



X SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

SERVICIO DE BUNKERING DE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS LIMPIOS. ESTUDIOS TÉCNICOS Y HERRAMIENTAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE OPERACIONES

SONIA HERAS ALONSO¹
RAUL ATIENZA²

RESUMEN

La búsqueda de soluciones para descarbonizar los océanos ha empezado por el uso de combustibles alternativos limpios, de entre los que destacan el GNL, el metanol y el amoníaco. El desarrollo de los nuevos sistemas de propulsión marina plantea para los agentes involucrados en el transporte la necesidad de analizar la rentabilidad económica y medioambiental de la implementación de los nuevos combustibles, las variables a tener en cuenta en las operaciones de bunker, las medidas de seguridad e incluso los equipos más críticos para el funcionamiento del sistema, que lleva al desarrollo de aplicaciones como SiBUNKER, ECOBUQ o NEWBUNKER.

El GNL sigue siendo la principal opción para los buques de doble combustible y el aumento en el número de unidades propulsadas por GNL ha fomentado la construcción de buques de suministro y su posicionamiento en puertos clave para las rutas marítimas. Los buques de suministro, de pequeñas dimensiones, han de utilizar en numerosas ocasiones terminales diseñados para grandes buques metaneros, lo que hace necesarios estudios técnicos de compatibilidad buque/terminal para identificar incompatibilidades y encontrar soluciones eficientes. Por otra parte, el interés para el operador se centra en las condiciones de operación en STS con los barcos a los que esté previsto dar servicio, por lo que son necesarios estudios de buque amarrado para identificar esquemas de amarre y condiciones climáticas límite que garanticen la seguridad, eficiencia y rentabilidad de las operaciones, así como analizar fenómenos relevantes en zonas de tránsito con restricciones de espacio, como es el fenómeno de passing-ship.

¹Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid / Directora del Área de Amarre y Offshore de Siport21. sonia.heras@siport21.es

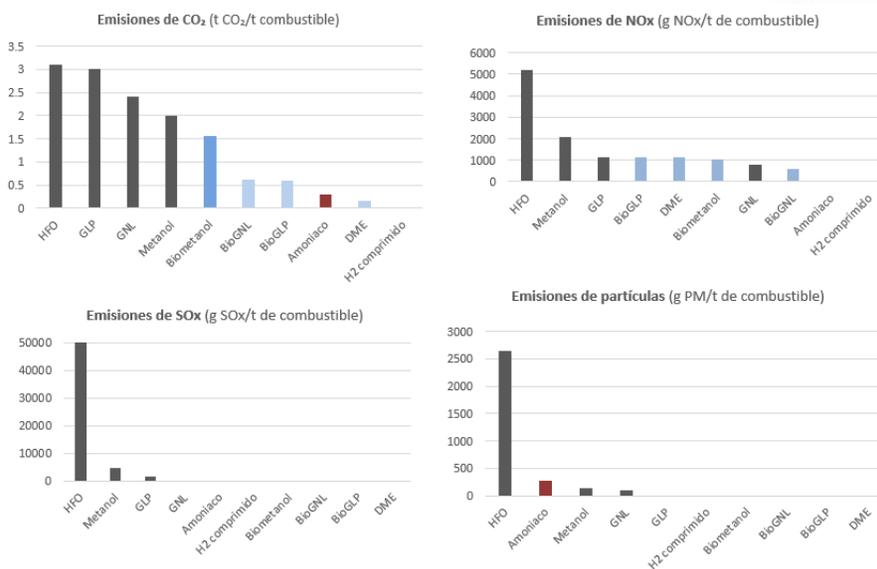
²Ingeniero Naval y Oceánico. Universidad Politécnica de Madrid / Director del Área de Innovación de Siport21. raul.atienza@siport21.es

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la industria de la navegación está trabajando en uno de los objetivos más ambiciosos de este siglo, que no es otro que el de reducir sus emisiones anuales de gases de efecto invernadero en (al menos) un 50 % en 2050, teniendo en cuenta los niveles de 2008, afrontando por tanto una ruta de **eficiencia medioambiental** hacia las **cero emisiones**.

La búsqueda de soluciones alternativas para descarbonizar los océanos ha empezado por la búsqueda de **combustibles alternativos** limpios que puedan sustituir a los convencionales y que abran el camino hacia otros de cero emisiones. Entre ellos hay tres que destacan sobre el resto: el GNL (gas natural licuado), el metanol y el amoniaco. En la Figura 1 se muestran algunos valores de referencia sobre las emisiones de distintos gases y partículas en función del tipo de combustible utilizado.

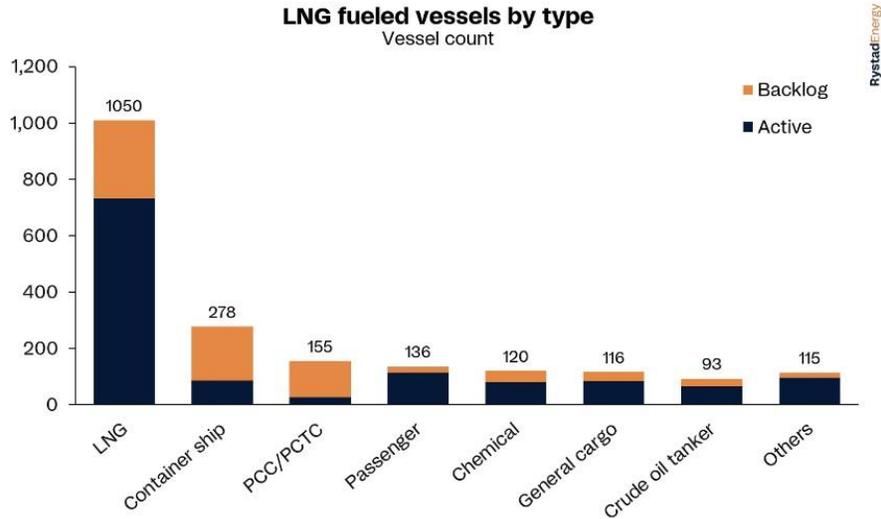
Figura 1: Comparativa combustibles alternativos: Reducción de emisiones



Fuente: Guía del suministro de combustibles alternativos desde cisterna a buque. GASNAM. Proyecto NEWBUNKER. 2024

Más de 2.400 buques, entre los que destacan buques de transporte de GNL en su mayoría, portacontenedores, cruceros y car-carriers, están ya equipados para operar con **GNL** en todo el mundo y otros 1.000 buques están encargados, aún pendientes de entrega tal y como muestra la Figura 2.

Figura 2: Buques propulsados por GNL



Fuente: Rystard Energy's Clean Shipping Solution. Abril 2024

Desde 2016 ya navegan buques quimiqueros que queman **metanol**, utilizando una parte segregada de la carga como combustible, de manera similar a lo que hacen los gaseros. El metanol ha ganado adeptos en la industria del transporte marítimo en los últimos tiempos y entre otros, el mercado naval chino apunta hacia él, donde gran parte de los buques existentes, podrían tener la capacidad de poder usarlo, previas pequeñas modificaciones en sus motores.

Ya existen también fabricantes de motores marinos que están desarrollando modelos aptos para el uso de **amoníaco**, pero el coste de los buques y de las operaciones asociadas son la gran preocupación de los armadores.

DNV GL (Fusión Det Norske Veritas y Germanischer Lloyd) está diseñando un barco gasero propulsado por amoníaco, y el grupo italiano Grimaldi Lines aumentará su flota en 2026 con dos nuevos buques para el transporte de vehículos eléctricos con una capacidad de carga de 9000 CEU (car equivalent units). Por su lado, las compañías Yara Clean Ammonia, NorthSea Container Line y Yara International, han anunciado una sociedad para construir el primer buque portacontenedores del mundo que utilizará amoníaco puro como combustible. Con el nombre de Yara Eyde, el buque operará entre Noruega y Alemania a partir de 2026, y complementará las cualidades del buque Yara Birkeland, el que fuera el primer portacontenedores eléctrico autónomo del mundo. Maersk ha anunciado también su apuesta por el uso del amoníaco como uno de sus combustibles alternativos (junto al metanol) en la búsqueda de la descarbonización, firmando un contrato para la construcción de cuatro buques duales a amoníaco, de 93000 metros cúbicos, con entregas a partir de 2026.

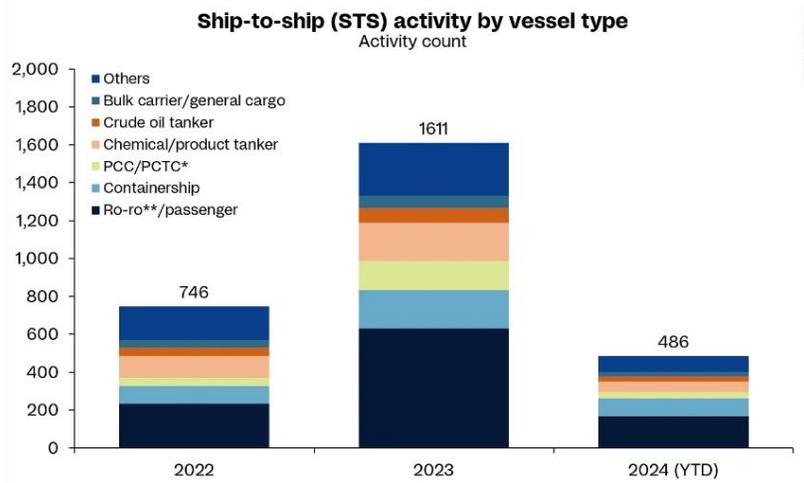
Según las noticias del sector, el **GNL** sigue siendo la principal opción para los buques de doble combustible en el transporte marítimo, abriendo el camino hacia la utilización de otros combustibles incluso más sostenibles, como el bioGNL y el gas natural sintético, y es que las emisiones gaseosas de metano siguen siendo un reto importante para el sector marítimo.

Como principales causas del éxito del GNL como combustible se señalan: su precio competitivo, la abundancia de su suministro y el buen desarrollo de sus infraestructuras, que lo sitúan en una posición ventajosa frente a otras alternativas, si bien es cierto que se detecta un aumento de los pedidos de buques equipados con motores de metanol y amoníaco de doble combustible.

El aumento de crecimiento de la flota propulsada con GNL, junto con otros factores como beneficios económicos y la expansión de la infraestructura está impulsando el aumento de la demanda de **bunkering de GNL**, que suele realizarse mediante tres métodos principales: camión a buque (Truck To Ship - TTS), gasoducto a buque (Pipe To Ship - PTS) y buque a buque (Ship To Ship - STS).

En 2023, el suministro de GNL alcanzó un récord con 4,7 millones de metros cúbicos suministrados en todo el mundo, un 62% más que en 2022. Este aumento fue impulsado principalmente por un fuerte repunte en las entregas de bunkering **STS** fundamentalmente en Europa y China, que se duplicaron en 2022, tal y como muestra la Figura 3, mientras que los volúmenes entregados por TTS o PTS mantuvieron un modesto crecimiento, sirviendo fundamentalmente a buques de pasajeros y de carga rodada (Ro-ro).

Figura 3: Número de operaciones STS



Fuente: Rystard Energy's Clean Shipping Solution. Abril 2024

Así puede observarse que el aumento en el número de unidades propulsadas por GNL ha fomentado asimismo la construcción de buques de suministro (bunkering) y su posicionamiento en puertos clave para las rutas marítimas.

2. ESTUDIOS TÉCNICOS BASE PARA EL SERVICIO DE BUNKERING

ESTUDIOS DE COMPATIBILIDAD BUQUE DE SUMINISTRO/TERMINAL Y BUQUE DE SUMINISTRO/BUQUE

La experiencia adquirida con la participación de Siport 21 en los **estudios técnicos** realizados para el **primer buque de suministro de GNL de bandera española**, demuestra que lo que no se está fomentando al mismo ritmo que las unidades de buques de suministro, son las infraestructuras e instalaciones necesarias en los puertos y terminales que permitan una distribución cada vez más eficiente de este combustible.

Los buques de suministro, de pequeñas dimensiones, no suelen disponer de terminales especializadas con el equipamiento e infraestructuras adecuadas que faciliten la carga de GNL, sino que en ocasiones han de utilizar terminales y equipamientos diseñados para grandes buques de transporte de GNL.

Es por esto por lo que, tanto para el operador como para el gestor de la terminal donde el buque de suministro vaya a realizar las operaciones de carga del combustible, es fundamental realizar previamente a las operaciones, estudios técnicos de **compatibilidad buque/terminal** entre los buques de bunkering y las terminales donde esté previsto realizar la carga del combustible, con el objeto de identificar incompatibilidades con el equipamiento de atraque y amarre instalado en las infraestructuras disponibles en las terminales, así como con los equipos de transferencia de carga (brazos de carga o mangueras) para encontrar soluciones eficientes. De igual modo el operador requiere estudiar la **compatibilidad buque/buque** entre el buque de suministro y los potenciales buques sobre los que operar.

La **compatibilidad geométrica** del equipamiento de atraque viene dada por el cumplimiento de las recomendaciones internacionales sobre el contacto del cuerpo cilíndrico del buque con las defensas disponibles, en términos de número de defensas en contacto y calidad del apoyo que viene dada por el porcentaje de eslora en contacto y la excentricidad del apoyo respecto al punto de conexión, así como del porcentaje de escudo en contacto, en caso de haberlo, para las condiciones extremas de nivel del mar.

La **compatibilidad del equipamiento de amarre** viene dada por la compatibilidad de la carga de trabajo de las amarras con la carga de trabajo de ganchos de escape rápido instalados en puerto o bitas sobre el buque receptor de combustible, así como por el cumplimiento de las recomendaciones internacionales sobre las longitudes y ángulos horizontales y verticales de largos, traveses y esprines previstos en la configuración de amarre, así como por la inexistencia de interferencias de las amarras bien con infraestructuras e instalaciones existentes (duques de alba o plataformas), muy comunes cuando el buque de suministro hace uso de una terminal diseñada para grandes buques de transporte de GNL, bien con elementos del buque al que se abarboa para prestar el servicio y en caso de encontrarlas, prever soluciones eficaces para salvarlas.

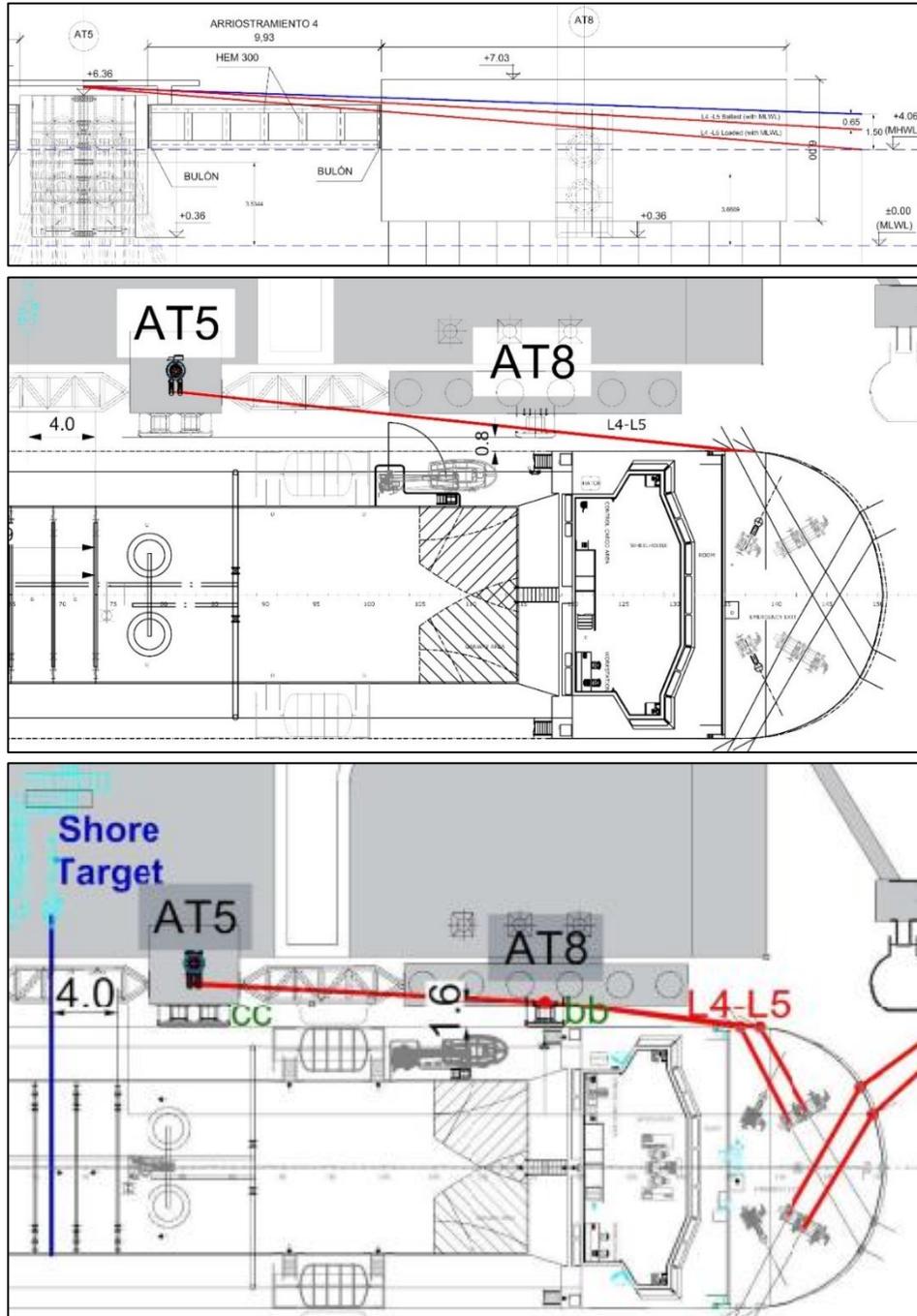
La **compatibilidad de los equipos de transferencia de carga** (brazos de carga o mangueras) viene dada por la posibilidad de conexión del equipo terrestre con el/los manifolds previstos a bordo del buque de suministro y la suficiencia de rango de trabajo de los mismos atendiendo a las variaciones del nivel del mar en la vertical y a los movimientos esperables del buque durante la operación de carga de combustible.

Finalmente, la **compatibilidad de los elementos de acceso** (pasarelas terrestres y rampas del buque) viene dada por la viabilidad de apoyo de estos, de modo que permitan el tránsito de personal entre el buque y la terminal cuando sea necesario.

Algunos de los ejemplos que se incluyen en las siguientes figuras corresponden con los estudios de compatibilidad y buque amarrado llevados a cabo para la barcaza de suministro "*Haugesund Knutsen (G-024)*" tanto con terminales donde podría operar en los puertos de Huelva, Barcelona, Brujas, Singapur y Rotterdam (Figura 6), como con buques Ferry, Cruceros y Ro-pax (Figura 5), potenciales clientes del servicio de bunkering.

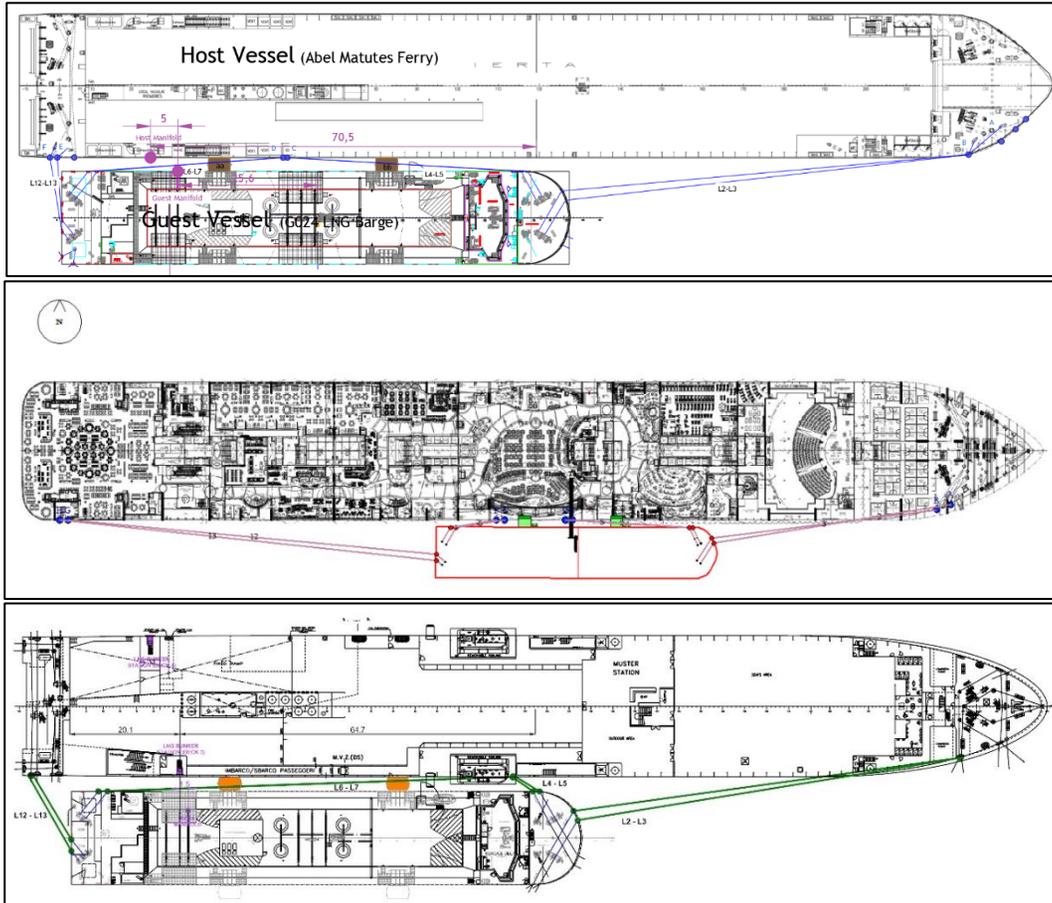
La Figura 4 muestra un ejemplo de potencial interferencia detectada a ser resuelta antes de iniciar las operaciones en dicha terminal.

Figura 4: Ejemplo de estudio de compatibilidad buque/terminal. Potenciales interferencias detectadas de amarras con defensas existentes (Alzado y planta). Solución rápida y económica: instalación de guía-cabos en el cantil



Fuente: Estudios de compatibilidad para la "Haugesund Knutsen (G-024)". Sioport21. 2022

Figura 5: Ejemplos de estudios de compatibilidad buque/buque. Planes de amarre



Fuente: Estudios de compatibilidad para la "Haugesund Knutsen (G-024)". Siport21. 2022

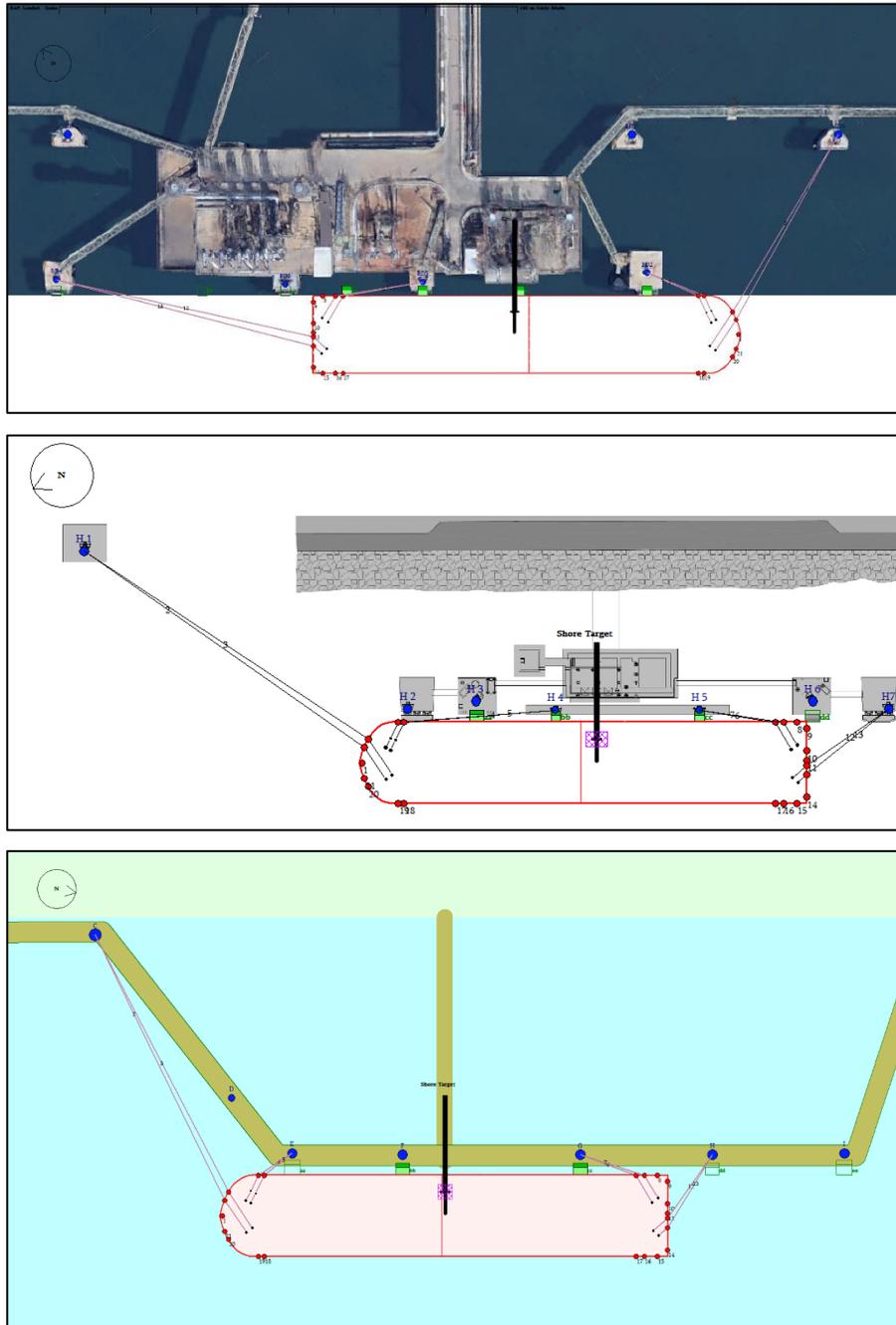
ESTUDIOS DE BUQUE AMARRADO

Otro tema de gran interés para el operador, vistos los esquemas de amarre viables tan asimétricos y de poco o nulo cumplimiento con las recomendaciones generales de amarre, se centra en las condiciones tanto de carga de la barcaza de suministro en la terminal, como de operación en Ship to Ship con los barcos a los que esté previsto dar servicio, sea esto efectuado para los buques amarrados dentro de puerto o fondeados en el exterior. De aquí la necesidad de **planificar** previamente los **esquemas de amarre** y **realizar estudios de buque amarrado** para analizar las **condiciones climáticas límite para garantizar la seguridad, eficiencia y rentabilidad de las operaciones.**

Considerando unas configuraciones de amarre de referencia, tal y como muestran las siguientes figuras, los resultados de las simulaciones dinámicas permiten valorar las amplitudes de movimiento de los buques y las cargas transmitidas a las defensas, bolardos y líneas de amarre bajo las diferentes condiciones ambientales impuestas (oleaje, viento, corriente...).

Establecidos los límites aceptables para los movimientos de los buques en operación y para los esfuerzos en el equipamiento de atraque (defensas) y amarre (amarras y bolardos), se pueden obtener las condiciones climáticas límite de permanencia y operación de los buques y conocidas las estadísticas del clima marítimo de la zona estimarse las horas/año de operatividad esperable.

Figura 6: Planificación de esquemas de amarre de barcaza en terminales de los puertos de Huelva, Barcelona, Brujas, Singapur y Rotterdam



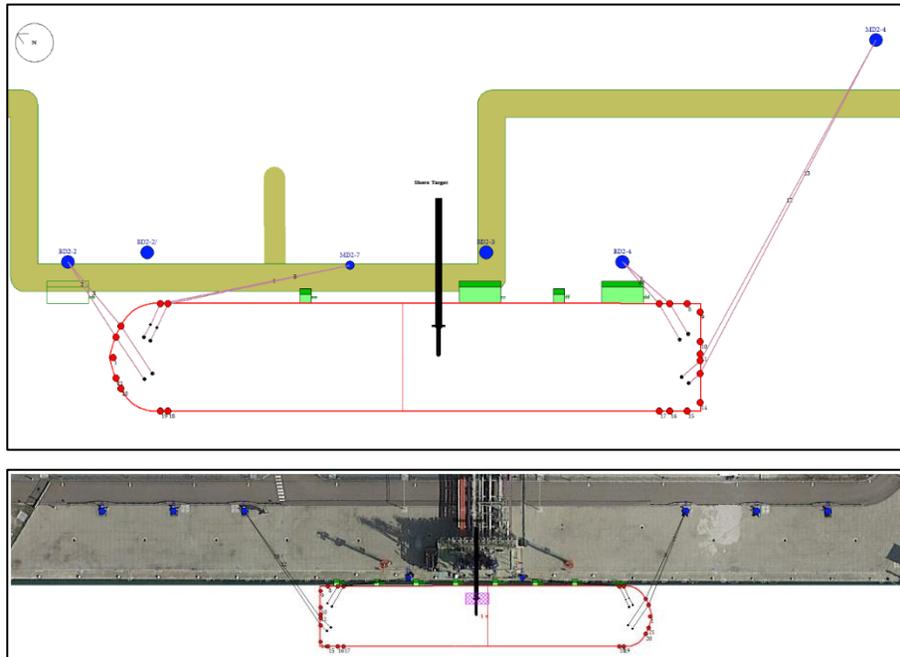
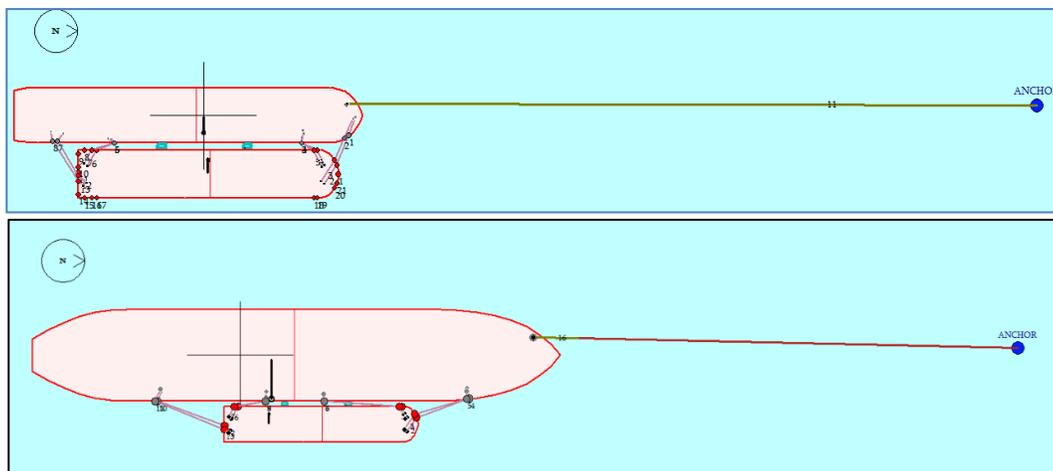


Figura 7: Planificación de esquemas de amarre en operaciones STS con buques petrolero y gasero fondeados en exterior de puerto



Fuente: Estudios de buque amarrado para la "Haugesund Knutsen (G-024)". Siport21. 2022

ESTUDIOS DE BUQUE PASANTE - PASSING-SHIP

En zonas portuarias, resulta de gran interés analizar la seguridad de las operaciones de bunker, fundamentalmente si las operaciones de suministro de combustible se realizan en **zonas de tránsito de buques con restricciones de espacio**, ya que el tráfico existente dentro de un puerto o canal puede dificultar las operaciones de suministro de GNL debido a las **fuerzas de succión generadas por los buques pasantes**.

El objetivo de los estudios de passing-ship es el de analizar la influencia que el paso de otros buques tiene sobre la estancia y operaciones tanto del buque amarrado al muelle, como del buque de suministro.

El efecto que ejercen los buques en tránsito sobre los buques amarrados en el atraque se realiza en dos etapas:

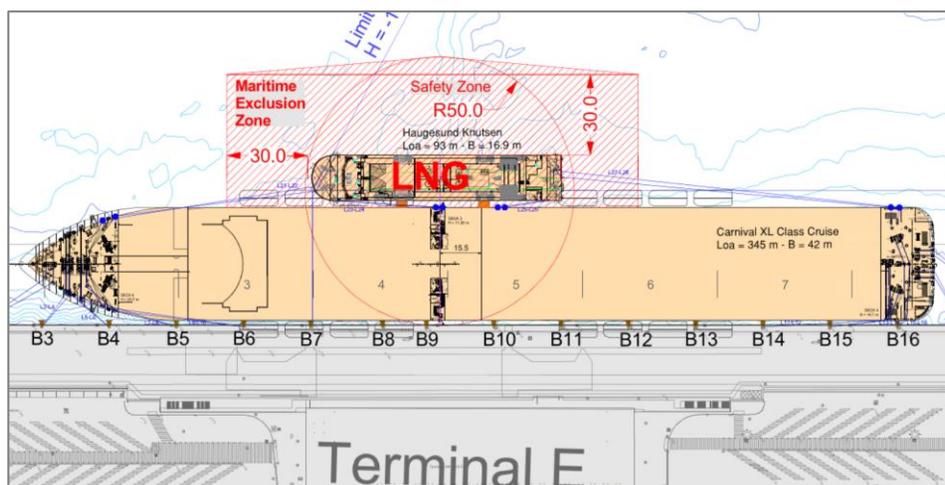
- Etapa I: Cálculo de las fuerzas de interacción generadas por el paso de buques sobre los buques atracados utilizando el modelo numérico ROPES desarrollado por PMH BV (Pinkster Marine Hydrodynamics BV, Holanda), Svašek Hydraulics, MARIN y Deltares

La interacción hidrodinámica entre las carenas de uno o varios buques en navegación y uno o más buques atracados se pone de manifiesto en la aparición de unas fuerzas de succión en los 6 grados de libertad (vaivén, deriva, alteada, balance, cabeceo y guiñada) originadas por el campo de presiones y velocidades del agua en las proximidades del buque en tránsito. La variación del flujo también depende de la profundidad del canal de navegación, así como de la configuración de los márgenes del canal. Las Figuras 9 y 10 muestran la simulación de casos para la obtención de fuerzas y momentos generados sobre los buques en muelle debidos al tránsito de otro buque.

- Etapa II: Análisis del comportamiento dinámico de los buques objetivos atracados bajo la acción combinada del viento, el oleaje y corrientes locales compatibles con la navegación en el puerto, e incorporando las fuerzas de interacción obtenidas mediante ROPES empleando modelo numérico dinámico.

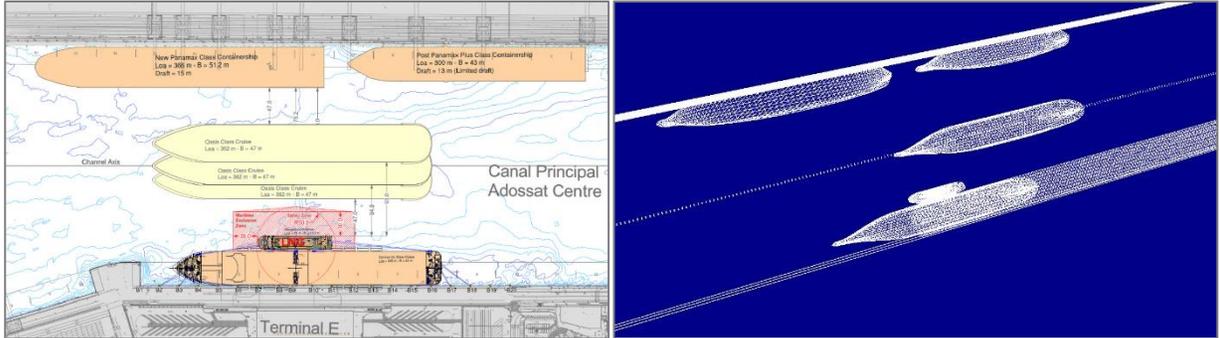
Para estas evaluaciones resulta muy relevante conocer la Regulación del tráfico marítimo en el puerto, tanto en lo que respecta a las condiciones climáticas límite como a las velocidades máximas para la navegación de los buques en puerto, así como la regulación que pueda haber en lo que respecta a las zonas de seguridad y de exclusión marítima para las operaciones STS, como es el caso de la regulación mostrada en la Figura 8, correspondiente al Puerto de Barcelona.

Figura 8: Zonas de seguridad y de exclusión de operaciones STS



Fuente: Passing Ship Analysis during "Haugesund Knutsen (G-024)" STS Bunkering Operations with "Carnival XL Class Cruiser" at Barcelona Port Cruise Terminal (Spain). Sioport21. 2022

Figura 9: Casos analizados y mallado de buques (pasante, amarrados y abarloado en operación de bunkering) y canal de navegación en la herramienta ROPES.



Fuente: Passing Ship Analysis during "Haugesund Knutsen (G-024)" STS Bunkering Operations with "Carnival XL Class Cruiser" at Barcelona Port Cruise Terminal (Spain). Siport21. 2022

Figura 10: Ejemplo de resultados de Fuerzas y Momentos obtenidos tanto en el buque amarrado como en el buque de suministro abarloado, debidos al paso de buque en tránsito por el canal



Fuente: Passing Ship Analysis during "Haugesund Knutsen (G-024)" STS Bunkering Operations with "Carnival XL Class Cruiser" at Barcelona Port Cruise Terminal (Spain). Siport21. 2022

Establecidos los límites aceptables para los movimientos de los buques en operación y para los esfuerzos en el equipamiento de atraque (defensas) y amarre (amarras y bolardos), se pueden **obtener las condiciones límite de permanencia y operación de los buques en términos de distancia/velocidad de paso del buque que transita** en las inmediaciones de los buques amarrados y con ello **verificar las regulaciones existentes o asesorar sobre las modificaciones a realizar** en ellas para conseguir **operaciones de suministro de combustible seguras y eficientes**.

3. HERRAMIENTAS SOBRE COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

El desarrollo de nuevos sistemas de propulsión marina con combustibles alternativos a los convencionales plantea para todos los agentes involucrados en el transporte (empresas de energía, de transporte de mercancías y viajeros, puertos, navieras, astilleros y administraciones) la necesidad de analizar la implementación de distintas alternativas de mejora de la eficiencia energética y conocer su rentabilidad económica y medioambiental, aumentar el grado conocimiento en las variables a tener en cuenta antes, durante y después de las operaciones de bunker, en las medidas de seguridad de las operaciones e incluso la determinación de los equipos más críticos para el funcionamiento del sistema y planificación de actuaciones preventivas sobre los mismos, tanto en diseño de las alternativas de suministro como en las estrategias de mantenimiento preventivo. Este interés lleva al desarrollo de **aplicaciones** de ayuda a la toma de decisiones como las que se presentan **SiBUNKER, ECOBUQ o NEWBUNKER**.

SiBUNKER

El Simulador Conceptual de Bunkering de GNL basado en procedimiento de operaciones e indicadores de disponibilidad, tiene como objetivo principal servir de ayuda a la evaluación y conocimiento de las distintas variables a tener en cuenta antes, durante y después una operación de bunker GNL, en función de las configuraciones y procedimientos más usuales, para que las operaciones de bunker de GNL puedan desarrollarse de forma segura.

No se pretende sustituir ni cubrir todas las posibles regulaciones que sean aplicables en cada puerto, sino de recoger en dicha herramienta una serie de requerimientos generales, y por lo general comúnmente aceptados, que puedan servir de ayuda tanto a los operadores de bunker como a las autoridades competentes y a los armadores, en el diseño y realización de operaciones de bunker de GNL. El simulador proporciona un indicador de disponibilidad de la operación de bunker de GNL, basado en la evaluación y cuantificación de una serie de variables presentes en algún momento de una operación bunker de GNL.

En primer lugar, se procede a la definición del procedimiento de operaciones náuticas de bunkering de GNL. Para ello se realiza un análisis del estado del bunkering de GNL en España y las normativas y guías de referencia existentes, se realiza una descripción de las fases de una operación bunker, se identifican los actores involucrados en la misma, se procede a la descripción de las alternativas de suministro más comunes y a la identificación de las variables parametrizables (condiciones hidrometeorológicas, áreas de control, operaciones simultáneas, variables de procedimiento como puedan ser los estudios de riesgos, sistema de inertizado y purga, válvulas de seguridad y venteos, sistemas de parada y desconexión de emergencia, extinción de incendios, comunicaciones...) para obtención de índice de disponibilidad de condiciones de contorno.

Posteriormente se desarrolla un factor de disponibilidad cualitativo que permita conocer la viabilidad de cada operación de bunkering de GNL conforme a las potenciales configuraciones tipo para las siguientes modalidades de suministro:

- TTS - Truck to Ship: de camión cisterna a barco
- MTTs con colector Y- Multiple Truck to Ship con colector Y: para suministro desde dos camiones cisterna a la vez al barco.

considerando todas las potenciales configuraciones para estas modalidades, los sistemas y equipos involucrados, la participación de personas y las condiciones del entorno.

- STS – Ship To Ship: de barco a barco

Considerando unas tasas de fallo de los equipos de referencia para esta última alternativa, no habiendo sido verificadas por ningún suministrador de equipos.

Finalmente se diseña el simulador de operaciones de suministro de GNL y se desarrolla el software.

El proyecto fue financiado con fondos del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, en la convocatoria de Agrupaciones Empresariales Innovadoras (AEI) y la aplicación resultante, desarrollada por Siport XXI, S.L. (Siport21) está disponible en <https://gasnam.es/project/sibunker/>

ECOBUQ-NEOBUQ

Es un proyecto orientado al desarrollo de un simulador para determinar el retorno económico y ambiental durante la operación de distintos tipos de buques, de aquellas medidas llevadas a cabo para alcanzar los restrictivos objetivos climáticos a los que se enfrenta el sector marítimo.

El simulador permite el cálculo del índice de eco-eficiencia, que se define como la relación entre la variación del índice de eficiencia energética para buques existentes cuando se aplica al buque una medida de mejora técnica y la valoración económica de esa medida técnica considerando inversión inicial financiada o no, ahorro en combustible, costes varios y pérdidas por parada del buque.

Entre las medidas técnicas que se pueden aplicar se encuentran: cambio de combustible a uno alternativo (GNL, etanol, metanol, hidrógeno, amoniaco...), sistema de lubricación por aire, sistema de propulsión asistido por viento (velas), paneles solares, sistemas de recuperación de energía residual, hélices de alto rendimiento, pinturas de baja resistencia y limitación de la potencia.

ECOBUQ-NEOBUQ también calcula de manera preliminar el índice operativo de la intensidad de carbono (CII) de un buque, empleando como datos de entrada la distancia navegada en un año y las toneladas o MWh de combustible consumidas durante el mismo. Además, calcula el nuevo CII debido a la implementación de las medidas técnicas anteriores, ya que éstas resultan en la mayoría de los casos en un ahorro del consumo de combustible.

El proyecto fue financiado con fondos del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, en la convocatoria de Agrupaciones Empresariales Innovadoras (AEI) y la aplicación resultante fue desarrollada en su primera fase (ECOBUQ) por Siport XXI, S.L. (Siport21), Consultoría Técnica Naval Valenciana S.L. (COTENAVAL) y Naviera Murueta S.A y en segunda fase (NEOBUQ) por Siport XXI, S.L. (Siport21) y Consultoría Técnica Naval Valenciana S.L. (COTENAVAL) junto con las AElS Gasnam y Foro Marítimo Vasco y está disponible para uso libre al público en <https://ecobuq-neobuq.netlify.app/>

NEWBUNKER

Es una iniciativa que analiza el estado del arte en sistemas de propulsión marina con combustibles alternativos a los combustibles convencionales, como el amoniaco y el hidrógeno. Este proyecto ha permitido identificar las distintas modalidades de suministro de estos combustibles en función del sistema de almacenamiento y del sistema de generación de energía instalados a bordo del buque.

El proyecto fue financiado con fondos del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España, en la convocatoria de Agrupaciones Empresariales Innovadoras (AEI) y liderado por Gasnam, contando con la dirección técnica de Gas Natural Comercializadora (grupo Naturgy) y la participación de ESK, Fundación Cidaut, TESICNOR, Siport21 y AEI-Foro Marítimo Vasco. La aplicación resultante está disponible para uso libre al público en <https://ecobuq-neobuq.netlify.app/>

4. REFERENCIAS

Noticias del Sector: H2 Business News, S&P Global, Portal Portuario, Petronor, NexoTrans, Inспенet, LinkedIn, Cero 2050, Sedigas, Navalia, Anave, El estrecho digital

Rystard Energy's Clean Shipping Solution. Abril 2024

Estudios de compatibilidad, buque amarrado y passing-ship para la "Haugesund Knutsen (G-024)". Siport21. 2022-2023

Gasnam web academy