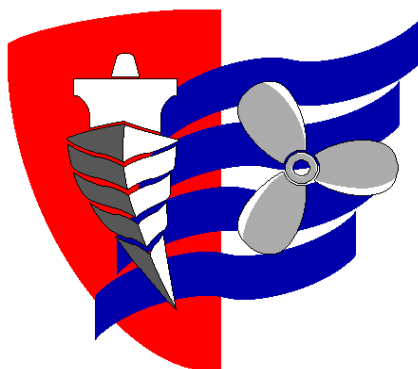


ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Trabajo Fin de Máster

**Optimización y adaptación del plan de carga
en buques de regasificación de gas natural.**

**Optimization and Adaptation of the Cargo
Plan in Natural Gas Regasification
Vessels.**

Para acceder al Título de Máster Universitario en
INGENIERÍA NÁUTICA Y GESTIÓN MARÍTIMA

Autor: Alejandro Miguez Algaba
Director: Francisco José Correa Ruiz
Septiembre – 2024



Escuela Técnica Superior de Náutica.



LOMO

TÍTULO	Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.			
Título en inglés	Optimization and Adaptation of the Cargo Plan in Natural Gas Regasification Vessels.			
AUTOR	Alejandro Miguez Algaba			
DIRECTOR/A	Francisco José Correa Ruiz			
TITULACIÓN	<i>Máster en Ingeniería Náutica y Gestión Marítima</i>	FECHA	21 de Agosto de 2024	TOMO I DE I

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE NÁUTICA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

Trabajo Fin de Máster

**Optimización y adaptación del plan de carga
en buques de regasificación de gas natural.**

**Optimization and Adaptation of the Cargo
Plan in Natural Gas Regasification
Vessels.**

Para acceder al Título de Máster Universitario en
INGENIERÍA NÁUTICA Y GESTIÓN MARÍTIMA

Septiembre - 2024

AVISO DE RESPONSABILIDAD:

Este documento es el resultado del Trabajo Fin de Máster 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 Máster, así como el profesor/a director no son responsables del contenido último de este Trabajo.

Resumen

La importancia de un plan de carga bien documentado y estructurado en el sistema de gestión de la seguridad de cualquier buque no puede ser sobreestimada, especialmente en sectores donde el tipo de carga transportada conlleva ciertos riesgos derivados de su naturaleza. Este es el caso de los buques tanque, quimiqueros o, más cercanos al tema del presente trabajo, los buques de transporte de gas natural licuado.

El concepto tradicional de plan de carga está basado en una operación con unas condiciones iniciales y finales preestablecidas y su correspondiente marco temporal. Este concepto no representa la complejidad de las operaciones llevadas a cabo en ciertos tipos de buque, tales como los buques de regasificación de gas natural o FSRUs. A pesar de ello, el formato de plan de carga utilizado en estos buques todavía está basado en la estructura tradicional del plan de carga, más aplicable a los buques de transporte.

En los FSRUs, las operaciones de carga son llevadas a cabo de manera continua, con operaciones de carga y descarga simultaneas. Esto requiere una adaptación del concepto tradicional del plan de carga a estas circunstancias especiales. En el presente trabajo aplicaremos los principios de los sistemas de gestión para desarrollar un concepto mejorado de plan de carga, que cumpla con los requisitos de la industria de los FSRU.

Palabras clave

FSRU, LNG, Plan de Carga, Buque Regasificador, Sistema de Gestión de la Seguridad.

Abstract

The importance of a well-documented and structured cargo plan in the safety management system of any ship cannot be overstated, and this is especially important in trades where the type of cargo being handled implies certain risks due to its nature. This may be the case on crude oil tankers, chemical carriers or, closer to the field of this essay, LNG carriers.

The traditional concept of a cargo plan is based on an operation with a predefined initial and final condition and its corresponding time frame. This concept does not represent the complexity of the operations carried out in certain type of ships, such as the liquefied natural gas regasification vessels, or FSRU. Despite this fact, the cargo plan used in these ships is still based on a traditional cargo plan structure, more applicable to trading LNG vessels.

On board FSRUs, cargo operations are carried out continuously, with loading and discharging operations being performed simultaneously. This requires the traditional concept of the cargo plan to be adapted to these special circumstances. In this essay, we will apply the principles of the management systems to develop an improved concept of cargo plan, which adapts to the requirements of the FSRU industry.

Key words

FSRU, LNG, Cargo Plan, Regas Ship, Safety Management System.



Índice

Resumen	5
Palabras clave	5
Abstract.....	6
Key words	6
Índice de figuras.....	9
Índice de tablas.....	10
Introducción.	11
Objetivo.....	12
Metodología	12
Estructura del trabajo.....	13
I. Estado actual del conocimiento.	14
I.1 Introducción al gas natural, evolución de su transporte marítimo y estado actual del sector.	14
1.1.1 Características del gas natural.....	14
1.1.2.1 Primeros Buques LNG	15
1.1.2.2 Desarrollo de la Tecnología y Flota Actual	16
1.1.3 Cadena de Suministro del Gas Natural Licuado (GNL)	18
1.1.3.1 Producción de GNL.....	18
1.1.3.2 Licuefacción	19
1.1.3.3 Transporte Marítimo	20
1.1.3.4 Regasificación y Distribución Terrestre	21
1.1.3.5 Los buques regasificadores dentro de la cadena de distribución del gas natural.	22
1.1.4 Características de los Buques de transporte de gas natural licuado	23
1.1.4.1 Tipos de Buques	23
1.1.4.2. Tecnología y Equipamiento	26
I.2 Buques regasificadores, ventajas, desventajas y características operacionales.....	27
I.2.1. Definición y Función de un Buque Regasificador.....	27
I.2.1.1 Desarrollo de los buques regasificadores.	27



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

I.2.1.2. Ventajas de los Buques Regasificadores	28
I.2.1.3 Desventajas de los Buques Regasificadores:	29
I.2.2 Equipamiento de los Buques Regasificadores	30
I.2.2.1. Sistemas de Almacenamiento de GNL.....	30
I.2.2.2. Sistemas de Regasificación	31
I.2.2.3 Sistemas para las operaciones Ship to Ship.	34
I.2.3 Gestión de la carga en los buques regasificadores.	37
I.2.3.1 Flujograma de gestión de carga a bordo de un FSRU.	37
I.2.4 Conclusión.	40
II. Análisis y discusión.	41
II.1 Análisis de un plan de carga convencional y modificaciones planteadas para la adaptación a las operaciones a bordo de un FSRU.....	41
II.1.1 El plan de carga en un buque GNL convencional.	41
II.1.1.1 Plan de carga - Parte 1: Volúmenes de carga.....	41
II.1.1.2 Plan de carga - Parte 2: Volúmenes de lastre.....	43
II.1.1.3 Plan de carga - Parte 3: Estabilidad y esfuerzos.....	44
II.1.2 Análisis de la progresión de volúmenes de carga y lastre en las operaciones de un buque FSRU.....	45
II.1.3 Conclusión del análisis de la progresión de volúmenes de carga y lastre en las operaciones de un buque FSRU.....	50
II.1.5.1 Propuesta de plan de carga - Volúmenes de carga.	52
II.1.5.2 Propuesta de plan de carga - Volúmenes de lastre.....	54
II.1.5.3 Propuesta de plan de carga - Información general.	55
III. Caso práctico.	58
III.1 Utilización del plan de carga planteado para planificar la gestión de la carga a bordo de un buque FSRU.	58
IV. Conclusión.	63
Bibliografía.	64
Anexo I.....	65



Índice de figuras

Ilustración 1 - Methane Pioneer, primer buque en transportar GNL.

Ilustración 2 - Al Mafyar, buque Q-Max.

Ilustración 3 - Cadena de producción del GNL.

Ilustración 4 - Buque de transporte de GNL durante la maniobra de atraque.

Ilustración 5 - Planta de GNL de Mugardos, en Ferrol.

Ilustración 6 - FSRU Excelsior, primer buque desarrollado por Excelerate y Exmar.

Ilustración 7 - Interior de un tanque de membrana.

Ilustración 8 - FSRUs operando en pareja en Bangladesh.

Ilustración 9 - Depósito de succión en un buque FSRU.

Ilustración 10 - Operación STS entre el FSRU Summit y un buque GNL.

Ilustración 11 - Dispositivo WAVE 4 para la transferencia de personal entre buques.

Ilustración 12 - Flujograma de responsabilidades en una terminal de regasificación con FSRU.



Índice de tablas

Tabla 1 – Evolución del consumo mundial de gas natural en millones de metros cúbicos.

Tabla 2 - Plan de carga convencional, sección 1.

Tabla 3 - Plan de carga convencional, sección 2.

Tabla 4 - Plan de carga convencional, sección 3.

Tabla 5 - Evolución de volúmenes de carga.

Tabla 6 - Variación de los volúmenes de lastre.

Tabla 7 - Variación de los volúmenes de carga en un FSRU.

Tabla 8 - Variación de los volúmenes de lastre en un FSRU.

Tabla 9 - Ejemplo de nominación de regasificación por horas.

Tabla 10 - Variación de los volúmenes de carga en un FSRU durante una operación STS.

Tabla 11 - Variación de los volúmenes de lastre en un FSRU durante una operación STS.

Tabla 12 - Modelo de plan de carga planteado – Volúmenes de carga.

Tabla 13 - Modelo de plan de carga planteado - Condiciones inicial y final.

Tabla 14 - Modelo de plan de carga planteado - Estabilidad, esfuerzos y calados.

Tabla 15 - Modelo de plan de carga planteado - Volúmenes de lastre.

Tabla 16 - Modelo de plan de carga planteado - Volúmenes de lastre, parte 2.

Tabla 17 - Modelo de plan de carga planteado - Documento completo.

Tabla 18 - Ejemplo de nominación de regasificación.

Tabla 19 - Plan de carga resultante del escenario planteado.



Introducción.

El Código Internacional de Gestión de la seguridad exige que las empresas desarrollen procedimientos para controlar las operaciones críticas a bordo de sus buques [1]. Esto implica que las empresas navieras y operadores de buques destinen grandes esfuerzos a desarrollar, dentro de su sistema de gestión, procedimientos que sistematicen y controlen las operaciones de carga y descarga, sistematización y control que queda plasmado en el documento del plan de carga.

Pero el concepto tradicional de plan de carga está basado en una operación definida en el tiempo, con un inicio y un final planificado de antemano. Ya sea un buque porta contenedores, un granelero o un buque Ro-Ro, en cualquier operación de carga o descarga se establece una condición inicial y una condición final, así como una estimación del tiempo que conllevará realizar las operaciones.

En el presente trabajo se tratará de adaptar el concepto tradicional de plan de carga a un tipo de buques en los cuales no solo no existe una duración estimada o planificada de las operaciones, sino en los que, además, en numerosas ocasiones, se estará cargando y descargando al mismo tiempo. Se trata de buques de regasificación de gas natural.

El gas natural licuado (GNL de aquí en adelante) se transporta por mar en buques metaneros a temperaturas criogénicas (-162°C). Una vez descargado en una terminal terrestre, este líquido debe ser regasificado, es decir, se debe aumentar su temperatura para que transicione nuevamente a su fase gaseosa, en la cual es utilizado como combustible. Este proceso se realiza normalmente en terminales de regasificación terrestres.

Los buques regasificadores, comúnmente denominados FSRU o LNG-RV, son buques que combinan las capacidades de un buque de transporte de GNL con las capacidades de regasificación de una terminal terrestre. Esto implica que son capaces tanto de transportar GNL, como de cargarlo a



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

través de operaciones de trasiego con otro buque y, finalmente, son capaces de regasificarlo e inyectarlo en la red de distribución terrestre en cooperación con el gestor de la misma. Si traducimos todas estas operaciones al ámbito de la carga y descarga, hablamos de buques que pueden cargar GNL y descargar gas natural simultáneamente, y hacerlo en marcos temporales muy variables. Esto hace que el concepto tradicional de plan de carga no permita reflejar la realidad de las operaciones realizadas en este tipo de buques.

Objetivo.

En los últimos años ha tomado especial importancia en la industria marítima la aplicación de sistemas integrados de gestión, con los que se pretende sistematizar y controlar los procedimientos críticos de la operación de cualquier buque. Una de las áreas clave en las cuales se aplican estos principios en el manejo y cuidado de la carga.

Dentro de los sistemas integrados de gestión, uno de los elementos clave para su correcta implantación y funcionamiento son los ciclos de mejora, que identifican áreas en las que los procedimientos no están optimizados y presentan oportunidades para mejorar su eficiencia o eficacia. El objetivo de este trabajo es aplicar dichos principios para tratar de mejorar uno de los documentos de mayor importancia a bordo de cualquier buque, el plan de carga, desde la perspectiva de las operaciones realizadas en un tipo específico de buque, los buques regasificadores de gas natural.

Metodología

Para desarrollar el objetivo planteado se analizará un plan de carga tradicional de un buque de transporte de GNL convencional y se desglosarán los puntos en los cuales su estructura y contenido no son capaces de reflejar la operativa llevada a cabo en un buque regasificador. Una vez identificados estos puntos, se tratará de extraer los puntos principales sobre los que



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

descansa la gestión de la carga en este tipo de buques para, posteriormente, utilizarlos en el desarrollo de un modelo de plan de carga que, esta vez sí, se adapte a las necesidades de los FSRUs.

Con el objetivo de dotar de un marco teórico básico a los procedimientos que se tratarán en el desarrollo del plan de carga, se aportará también una pequeña introducción al equipamiento utilizado, sistemas empleados y procedimientos que gobiernan la operativa de carga en un buque regasificador, únicamente con la profundidad necesaria para poder desarrollar plenamente el plan de carga mencionado.

Estructura del trabajo

Este trabajo está estructurado en tres partes principales. En el apartado I se realiza una introducción al estado actual del conocimiento en la industria del transporte marítimo de gas natural licuado y al concepto y desarrollo de los buques regasificadores.

En el apartado II se planteará la discusión sobre la idoneidad del concepto tradicional de plan de carga a los buques de regasificación, analizando diferentes elementos que intervienen en el control y gestión de la carga a bordo.

En el apartado III se plantea un caso práctico en el cual se utilizarán las herramientas desarrolladas durante el trabajo para resolver una situación de gestión de la carga a bordo de un buque de regasificación y se analizarán las mejoras obtenidas con respecto al formato original del plan de carga.

Finalmente, en el apartado IV se expone la conclusión obtenida durante la aplicación de las herramientas desarrolladas.



I. Estado actual del conocimiento.

I.1 Introducción al gas natural, evolución de su transporte marítimo y estado actual del sector.

I.1.1 Características del gas natural.

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos consistente principalmente en metano (CH_4) y pequeñas cantidades de etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) y pentano (C_5H_{12}). Contiene además cantidades variables de dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y nitrógeno (N_2) [2]. Es utilizado principalmente como combustible para calefacción y para la producción de energía eléctrica, así como, en menor medida, como combustible en el transporte marítimo.

El gas natural licuado es el producto resultante de la licuefacción del gas natural para su almacenamiento y transporte. Se trata de un líquido transparente que se forma cuando el gas natural es enfriado por debajo de los -162°C . Es en este estado en el que el gas natural se transporta por vía marítima, pues al licuarse, el gas natural reduce su volumen aproximadamente 600 veces, permitiendo un transporte más eficiente.

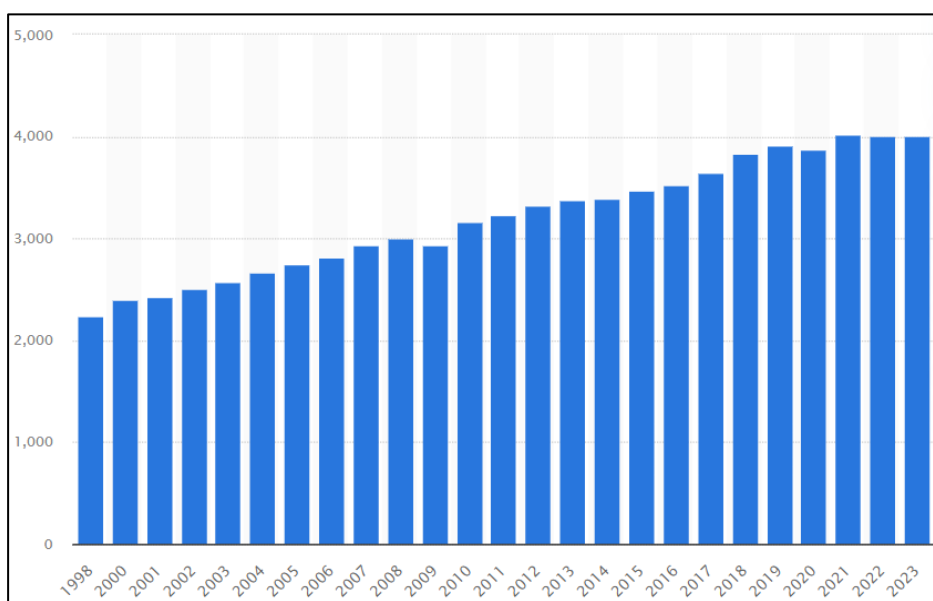


Tabla 1 – Evolución del consumo mundial de gas natural en millones de metros cúbicos.
Fuente: Statista



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Su consumo ha aumentado significativamente en las últimas décadas, convirtiéndose en una fuente de energía clave para la seguridad energética de números países.

I.1.2 Historia y evolución del transporte de gas natural.

El transporte marítimo de gas natural ha experimentado una notable evolución desde sus inicios hasta convertirse en una pieza fundamental de la cadena de suministro global de energía. En apenas setenta años de historia, este sector de la industria marítima se ha convertido en un elemento pionero tanto en seguridad como en tecnología, impulsado especialmente por la creciente demanda de gas natural como alternativa a otros combustibles fósiles más contaminantes.

I.1.2.1 Primeros buques GNL.

El concepto de transportar gas natural en forma de GNL comenzó a explorarse en la década de 1950, enfrentándose al reto de transportar mercancías a temperaturas criogénicas. El primer buque en el que se transportó GNL fue el Methane Pioneer, un buque de carga construido en 1945, al que en 1958 se le realizaron las modificaciones necesarias que le permitieron transportar GNL. En esta modificación, se equipó al buque con cinco tanques de aluminio térmicamente aislados que le permitían transportar 5.500 metros cúbicos. Realizó el primer transporte exitoso de GNL en 1959, desde el Golfo de Méjico hasta el Reino Unido. Este hito demostró la viabilidad técnica y económica del transporte marítimo de GNL y sentó las bases para el desarrollo de la industria.

Este exitoso proyecto supuso el inicio de un desarrollo tanto tecnológico como en términos de capacidad. Empresas como Tokyo Gas, Moss Rosenberg o Technigaz fueron desarrollando tecnologías que permitieron a los buques GNL llegar a las capacidades actuales, por encima de los 260.000 metros cúbicos.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.



Ilustración 1 - Methane Pioneer, primer buque en transportar GNL. Fuente: Helderline

I.1.2.2 Desarrollo de la tecnología y flota actual.

Desde los modestos comienzos con el Methane Pioneer, la tecnología de transporte de GNL ha avanzado significativamente. Durante las décadas de 1960 y 1970, la demanda de energía y la búsqueda de fuentes más limpias y eficientes llevaron al desarrollo de la flota moderna de buques GNL.

En la década de 1970, se construyeron los primeros buques GNL con capacidad superior a los 100,000 metros cúbicos, lo que permitió transportar mayores volúmenes de gas natural y mejorar la economía de escala. La introducción de los tanques de membrana de acero inoxidable y los sistemas de aislamiento avanzados aumentaron la eficiencia y seguridad del transporte.

El crecimiento de la industria del transporte marítimo de GNL continuó en las décadas siguientes, con la construcción de terminales de licuefacción y regasificación en todo el mundo. En sus inicios, los proyectos de transporte de GNL implicaban tanto la construcción de terminales como de buques, los cuales solían servir una misma ruta durante toda su vida útil.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

La tecnología disponible a bordo de los buques ha ido desarrollándose para pasar de los buques de calderas, algunos de los cuales siguen en servicio hoy en día, a los modernos buques con motores duales o motores diésel, que, combinados con plantas de licuefacción, permiten el transporte de GNL sin la pérdida de carga que suponía el hecho de que el líquido evaporado tuviera que ser quemado como combustible. Los buques GNL modernos están equipados con tecnología de vanguardia, incluyendo sistemas de propulsión eficientes, mejores métodos de aislamiento y avanzados sistemas de gestión de carga. Los buques más grandes, conocidos como Q-Max, pueden transportar hasta 266,000 metros cúbicos de GNL, representando el pináculo de la ingeniería marítima en este campo.

La flota actual de buques GNL es diversa, con aproximadamente 800 buques operando globalmente. Estos buques juegan un papel crucial en la cadena de suministro de gas natural, conectando productores y consumidores en todo el mundo. La evolución de la tecnología y el aumento de la demanda de GNL han llevado a una mayor eficiencia operativa, reducción de costos y mejoras en la seguridad y sostenibilidad del transporte marítimo de gas natural.



Ilustración 2 - Al Mafyar, buque Q-Max. Fuente: Seatrade Maritime



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Además, la industria ha desarrollado diferentes subsectores atendiendo a las variantes demandas del mercado energético, pudiendo ya encontrar en varios puertos europeos buques GNL destinados especialmente a suministrar esta carga a buques que la utilizan como combustible. De la misma manera, se han desarrollado los buques sobre los que trata el presente trabajo, los buques regasificadores, que desde sus inicios a principios del siglo XXI han demostrado ser instalaciones tremendamente versátiles y claves para garantizar la seguridad energética en numerosos países.

I.1.3 Cadena de suministro del gas natural licuado (GNL).

La cadena de suministro del gas natural licuado es un proceso complejo que involucra varias etapas críticas, desde la extracción del gas natural hasta su entrega a los consumidores finales. Cada etapa de esta cadena es esencial para garantizar un suministro eficiente, seguro y continuo de gas natural a nivel global. A continuación, veremos cada una de estas etapas, qué elementos las conforman y cuál es el papel de los buques de regasificación dentro de la cadena de suministro.

I.1.3.1 Producción de GNL.

La demanda de gas natural ha aumentado de manera intensa en las últimas décadas, principalmente por ser el combustible fósil menos contaminante. Como se explicó en el apartado anterior, el gas natural está compuesto principalmente por metano, el hidrocarburo más ligero, siempre acompañado por pequeñas cantidades de otras sustancias, como nitrógeno, etano o propano.

La cadena de suministro del GNL comienza en los yacimientos, donde el denominado *raw gas* o gas “crudo” es extraído. Estos yacimientos pueden ser únicamente de gas natural o estar ligados a yacimientos de crudo [2].



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Tal y como se encuentra en estos yacimientos, el gas natural contiene pequeñas cantidades de hidrocarburos pesados, agua, CO₂, azufre y otros elementos que es necesario eliminar para poder licuarlo o utilizarlo como combustible. Esto requiere tratar el gas crudo para eliminar esas impurezas y separar los elementos más pesados como el propano, etano o butano y los elementos contaminantes como el azufre o el mercurio. Este proceso se realiza en plantas de tratamiento y licuefacción, en sistemas denominados “trenes”. Estos trenes están compuestos de diferentes etapas, cada una de las cuales aplica parte del proceso necesario para transformar el gas crudo en gas natural apto para ser licuado.

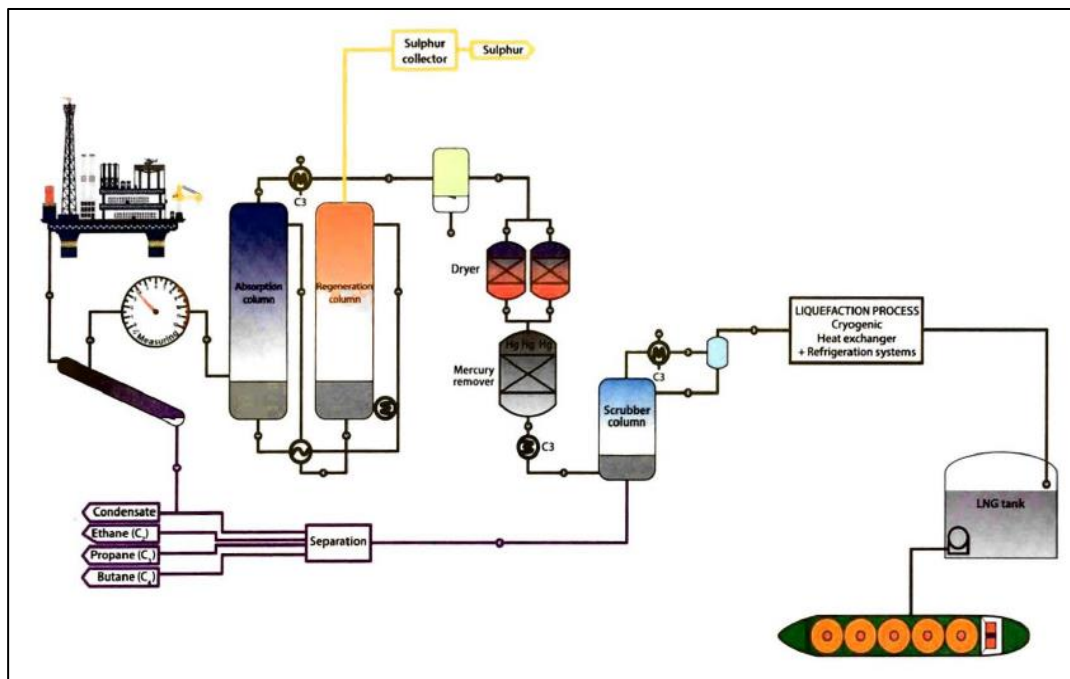


Ilustración 3 - Cadena de producción del GNL. Fuente: *Liquefied Gas Handling Principles*.

I.1.3.2 Licuefacción.

El transporte de gas natural a gran escala puede realizarse principalmente de dos maneras. La primera, a través de gaseoductos, permite el transporte de esta materia prima en forma de gas, pues la alta presión a la que se transporta, unida a la continuidad de caudal que ofrecen estas infraestructuras así lo permite. Pero el transporte por vía marítima, con sus restricciones en la capacidad de los buques GNL, obliga a licuar el gas



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

natural, con el objetivo de maximizar la cantidad de energía transportada por unidad de volumen [3].

El gas natural, al licuarse y convertirse en lo que se conoce como gas natural licuado, reduce su volumen en aproximadamente 600 veces. Esto permite que un buque, con una capacidad volumétrica determinada, transporte una cantidad de carga mucho mayor si esta está en estado líquido.

La temperatura crítica del metano, principal componente del gas natural, es de -82.5 grados centígrados, lo cual significa que, por encima de este valor, el gas no puede licuarse únicamente por un incremento de presión. Por lo tanto, la licuefacción del gas natural se debe realizar enfriándolo, concretamente a una temperatura de aproximadamente -162 °C. Las plantas de licuefacción suelen estar ubicadas cerca de los yacimientos de gas o en áreas costeras para facilitar el transporte marítimo. El proceso de enfriado y licuado del gas es uno más de los explicados en el apartado anterior, necesarios para producir GNL. Una vez tratado y licuado, el GNL se almacena en tanques criogénicos a la espera de su transporte.

I.1.3.3 Transporte marítimo.

Una vez licuado, el GNL se transporta en buques metaneros o buques GNL diseñados específicamente para mantener el gas en estado líquido a bajas temperaturas. Estos buques están equipados con tanques aislados que garantizan la estabilidad y seguridad del GNL durante el transporte.

El diseño de los buques GNL ha evolucionado para aumentar la eficiencia y la capacidad, permitiendo el transporte de grandes volúmenes de gas a largas distancias.

El transporte de gas natural por vía marítima ha ido evolucionando desde un mercado en el cual los buques se construían para proyectos específicos y trabajaban toda su vida útil en ellos, a la situación actual, en la que las



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

cargas “spot” son cada vez más abundantes y los flujos de tráfico varían en función de parámetros tanto económicos como geopolíticos.



Ilustración 4 - Buque GNL durante la maniobra de atraque. Fuente: Autor

I.1.3.4 Regasificación y distribución terrestre.

La regasificación es el proceso mediante el cual el GNL se convierte nuevamente en gas natural mediante calentamiento. En el caso de los buques regasificadores (FSRU), este proceso se realiza a bordo, y el gas regasificado se inyecta directamente en la red de distribución terrestre a través de conexiones especiales.



Ilustración 5 - Planta de GNL de Mugardos, en Ferrol. Fuente: El Correo Gallego



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Las terminales terrestres de regasificación, por otro lado, reciben el GNL de los buques metaneros y lo almacenan en tanques criogénicos antes de regasificarlo para su distribución. Estas terminales están conectadas a la red de gasoductos que transportan el gas natural a los consumidores finales, incluyendo plantas de energía, industrias y hogares.

Tanto las plantas terrestres como las situadas a bordo de los buques FSRU cuentan con sistemas de medición y regulación de las condiciones en las que el gas es inyectado en la red de distribución, así como sistemas de control que permiten suministrar cantidades variables en función de la demanda.

I.1.3.5 Los buques regasificadores dentro de la cadena de distribución del gas natural.

En resumen, podemos identificar cuatro pasos en la cadena de producción y distribución del gas natural por vía marítima:

- Producción.
- Licuefacción.
- Transporte
- Regasificación.

De estos cuatro pasos, los buques convencionales de transporte de GNL efectúan el tercero. Pero a principios de la década de los 2000, la naviera belga Exmar y la energética estadounidense Excelerate comenzaron a desarrollar un nuevo concepto de buque de transporte de GNL con capacidad para llevar a cabo los dos últimos pasos de la cadena de distribución, a saber, transporte y regasificación. Fue en 2005 cuando el Excelsior, el primer buque LNG-RV (Liquefied Natural Gas - Regassification Vessel) entro en servicio. Este concepto de buque estaba orientado tanto al transporte como a la regasificación, bajo la idea de que el buque realizara el viaje necesario para cargar el GNL, lo transportara hasta el puerto de



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

descarga y lo descargara directamente como gas natural a la red de distribución.



Ilustración 6 - FSRU Excelsior, primer buque desarrollado por Excelerate y Exmar. Fuente: gCaptain

Este concepto inicial del LNG-RV fue rápidamente abandonado, y hoy en día los buques FSRU operan como instalaciones semipermanentes, es decir, realizan únicamente la etapa de regasificación del GNL, recibiendo este de buques convencionales a través de operaciones Ship to Ship.

I.1.4 Características de los buques de transporte de gas natural licuado.

Los buques de gas natural licuado son, como se vio en el apartado anterior, una pieza fundamental en la cadena de suministro global de GNL, ya que permiten el transporte seguro y eficiente de grandes volúmenes de GNL desde los puntos de producción hasta los mercados de consumo. Estos buques poseen características y tecnologías avanzadas que aseguran la integridad del GNL durante su transporte. A continuación, veremos las principales características de estos buques.

I.1.4.1 Tipos de buques.

Como se ha explicado en la introducción de este apartado, la tecnología de transporte marítimo de GNL ha ido evolucionando desde que hace apenas 70 años se transportara esta carga por primera vez. Pese a que los buques



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

GNL cuentan todos con diseños similares, su desarrollo ha derivado en que existan algunas diferencias entre los buques que conforman la flota actual. Esta división de los distintos tipos de buque podemos realizarla en función de distintas características.

Atendiendo al tamaño, encontramos:

- *Small LNG carrier*: Cuentan con una capacidad por debajo de los 90.000 metros cúbicos de carga.
- *Small conventional*: Con capacidades de carga de entre 120.000 y 150.000 metros cúbicos.
- *Large conventional*: Con capacidades de carga de entre 150.000 y 180.000 metros cúbicos.
- *Q-Flex*: Con capacidades de carga de entre 200.000 y 220.000 metros cúbicos.
- *Q-Max*: Con capacidades de carga por encima de los 260.000 metros cúbicos.

Atendiendo al sistema de propulsión, encontramos:

- Buques de calderas: Están propulsados por dos calderas con capacidad para quemar tanto gas natural como fuel pesado. Funcionan con plantas de vapor entre 60 y 70 bares que alimentan una turbina que propulsa la hélice del buque.
- DFDE: Siglas de *Dual Fuel Diesel Electric*, son buques en los que la propulsión se realiza con motores eléctricos, y el buque cuenta con una serie de generadores capaces de funcionar tanto con gas natural como con diésel. Estos generadores generan la electricidad para alimentar los motores eléctricos del buque, así como el resto de los sistemas de abordó.
- Motores diésel con planta de licuefacción: Son buques con motores convencionales que, al no tener la capacidad de quemar el exceso de gas para la propulsión, están equipados con plantas de licuefacción



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

que mantienen la presión y temperatura de los tanques dentro de los límites adecuados.

- Motores duales: Son los más modernos. En estos buques la propulsión se consigue con máquinas convencionales capaces de utilizar tanto gas natural como diésel como combustible.

Atendiendo al sistema de aislamiento y diseño de los tanques, hoy en día existen principalmente dos tipos de buques:

- Moss-Rosenberg: Fácilmente identificables por sus tanques esféricos que protruyen de la cubierta principal. Los tanques son estructuralmente independientes del casco [2]. Pese a ser una tecnología en desuso, existen todavía en servicio un número importante de buques.
- Buques de membrana: Es la tecnología dominante hoy en día. Los tanques de estos buques no son estructuralmente independientes, por el contrario, consisten en dos membranas y dos espacios de aislamiento térmico que están soportados por el propio casco del buque [4]. La inmensa mayoría de los buques construidos hoy en día están equipados con este tipo de tanques, ya sea con los modelos NO96 o Mark III.

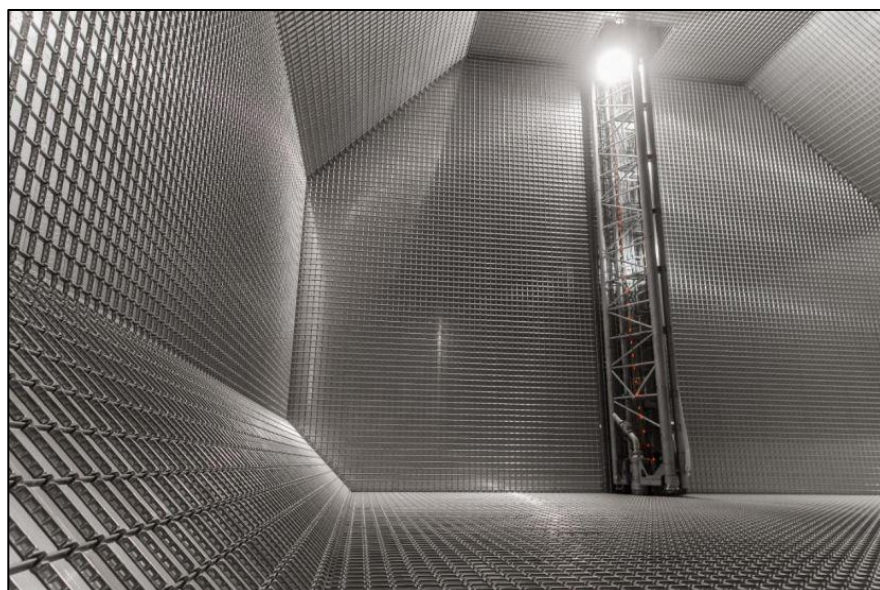


Ilustración 7 - Interior de un tanque de membrana. Fuente: Offshore Energy



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

I.1.4.2. Tecnología y equipamiento.

El equipamiento que podemos encontrar a bordo de los buques de transporte de GNL está regido, principalmente, por el Código Internacional de Buques Gaseros (IGC Code), y se caracteriza principalmente por la naturaleza criogénica de la carga, así como por su transporte en su punto de ebullición. Sin profundizar demasiado en los distintos equipos, podemos encontrar:

- Tanques de carga y bombas criogénicas: Ya sean del tipo Moss-Rosenberg o de membrana, los tanques se caracterizan por su resistencia a las temperaturas criogénicas a las que se transporta la carga. Dentro de estos tanques encontraremos las bombas de carga, junto con otro conjunto de bombas de menor capacidad, como las “fuel gas” o las “stripping”, que serán utilizadas en diferentes operaciones a bordo.
- Sistemas de manejo del “boil off gas”: Al transportarse a su temperatura de ebullición, el GNL está continuamente evaporándose en los tanques. Al vapor generado en este proceso se le denomina “boil off gas” o BOG. Este BOG debe ser extraído de los tanques para mantener en ellos una presión y una temperatura adecuada. Para ello, los buques pueden estar equipados con distintas tecnologías, ya sea plantas de licuefacción, que enfríen el BOG para licuarlo y volverlo a introducir en los tanques como líquido, o equipamiento necesario para quemar dicho BOG y utilizar la energía resultante como medio para propulsar el buque. Entre estos sistemas podemos encontrar calderas de vapor, compresores de baja y alta presión, cámaras de combustión, etc.
- Sistemas integrados de control: Todas las operaciones relacionadas con la carga y la propulsión de un buque de transporte de GNL se controlan desde un sistema central denominado IAS, siglas de Integrated Automation System. Este sistema contará con varias



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

estaciones de control en el puente, en la sala de control de carga y en la sala de máquinas, que permitirán gestionar todos los sistemas del buque.

I.2 Buques regasificadores, ventajas, desventajas y características operacionales.

I.2.1. Definición y función de un buque regasificador.

Los buques regasificadores, también conocidos como Unidades Flotantes de Almacenamiento y Regasificación (FSRU, por sus siglas en inglés), desempeñan un papel crucial en la cadena de suministro de gas natural licuado. Estos buques están diseñados para recibir, almacenar, regasificar y entregar gas natural de manera eficiente y flexible.

En este apartado trataremos de dar una introducción teórica al concepto del FSRU, exponiendo las ventajas e inconvenientes que supone la operación de este tipo de buques con respecto a una terminal terrestre, así como explicar de manera simple con qué sistemas cuentan este tipo de buques para realizar su función como plantas de regasificación de gas natural.

I.2.1.1 Desarrollo de los buques regasificadores.

El desarrollo de los buques FSRU comenzó con el proyecto Gulf Gateway en el Golfo de México. Este proyecto, desarrollado por la compañía estadounidense Excelerate en colaboración con la naviera belga Exmar, entro en funcionamiento en 2005 y supuso la primera vez que se importó gas natural licuado sin necesidad de una terminal terrestre [5]. Fue en el desarrollo de esta infraestructura cuando se desarrolló tanto el diseño como la construcción del primer buque FSRU. A partir de entonces, empresas como Golar LNG, MOL o BW Gas entre otras han añadido FSRU a sus flotas, aunque Excelerate continúa siendo la operadora que más buques posee [5].



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

I.2.1.2. Ventajas de los buques regasificadores

Desde que se desarrolla el concepto en 2005, el mercado de los FSRU ha sufrido un aumento destacable, existiendo en la actualidad cerca de 50 unidades operando en el mundo. Esto se debe a una serie de ventajas sobre las plantas de regasificación terrestres, que veremos a continuación.

I.2.1.2.1 Flexibilidad operacional.

Los FSRU pueden ser desplegados en diversas ubicaciones, incluyendo zonas costeras y áreas donde la infraestructura terrestre es limitada o inexistente. Esto permite una rápida respuesta a cambios en la demanda de gas y la posibilidad de suministrar gas a mercados emergentes o remotos. Además, los buques pueden ser recolocados en función de las variaciones de la demanda, existiendo ya buques que operan en diferentes países en función de la época del año.

I.2.1.2.2 Reducción de costes y tiempo de implementación.

La instalación de un FSRU puede ser significativamente más rápida y económica en comparación con la construcción de terminales terrestres de regasificación. Esto es especialmente beneficioso para proyectos temporales o cuando se necesita una solución inmediata.

El coste de construcción de un FSRU y sus instalaciones asociadas representa normalmente un 50-60% del coste de una terminal en tierra de la misma capacidad. Además, mientras que una terminal terrestre conlleva un tiempo de construcción de entre cinco y siete años de media, un proyecto de instalación de un FSRU puede completarse en una franja temporal de entre uno y tres años [5].

I.2.1.2.3 Escalabilidad.

Pese a que los buques FSRU cuentan con una capacidad de regasificación menor que las plantas tradicionales en tierra, es posible escalar dicha



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

capacidad añadiendo más buques a un mismo servicio. Existen ya ejemplos de este caso en países como Bangladesh, donde dos buques FSRU trabajan de manera combinada para ofrecer la capacidad adecuada de regasificación.



Ilustración 8 - FSRUs operando en pareja en Bangladesh. Fuente: Gas to Power Journal

1.2.1.2.4 Menor impacto ambiental.

La instalación de un FSRU suele tener un impacto ambiental menor en comparación con las terminales terrestres, ya que requieren menos infraestructura en tierra y pueden ser retiradas o reubicadas con facilidad.

1.2.1.3 Desventajas de los buques regasificadores.

Pese a ser infraestructuras altamente versátiles, los FSRU cuentan con una serie de desventajas que es importante tener en cuenta a la hora de analizar la viabilidad de un proyecto de instalación de un buque FSRU. A continuación, veremos las principales.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

1.2.1.3.1 Capacidad limitada.

Aunque las FSRU son eficientes, su capacidad de almacenamiento y regasificación es generalmente menor que la de las grandes terminales terrestres. Esto puede ser una limitación en mercados con una demanda muy alta de gas natural.

1.2.1.3.2 Condiciones meteorológicas adversas.

Las operaciones de los FSRU pueden verse afectadas por condiciones meteorológicas extremas, como tormentas y oleajes fuertes, lo que podría interrumpir el proceso de regasificación y entrega de gas. Esto no afecta de manera tan severa a las terminales en tierra.

1.2.1.3.3 Costes operativos.

Los costes operacionales de un buque FSRU son sustancialmente más altos que los de un buque de GNL convencional. La complejidad de los sistemas de abordaje aumenta tanto las necesidades de mantenimiento como el conocimiento y entrenamiento de la tripulación, todo lo cual supone mayores costes operacionales.

1.2.2 Equipamiento de los buques regasificadores.

Los buques regasificadores están equipados con una variedad de sistemas y tecnologías que permiten la recepción, almacenamiento, regasificación y entrega de gas natural licuado. A continuación, se tratará de ofrecer una explicación simple de estos equipos, agrupados según la función que cumplen en el funcionamiento del buque.

1.2.2.1. Sistemas de almacenamiento de GNL.

Los sistemas de almacenamiento del GNL en un buque FSRU son los propios tanques del buque, similares en diseño a los de un buque convencional. La principal diferencia con respecto a estos es que los tanques de carga de un FSRU están normalmente reforzados



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

estructuralmente para permitir al buque mantener cualquier nivel de carga en los tanques sin que las superficies libres dentro de estos causen daños a la estructura.

En función del tipo de tecnología empleada podemos encontrar tanto tanques esféricos (Moss-Rosenberg) como de membrana, así como encontrarlos en cantidades que normalmente varían entre los cuatro y cinco tanques por buque.

I.2.2.2. Sistemas de regasificación.

Siendo la regasificación su actividad principal, es en este apartado donde observamos las principales diferencias entre el equipamiento utilizado en un buque de GNL convencional y un FSRU. Para poder regasificar el GNL, un buque FSRU cuenta con una serie de sistemas, normalmente denominados de manera general como “planta de regasificación”, cuyos principales componentes se explican a continuación.

I.2.2.2.1 Bombas de alimentación.

Se trata de bombas centrifugas situadas en el interior de los tanques, e instaladas en el lugar de la bomba de descarga de emergencia de un buque GNL convencional. El propósito de estas bombas es suministrar GNL a la planta de regasificación. Su capacidad ronda los 600 metros cúbicos la hora, con presiones de descarga de hasta 10 bares [6].

I.2.2.2.2 Depósito de succión o “Suction drum”.

Consiste en un pequeño tanque de entre 15 y 20 metros cúbicos de capacidad, situado cerca de la planta de regasificación, en la proa del buque, que sirve para mantener unas condiciones de succión constantes en las bombas de alta presión [6]. Las bombas de alimentación suministran GNL a este tanque a través de un controlador automático de nivel, y de este tanque salen las dos líneas que alimentan a la planta.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.



Ilustración 9 - Depósito de succión en un buque FSRU. Fuente: Autor.

I.2.2.2.3 Bombas de alta presión.

Para que el proceso de regasificación sea más eficiente, el GNL se presuriza a 90 bares antes de vaporizarlo [6]. Esta presión es suministrada por las bombas de alta presión. Cada bomba de alta presión, en combinación con un vaporizador, forman un tren. Un FSRU convencional cuenta, normalmente, con 6 trenes.

I.2.2.2.4 Vaporizadores de alta presión.

En estos equipos, el GNL presurizado se calienta, ya sea con agua de mar o con glicol, según el sistema utilizado. Esta transferencia de calor vaporiza el GNL, formando gas natural.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

1.2.2.2.5 Sistema de agua de refrigeración.

Para que los vaporizadores sean capaces de transmitir la cantidad de energía necesaria al GNL, es necesario un flujo constante de agua o glicol. En ambos casos, es necesario un flujo constante de agua, ya sea directamente a los vaporizadores o a los intercambiadores de calor que calientan el glicol y lo mantienen a la temperatura necesaria para el correcto funcionamiento de los vaporizadores. Esto se consigue con un sistema de bombeo de agua, que puede ser de ciclo abierto o cerrado en función de la temperatura del agua en el área en la que el FSRU esté operando. Este sistema se compone bombas de suministro y las líneas asociadas que permiten suministrar el agua, ya sea a los vaporizadores o a los intercambiadores de calor del sistema de glicol.

1.2.2.2.6 Sistema de medición y control.

Los buques FSRU, aparte de regasificar el GNL, son capaces de cuantificar la cantidad de gas natural suministrada. Esto se realiza a través de la medición tanto del flujo de gas como de su composición. Además, las condiciones variables de la red de distribución en tierra hacen necesario contar con sistemas de control que permitan que la presión en la planta de regasificación del buque sea estable, sin verse afectada por las variaciones en la red terrestre.

Para esta labor, los FSRU cuentan con medidores de flujo, normalmente ultrasónicos, y cromatógrafos de gases, con los cuales se analiza continuamente la composición del gas enviado a tierra. Con estas mediciones, junto con información sobre la presión y la temperatura de la línea, puede calcularse exactamente la cantidad de gas suministrada y la cantidad de energía equivalente.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

1.2.2.2.7 Conexión a la red terrestre.

Finalmente, es necesario que la planta del buque esté conectada a la red de distribución terrestre. Esto puede realizarse de dos maneras distintas, bien a través de un manifold convencional, conectado a un brazo en tierra en los casos en los que el buque este atracado a una terminal, o a través del denominado “Submerged Tourret Loading” o STL. Este dispositivo permite al buque conectarse a una estructura submarina, normalmente una boya, la cual esta a su vez conectada con una línea submarina de distribución [3].

Es a través de esta conexión que el gas es enviado a tierra, normalmente a una estación receptora que será, además, la que indique al FSRU la cantidad de gas que debe entregar cada día.

1.2.2.3 Sistemas para las operaciones Ship to Ship.

Puesto que los FSRU reciben la carga a través de operaciones Ship to Ship (STS) con buques GNL convencionales, cuentan con equipamiento especializado para la realización frecuente de este tipo de operaciones, además de contar con tripulación especialmente entrenada y cualificada para ello. Entre el equipamiento específico para estas operaciones, podemos encontrar los siguientes.

1.2.2.3.1 Mangueras.

Las mangueras utilizadas en las operaciones STS están fabricadas de tejidos de poliéster y poliamida, reforzadas con alambre de acero inoxidable tanto en el interior como en el exterior. Suelen tener una longitud de entre 15 y 18 metros y una presión de ruptura sobre los 10 bares. En función de su diámetro, podemos encontrar mangueras de ocho pulgadas, que permiten un flujo máximo de 1250 metros cúbicos por hora y mangueras de 10 pulgadas, con un flujo máximo de 2250 metros cúbicos por hora.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.



Ilustración 5 - Operación STS entre el FSRU Summit y un buque GNL. Fuente: Summit Power

Las mangueras además deberán ser instaladas sobre unos soportes especiales que respeten el máximo radio de torsión de las mangueras. Estos soportes, denominados Support Saddles, aseguran la integridad estructural de la manguera y, además, los colocados en el FSRU cuentan con un sistema de cables que asegura que la manguera no caiga violentamente en caso de que se active la desconexión automática de las mismas.

1.2.2.3.2 “Hydraulic Power Unit” y “Emergency Release Couplings”.

Los brazos con los que cargan los buques convencionales en las terminales terrestres cuentan con sistemas de separación automática que, en caso de superarse una serie de parámetros límites, permiten desconectar el brazo del buque de manera rápida y segura. Para contar con una protección equivalente en las operaciones STS, se cuenta con los denominados Emergency Release Couplings o ERC. Estos dispositivos se colocan en cada una de las conexiones del manifold del FSRU, entre la línea y la manguera, y permite que, en caso de ser necesario, la manguera pueda ser desconectada rápida y automáticamente del manifold del FSRU.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Los ERC son dispositivos hidráulicos, que deberán estar conectados a una fuente de alimentación, denominada Hydraulic Power Unit o HPU. Este equipo es el encargado de mantener la presión adecuada para que, en caso de ser necesario, los ERC puedan activarse.

1.2.2.3.3 Equipamiento para la transferencia de personal.

A lo largo de la operación de STS, es necesario que el personal del FSRU pueda acceder al buque GNL para realizar varias actividades, tales como conectar las mangueras, inspeccionar el buque o asistir a las reuniones. Para ello es necesario contar con equipamiento específico que permita el trasvase del personal entre ambos buques. Lo más común es utilizar el conocido como Billy Pugh, una estructura de acero y cuerda que permite, con el uso de una grúa de abordaje, transportar personal entre ambos buques.



Ilustración 6 - Dispositivo WAVE 4 para la transferencia de personal entre buques. Fuente: Reflex



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

1.2.2.3.4 Ganchos de amarre automáticos.

Durante las operaciones STS, el FSRU actúa como terminal, y es por lo tanto la estructura a la que estarán dados los cabos del buque GNL. Dada la elevada frecuencia con la que los FSRU realizan operaciones STS, la mayoría de ellos cuenta con ganchos de amarre automáticos que permiten liberar los cabos del buque GNL de manera remota, facilitando las maniobras de desatraque. Además, estos ganchos permiten monitorear la tensión de cada línea entre el FSRU y el buque GNL, mejorando la seguridad de las operaciones.

1.2.3 Gestión de la carga en los buques regasificadores.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un concepto de plan de carga que se adapte a las necesidades de gestión de carga de un buque FSRU. Es por ello por lo que se considera necesario introducir, aunque sea de manera simple, de qué manera se gestiona la carga a bordo de este tipo de buques. Para ello se explicarán los principales procesos que se llevan a cabo en relación tanto con la regasificación como con las operaciones STS.

1.2.3.1 Flujograma de gestión de carga a bordo de un FSRU.

El proceso de regasificación a bordo de un FSRU se realiza, en cuanto al aspecto técnico, de manera similar a una terminal terrestre. El GNL es bombeado desde los tanques por las bombas de alimentación hasta el tanque de succión. De aquí, las bombas de alta presión incrementan la presión del líquido hasta los 90 bares y lo envían a los vaporizadores. Aquí, el líquido es calentado hasta convertirse en gas, que es posteriormente enviado a tierra. La mayoría del proceso es controlado de manera automática por el IAS del buque y monitoreado continuamente por los oficiales, que actúan de operadores de planta.

Pero para el ámbito del presente trabajo no resulta especialmente importante conocer los detalles técnicos de este proceso, sino cómo se gestiona, quién



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

interviene en él y de qué otros procesos depende. En el siguiente flujograma podemos observar el conjunto de actores que toman parte en la gestión, así como su relación entre ellos.

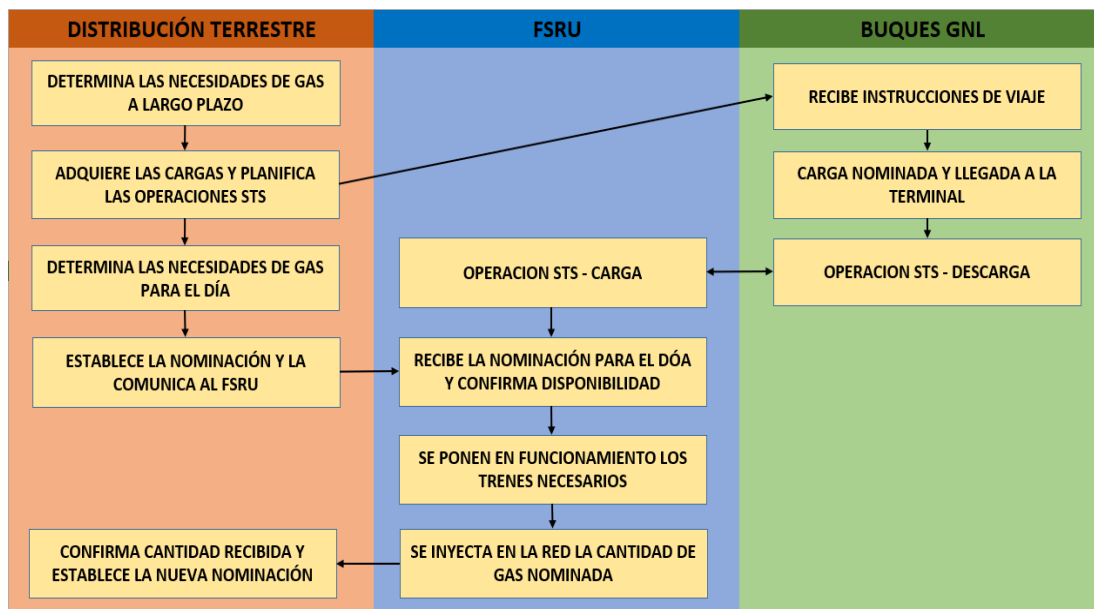


Ilustración 7 - Flujograma de responsabilidades en una terminal de regasificación con FSRU. Fuente: Elaboración Propia.

La nominación se establecerá todos los días, mientras que las operaciones de STS se realizarán en función de las necesidades de carga del proyecto. En el flujograma podemos deducir los siguientes puntos, que conforman las principales características de la operación que deberemos tener en cuenta para, en el apartado final, diseñar un modelo de plan de carga adecuado:

1. **Velocidad de descarga desconocida:** La nominación, o cantidad de gas que el FSRU debe inyectar en la red, es establecida diariamente por el gestor de la red terrestre y comunicado al buque únicamente con varias horas de antelación. El rango de capacidad de un buque FSRU implica que la nominación puede variar entre una cantidad de gas equivalente a únicamente 5000 metros cúbicos de GNL hasta los 45000 metros cúbicos al día. Esto supone un rango de velocidad de descarga muy variable, pues con una nominación equivalente a 5000 metros cúbicos de GNL, un buque con capacidad para 150.000 metros cúbicos podrá regasificar durante casi un mes con el



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

inventario de carga de a bordo, mientras que, con una nominación equivalente a 45000 metros cúbicos, toda la carga que puede almacenar el buque será regasificada en algo más de tres días. Además, esta variabilidad implica que, en la mayoría de las ocasiones, la nominación solo requerirá el uso de una o dos bombas de alimentación, por lo que solo se utilizará carga de uno o dos tanques. Esto debe ser tenido en cuenta a la hora de planear la estabilidad y los esfuerzos del buque.

2. **Roturas de stock:** Pese a que es el gestor de la red terrestre el que, en función de sus necesidades de gas, adquiere y organiza las cargas que serán entregadas al FSRU por medio de las operaciones STS, el FSRU deberá coordinarse con el gestor de la red para garantizar que no se produzcan roturas de stock de carga por quedar el FSRU vacío antes de que la próxima carga esté disponible [7].
3. **Disponibilidad de espacio para cargar:** La coordinación mencionada en el punto anterior deberá tenerse en cuenta también a la hora de las operaciones STS con respecto a la limitación de la capacidad de tanques del FSRU, puesto que este deberá contar con espacio suficiente en sus tanques para recibir la carga. Además, durante las operaciones STS, el FSRU deberá gestionar la operación de carga y la de regasificación de manera simultánea.

Además, debe tenerse en cuenta las restricciones con respecto a la estabilidad de cualquier buque vienen dadas principalmente por la necesidad de asegurar que el buque se encuentra dentro de los límites aceptables antes de salir de puerto (SOLAS II-1, Regla 20) [8]. Esto implica que los FSRU pueden gestionar la estabilidad dentro de los más amplios límites permitidos a los buques durante las operaciones de carga y descarga en puerto.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

I.2.4 Conclusión.

Pese a suponer solo una pequeña introducción a los principios que rigen la gestión de la carga en un FSRU, las explicaciones dadas en este apartado son suficientes para comprender los puntos en los que se diferencia la gestión de la carga en un FSRU y en un buque GNL convencional y, por lo tanto, los puntos en los que se basaran las propuestas de mejora que se realizaran sobre el concepto tradicional de plan de carga.

En el siguiente apartado comenzaremos analizando la estructura e información ofrecidas por un plan de carga de un buque GNL convencional, identificaremos los puntos débiles del mismo en cuanto a su capacidad para planear las operaciones en un FSRU y finalmente propondremos las acciones de mejora necesarias para amoldar el documento a las necesidades planteadas.



II. Análisis y discusión.

II.1 Análisis de un plan de carga convencional y modificaciones planteadas para la adaptación a las operaciones a bordo de un FSRU.

Una vez introducidos los conceptos necesarios para poder realizar el análisis tanto del plan de carga tradicional de un buque GNL como de las necesidades que debe tener el documento a emplear en un buque FSRU, se pasa a analizar el plan de carga tradicional con el objetivo de encontrar las deficiencias con respecto a las necesidades requeridas.

II.1.1 El plan de carga en un buque GNL convencional.

Comenzando con el análisis del plan de carga en un GNL convencional, se utilizará un ejemplo realizado por el autor, en el cual se ha tratado de representar una operación real de carga. El primer objetivo será desglosar el documento para profundizar en cada una de las partes que lo conforman y en la información que ofrecen sobre la operación para posteriormente analizar sus deficiencias desde el punto de vista operacional de un FSRU.

II.1.1.1 Plan de carga - Parte 1: Volúmenes de carga.

PLAN DE CARGA							
Buque: <u>GNL SANTANDER</u>		Fecha: <u>22-Jul-24</u>		Primer Oficial: _____			
Puerto: <u>FERROL</u>		Densidad LNG: <u>443</u>		Densidad agua: <u>1025</u>			
Operación: <u>CARGA</u>		Rate: <u>11.500 m³/h</u>		Total a cargar: <u>147.210.0 m³</u>			
CARGA	Inicio		25%	50%	75%	100%	
	NIVEL	VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN	NIVEL
TANQUE 1	500 mm	300 m³	5.527 m³	11.055 m³	16.500 m³	22.110 m³	26211 mm
TANQUE 2	250 mm	300 m³	10.525 m³	21.050 m³	31.600 m³	42.100 m³	26114 mm
TANQUE 3	250 mm	300 m³	10.525 m³	21.050 m³	31.600 m³	42.100 m³	26152 mm
TANQUE 4	250 mm	300 m³	10.252 m³	21.050 m³	31.600 m³	42.100 m³	26055 mm
TOTAL	1.200 m³		36.829 m³	74.205 m³	111.300 m³	148.410 m³	

Tabla 2 - Plan de carga convencional, sección 1. Fuente: Elaboración propia.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

En esta primera sección del plan de carga apreciamos tanto información general sobre la operación como la evolución de los volúmenes de carga transferida según avanza la operación. Para ello se determinan las condiciones iniciales y finales y se definen las condiciones del 25, 50 y 75 por ciento. Esto permitirá a los oficiales del buque el comprobar que la operación se desarrolla según lo planeado y al primer oficial el utilizar estas etapas intermedias para comprobar la estabilidad del buque, asegurándose de que el buque se mantiene siempre dentro de los límites permitidos.

Si se analiza la información suministrada por esta sección del plan de carga en función de los tres puntos identificados en el apartado I.2.3.1, se obtiene:

- 1. Velocidad de carga desconocida:** En una operación de carga o descarga en un buque GNL convencional, todos los tanques se llenan o vacían simultáneamente, intentando mantenerlos al mismo nivel. Esto implica que pueden definirse los pasos intermedios entre la situación final e inicial, y todos los tanques seguirán la misma secuencia. En un buque FSRU, la velocidad de descarga general es variable y, además, los tanques no se descargan simultáneamente. Esto supone que puede haber tanques al 50% mientras otros estén al 75%. Esto supone que la información suministrada no es suficiente ni para definir el plan a seguir ni para monitorear el progreso de la operación.
- 2. Rotura de stock:** Puesto que en un buque GNL convencional, normalmente, las cargas se trabajan como unidades completas, es decir, el buque se carga y se descarga completamente en cada viaje, no existe necesidad de monitorear el stock de carga a bordo ante las exigencias de un cliente externo. Es por ello por lo que en el plan de carga no se incluye ningún tipo de referencia ni planificación con respecto a este proceso.
- 3. Disponibilidad de espacio para cargar:** Podría considerarse que, al mostrar la cantidad de carga a bordo, este concepto de plan de carga



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

si muestra el espacio disponible para cargar, pero con la crucial diferencia de que, en los buques GNL convencionales, la cantidad de carga que se acepta cargar depende únicamente de la capacidad de los tanques del buque. En un FSRU existe una variable adicional, y es la cantidad de carga transportada por el buque GNL con el que se realizara la próxima operación STS. No todos los buques cuentan con la misma capacidad, por lo que será necesario conocer la cantidad de carga que cabe esperar en la siguiente operación e introducir esa información en el plan de carga para poder planear la disponibilidad estimada.

II.1.1.2 Plan de carga - Parte 2: Volúmenes de lastre.

En la siguiente sección del plan de carga analizado observamos los volúmenes de lastre planeados en cada paso de la operación, identificando, al igual que en el caso anterior, los pasos iniciales y finales y pasos intermedios al 25%, 50% y 75%.

De manera similar a la carga, en una operación en un buque GNL convencional, casi la totalidad de los tanques de lastre se llenan o vacían de manera simultánea, utilizando toda la capacidad de las bombas de lastre para completar la operación antes de terminar con la carga o descarga. Por el contrario, en un buque FSRU, se lastra o deslastra a ritmo mucho menor, adecuado a la velocidad de descarga y, además, no se realiza de manera lineal desde una situación inicial a otra final, sino que se lastran o deslastran tanques en función de las necesidades de estabilidad del buque. A esto debe añadirse que la condición de instalación semipermanente del FSRU le permite mantener los tanques de lastre en cualquier nivel de llenado, sin verse afectado por superficies libres. Es por ello por lo que, de manera habitual, los tanques de lastre en un buque FSRU se mantengan siempre cercanos a una condición media, realizando únicamente los pequeños ajustes de volumen necesarios para mantener la estabilidad, calados y esfuerzos dentro de los límites seguros.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Atendiendo a las razones explicadas, la planificación de la secuencia de lastre tal y como se realiza en un plan de carga convencional tampoco resulta adecuada para gestionar esta operación en un buque FSRU.

LASTRE	Inicio		25%		50%		75%		100%	
	VOLUMEN		VOLUMEN		VOLUMEN		VOLUMEN		VOLUMEN	
	BABOR	ESTRIBOR	BABOR	ESTRIBOR	BABOR	ESTRIBOR	BABOR	ESTRIBOR	BABOR	ESTRIBOR
Fore Peak	131		131		131		131		131	
FWD DEEP WBT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
No 1 WBT	5900	5900	4425	4425	2950	2950	1475	1475	100	100
No 2 WBT	6100	6100	4575	4575	3050	3050	1525	1525	100	100
No 3 WBT	6250	6250	4690	4690	3125	3125	1560	1560	100	100
No 4 WBT	5900	5900	4425	4425	2950	2950	1475	1475	100	100
ER WBT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AFTERPEAK	0		0		0		0		0	
BW Total:	48431		36361		24281		12201		931	

Tabla 3 - Plan de carga convencional, sección 2. Fuente: Elaboración propia.

II.1.1.3 Plan de carga - Parte 3: Estabilidad y esfuerzos.

En esta tercera y última parte del plan de carga convencional encontramos un resumen de la condición de estabilidad y esfuerzos para cada una de las condiciones, tanto inicial como final e intermedias, en las que se dividen tanto la planificación de los volúmenes de carga como los de lastre. Esto resulta insuficiente por las mismas razones explicadas en los dos apartados anteriores, pues ni la variación de volúmenes de carga ni de lastre serán lineales en la operación del buque FSRU, y por lo tanto la planificación de la estabilidad y los esfuerzos basándose únicamente en una elección de cinco condiciones no ofrece la cantidad de información necesaria.

ESTABILIDAD	Inicio	25%	50%	75%	100%
	SEA	SEA (MAX)	SEA (MAX)	SEA (MAX)	SEA
SF (%)	64 %	40 %	39 %	34 %	29 %
BM (%)	92 %	64 %	57 %	37 %	62 %
GM (m)	10.91 m	9.43 m	8.87 m	7.23 m	5.05 m
PROA	7.83 m	9.26 m	9.84 m	11.13 m	12.64 m
POPA	7.99 m	10.06 m	10.44 m	11.37 m	12.83 m
ASIENTO	0.16 m	0.80 m	0.60 m	0.24 m	0.19 m
PESO MUERTO	48.963 T	52.676 T	57.154 T	61.507 T	66.677 T
ROSCA	36.210 T	36.210 T	36.210 T	36.210 T	36.210 T
DESPLAZAMIENTO	85.173 T	88.886 T	98.486 T	97.717 T	102.887 T
CALADO AEREO	35.41 m	33.34 m	32.96 m	32.03 m	30.57 m

Tabla 4 - Plan de carga convencional, sección 3. Fuente: Elaboración propia.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

II.1.2 Análisis de la progresión de volúmenes de carga y lastre en las operaciones de un buque FSRU.

El análisis del plan de carga convencional nos demuestra que la complejidad y duración de las operaciones de carga en un buque FSRU conllevan que el documento no ofrezca las herramientas de planificación y gestión necesarias para poder asegurar el control de la operación. En este apartado se tratará de analizar y cuantificar las diferencias entre la progresión de los volúmenes de carga y lastre en una operación de descarga de un buque GNL convencional y un buque FSRU. Para ello se plantean los siguientes tres escenarios, basados en operaciones reales experimentadas por el autor.

Escenario 1.

En este escenario se analiza la progresión de los volúmenes de carga y lastre en una operación de descarga de un buque GNL convencional, en la que se descargan 147.210 metros cúbicos de GNL con un caudal medio de 11.500 metros cúbicos la hora, lastrando un total de 47.500 metros cúbicos de agua a un caudal medio de 3.000 metros cúbicos la hora. La operación tiene una duración de 14 horas para la descarga y 13 horas para el lastrado.

Representando gráficamente los volúmenes de carga y lastre, obtenemos los siguientes resultados.

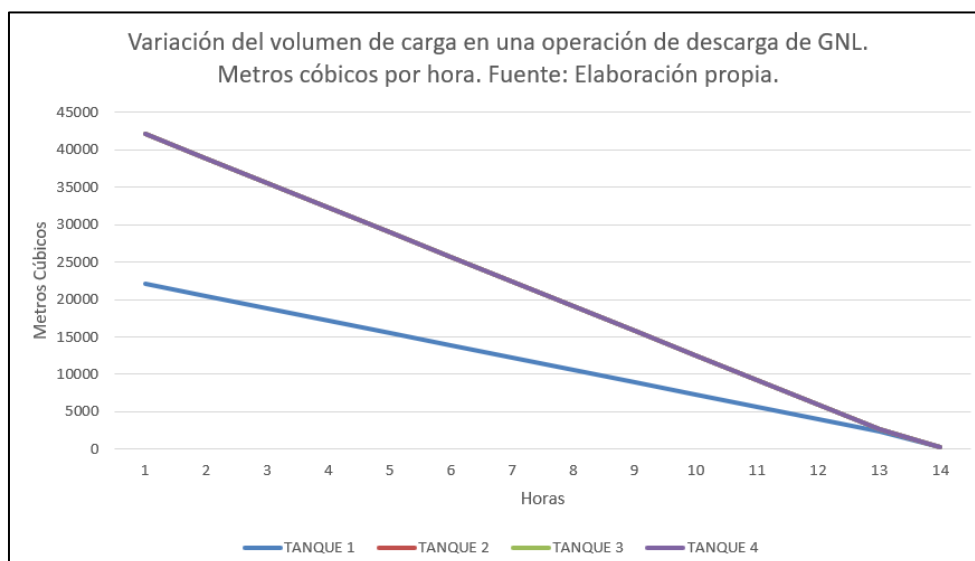


Tabla 5 - Evolución de volúmenes de carga. Fuente: Elaboración propia.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

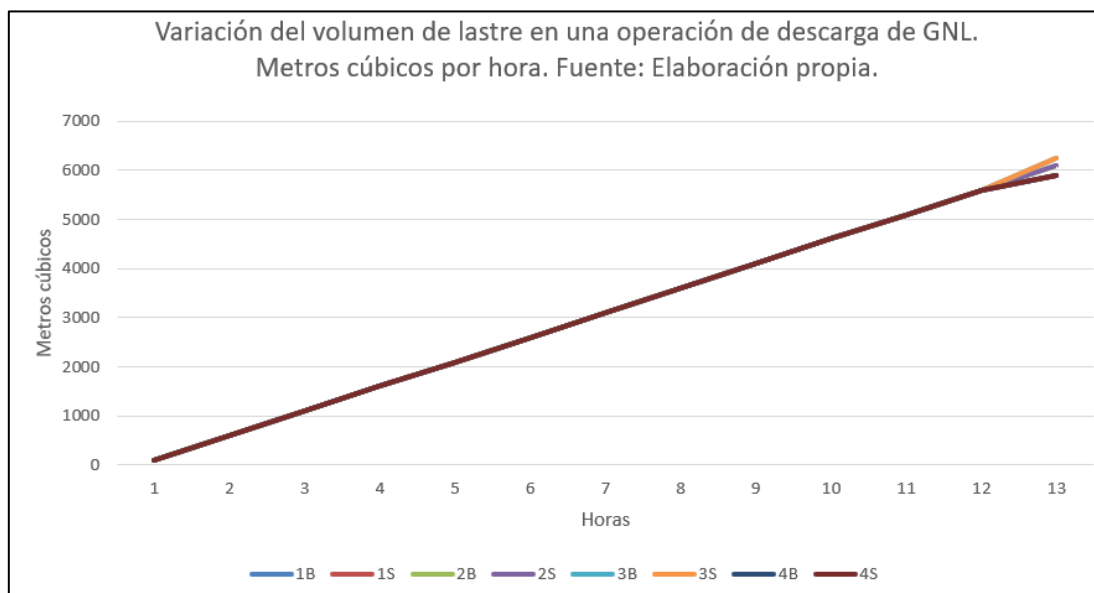


Tabla 6 - Variación de los volúmenes de lastre. Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar, la variación tanto de los volúmenes de carga como el volumen de lastre es lineal. Esto permite que la totalidad de la operación pueda ser definida, y por lo tanto planeada y controlada, estableciendo los parámetros que deben cumplirse en determinadas situaciones (inicial, 25%, 50%, 75% y final) sin perder información crucial para la seguridad de la operación. Por lo tanto, la información contenida en un plan de carga convencional como el analizado previamente resulta suficiente para el control de este tipo de operaciones.

Escenario 2.

En este segundo escenario realizaremos el mismo análisis, pero aplicándolo a un buque FSRU, en el que se está regasificando el GNL a un caudal de 19.000 metros cúbicos al día. Este caudal tiene la peculiaridad de que solo requiere el uso de las bombas de alimentación de dos de los cuatro tanques. Además, al no contar el tanque uno con bomba de alimentación, será necesario realizar un trasvase de carga desde este tanque a los tanques dos, tres y cuatro. Paralelamente, se realizan los ajustes de lastre necesarios.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Realizando la misma representación gráfica de volúmenes obtenemos lo siguiente:

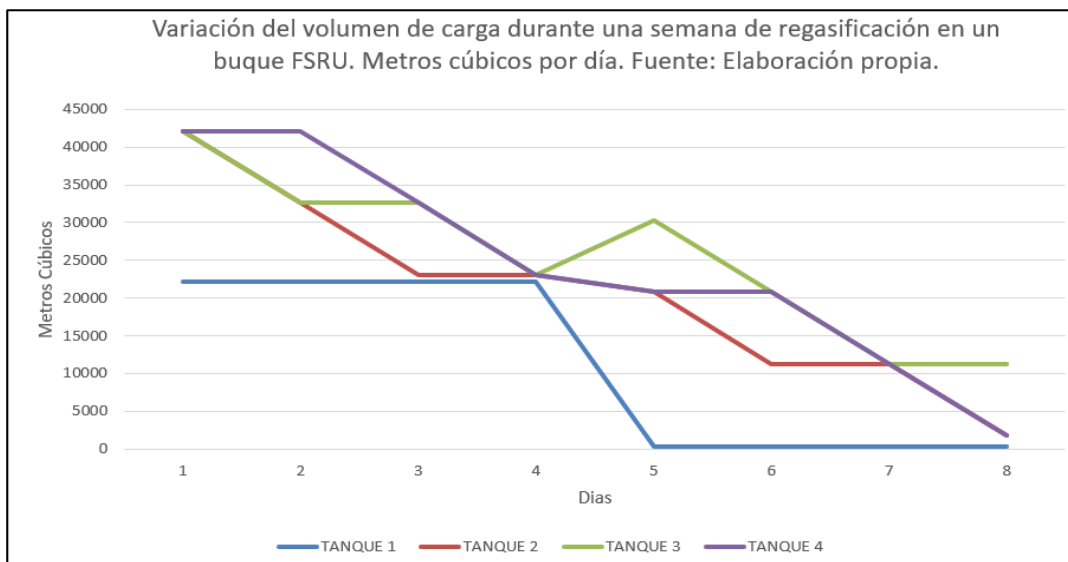


Tabla 7 - Variación de los volúmenes de carga en un FSRU. Fuente: Elaboración propia.

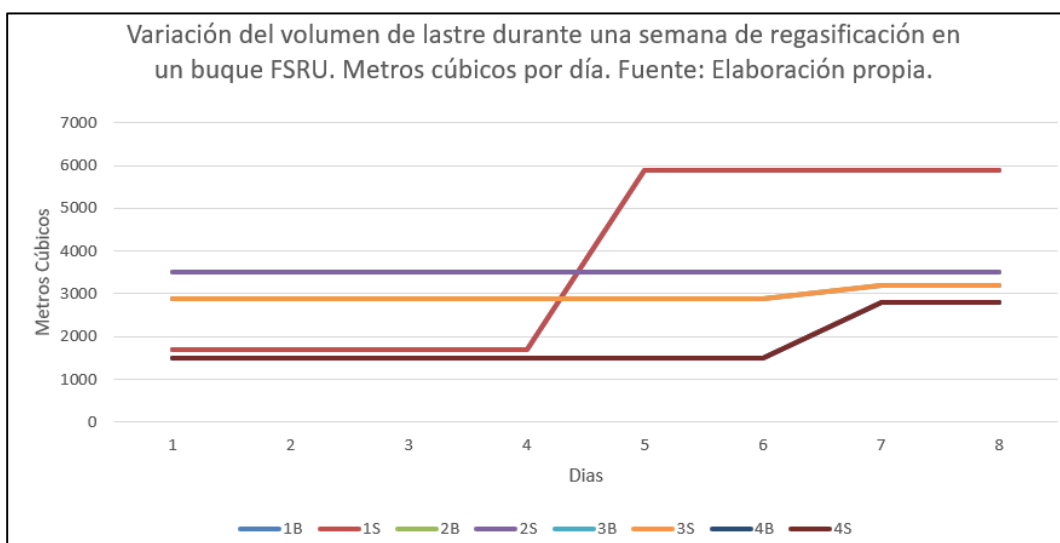


Tabla 8 - Variación de los volúmenes de lastre en un FSRU. Fuente: Elaboración propia.

Como puede observarse, en este caso la variación dista de ser lineal y por lo tanto no puede ser adecuadamente representada definiendo los parámetros que deben cumplirse en el número limitado de situaciones que recoge el formato de plan de carga analizado. Debe tenerse en cuenta, además, que el escenario planteado supone un caudal de regasificación constante durante un periodo de 8 días, algo que rara vez sucede en este tipo de buques, en los cuales las variaciones diarias de caudal son comunes, como



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

puede verse en la siguiente tabla, ejemplo de una nominación de regasificación diaria.

NOMINATION BY HOUR				
Hour	Send-Out (MMSCFD)	Estimated GHV (BTU/SCF)	Estimated Energy (MMBTU)	Comments
00:00	320	1075	344,000	
01:00	320	1075	344,000	
02:00	320	1075	344,000	
03:00	320	1075	344,000	
04:00	160	1075	172,000	
05:00	160	1075	172,000	
06:00	160	1075	172,000	
07:00	160	1075	172,000	
08:00	160	1075	172,000	
09:00	160	1075	172,000	
10:00	160	1075	172,000	
11:00	160	1075	172,000	
12:00	160	1075	172,000	
13:00	320	1075	344,000	
14:00	320	1075	344,000	
15:00	320	1075	344,000	
16:00	420	1075	451,500	
17:00	440	1075	473,000	
18:00	440	1075	473,000	
19:00	440	1075	473,000	
20:00	440	1075	473,000	
21:00	440	1075	473,000	
22:00	320	1075	344,000	
23:00	320	1075	344,000	
Day Average:	289	1075	310,854	

Tabla 9 - Ejemplo de nominación de regasificación por horas. Fuente: Elaboración propia.

Escenario 3.

En este último escenario se analizará la variación de los volúmenes de carga y lastre en un buque FSRU mientras se realiza una operación STS con un buque GNL convencional mientras se encuentra regasificando. Se partirá de una situación inicial en la que el FSRU cuenta con 10.000 metros cúbicos de carga y procede a cargar 135.000 metros cúbicos durante la operación STS,



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

a un caudal medio de 6.000 metros cúbicos la hora. Al mismo tiempo, el FSRU se encontrará regasificado al mismo caudal que en el escenario número dos, 19.000 metros cúbicos, lo que implica un caudal de aproximadamente 790 metros cúbicos la hora. Este caudal obliga a utilizar las bombas de alimentación de dos tanques. Además, durante la operación de carga se realizarán los ajustes de lastre necesarios.

En este caso obtenemos los siguientes resultados.

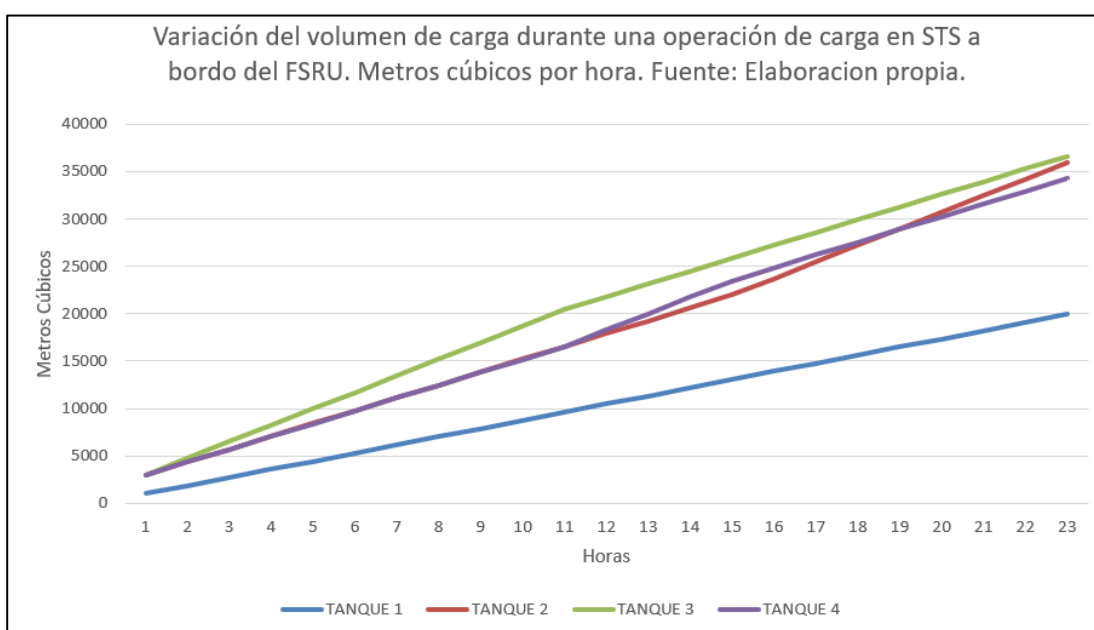


Tabla 10 - Variación de los volúmenes de carga en un FSRU durante una operación STS. Fuente: Elaboración propia.

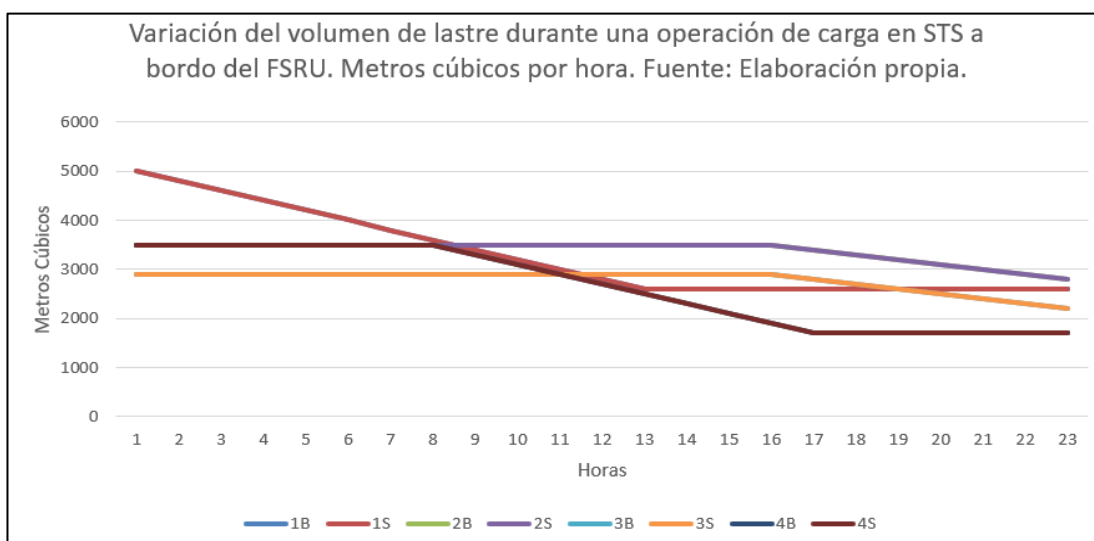


Tabla 11 - Variación de los volúmenes de lastre en un FSRU durante una operación STS. Fuente: Elaboración propia.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

En este caso puede apreciarse que, pese a que la variación no es plenamente lineal, en el volumen de carga puede apreciarse cierta linealidad. En cuanto al lastre, se realizan cuatro movimientos de lastre.

En este tercer escenario, mucho más limitado en el tiempo que el segundo, pues contempla una operación concreta de STS en la que los volúmenes de carga transferidos son mucho mayores a los transferidos durante la regasificación, si podemos afirmar que el formato tradicional de plan de carga puede suministrar la información necesaria para gestionar la operación.

II.1.3 Conclusión del análisis de la progresión de volúmenes de carga y lastre en las operaciones de un buque FSRU.

En definitiva, el análisis anterior nos permite identificar de manera más específica cuales son las peculiaridades de la gestión de la carga a bordo de un buque FSRU que no quedan adecuadamente representadas en el formato tradicional de plan de carga, a saber, las variaciones irregulares de volumen de carga en cada tanque debido a los caudales regasificados, así como los ajustes de lastre que deben realizarse para compensar dichos volúmenes.

Por lo tanto, se puede concluir con que, tras las propuestas de mejora a realizar, el plan de carga actualizado debe cumplir una serie de requisitos, que se enumeran a continuación:

1. **Debe reflejar la continuidad de las operaciones:** Un buque FSRU regasifica continuamente o, en caso de ser un proyecto estacional, regasificará de manera continuada durante varios meses. Esto implica que la gestión de la carga se realiza diariamente. Es por ello por lo que el plan de carga propuesto debe ser un documento que permita actualizaciones permanentes, a ser posibles diarias, pues es el marco temporal en el que el buque recibe las nominaciones del cliente en tierra.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

2. **Debe reflejar las diferencias entre las variaciones de los diferentes tanques del buque:** Como se vio en el análisis de las variaciones de volúmenes, mientras que en una operación de carga o descarga en un buque GNL convencional los tanques se llenan o vacían de manera lineal, en un buque FSRU los volúmenes de los tanques varían independientemente los unos de los otros en función de las necesidades de regasificación. El plan de carga planteado deberá reflejar este hecho y permitir planear cada tanque de manera individual.
3. **Debe permitir planificar operaciones simultaneas:** Cuando un FSRU realiza una operación STS con un buque GNL convencional, lo hace de manera simultánea a la regasificación. Esto implica que habrá tanques que se estén cargando y descargando simultáneamente. El plan de carga planteado deberá permitir esa posibilidad.
4. **Debe ofrecer información relevante para prevenir roturas de stock y para planear el volumen de carga necesario para cargar:** El plan de carga planteado deberá facilitar al oficial encargado de la gestión de la carga el conocer qué stock de carga existe a bordo y qué margen de regasificación tiene el buque con el stock de carga existente. Además, deberá ofrecer información sobre la próxima operación de carga por STS, volúmenes esperados de carga y espacio necesario.
5. **Debe permitir una gestión del lastre orientada a pequeños ajustes de la condición del buque:** El plan de carga deberá orientar la planificación del lastre a la realidad de las operaciones a bordo del FSRU. Es decir, deberá estar diseñado para planear pequeños cambios en los volúmenes de lastre a lo largo de periodos relativamente largos.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Tomando estos cinco puntos como principios rectores, se ha diseñado el formato de plan de carga que se presenta en la siguiente sección y que se pasará a analizar de manera detallada, explicando su funcionamiento y capacidades y las razones por las que se amolda de manera más adecuada a las operaciones llevadas a cabo a bordo de un buque FSRU.

II.1.4 Propuestas de mejora y diseño de un plan de carga adaptado a las necesidades de un buque FSRU.

En este apartado se presentará la propuesta de plan de carga modificada para amoldarse a las necesidades de un FSRU. Consiste en un documento de utilización diaria, el cual deberá ser actualizado diariamente por el oficial responsable, utilizando la información disponible tanto de los volúmenes de carga y lastre a bordo como de la nominación planeada para el día y de los volúmenes de carga a recibir en caso de realizar operaciones STS.

En cada uno de los siguientes apartados se analizará cada una de las secciones de este plan y las ventajas que ofrece sobre el plan de carga tradicional.

II.1.5.1 Propuesta de plan de carga - Volúmenes de carga.

Para la gestión de los volúmenes de carga se propone una estructura que individualice cada tanque y planee tanto las entradas como las salidas de carga en cada uno de ellos. Para ello se propone una planificación diaria en la cual se comenzará introduciendo la condición inicial de carga en cada tanque para, posteriormente, en cada hora, planear la cantidad de carga regasificada y/o cargada. Esta estructura permitirá además planificar que bombas de alimentación serán utilizadas. Además, con una estructura similar, se incluye en el documento una sección de totales, que permite obtener una visión más general de la evolución de los volúmenes de carga del buque. A modo de ejemplo se muestra a continuación la sección dedicada al tanque uno junto con el apartado de totales.



Tabla 12 - Modelo de plan de carga planteado – Volúmenes de carga. Fuente: Elaboración propia.

53



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

CONDICIÓN INICIAL - CARGA		
TANQUE 1	20610	m3
TANQUE 2	41225	m3
TANQUE 3	41225	m3
TANQUE 4	41225	m3

CONDICIÓN FINAL - CARGA		
TANQUE 1	20610	m3
TANQUE 2	41225	m3
TANQUE 3	41225	m3
TANQUE 4	41225	m3

Tabla 13 - Modelo de plan de carga planteado - Condiciones inicial y final. Fuente: Elaboración propia.

Para esta condición inicial y final se incluyen los datos de estabilidad y calados que permite comprobar que el buque se mantiene dentro de los límites seguros y además serán utilizados por los oficiales de guardia para comprobar el progreso de la operación. Estos datos serán obtenidos del ordenador de estabilidad del buque, introduciendo tanto la condición inicial como la condición final esperada.

CONDICIÓN INICIAL - ESTABILIDAD				
BM:		Cp:		m
SF:		C _{pp} :		m
GM:		Asiento:		m
Dwt:		Δ:		t

CONDICIÓN FINAL - ESTABILIDAD				
BM:		Cp:		m
SF:		C _{pp} :		m
GM:		Asiento:		m
Dwt:		Δ:		t

Tabla 14 - Modelo de plan de carga planteado - Estabilidad, esfuerzos y calados. Fuente: Elaboración propia.

II.1.5.2 Propuesta de plan de carga - Volúmenes de lastre.

Para la gestión del lastre se plantea una sección en la que se planeen los movimientos individuales de cada tanque en tramos de seis horas. Puesto que los ajustes de lastre en los buques FSRU suelen ser de mucha menor escala que en los buques GNL convencionales, una planificación en esta escala de tiempo resulta suficiente para asegurar el control de la operación, teniendo en cuenta además que, en muchas ocasiones, los ajustes de lastre se realizan con una bomba de lastre adicional, de menor capacidad, puesto que las bombas de lastre principales del buque están siendo utilizadas para suministrar agua a los vaporizadores de la planta de regasificación.

En esta sección, el oficial responsable de la carga planea los movimientos de lastre en cada tanque si los hubiera, introduciendo los volúmenes de lastre esperados cada seis horas. Esto permite al oficial de guardia planear



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

las operaciones de lastre de manera eficiente y segura. La estructura de esta sección se muestra a continuación, con el pique de proa y los tanques uno y dos como ejemplo.

Hora	PIQUE DE PROA m3	1 BABOR m3	1 ESTRIBOR m3	2 BABOR m3	2 ESTRIBOR m3
0:00					
6:00					
12:00					
18:00					
0:00					

Tabla 15 - Modelo de plan de carga planteado - Volúmenes de lastre. Fuente: Elaboración propia.

De manera similar a la gestión de los volúmenes de carga, se plantea una sección de totales en los volúmenes de lastre que entregará de manera automática la variación total de volumen en cada periodo de seis horas. Esto permitirá al oficial encargado de la gestión de la carga comprobar si la variación de volumen planeada entra dentro de las capacidades de lastre o deslastre de las bombas.

3 ESTRIBOR m3	4 BABOR m3	4 ESTRIBOR m3	PIQUE DE POPA m3	TOTAL A LASTRAR / DESLASTRAR
				0
				0
				0
				0

Tabla 16 - Modelo de plan de carga planteado - Volúmenes de lastre, parte 2. Fuente: Elaboración propia.

II.1.5.3 Propuesta de plan de carga - Información general.

Finalmente, en el documento se incluyen ciertos cálculos que aportan información relevante con respecto a la planificación del inventario de carga a bordo en relación con el caudal de regasificación y con la cantidad planeada de carga a recibir en la próxima operación STS. Esta información está calculada de la siguiente manera:



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

- **LNG a regasificar:** Se calcula aplicando un factor de corrección de 46.601093 para convertir los millones de pies cúbicos estándar (MMSCFD) a metros cúbicos de LNG. Pese a que el valor exacto de este factor de conversión variará en función de las condiciones estándar definidas en la póliza de fletamento del buque y de la composición del GNL, las variaciones no son de una magnitud suficiente como para considerarlas relevantes.
- **Días hasta rotura de stock:** Calculado dividiendo la cantidad total de carga a bordo al iniciar el día entre la cantidad de LNG a regasificar. Pese a que este cálculo presupone que el caudal de regasificación permanecerá constante, ofrece la única manera de conocer, aproximadamente, cuánto tiempo podrá regasificar el buque con el inventario de carga disponible [7].
- **Caudal de regas necesario:** Este apartado pretende ofrecer información sobre que caudal de regasificación es necesario para poder disponer del espacio de carga requerido para estar en condiciones de recibir la siguiente carga planeada. Un caudal medio menor que esta cifra supondrá que cuando el próximo buque GNL llegue para realizar la operación de descarga, el FSRU no contará con espacio suficiente en sus tanques, lo que obligará a retrasar la operación o a realizarla a un caudal medio menor. Esta información se calcula en base a la cantidad estimada a cargar, la fecha de la operación y la cantidad de carga existente a bordo.

Esta información complementa a la suministrada anteriormente en aspectos específicos de la operación de un FSRU y ayuda a incrementar la conciencia situacional del oficial responsable de la gestión de la carga con respecto al estado del buque en relación con la planificación a largo plazo.

En la siguiente página se muestra el documento en su totalidad, mostrando todas las secciones explicadas.



Tabla 17 - Modelo de plan de carga planteado - Documento completo. Fuente: Elaboración propia.



III. Caso práctico.

III.1 Utilización del plan de carga planteado para planificar la gestión de la carga a bordo de un buque FSRU.

En esta tercera y última sección del trabajo se simulará una situación real en la que se utilizará el formato de plan de carga propuesto para planificar las operaciones durante 24 horas a bordo de un buque FSRU. Para ello se plantean el siguiente escenario.

El buque acaba de terminar una operación STS en la que ha recibido 135.000 metros cúbicos de carga, dejando todos sus tanques al 97% de capacidad. La próxima operación está planeada para una semana después, con una cantidad estimada a recibir de 140.000 metros cúbicos de carga.

La planificación comenzará, pues, introduciendo en el plan de carga la información conocida, a saber:

- Fecha de inicio de la operación.
- Fecha final de la operación.
- Nominación de regasificación.
- Fecha de la próxima operación STS.
- Cantidad a cargar.
- Condición inicial de carga.

Una vez introducido estos datos, la información de cada tanque se actualizará con la cantidad de carga introducida en la condición inicial. A partir de aquí, el oficial responsable podrá empezar a planear qué bombas de alimentación se utilizarán para suministrar el caudal de regasificación necesario. Para ello será necesario conocer que:

- Cada tren de regasificación tiene una capacidad máxima de 160 MMSCFD.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

- Esta nominación equivale a una cantidad de 315 metros cúbicos de GNL a la hora.
- La capacidad de las bombas de alimentación es de 550 metros cúbicos de GNL a la hora.

Finalmente, se deberá hacer recibido la nominación para el día a planear, que en este caso supondremos que es la siguiente:

NOMINATION BY HOUR				
Hour	Send-Out (MMSCFD)	Estimated GHV (BTU/SCF)	Estimated Energy (MMBTU)	Comments
00:00	320	1075	344,000	
01:00	320	1075	344,000	
02:00	320	1075	344,000	
03:00	320	1075	344,000	
04:00	160	1075	172,000	
05:00	160	1075	172,000	
06:00	160	1075	172,000	
07:00	160	1075	172,000	
08:00	160	1075	172,000	
09:00	160	1075	172,000	
10:00	160	1075	172,000	
11:00	160	1075	172,000	
12:00	160	1075	172,000	
13:00	320	1075	344,000	
14:00	320	1075	344,000	
15:00	320	1075	344,000	
16:00	420	1075	451,500	
17:00	440	1075	473,000	
18:00	440	1075	473,000	
19:00	440	1075	473,000	
20:00	440	1075	473,000	
21:00	440	1075	473,000	
22:00	320	1075	344,000	
23:00	320	1075	344,000	
Day Average:	289	1075	310,854	

Tabla 18 - Ejemplo de nominación de regasificación. Fuente: Elaboración propia.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Por lo tanto, para las horas en las que la nominación es de 160 MMSCFD, será suficiente con utilizar una sola bomba de alimentación, mientras que para las horas en las que se requiere un caudal de 320 MMSCFD, será necesario utilizar dos. Con esta información, se procederá a planear, para cada hora, cuánta carga se bombeará de cada tanque acorde a la nominación horaria recibida.

Una vez completada la planificación de la carga, se procede a planificar los ajustes de lastre necesarios en la sección de volúmenes de lastre. Estos ajustes estarán orientados principalmente a mantener un asiento adecuado y a mantener los esfuerzos dentro de los límites aceptables.

El último paso será, una vez planeadas todas las variaciones de volúmenes de carga y lastre, introducir en el ordenador de estabilidad la condición inicial y final y obtener los valores de estabilidad, calados y esfuerzos para cada una.

A diferencia de la limitada información que ofrecía el plan de carga inicial, de este documento podemos extraer una gran cantidad de información relevante para la gestión de la carga a bordo. Cabe destacar:

- Información individualizada de la variación horaria de volumen de carga disponible en cada tanque, lo que supone también planificar los cambios de las bombas de alimentación para mantener los tanques a niveles similares. En este caso, el oficial de guardia sabrá, estudiando el plan de carga, que a las 03:00 se debe parar la bomba de alimentación del tanque dos o que a las 13:00 se debe arrancar la bomba de alimentación del tanque cuatro.
- Información clara sobre las operaciones de lastre a realizar y la franja horaria en la que deben ser realizadas.
- Condiciones de estabilidad, esfuerzo y calados al inicio y final del día, lo que permite al oficial de guardia comparar los datos calculados con la situación real del buque en estos dos momentos e identificar cualquier diferencia.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

- El documento nos ofrece también información sobre cuantos días puede estar el buque regasificando de mantenerse el caudal actual, lo que puede ayudar a prevenir roturas de stock de la carga.
- Además, al introducir información sobre la fecha prevista y la cantidad de carga planeada para la próxima operación de STS, podemos saber el caudal de regas diario que deberá entregar el buque para contar con espacio suficiente para cargar cuando llegue el momento. En este caso, podemos observar que el caudal necesario está por encima del caudal actual, lo que significaría que, de mantenerse este caudal, el buque no contará con espacio suficiente en sus tanques para recibir la carga en la fecha prevista.

En la siguiente página se ofrece el documento completo, esta vez resuelto para la situación planteada. Además, puesto que el objetivo principal del presente trabajo ha sido el desarrollo de dicho documento, y la herramienta utilizada para hacerlo ha sido Microsoft Excel, en el Anexo I se presenta la hoja de cálculo, con su estructura de fórmulas visible, para que pueda analizarse más profundamente el documento desarrollado.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

PLAN DE CARGA																				
Buque: FSRU Santander		Comienzo: 2024-07-24 00:00 L.T.		Final: 2024-07-25 00:00 L.T.		Oficial de carga:														
Nominación: 289		MMSCFD		LNG a regasificar: m3		Días hasta rotura de stock: 10.71														
Fecha próxima STS: 2024-07-31		MMSCFD		Caudal de regas necesario: 415.49		Caudal de regas necesario: 415.49		MMSCFD												
CONDICIÓN INICIAL - CARGA				CONDICIÓN INICIAL - ESTABILIDAD				CONDICIÓN FINAL - ESTABILIDAD												
TANQUE 1		20610 m3		TANQUE 1		Cp: 12.4 m		BM: 62%		Cp: 11.2 m										
TANQUE 2		41225 m3		TANQUE 2		Cp: 13.05 m		SF: 28%		Cp: 11.5 m										
TANQUE 3		41225 m3		TANQUE 3		Cp: 13.05 m		GM: 5.05		Asiento: -0.3 m										
TANQUE 4		41225 m3		TANQUE 4		Cp: 13.05 m		Dwt: 84885		Δ: 115221 t										
VOLUMENES DE CARGA																				
Hora	TANQUE 4		TANQUE 3		TANQUE 2		TANQUE 1		TANQUE 1		TOTALES									
	Vol. (m3)	%	Bomba Alimentación	Bomba Carga	Llenado	Vol. (m3)	%	Bomba Alimentación	Bomba Carga	Llenado	Carga a bordo	Regas	Cargado							
0:00	41225	97.00%	310.6	310.6	41225	97.00%	310.6	310.6	20610	96.99%	144285	621.2	0							
1:00	41225	97.00%	310.6	310.6	40914	96.27%	310.6	310.6	20610	96.99%	143663.8	621.2	0							
2:00	41225	97.00%	310.6	310.6	40604	95.54%	310.6	310.6	20610	96.99%	143042.6	621.2	0							
3:00	41225	97.00%	310.6	310.6	40293	94.81%	310.6	310.6	20610	96.99%	142421.4	621.2	0							
4:00	41225	97.00%	310.6	310.6	39983	94.08%	310.6	310.6	20610	96.99%	141800.2	310.6	0							
5:00	41225	97.00%	310.6	310.6	39672	93.35%	310.6	310.6	20610	96.99%	141489.6	310.6	0							
6:00	41225	97.00%	310.6	310.6	39361	92.62%	310.6	310.6	20610	96.99%	141179	310.6	0							
7:00	41225	97.00%	310.6	310.6	39051	91.88%	310.6	310.6	20610	96.99%	140868.4	310.6	0							
8:00	41225	97.00%	310.6	310.6	38740	91.15%	310.6	310.6	20610	96.99%	140557.8	310.6	0							
9:00	41225	97.00%	310.6	310.6	38430	90.42%	310.6	310.6	20610	96.99%	140247.2	310.6	0							
10:00	41225	97.00%	310.6	310.6	38119	89.69%	310.6	310.6	20610	96.99%	139936.6	310.6	0							
11:00	41225	97.00%	310.6	310.6	37808	88.96%	310.6	310.6	20610	96.99%	139626	310.6	0							
12:00	41225	97.00%	310.6	310.6	37498	88.23%	310.6	310.6	20610	96.99%	139315.4	310.6	0							
13:00	40914	96.27%	310.6	310.6	37187	87.50%	310.6	310.6	20610	96.99%	139004.8	621.2	0							
14:00	40604	95.54%	310.6	310.6	36877	86.77%	310.6	310.6	20610	96.99%	138694.2	621.2	0							
15:00	40293	94.81%	310.6	310.6	36566	86.04%	310.6	310.6	20610	96.99%	138383.6	621.2	0							
16:00	40000	94.08%	310.6	310.6	36255	85.31%	310.6	310.6	20610	96.99%	138073.0	621.2	0							
17:00	39983	94.08%	407.7	310.6	35945	84.58%	310.6	407.7	20610	96.99%	137762.4	621.2	0							
18:00	39575	93.12%	407.7	310.6	35536	83.85%	310.6	407.7	20610	96.99%	137451.8	621.2	0							
19:00	39167	92.16%	407.7	310.6	35128	83.12%	310.6	407.7	20610	96.99%	137141.2	621.2	0							
20:00	38760	91.20%	407.7	310.6	34720	82.40%	310.6	407.7	20610	96.99%	136830.6	621.2	0							
21:00	38352	90.24%	407.7	310.6	34312	81.68%	310.6	407.7	20610	96.99%	136520.0	621.2	0							
22:00	37944	89.28%	407.7	310.6	33904	80.96%	310.6	407.7	20610	96.99%	136209.4	621.2	0							
23:00	37536	88.32%	407.7	310.6	33496	80.24%	310.6	407.7	20610	96.99%	135900.0	621.2	0							
VOLUMENES DE LASTRE																				
Hora	PIQUE DE PROA m3		1 BABOR m3		1 ESTRIBOR m3		2 BABOR m3		2 ESTRIBOR m3		3 BABOR m3		3 ESTRIBOR m3		4 BABOR m3		4 ESTRIBOR m3		TOTAL A LASTRAR / DESLASTRAR	
	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%	Vol. (m3)	%
0:00	150	15.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	3000	30.00%	3000	30.00%	2500	25.00%	2500	25.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	100	10.00%
6:00	150	15.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	3000	30.00%	3000	30.00%	2800	28.00%	2800	28.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	600	6.00%
12:00	150	15.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	3000	30.00%	3000	30.00%	3200	32.00%	3200	32.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	800	8.00%
18:00	150	15.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	3000	30.00%	3000	30.00%	3200	32.00%	3200	32.00%	2200	22.00%	2200	22.00%	100	10.00%
0:00	150	15.00%	1800	18.00%	1800	18.00%	3000	30.00%	3000	30.00%	3200	32.00%	3200	32.00%	2200	22.00%	2200	22.00%	400	4.00%



IV. Conclusión.

Los sistemas de gestión son estructuras de conocimiento en las que las organizaciones guardan y conservan información. Es necesario pues que estos sistemas cuenten con medios para poder incorporar información nueva, corregir información errónea y mejorar los procedimientos y documentación. Estos medios son los ciclos de mejora, y en el presente trabajo se ha tratado de emplear sus herramientas para mejorar un documento crucial en el sistema de gestión de cualquier buque, el plan de carga, y adaptarlo a los requisitos operacionales de un tipo particular de buque, los FSRU.

Tal y como se ha demostrado en el apartado III del presente trabajo, el modelo de plan de carga planteado ofrece no solo una estructura mucho más acorde a las operaciones realizadas, sino que, además, ofrece información relevante que no se encontraba disponible en el modelo anterior. En definitiva, en cualquier sistema de gestión debe ser la documentación la que se adapte al buque, y no el buque el que se adapte a la documentación, y en este trabajo hemos planteado un buen ejemplo de ello.



Bibliografía.

- [1] International Maritime Organization, Ed., *ISM code: International Safety management code with guidelines for its implementation*, 2018 edition. in IMO publication. London: IMO, 2018.
- [2] Society of International Gas Tanker and Terminal Operators Ltd, *Liquefied gas handling principles on ships and in terminals: LGHP4*, Fourth edition. London: Witherby Publishing Group Ltd, 2016.
- [3] National Technical University of Athens School of Naval Architecture and Marine Engineering, Trakadas Dimistris, *Feasibility Study for the Deployment of Floating Storage Regasification Unit*, Athens, 2018.
- [4] International Chamber of Shipping, Ed., *Tanker safety guide: liquefied gas*, 2. ed. London, 1995.
- [5] B. Songhurst, *The outlook for floating storage and regasification units (FSRUs)*. in OIES paper, no. NG 123. Oxford Institute for Energy Studies, 2017.
- [6] Exmar, *Cargo operation Manual – LNGRV Expedient (2271)*, 2016
- [7] A. Wild, *Best practice in inventory management*, 3rd Edition. New York: Routledge, 2018.
- [8] International Maritime Organization, Ed., SOLAS, consolidated edition 2014: consolidated text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and its Protocol of 1988: articles, annexes and certificates, Sixth edition, 2014. in IMO publication. London: International Maritime Organization, 2014.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

Anexo I

Buque:		Comienzo:		00:00 L.T.	
Nominación:		MMSCFD		LNG a regasifica	
Fecha próxima STS:					

CONDICIÓN INICIAL - CARGA		CONDICIÓN FINAL - CARGA	
TANQUE 1	20610 m3	TANQUE 1	=Q43 m3
TANQUE 2	41225 m3	TANQUE 2	=L43 m3
TANQUE 3	41225 m3	TANQUE 3	=G43 m3
TANQUE 4	41225 m3	TANQUE 4	=B43 m3

TANQUE 4		TANQUE 3	
Hora	Vol. (m3)	Vol. (m3)	%
0	=D14	=D13	=G20/SK\$18
0.041666666666	=B20-D20-E20+F20	=G20-I20-J20+K20	=G21/SK\$18
0.083333333333	=B21-D21-E21+F21	=G21-I21-J21+K21	=G22/SK\$18
0.125	=B22-D22-E22+F22	=G22-I22-J22+K22	=G23/SK\$18
0.166666666666	=B23-D23-E23+F23	=G23-I23-J23+K23	=G24/SK\$18
0.208333333333	=B24-D24-E24+F24	=G24-I24-J24+K24	=G25/SK\$18
0.25	=B25-D25-E25+F25	=G25-I25-J25+K25	=G26/SK\$18
0.291666666666	=B26-D26-E26+F26	=G26-I26-J26+K26	=G27/SK\$18
0.333333333333	=B27-D27-E27+F27	=G27-I27-J27+K27	=G28/SK\$18
0.375	=B28-D28-E28+F28	=G28-I28-J28+K28	=G29/SK\$18
0.416666666666	=B29-D29-E29+F29	=G29-I29-J29+K29	=G30/SK\$18
0.458333333333	=B30-D30-E30+F30	=G30-I30-J30+K30	=G31/SK\$18
0.5	=B31-D31-E31+F31	=G31-I31-J31+K31	=G32/SK\$18
0.541666666666	=B32-D32-E32+F32	=G32-I32-J32+K32	=G33/SK\$18
0.583333333333	=B33-D33-E33+F33	=G33-I33-J33+K33	=G34/SK\$18
0.625	=B34-D34-E34+F34	=G34-I34-J34+K34	=G35/SK\$18
0.666666666666	=B35-D35-E35+F35	=G35-I35-J35+K35	=G36/SK\$18
0.708333333333	=B36-D36-E36+F36	=G36-I36-J36+K36	=G37/SK\$18
0.75	=B37-D37-E37+F37	=G37-I37-J37+K37	=G38/SK\$18
0.791666666666	=B38-D38-E38+F38	=G38-I38-J38+K38	=G39/SK\$18
0.833333333333	=B39-D39-E39+F39	=G39-I39-J39+K39	=G40/SK\$18
0.875	=B40-D40-E40+F40	=G40-I40-J40+K40	=G41/SK\$18
0.916666666666	=B41-D41-E41+F41	=G41-I41-J41+K41	=G42/SK\$18
0.958333333333	=B42-D42-E42+F42	=G42-I42-J42+K42	=G43/SK\$18

PIQUE DE PROA		1 BAVOR		1 ESTRIBOR		2 BAVOR		2 ESTRIBOR	
Hora	m3	m3	m3	m3	m3	m3	m3	m3	m3
0									
0.25									
0.5									
0.75									
0									

Anexo 1 – Plan de carga, parte 1. Hoja de cálculo con fórmulas.



Optimización y adaptación del plan de carga en buques de regasificación de gas natural.

PLAN DE CARGA									
Final:				00:00 L.T.					
Oficial de carga:									
r: E6*46.601093 m3				V20/M6					
Cantidad a cargar: m3				Caudal de regas necesario: [(V20-[(F18+K18+...					
CONDICIÓN INICIAL - ESTABILIDAD				CONDICIÓN FINAL - ESTABILIDAD					
BM:		Cp:		BM:		Cp:			
SF:		Cp:		SF:		Cp:			
GM:		Asiento:		GM:		Asiento:			
Dwt:		Δ:		Dwt:		Δ:			
VOLUMENES DE CARGA									
TANQUE 2				TANQUE 1			MÁX: 21250		
MÁX: 42500									
Vol. (m3)				Vol. (m3)			%		
Bomba Alimentación				Bomba Alimentación			Bomba Carga		
Llenado				Llenado			Llenado		
=D12				=D11			=Q20/SU\$18		
=L20-N20-O20+P20				=Q20-S20-T20+U20			=Q21/SU\$18		
=L21-N21-O21+P21				=Q21-S21-T21+U21			=Q22/SU\$18		
=L22-N22-O22+P22				=Q22-S22-T22+U22			=Q23/SU\$18		
=L23-N23-O23+P23				=Q23-S23-T23+U23			=Q24/SU\$18		
=L24-N24-O24+P24				=Q24-S24-T24+U24			=Q25/SU\$18		
=L25-N25-O25+P25				=Q25-S25-T25+U25			=Q26/SU\$18		
=L26-N26-O26+P26				=Q26-S26-T26+U26			=Q27/SU\$18		
=L27-N27-O27+P27				=Q27-S27-T27+U27			=Q28/SU\$18		
=L28-N28-O28+P28				=Q28-S28-T28+U28			=Q29/SU\$18		
=L29-N29-O29+P29				=Q29-S29-T29+U29			=Q30/SU\$18		
=L30-N30-O30+P30				=Q30-S30-T30+U30			=Q31/SU\$18		
=L31-N31-O31+P31				=Q31-S31-T31+U31			=Q32/SU\$18		
=L32-N32-O32+P32				=Q32-S32-T32+U32			=Q33/SU\$18		
=L33-N33-O33+P33				=Q33-S33-T33+U33			=Q34/SU\$18		
=L34-N34-O34+P34				=Q34-S34-T34+U34			=Q35/SU\$18		
=L35-N35-O35+P35				=Q35-S35-T35+U35			=Q36/SU\$18		
=L36-N36-O36+P36				=Q36-S36-T36+U36			=Q37/SU\$18		
=L37-N37-O37+P37				=Q37-S37-T37+U37			=Q38/SU\$18		
=L38-N38-O38+P38				=Q38-S38-T38+U38			=Q39/SU\$18		
=L39-N39-O39+P39				=Q39-S39-T39+U39			=Q40/SU\$18		
=L40-N40-O40+P40				=Q40-S40-T40+U40			=Q41/SU\$18		
=L41-N41-O41+P41				=Q41-S41-T41+U41			=Q42/SU\$18		
=L42-N42-O42+P42				=Q42-S42-T42+U42			=Q43/SU\$18		
=L43-N43-O43+P43				=Q43-S43-T43+U43			=Q44/SU\$18		
VOLUMENES DE LASTRE									
3 BAVOR m3				4 BAVOR m3			4 ESTRIBOR m3		
PIQUE DE POPA m3									

Anexo 1 – Plan de carga, parte 2. Hoja de cálculo con fórmulas.



Anexo 1 – Plan de carga, parte 3. Hoja de cálculo con fórmulas.