Propia).*

*- Calentador de baja presión*

El calentador de baja presión es el tercer calentador de agua de condensado. Se alimenta del vapor de la sangría de baja presión (0,1 kg/cm<sup>2</sup>) y se trata de un intercambiador de calor tubular.



*Figura 30. "L.P. Heater" o calentador de baja presión. Fuente: (Propia).*

### - Desaireador

Es el último calentador que nos encontramos en el circuito de agua de condensado. El vapor utilizado para calentar el agua de condensado en el desaireador proviene de la segunda sangría de la turbina ( $2,7 \text{ kg/cm}^2$ ), así como de la exhaustación de las turbobombas de alimentación de la caldera. En este tanque se elimina el oxígeno disuelto, así como otros gases que pueda contener el agua de alimentación. Otra función del desaireador es recoger todos los retornos de condensado para enviarlos a las calderas de nuevo.



Figura 31. Desaireador. Fuente: (Propia).

### - Tanques de agua destilada

En estos tanques se almacena el agua destilada utilizada para el sistema de alimentación de las calderas. El buque dispone de tres tanques de agua destilada con una capacidad total de  $560 \text{ m}^3$  al 100% de su capacidad.

- *Válvulas make up y spill*

Son las encargadas de mantener el nivel de agua de las calderas entre los niveles máximo y mínimo. La válvula make up deja pasar agua a su través para rellenar el circuito, mientras que la válvula spill saca agua del sistema.



*Figura 32. Válvula spill con su by-pass correspondiente y sus válvulas de incomunicación. Fuente: (Propia).*



*Figura 33. Válvula make up con válvulas de incomunicación correspondientes.*

*Fuente: (Propia).*

### 2.3. CICLO RANKINE

La planta de propulsión del buque Sestao Knutsen está basada en el ciclo Rankine de vapor. Este ciclo termodinámico se fundamenta en la evaporación y condensación de un fluido, en este caso, el agua.

El agua de alimentación de la caldera es transformada en vapor mediante la absorción de energía calorífica procedente de la quema de un combustible en el interior del hogar. Ese vapor sobrecalentado se envía a la turbina, con el fin de transformar la energía cinética y de presión del propio vapor en energía mecánica. El vapor con poca energía que hay a la salida de la turbina se envía al condensador principal, donde se condensa. Una bomba aumenta la presión del líquido para introducirlo en las calderas y volver a comenzar el ciclo.

#### 2.3.1. DIAGRAMA T-S

Dentro del diagrama T-S podemos diferenciar 4 puntos principales:

- 1- Líquido saturado a baja presión
- 2- Líquido subenfriado
- 3- Vapor sobrecalentado a alta presión
- 4- Vapor húmedo a baja presión

Los puntos a y b indican los estados de líquido saturado y vapor saturado.

- a- Líquido saturado a alta presión
- b- Vapor saturado a alta presión

El ciclo Rankine viene definido por cuatro procesos, dos isoentrópicos y dos isobáricos:

1. 1-2: Compresión isoentrópica del fluido en fase líquida a través de la bomba. El líquido alcanza la presión existente en el interior de la caldera.
2. 2-3: Calentamiento del líquido hasta la temperatura de saturación, vaporización del fluido y sobrecalentamiento del vapor en el interior de la caldera.
3. 3-4: Expansión isoentrópica del vapor en la turbina desde la presión de trabajo de la caldera hasta la presión del condensador. En este proceso es donde se aprovecha la energía cinética y de presión del vapor para convertirlo en trabajo mecánico transmitido al eje de la turbina.
4. 4-1: Condensación isobárica del vapor en el condensador principal por contacto indirecto con el agua de mar mediante un intercambiador de calor de superficie.

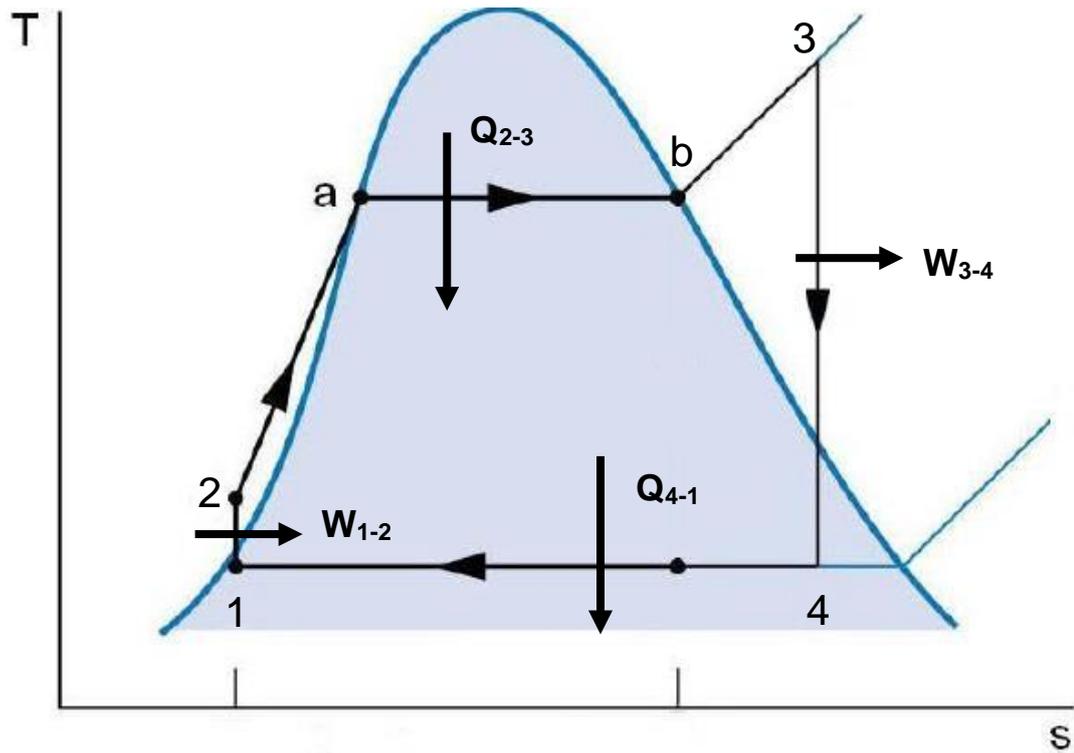


Figura 34. Diagrama T-S. Fuente: Adaptación de (Renedo, 2017).

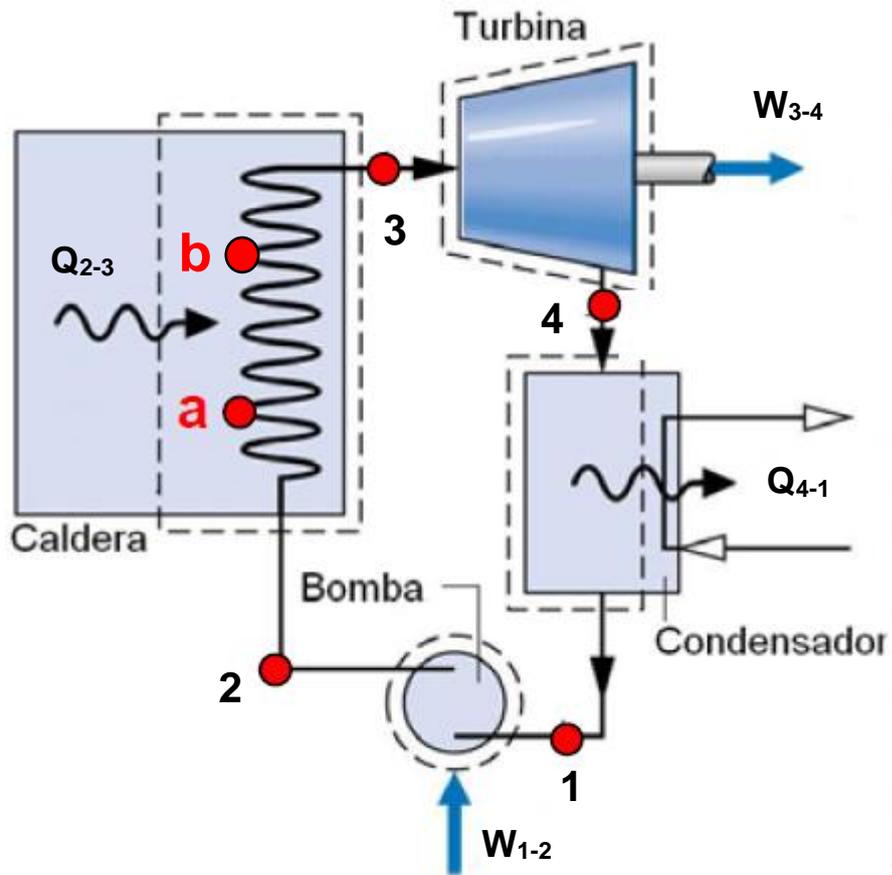


Figura 35. Esquema ciclo de vapor. Fuente: Adaptación de (Renedo, 2017).

## 2.4. RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA PLANTA

El rendimiento es un concepto asociado al trabajo realizado por las máquinas.

Obtener un buen rendimiento supone obtener buenos y esperados resultados con poco trabajo. En el caso que nos ocupa, se trata de averiguar si para un mismo trabajo con dos instalaciones diferentes es posible conseguir un aumento de rendimiento.

Hablando del rendimiento total de la planta, y suponiendo un cambio de aislamiento de los tanques de carga, se espera una variación del rendimiento térmico de la instalación, puesto que la cantidad de vapor dumpeado o enviado al condensador será menor. Se reducirá la cantidad de vapor generado por las calderas, lo que disminuirá el calor aportado por las propias calderas y, por consiguiente, esa variación del rendimiento se presume que sea positiva.

Consideramos el rendimiento térmico del ciclo mediante la siguiente función:

$$\eta_t = \frac{W_{\text{útil}}}{Q_{\text{aportado}}}$$

Se denomina trabajo útil al trabajo mecánico de la turbina, así como el de los turbogeneradores, los cuales están siendo accionados por el vapor generado por las calderas. Se entiende como calor aportado o energía aportada al ciclo a la potencia térmica de ambas calderas. Así obtenemos la relación entre el consumo energético del sistema de propulsión y generación de energía eléctrica y la potencia total aportada por las calderas.

La presión de trabajo de las calderas es de 61,8 kg/cm<sup>2</sup> y la temperatura del vapor sobrecalentado es 515°C.

A continuación, se describen las variables utilizadas en el desarrollo de los cálculos:

$m_c = \text{flujo másico de vapor producido por las calderas}$

$\Delta h = (h_3 - h_2) = \text{energía absorbida por el vapor en la caldera}$

$Q_{\text{calderas}} = \text{Potencia térmica producida por las calderas}$

$Q_{aportado} = \text{Potencia térmica aportada a la caldera}$

$W_{\text{útil}} = \text{Potencia mecánica total}$

$W_{\text{turbina}} = \text{Potencia mecánica generada por la turbina}$

$W_{\text{turboalternador}} = \text{Potencia mecánica generada por el}$   
 $\text{turboalternador}$

$P_2 = \text{Presión a la entrada de las calderas}$

$T_2 = \text{Temperatura a la entrada de las calderas}$

$h_2 = \text{entalpía del agua subenfriada a la entrada de las calderas}$

$P_3 = \text{Presión a la salida de las calderas}$

$T_3 = \text{Temperatura a la salida de las calderas}$

$h_3 = \text{Entalpía del vapor sobrecalentado a la salida}$   
 $\text{de las calderas}$

Se dispone de los siguientes datos procedentes del Kyma y de diferentes manuales:

$$\eta_{\text{calderas}} = 0,9 \text{ (90\%)}$$

$$m_c = 100.000 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$P_2 = 84 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 84 \text{ bar}$$

$$T_2 = 140 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$P_3 = 61,8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} = 61,8 \text{ bar}$$

$$T_3 = 515 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$W_{\text{turbina}} = 28.000 \text{ kW}$$

$$W_{\text{turboalternador}} = 3.150 \text{ kW}$$

$$m_c = 100.000 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1h}{3600s} = 27,78 \frac{kg}{s}$$

$$PCI_{gas\ natural} = 13.082 \frac{kcal}{kg}$$

$$\rho_{gas\ natural} = 0,743 \frac{kg}{m^3} = 0,743 \frac{g}{l}$$

$$Q_{calderas} = m_c \cdot \Delta h = 27,78 \frac{kg}{s} \cdot (3.455,73 - 594,37) \frac{kJ}{kg}$$
$$= 79.488,58 \text{ kW}$$

$$Q_{aportado} = \frac{Q_{calderas}}{\eta_{calderas}} = \frac{79.488,58 \text{ kW}}{0,9} = 88.320,6 \text{ kW}$$

$$W_{\acute{u}til} = W_{turbina} + W_{turboalternador} = 28.000 + 3.150$$
$$= 31.150 \text{ kW}$$

$$\eta_{t\acute{e}rmico} = \frac{W_{\acute{u}til}}{Q_{aportado}} = \frac{31.150 \text{ kW}}{88.320,6 \text{ kW}} \cdot 100 = 35,27 \%$$

## 2.5. CÁLCULO DE LA POTENCIA PRODUCIDA CON AMBOS SISTEMAS DE AISLAMIENTO

En este apartado se va a realizar un cálculo de la potencia producida con la cantidad de boil-off natural generado por los dos sistemas de aislamiento (No.96E.2 Evolution System y Mark V).

La evaporación natural del sistema No.96E.2 Evolution System correspondía al 0,15% de la carga total del buque. Suponiendo un viaje en carga de nuestro buque Sestao Knutsen, cuya capacidad es de 138.000 m<sup>3</sup> y teniendo en cuenta que los tanques de carga se llenan un 98% del total por medidas de seguridad, procederemos a realizar los cálculos pertinentes para los dos sistemas:

### - Sistema No.96E.2 Evolution System

$$V_c = 138.000 \cdot 0,98 = 135.240 \text{ m}^3$$

$$BOG_1 = 0,15\% \cdot 135.240 = 202,86 \text{ m}^3 \text{ de líquido}$$

$$Gas \text{ de consumo}_1 = 202,86 \cdot 600 = 121.716 \text{ m}^3 \text{ de gas diarios}$$

$$121.716 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{0,743 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 90.434,99 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$90.434,99 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{86.400 \text{ s}} \cdot \frac{13.082 \text{ kcal}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{4,18 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} =$$

$$\boxed{Potencia \text{ disponible}_1 = 57.236,51 \text{ kW}}$$

- Sistema Mark V

$$V_c = 135.240 \text{ m}^3$$

$$BOG_2 = 0,07\% \cdot 135.240 = 94,67 \text{ m}^3$$

*Gas de consumo*<sub>2</sub> = 94,67 · 600 = 56.802 m<sup>3</sup> de gas diarios

$$56.802 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{0,743 \text{ kg}}{1 \text{ m}^3} = 42.203,89 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$42.202,99 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{86.400 \text{ s}} \cdot \frac{13.082 \text{ kcal}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{4,18 \text{ kJ}}{1 \text{ kcal}} =$$

|  |
|--|
| $Potencia disponible_2 = 26.710,93 \text{ kW}$ |
|--|

La potencia producida con el sistema No.96 Evolution System es de 57.236,51 kW, mientras que la producida con el sistema Mark V es de 26.710,93 kW.

La potencia total requerida para propulsión y generación de energía eléctrica alcanza un máximo de 31.150 kW, es decir, es mayor que la producida con el sistema de aislamiento MARK V de manera natural, pero eso no supone ningún problema, dado que se puede generar esa cantidad necesaria de gas mediante el "Forcing Vaporizer"<sup>9</sup> a través de los "Low Duty Compressors"<sup>10</sup> y los "Gas Heaters"<sup>11</sup> dispuestos en el buque, cuya instalación se localiza en el Anexo II y Anexo III. El Forcing Vaporizer es un intercambiador de calor entre gas natural licuado suministrado por una "Stripping Pump"<sup>12</sup> (consume solamente 18 kW de potencia), y vapor a 9 kg/cm<sup>2</sup> y 190°C procedente del sistema de vapor auxiliar desrecalentado, mientras que el motor eléctrico que acciona el L.D Compressor consume una potencia de 280 kW.

La potencia necesaria para generar gas natural forzado alcanza los 298 kW, por lo que no será necesario poner en marcha el segundo turboalternador en caso de que haya que vaporizar gas natural mediante el Forcing Vaporizer.

A continuación, se detallan los cálculos del gas natural necesario para generar la potencia requerida para propulsión, así como la diferencia de gas ahorrado con el nuevo sistema de aislamiento.

---

<sup>9</sup> Forcing Vaporizer o vaporizador forzado: intercambiador de calor de superficie entre vapor y gas natural licuado.

<sup>10</sup> Low duty Compressors o compresores de gas de baja carga: comprimen el boil-off natural o forzado para suministrarlo a las calderas como combustible a una presión suficiente.

<sup>11</sup> Calentadores de gas o gas heaters: regulan la temperatura del boil-off natural y forzado impulsado por los compresores de gas de baja carga hacia la máquina.

<sup>12</sup> Stripping pump o bomba de reachique: suministra gas natural licuado al forcing Vaporizer.

- Gas consumido para la potencia requerida

$$31.150 \text{ kW} = \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \cdot \frac{86.400 \text{ s}}{1 \text{ día}} \cdot \frac{1 \text{ kcal}}{4,18 \text{ kJ}} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{13.082 \text{ kcal}} = 49.217,7 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

$$49.217,7 \frac{\text{kg}}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ m}^3}{0,743 \text{ kg}} = 66.241,86 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

- El ahorro de gas natural que se va a producir con el cambio propuesto del aislamiento es la diferencia entre la evaporación natural que se producía con el sistema No.96E.2 Evolution System y la cantidad de gas natural consumido para la potencia requerida actual, que se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

- Ahorro de gas natural diario con el nuevo aislamiento

**Gas natural ahorrado =**

*Gas de consumo<sub>1</sub> – Gas consumido para la potencia*

*requerida = 121.716 – 66.241,86 =*

**= 55.474,14  $\frac{\text{m}^3}{\text{día}}$  de gas natural ahorrado**

Dando por hecho que los cálculos están realizados para los viajes en carga del buque y estimando que dicho buque efectúa la mitad de los días de navegación en carga y la otra mitad en lastre, podemos estimar la cantidad de gas natural ahorrado durante todo un año mediante la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \text{Ahorro anual de gas natural} &= 55.474,14 \cdot \frac{365}{2} = \\ &= \mathbf{10.124.030,6 \text{ m}^3 \text{ de gas}} \end{aligned}$$

## 2.6. AUMENTO DEL RENDIMIENTO TÉRMICO DE LA PLANTA

Con el cambio del aislamiento de los tanques, además de conseguir una disminución de las mermas de carga durante los viajes, se puede demostrar un aumento del rendimiento térmico de la planta.

Según datos del "Kyma", el programa de cálculo energético del buque Sestao Knutsen, durante un viaje normal en carga, de las dos válvulas de dumpeo de vapor al condensador, la válvula número 1 se encontraba en torno al 20% de apertura. Las dos válvulas de dumpeo abiertas al 100 % son capaces de enviar al condensador el 60% del vapor producido por las calderas en evaporación normal (100.000 kg/h). Dados estos datos, podremos calcular el aumento de rendimiento que se producirá con la disminución de la producción de vapor por parte de las calderas:

$$\textit{Apertura media de la válvula dumping 1} = 20\%$$

$$\textit{Capacidad de dumpeo de las dos válvulas} = 60\% \textit{ de } 100.000 \frac{\textit{kg}}{\textit{h}}$$

$$\textit{Cantidad de vapor dumpeado al condensador} =$$

$$= 0,2 \cdot \frac{0,6}{2} \cdot 100.000 \frac{\textit{kg}}{\textit{h}} = 6.000 \frac{\textit{kg}}{\textit{h}}$$

$$\textit{Vapor generado por las calderas con el cambio de aislamiento} =$$

$$= 100.000 - 6.000 = 94.000 \frac{\textit{kg}}{\textit{h}}$$

$$\mathbf{m'_c} = 94.000 \frac{\textit{kg}}{\textit{h}} \cdot \frac{1 \textit{ h}}{3.600 \textit{ s}} = \mathbf{26,11} \frac{\textit{kg}}{\textit{s}}$$

$$Q'_{calderas} = m'_c \cdot \Delta h = 26,11 \frac{kg}{s} \cdot (3455,73 - 594,37) \frac{kJ}{kg}$$

$$= 74.710,11 kW$$

$$Q'_{aportado} = \frac{Q'_{calderas}}{\eta_{calderas}} = \frac{74.710,11}{0,9} = 83.011,23 kW$$

$$\eta'_{térmico} = \frac{W_{útil}}{Q'_{aportado}} = \frac{31.150 kW}{83.011,23 kW} \cdot 100 = 37,53 \%$$

$$Aumento\ de\ rendimiento = \frac{\eta' - \eta}{\eta} \cdot 100$$

$$= \frac{37,53 - 35,27}{35,27} \cdot 100 = 6,41\%$$

| Sistemas de aislamiento   | Gas evaporado de manera natural ( $\frac{m^3}{día}$ ) | Potencia (kW) | Rendimiento térmico de la planta (%) |
|---------------------------|---|---------------|--------------------------------------|
| No.96E.2 Evolution System | 121.716   | 57.236,51     | 35,27                                |
| Mark V                    | 56.802  | 26.710,93     | 37,53                                |
| Necesario                 | 66.241,86   | 31.150        | —                                    |
| Diferencia                | -55.474,14  | -26.086,51    | 6,41                                 |

Tabla 7. Tabla comparativa energética de ambos sistemas. Fuente: (Propia).

### 3. CONCLUSIONES

La gestión de la carga en un gasero es uno de los temas más delicados a bordo de este tipo de buques. El continuo control de la presión en el interior de los tanques es el factor más importante para tener en cuenta, puesto que un aumento constante y acusado en la presión, concluirá en una situación de peligro. Si no se realiza acción alguna durante ese aumento de presión, la única solución será el venteo de gas a la atmósfera. Esto puede poner en riesgo la integridad del buque, así como de la tripulación, dado que pueden formarse bolsas de gas en espacios exentos de ventilación, pudiendo llegar a causar explosiones o incendios.

La alta permisibilidad de transferencia de calor a través del sistema instalado actualmente en el buque es la que genera esa cantidad extra de boil-off gas que debíamos enviar a las calderas para la gestión de la presión en los tanques. Según los resultados obtenidos en el proceso de cálculos, se puede concluir que el cambio de aislamiento sería una opción viable para un mayor control de la carga evaporada, hablando en términos energéticos.

Por otro lado, ese cambio de aislamiento propuesto para los tanques de carga tiene como resultado añadido, un aumento del rendimiento térmico de la planta de vapor. La disminución del consumo de gas como combustible en las calderas, hace que se reduzca también la producción de vapor, un vapor que estaba siendo desaprovechado. Como se ha visto en el apartado de cálculos, el rendimiento térmico del ciclo es función de la potencia mecánica de la turbina y turboalternador, así como de la potencia térmica aportada por las calderas, y esa potencia térmica, a su vez, es función de la diferencia de energía del fluido a la entrada y a la salida de las calderas, del rendimiento de las propias calderas y del flujo másico de vapor, que se puede disminuir considerablemente al no enviarlo directamente al condensador.

Teniendo en cuenta solamente factores energéticos y de consumo, y no factores económicos (precio de la instalación, coste de la estancia en dique, mano de obra, etc.), se puede concluir que el cambio propuesto puede resultar un beneficio para la gestión de la carga en el buque, así como una disminución de las mermas de la carga durante su transporte.

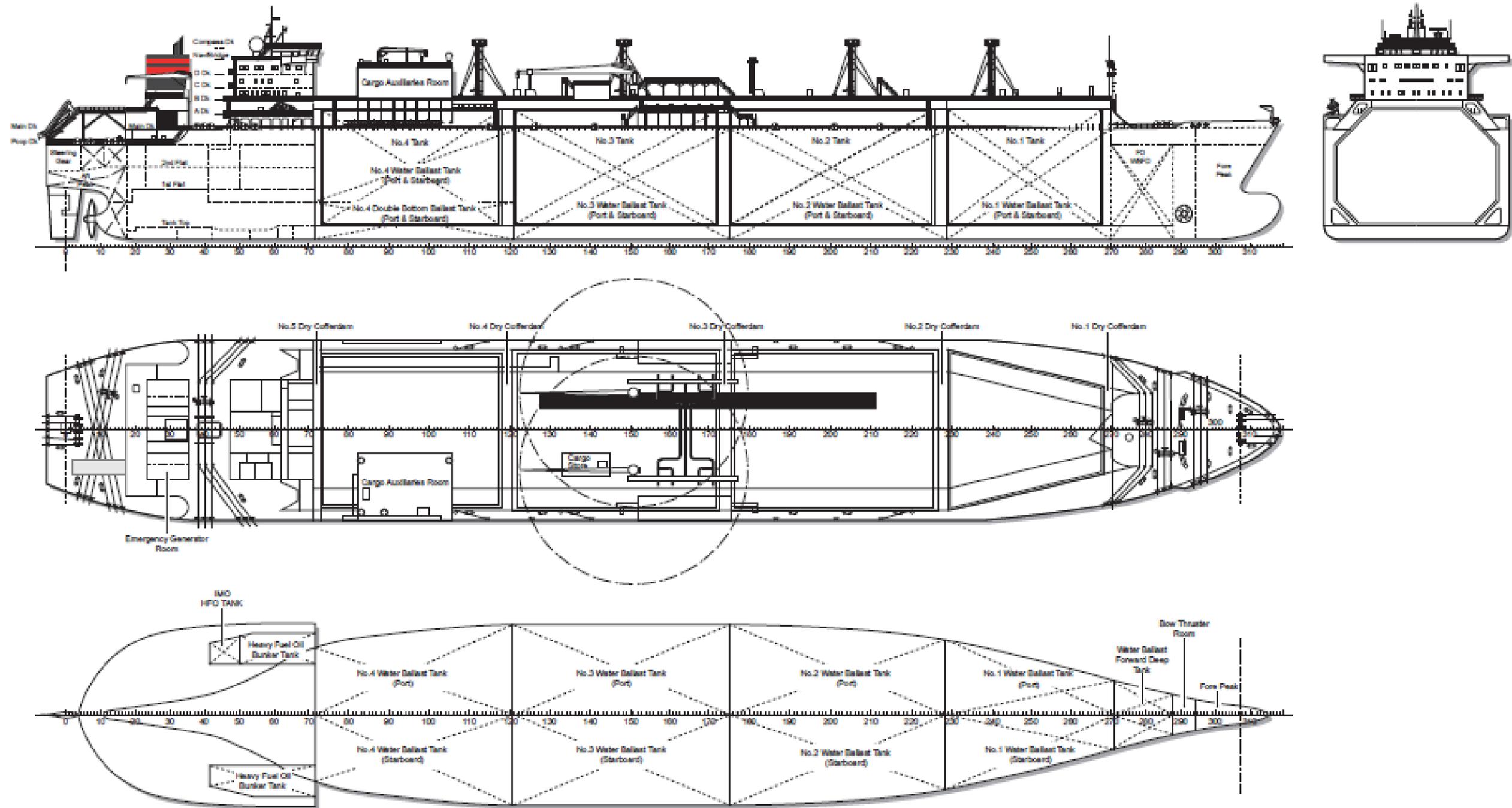
## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BMT Marine & Offshore Surveys. (2017). *General Insurance Association*. Obtenido de <http://www.gia.org.sg/pdfs/Industry/Marine/MKSS/Risk%20Assessment%20and%20Loss%20Prevention%20of%20LNG%20Carriers%20KS%20Wangl.pdf>
- Castellano, G. (2017). *FaMAF*. Obtenido de <http://www.famaf.unc.edu.ar/~gcas/termo1/clases/node54.html>
- García, R. (2017). *Ingeniero Marino*. Obtenido de <http://ingenieromarino.com/tipos-de-tanques-en-buques-gaseros-sistemas-de-contencion/>
- Gaz Transport & Technigaz. (2017). *GTT*. Obtenido de <http://www.gtt.fr/en>
- GIIGNL. (2017). *GNI CUSTODY TRANSFER MANUAL*.
- Global Security. (2017). *Global Security*. Obtenido de <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/tanker-lng-safety.htm>
- GNL. (2017). *LNG GNL*. Obtenido de <http://www.gnl.es/licuefaccion-gnl.php>
- Hidromec. (2017). Obtenido de <http://www.hidromecbombas.com.ar/wordpress/page/2/>
- Knutsen OAS Shipping. (2009). "Cargo Systems Operating Manual".
- Knutsen OAS Shipping. (2009). "Machinery Operating Manual".
- Kobelco Welding. (2017). *Kobelco*. Obtenido de <http://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/technical-highlight/vol02.html>
- La Naval. (2017). *La Naval*. Obtenido de <http://www.lanaval.es/es/descargas/reportajes-buques.html>
- Larrucea, J. R. (2017). *Research Gate*. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/33422604\\_Seguridad\\_de\\_buques\\_gaseros\\_Safety\\_at\\_Gas\\_Carriers](https://www.researchgate.net/publication/33422604_Seguridad_de_buques_gaseros_Safety_at_Gas_Carriers)
- Liquefied Gas Carrier. (2017). *Liquefied Gas Carrier*. Obtenido de <http://www.liquefiedgascarrier.com/index.html>

- Marine Insight. (2017). *Marine Insight*. Obtenido de <http://www.marineinsight.com/naval-architecture/understanding-design-liquefied-gas-carriers/>
- MasMinerMetal. (2017). *Mas Miner Metal Global Investment & Trade Company*. Obtenido de <http://masminermetal.com/es/glosario/54-gnl-gas-natural-licuado>
- Oliveira, J. A. (2017). *Va de Barcos*. Obtenido de <https://vadebarcos.net/2013/11/25/buques-transporte-de-Ing-gasero-metanero-sestao-knutsen/>
- OMI. (2016). *Código CIG: código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten gases licuados a granel*. Londres: OMI.
- Organización Internacional del Trabajo. (2017). *ILO*. Obtenido de [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_protect/---protrav/---safework/documents/normativeinstrument/wcms\\_218639.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/normativeinstrument/wcms_218639.pdf)
- Preciado, F. S. (2017). *Atmosferis*. Obtenido de <http://www.atmosferis.com/tipos-de-tanque-en-buques-gaseros-parte-1/>
- Renedo, C. J. (2017). *Página personal de Carlos J. Renedo Estébanez*. Obtenido de <http://personales.unican.es/renedoc/Trasperecias%20WEB/Trasp%20Termo%20y%20MF/00%20GRADOS/TD%2005.pdf>
- Rodríguez, C. (2017). *Tecnología Marina*. Obtenido de <http://tecnologia-maritima.blogspot.com.es/2012/11/buque-Ing-british-emerald.html>
- Unión Fenosa Gas S.A. (2017). *UFG*. Obtenido de <https://www.unionfenosagas.com/es/Clientes/CadenaGas>

## 5. ANEXOS

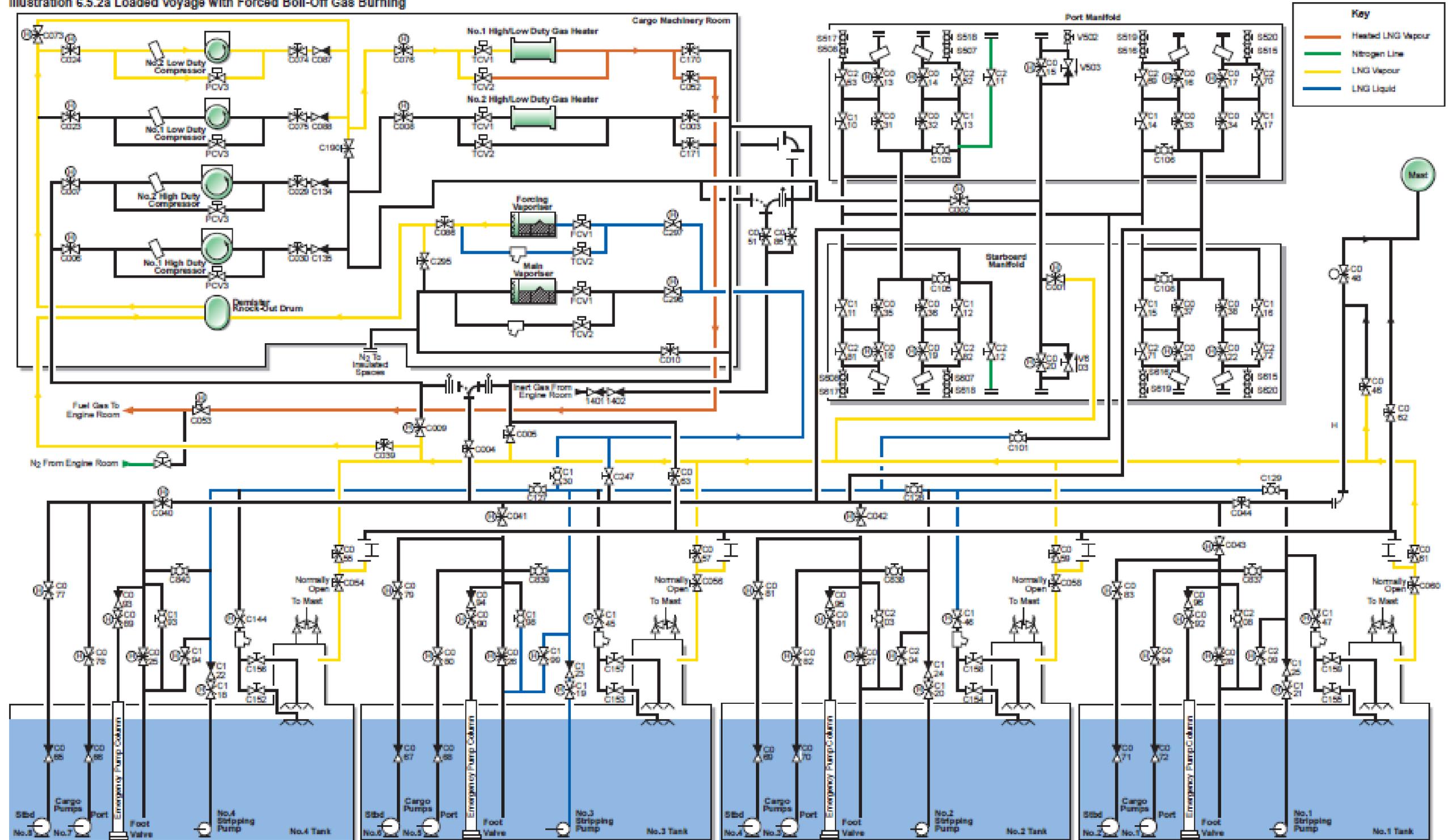
ANEXO I: DISPOSICIÓN GENERAL DEL BUQUE SESTAO KNUTSEN



(Knutsen OAS Shipping, 2009).

ANEXO II: VIAJE EN CARGA CONSUMIENDO GAS MEDIANTE VAPORIZACIÓN FORZADA A TRAVÉS DEL FORCING VAPORIZER

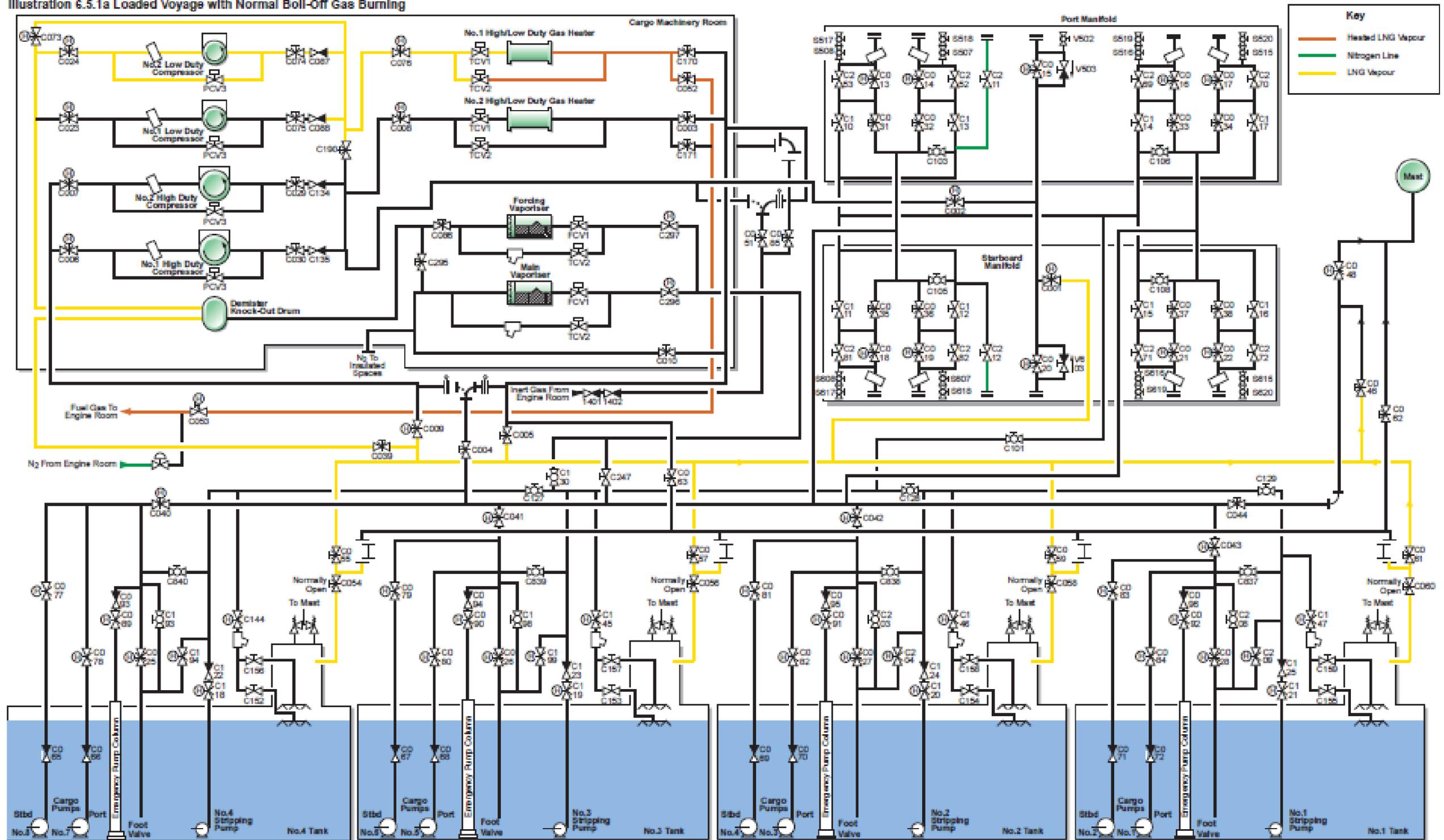
Illustration 6.5.2a Loaded Voyage with Forced Boil-Off Gas Burning



(Knutsen OAS Shipping, 2009).

ANEXO III: VIAJE EN CARGA CONSUMIENDO GAS MEDIANTE VAPORIZACIÓN NATURAL

Illustration 6.5.1a Loaded Voyage with Normal Boil-Off Gas Burning



(Knutsen OAS Shipping, 2009).

ANEXO IV: TABLAS DE LÍQUIDO SUBENFRIADO

| T  | v                  | u     | h     | s       |
|----|--------------------|-------|-------|---------|
| °C | m <sup>3</sup> /kg | kJ/kg | kJ/kg | kJ/kg·K |

| P= 75 bar = 7,5 MPa<br>(T <sub>sat</sub> =290,59°C) |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 20  | 0,9984 | 83,50  | 90,99  | 0,2950 |
| 40  | 1,0045 | 166,64 | 174,18 | 0,5696 |
| 80  | 1,0256 | 333,15 | 340,84 | 1,0704 |
| 100   | 1,0397 | 416,81 | 424,62 | 1,3011 |
| 140   | 1,0752 | 585,72 | 593,78 | 1,7317 |
| 180   | 1,1219 | 759,13 | 766,55 | 2,1308 |
| 220   | 1,1835 | 936,2  | 945,1  | 2,5083 |
| 260   | 1,2696 | 1124,4 | 1134,0 | 2,8763 |
| Sat   | 1,3677 | 1282,0 | 1292,2 | 3,1649 |

(Renedo, 2017).

| P= 100 bar = 10 MPa<br>(T <sub>sat</sub> =311,06°C) |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|
| 20  | 0,9972 | 83,36  | 93,33  | 0,2945 |
| 40  | 1,0034 | 166,35 | 176,38 | 0,5686 |
| 80  | 1,0245 | 332,59 | 342,83 | 1,0688 |
| 100   | 1,0385 | 416,12 | 426,50 | 1,2992 |
| 140   | 1,0737 | 584,68 | 595,42 | 1,7292 |
| 180   | 1,1199 | 756,65 | 767,84 | 2,1275 |
| 220   | 1,1805 | 934,1  | 945,9  | 2,5039 |
| 260   | 1,2645 | 1121,1 | 1133,7 | 2,8699 |
| Sat   | 1,4524 | 1393,0 | 1407,6 | 3,3596 |

(Renedo, 2017).

ANEXO V: TABLAS DE VAPOR SOBREALENTADO

| T  | v                  | u     | h     | s       |
|----|--------------------|-------|-------|---------|
| °C | m <sup>3</sup> /kg | kJ/kg | kJ/kg | kJ/kg·K |

| P= 60 bar = 6,0 MPa<br>(T <sub>sat</sub> =290,59°C) |         |         |         |        |
|---|---------|---------|---------|--------|
| Sat   | 0,03244 | 2.589,7 | 2.784,3 | 5,8892 |
| 280   | 0,03317 | 2.605,2 | 2.804,2 | 5,9252 |
| 320   | 0,03876 | 2.720,0 | 2.952,6 | 6,1846 |
| 360   | 0,04331 | 2.811,2 | 3.071,1 | 6,3782 |
| 400   | 0,04739 | 2.892,9 | 3.177,2 | 6,5408 |
| 440   | 0,05122 | 2.970,0 | 3.277,3 | 6,6853 |
| 500   | 0,05665 | 3.082,2 | 3.422,2 | 6,8803 |
| 540   | 0,06015 | 3.156,1 | 3.517,0 | 6,9999 |
| 600   | 0,06525 | 3.266,9 | 3.658,4 | 7,1677 |
| 640   | 0,6859  | 3.341,0 | 3.752,6 | 7,2731 |
| 700   | 0,7352  | 3.453,1 | 3.894,1 | 7,4234 |
| 740   | 0,7677  | 3.528,3 | 3.989,2 | 7,5190 |

(Renedo, 2017).

| P= 80 bar = 8,0 MPa<br>(T <sub>sat</sub> =290,59°C) |         |         |         |        |
|---|---------|---------|---------|--------|
| Sat   | 0,02352 | 2.569,8 | 2.758,0 | 5,7432 |
| 320   | 0,02682 | 2.662,7 | 2.877,2 | 5,9489 |
| 360   | 0,03089 | 2.772,7 | 3.019,8 | 6,1819 |
| 400   | 0,03432 | 2.863,8 | 3.138,3 | 6,3634 |
| 440   | 0,03742 | 2.946,7 | 3.246,1 | 6,5190 |
| 480   | 0,04034 | 3.025,7 | 3.348,4 | 6,6586 |
| 520   | 0,04313 | 3.102,7 | 3.447,7 | 6,7871 |
| 560   | 0,04582 | 3.178,7 | 3.545,3 | 6,9072 |
| 600   | 0,04845 | 3.254,4 | 3.642,0 | 7,0206 |

|     |        |         |         |        |
|-----|--------|---------|---------|--------|
| 640 | 0,5102 | 3.330,1 | 3.738,3 | 7,1283 |
| 700 | 0,5481 | 3.443,9 | 3.882,4 | 7,2812 |
| 740 | 0,5729 | 3.520,4 | 3.978,7 | 7,3782 |

(Renedo, 2017).

## AVISO DE RESPONSABILIDAD UC

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Grado de un alumno, siendo su autor responsable de su contenido.

Se trata por tanto de un trabajo académico que puede contener errores detectados por el tribunal y que pueden no haber sido corregidos por el autor en la presente edición.

Debido a dicha orientación académica no debe hacerse un uso profesional de su contenido.

Este tipo de trabajos, junto con su defensa, pueden haber obtenido una nota que oscila entre 5 y 10 puntos, por lo que la calidad y el número de errores que puedan contener difieren en gran medida entre unos trabajos y otros.

La Universidad de Cantabria, la Escuela Técnica Superior de Náutica, los miembros del Tribunal de Trabajos Fin de Grado así como el profesor tutor/director no son responsables del contenido último de este Trabajo.