

Paper CA1211_Pitton Straface_L - ESTUDIOS DE NAVEGACIÓN EN PROXIMIDAD A MUELLE Y OPERACIÓN PORTUARIA EN FUNCIÓN DEL BUQUE DE DISEÑO

Pitton Straface, Leandro Cristian
Egresado EGIP Universidad de Buenos Aires

Email: leapitton@gmail.com

ABSTRACT: El presente trabajo intenta estudiar la navegación, en condiciones de seguridad, de los buques de diseño hacia y desde el muelle. Se considera fundamental, que haciendo un estudio de los parámetros medioambientales y control de las operaciones portuarias, se podrían reducir los accidentes y, por ende, los costos de seguro para los buques e instalaciones portuarias. Se busca evaluar en modelos de simulación las maniobras adecuadas para lograr el fin considerado, como ser la utilización o no de remolcadores de empuje y tiro, propulsiones del buque, abarcando los requerimientos necesarios. Se analizarán las recomendaciones internacionales, relacionado las profundidades, corrientes, vientos y oleaje por el paso de las embarcaciones. En resumen, se pretende enfatizar la necesidad de contar con estudios de investigación de la navegación de los buques de diseño en proximidades al muelle, en virtud de sus características, que le son propias, y en las condiciones seguras a operar, generando un registro de antecedentes público de consulta para los prácticos y capitanes para la navegación fluvial y marítima en Argentina.

1 INTRODUCCIÓN

En un proyecto de navegación se consideran las condiciones físicas de la zona (canales de navegación, facilidades portuarias, servicios de dragado y emisión de cartografía), los factores ambientales (niveles de agua, olas, vientos, mareas, corrientes, entre otros), el comportamiento hidrodinámico de los buques al navegar (diseño del buque, maniobrabilidad, factores humanos, equipamiento de navegación, VTS, AIS) y el tráfico de buques y las reglas que los gobiernan (reglas de operación, ayudas a la navegación, servicios de pilotaje y remolque, comunicaciones, VTS, AIS), estando íntimamente relacionados.

El diseño del canal para la navegación está fuertemente influenciado por el tamaño de los buques y la precisión y calidad de las ayudas a la navegación (AToN).

En la etapa de diseño conceptual se plantean alternativas y se estudian hasta un determinado nivel que permita la comparación entre ellas. En esta etapa se utilizan reglas del arte y manuales de ingeniería.

En la etapa de diseño de detalle se elige una de las alternativas que es la que se estudia en profundidad y con herramientas más sofisticadas.

2 METODOLOGÍA

2.1 Condiciones del sitio

Una vez que se ha seleccionado un buque de diseño para la navegación y puerto destino, se deben recopilar datos sobre las condiciones predominantes del sitio para asegurar un diseño adecuado.

Niveles de agua: detalles de las variaciones de los niveles de agua (fluvial) y mareas (marítimo) e información histórica sobre los temporales (por ejemplo, sudestada) u otros efectos que causan una subida o bajada del nivel del agua. La estimación del nivel de agua máxima y mínima es importante para evaluar las profundidades de dragado requeridas para el acceso de los buques. También se debe considerar el aumento del nivel del mar a largo plazo.

Corrientes y flujo de mareas: detalles de las velocidades de las corrientes, ya que esto puede influir en la maniobrabilidad del buque y,

por lo tanto, ancho de canal y otros parámetros requeridos para la navegación.

Viento y olas: las boyas de medición de olas son instaladas para obtener datos de oleaje que permitan obtener datos del clima. En otros lugares, el clima de olas se evalúa utilizando una técnica de proyección posterior a partir de registros de viento, generalmente se obtiene de un aeropuerto cercano. Alternativamente, los datos también están disponibles proyectando alturas de olas desde aguas profundas hasta aguas poco profundas, a partir de observaciones (por satélites) y modelos matemáticos.

El clima de viento y oleaje se utiliza para definir la navegación, evaluar las cargas en buques, estructuras y grúas y evaluar la tranquilidad dentro del puerto y la cantidad de tiempo de inactividad que se puede experimentar en la terminal portuaria debido a la excesiva altura residual de las olas y las altas velocidades del viento.

2.2 Pronóstico de tráfico

Antes de que se pueda planificar la navegación, es fundamental comprender la naturaleza del comercio de importación y exportación en la región. Puede ser que el comercio local de importación/exportación solo justifique pequeños buques de transbordo; por otro lado, la ubicación estratégica de una terminal puede facilitar su uso como centro de transbordo. En cada caso el tamaño de buques que realmente pasan dentro de la región geográfica sirve como guía para los tamaños de buques para los cuales la vía navegable debería estar diseñada.

También se debe considerar el desarrollo futuro de los tamaños de los buques, para garantizar que los muelles puedan ser diseñado para ser dragados más profundo en el futuro y ser capaz de aceptar buques más grandes a medida que crece el comercio.

Del mismo modo, se debe permitir un espacio de maniobra adecuado para los buques a fin de permitir un aumento en el tamaño de dársenas de maniobra y ancho de canales incluyendo la entrada al puerto.

Una vez que se definen los tamaños de los buques de diseño, las longitudes de los muelles y las profundidades de dragado se pueden evaluar con confianza utilizando estos parámetros del buque.

2.3 Acceso Marítimo

El tamaño del buque está relacionado con la economía del transporte marítimo, ya que los costos por tonelada-km de carga, con respecto al combustible, la dotación y el valor de capital de una embarcación cargada en el mar, disminuyen a medida que aumenta el tamaño de la embarcación. Para esto razón por la que a menudo se ejerce presión sobre la autoridad portuaria para que proporcione canales de acceso para buques grandes, o para permitir que los buques más grandes utilicen los canales existentes.

El acceso marítimo óptimo varía en el tiempo, ya que depende de las variaciones tanto del comercio mundial como de los mercados, y sobre las tendencias en las prácticas de transporte y manipulación de carga.

Para diseñar el acceso marítimo al nivel deseado de navegabilidad y seguridad, es necesario evaluar una serie de elementos claves, incluidos el tamaño y el comportamiento del buque, los factores humanos en el manejo del buque y los efectos del entorno físico.

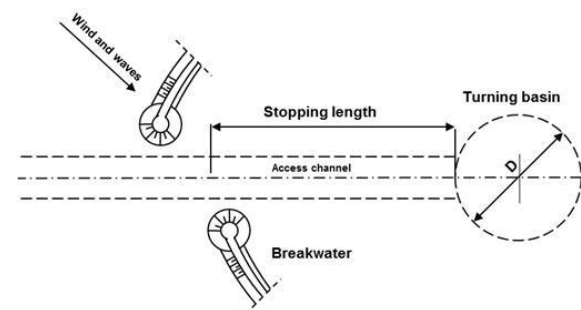


Figura 1. Disposición principal del acceso marítimo de un puerto.

Las dimensiones del canal de acceso y dársena de giro generalmente dependen de:

- Maniobrabilidad y velocidad del buque.
- Nivel de peligrosidad de la carga.
- Densidad del tráfico.
- Visibilidad y nivel de las ayudas a la navegación.
- Condiciones ambientales físicas consistentes en viento, olas, corrientes, pero también la dureza de la superficie inferior.
- Rango de marea y niveles de agua.

Un área típica de espejo de agua portuaria incluye el área de parada del buque, el área de maniobras, la dársena de giro y áreas de

atraque frente a las terminales. La longitud del área de parada en el interior de las obras de abrigo deberían ser suficientes para permitir que una embarcación que ingrese al puerto se detenga de manera segura. La longitud de parada de un buque depende de la masa del buque, la velocidad de viaje, la potencia del motor instalado y condiciones ambientales locales.

En general, la distancia de la detención varía entre 3,5 y 8,0 veces la longitud de la buque más largo que se espera que ingrese al puerto, sujeto a su masa y velocidad. A menudo, los buques son compatibles con los remolcadores y se debe tener en cuenta el área requerida para los remolcadores durante las maniobras de los buques.

2.4 Requisitos de espacio

En función de la capacidad de amarre, históricamente se ha observado que cuando la ocupación de atraque en una terminal de 2 atraques supera el 50 % existe una posibilidad significativa de que los buques tengan que esperar más del 25 % de su tiempo de atraque.

Por lo tanto, generalmente se ha adoptado como criterio de nivel de servicio un nivel de ocupación del atraque del 50-60 % para la capacidad de atraque para terminales típicas de dos atraques.

El mejor enfoque para estimar la capacidad de atraque es utilizar la teoría de colas. En el caso de una terminal de contenedores, una relación del 10 % entre el tiempo de espera y el tiempo de servicio es generalmente aceptado. En la Figura 2 se muestran los tiempos de espera relativos para uno, dos y tres sitios de atraque, como factor del tiempo de servicio, derivadas de la Tabla IX de UNCTAD (Distribuciones Erlang para tiempos de espera y servicio). Eso puede verse que la ocupación límite de atraque basada en la proporción del 10 % es 30, 50 y 60 % para 1, 2 y 3 literas respectivamente.

Berth occupancy (utilisation)	Single berth	Two berths	Three berths
30%	0.13	0.02	0.01
40%	0.24	0.06	0.02
50%	0.39	0.12	0.05
60%	0.63	0.22	0.11
70%	1.04	0.41	0.23
80%	1.87	0.83	0.46
90%	4.36	2.00	1.20

Figura 2. Tiempos promedio de espera de los buques.

La capacidad de atraque depende más de las características del buque (eslora, desplazamiento, porcentaje de carga del buque y capacidad descarga/carga por escala) y horario, en lugar de las características geométricas del atraque de ellos mismos.

3. DESARROLLO

3.1. Métodos empíricos y modelos de estudio

Se han desarrollado sistemas de simulación de maniobras/navegación de barcos para evaluar y optimizar el diseño horizontal de un canal de navegación o dársena portuaria. Ellos por lo general se pueden describir:

- Métodos empíricos.
- Modelos de simulación de navegación de tiempo rápido.
- Modelos de simulación de navegación en tiempo real.
- Investigaciones de modelos físicos.

En el caso de los sistemas de simulación, están compuestos por software de simulación, modelos matemáticos de maniobra, bases de datos de áreas geográficas y herramientas de análisis y reproducción.

La principal diferencia es que la simulación de tiempo rápido utiliza algoritmos de piloto automático para controlar el barco y remolcadores, mientras que los sistemas de simulación en tiempo real utilizan un marinero real o piloto marino para controlar el barco y remolcadores simulados.

Con respecto al entorno del puente, los simuladores en tiempo real para el diseño de ingeniería pueden tener varios niveles de sofisticación. Algunos pueden ser muy simples con una vista de puente y panel de control que se muestra en un solo monitor o pantalla de proyección. Algunos pueden tener una multipantalla mostrar e incluso tener controles de puente reales para uso directo del piloto.

En general, software de simulación, disponen de modelos matemáticos de maniobras de barcos y bases de datos geográficas que se utilizan para ambos tipos de sistemas de simulación.

La mayor precisión de maniobra de los modelos matemáticos de maniobra de barcos puede ser logrado si se basan en datos a gran escala, tales como datos de ensayos, modelos

y/o viento en pruebas de túnel y luego se ajustan con otros datos a gran escala.

Sin embargo, también es posible producir modelos representativos basados en el diseño numérico y modelos probados de similares tipo y tamaño de los barcos.

La base de datos geográfica del simulador describe el área donde se realizan las simulaciones. La realidad de la representación geográfica depende de la batimetría disponible, datos topográficos e hidráulicos, que pueden influir en la respuesta hidrodinámica de las embarcaciones de maniobra y el escenario visual para los prácticos (en simulación en tiempo real).

3.2 Simulación de tiempo rápido

Operan mediante el uso de una serie de ecuaciones que representan el comportamiento de un piloto en el control de la nave y los remolcadores. Estos son operados de tal manera que el barco simulado se mantenga en una derrota de referencia.

Además, la dirección de viaje del barco está controlada por un piloto automático, acoplado a un algoritmo de control del motor. El control de los remolcadores se lleva a cabo normalmente mediante métodos deterministas, usando algoritmos y reglas relativamente simples. Todos estos algoritmos se utilizan para controlar el barco en función de la distancia a la que se desvía de la derrota prevista, o de una posición.

Esta forma de simulación se considera apropiada para representar el comportamiento de un piloto en ciertas circunstancias. Estos incluyen circunstancias en las que las acciones del piloto son relativamente sencillas y donde el diseño de canales son relativamente rectos, o aquellos sin curvas complejas. Sin embargo, en las etapas finales de una aproximación a un puerto o muelle, o al virar el buque en un área de maniobra, es posible que no se cumplan estas condiciones. En tales casos, debe ser considerado si el uso de la simulación de tiempo rápido es válido y realista. Si las simulaciones de tiempo rápido no son representativas, la simulación en tiempo real debe usarse junto con un piloto experimentado.

Para ser efectivos, los estudios de simulación de tiempo rápido deben usar una gran cantidad de ejecuciones para permitir algunos análisis estadísticos de los resultados. Es probable que

el piloto automático conste de cinco o más parámetros principales que pueden variar para representar una variedad de acciones del piloto humano.

Para que los resultados sean significativos, es necesario realizar una serie de ejecuciones repetidas para cada condición de operación, con los parámetros de seguimiento variados en un rango para representar un rango de desempeño del operador. Se deben realizar aproximadamente diez ejecuciones por escenario para representar un nivel de estudios adecuado.

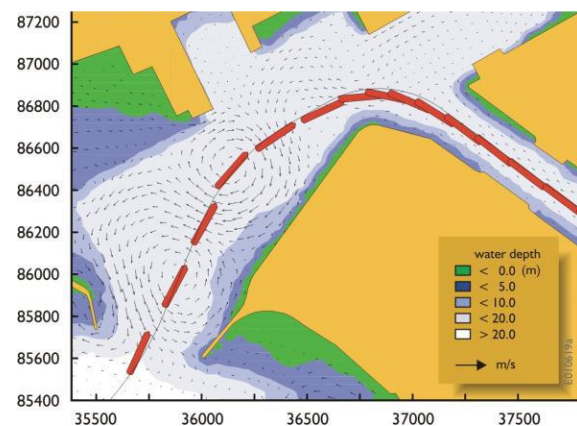


Figura 3: Salida de simulación de tiempo rápido.

3.3. Simulación en tiempo real

Una herramienta más completa para examinar la navegación y las maniobras de los barcos es la simulación de navegación en tiempo real. Toda la información visual y de otro tipo relevante se proporciona a un piloto humano, que por lo tanto es capaz de operar el barco y los remolcadores de una manera realista.

La simulación de navegación en tiempo real puede llevarse a cabo en simuladores de puente completo o puente parcial, que varían en el nivel de información presentado al piloto. El aspecto más crítico es la provisión de una escena visual adecuada con un campo de visión relativamente grande que involucra un número de monitores o imágenes proyectadas de tal manera que la visión periférica del piloto se llene con la vista simulada. Un simulador en tiempo real también debería tener los controles del barco replicados para que el buque se pueda controlar de una manera realista.

El uso de instrumentación y controles reales proporciona a los navegantes tanto realismo de

puente como sea posible. De esta manera los resultados, conclusiones y recomendaciones pueden basarse en un revisión minuciosa de los aspectos técnicos, así como de los factores humanos importantes, como tiempos de respuesta y comunicación.

3.4 Ayudas a la navegación (AtoN)

Las directrices y recomendaciones para Ayudas a la Navegación (AtoN) son acordadas internacionalmente y publicado por IALA (2010).

La navegación en sí puede entenderse como monitorear la posición de uno geográficamente dentro de una vía restringida. Hay varios métodos de navegación muy utilizados en el mundo marítimo:

- Navegación visual que utiliza observaciones ópticas.
- Navegación por radar que utiliza observaciones de radar.
- Navegación electrónica que utiliza señales de posicionamiento de satélites y otros sistemas.

Hoy en día, todos se usan generalmente en combinación según corresponda. Además, VTS/VTMS (Vessel Traffic Service) están monitoreando y ayudando a la navegación segura desde la costa a través de radio en muchas zonas portuarias y costeras.

3.5 Ayudas Electrónicas

Las ayudas electrónicas incluyen radar, ECS, ECDIS, GNSS, DGPS, eLORAN, e-Navigation, AIS, PPU y sistemas misceláneos.

El radar se puede utilizar tanto para la fijación de la posición geográfica como para el control de la posición relativa a través de una variedad de técnicas. La tecnología de radar sigue desarrollándose para canal marcado, la adición de balizas de radar o Racons puede mejorar significativamente la visibilidad de boyas importantes, etc.

ECS es un sistema de información de navegación no aprobado por la OMI que muestra electrónicamente posición del buque y datos de cartas náuticas relevantes e información de una base de datos ECS en una pantalla de visualización.

El equipo ECDIS (Electronic Chart Display and Information System) se especifica en el Normas de funcionamiento del ECDIS de la OMI y con arreglos de respaldo adecuados pueden ser aceptado por cumplir con la tabla actualizada requerida por la regulación V/19 y V/27 de la Convenio SOLAS de 1974.

GNSS (Global Navigation Satellite System) es el término genérico estándar para satélite sistemas de navegación.

DGPS (GPS diferencial) es una mejora del GPS; el resultado es significativamente más fijación de posición precisa y fiable.

eLORAN (sistema mejorado de navegación de largo alcance) es un sistema independiente, diferente complemento al GNSS. La comunidad marítima internacional comprende ahora que su futuro entorno digital de navegación electrónica necesita un sistema alternativo acordado internacionalmente al GNSS. eLORAN es el único candidato viable.

e-Navigation (navegación electrónica) aunque no es estrictamente un sistema de fijación de posición, es un concepto de navegación que tendrá influencias de largo alcance en el futuro de los barcos. Sistemas y técnicas de navegación. Es un concepto dirigido por la OMI basado en la armonización de sistemas de navegación marina y servicios de apoyo en tierra impulsados por las necesidades de los usuarios.

AIS (Sistema de Identificación Automática) es un sistema utilizado por los barcos y el Tráfico de Buques principalmente de identificación y localización de embarcaciones, para facilitar la transmisión de datos como los de identificación, meteorológicos y mareas de las marcas de navegación a través de AIS.

PPU (Unidad Piloto Portátil) es un sistema basado en computadora portátil que, dependiendo de su nivel de sofisticación y fabricante, es capaz de proporcionar al Piloto su propio total o Consola de control de navegación y maniobras parcialmente independiente.

Los sistemas misceláneos son equipos más fundamentales que también están en uso e incluyen pero no limitado a brújulas giroscópicas, magnéticas, Fluxgate y basadas en GPS, ecosondas y dispositivos de sonda, etc. Además, hay numerosos dispositivos de acoplamiento.

3.6 Sistemas VTS/VTMS e impacto

Servicios de tráfico de embarcaciones (VTS), a menudo denominados VTMS (Gestión de tráfico de embarcaciones System), son sistemas de gestión de tráfico de puertos o regiones costeras basados en tierra

Un VTS es particularmente apropiado en un área que puede incluir cualquiera de las siguientes:

- Alta densidad de tráfico.
- Canales angostos, configuración portuaria, puentes y áreas similares donde el avance de los buques pueden estar restringidos.
- Cambios existentes o previsibles en el patrón de tráfico resultante de operaciones portuarias o costa afuera, desarrollos de terminales o exploración y explotación costa afuera.
- Tráfico de cargas peligrosas.
- Patrones de navegación conflictivos y complejos.
- Elementos hidrográficos, hidrológicos y meteorológicos difíciles.
- Bajíos cambiantes y otros peligros locales.
- Consideraciones ambientales.
- Interferencia del tráfico de embarcaciones con otras actividades marítimas.
- Un registro de siniestros marítimos.
- Servicios de tráfico de embarcaciones existentes o planificadas y la necesidad de cooperación entre estados vecinos.

3.7 Maniobrabilidad básica

La dinámica de los buques es tal que, cuando están bajo control manual (como suele ser el caso en canales de aproximación) seguirán un camino navegado (derrota), que, en presencia de cualquier fuerza externa como ser el viento, las olas, la corriente, etc., excederá su anchura en cierta cantidad.

Esto se debe a la velocidad de respuesta tanto del capitán del buque al interpretar la información visual de señales que indican la posición del buque en el canal, y la del buque al reaccionar al timón y motor principal. El ancho de la trayectoria de la derrota, que es el canal de maniobra básico, dependerá de una serie de factores, pero los elementos claves son:

- La maniobrabilidad inherente del buque (que variará de un buque a otro y con profundidad del agua/proporción de calado).
- Habilidad del capitán de buques.
- Señales visuales disponibles para el capitán de buques.
- Visibilidad general.

De estos, los dos primeros son los más importantes, ya que los otros dos pueden ser tratados por Ayudas a la Navegación (AtoN) adecuadas tanto en el exterior (p. ej., boyas) como a bordo del buque (p. ej., radar).

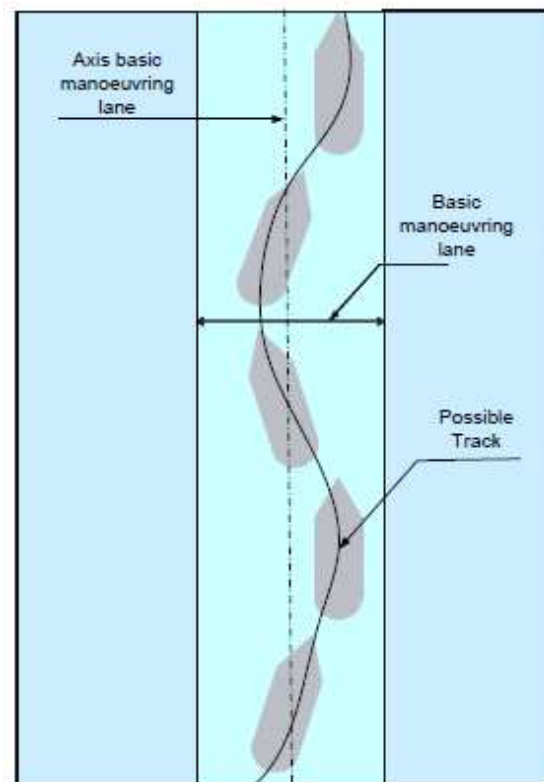


Figura 4: Canal de maniobra básico.

La maniobrabilidad del buque consta básicamente de las siguientes tres características:

- a) capacidad de mantener el rumbo con ángulos de timón bajos $\delta R < 5$ grados.
- b) capacidad de cambio de rumbo con ángulos de timón medios $\delta R = 10$ a 20 grados.
- c) capacidad de giro con un timón rígido.

Entre estas características, la capacidad de mantener el rumbo es la más importante para el ancho del canal con buques de diseño de

coeficiente de bloque alto (como VLCC y grandes graneleros), los coeficientes pueden ser intrínsecamente inestables en el curso y mostrar cierta deriva aumentada, mientras que los buques con coeficiente de bloque bajo (como los portacontenedores y los buques metaneros) los coeficientes son más estables en el curso. Con respecto a los efectos de las aguas poco profundas, la estabilidad del rumbo del buque generalmente aumenta a medida que la profundidad del agua disminuye desde las condiciones de aguas profundas. De todos modos, eso debe tener en cuenta que los buques completamente cargados a veces muestran características de inestabilidad de rumbo en profundidades medias del agua de $h/T \approx 1.5$ (donde h es la profundidad del agua y T es el calado del buque) que en aguas profundas. En aguas poco profundas de $h/T = 1,2$ o menos, como en muchas zonas portuarias, la capacidad de mantenimiento del rumbo de los buques mejora en gran medida, pero la capacidad de giro disminuye.

Las características de manejo del buque en un canal y la desviación de su rumbo pueden depender principalmente de la habilidad del capitán del buque. Las Ayudas a la Navegación (AtoN) junto con la visibilidad influyen en general en gran medida en el manejo del buque. Los siguientes tres tipos de equipos de navegación a bordo se encuentran entre los disponibles actualmente en las operaciones de manipulación de buques: una boya de observación a simple vista del mariner, una observación de boya por RADAR y la observación directa uso de GPS o GPS diferencial (DGPS).

En la operación de mantenimiento de rumbo en el canal (bajo control manual o piloto automático activo), el buque tendrá cierta cantidad de deriva (desviación lateral) de su rumbo causada por efectos de turbulencia inestable, incluso en aguas tranquilas. Debido a esta deriva, el buque tiene un 'serpenteo' en la trayectoria del canal. La magnitud de la deriva depende tanto de la inherente maniobrabilidad y el manejo del buque. La deriva del buque puede ser difícil de detectar por una pequeña cantidad de desviación, aunque un piloto automático puede detectarlo. Sin embargo, el capitán del buque puede reconocer la deriva cuando la desviación lateral de la línea central del canal se vuelve considerable. Esta deriva detectable (amplitud "serpenteante") debe ser el diseño principal de consideración para la determinación del ancho del canal como maniobra básico.

3.8 Fuerzas Ambientales

El canal debe tener suficiente ancho para garantizar una navegación segura teniendo en cuenta los efectos de fuerzas externas debidas a vientos cruzados, corrientes y olas.

Los vientos cruzados afectarán al buque en todas las velocidades, pero tendrán su mayor efecto a bajas velocidades de los buques. Hará que el buque se desplace lateralmente o adopte un ángulo de abatimiento, tanto de los cuales aumentan la anchura necesaria para maniobrar. Es poco probable que un buque pueda mantener un rumbo constante a bajas velocidades con viento de costado, el capitán del buque tendrá dirección del mismo ligeramente contra el viento, lo que hace que el buque desarrolle un ángulo de deriva y un ligero curso oscilatorio.

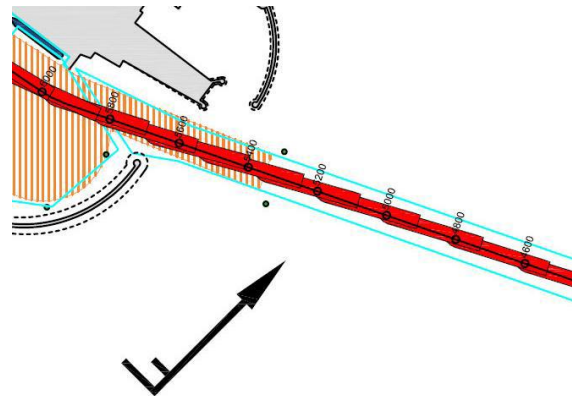


Figura 5. Rumbo del buque en condiciones de viento fuerte.

Los efectos del viento cruzado dependen de:

- Velocidad del buque.
- Resistencia al viento de la embarcación (en relación con el área sumergida lateral).
- Relación profundidad/calado (porque la resistencia de un buque al movimiento lateral aumenta a medida que la relación profundidad/calado se aproxima a la unidad ya que el viento provoca menos deriva en la parte en pequeños espacios libres debajo de la quilla).
- Velocidad y dirección del viento en relación con el buque.

Los efectos del viento se vuelven significativamente mayores a bajas velocidades del buque, como en áreas portuarias, e incluso

a altas velocidades de buque para buques de superficie vélica considerable.

Para mantener un rumbo recto en el canal bajo vientos cruzados, se requiere generar contra timón un ángulo de deriva adecuado para compensar el abatimiento. Estas características se deben al equilibrio de fuerzas hidrodinámicas (fuerzas del casco y fuerzas del timón) y fuerzas aerodinámicas actuando en el buque. El requerimiento de ancho de canal para vientos cruzados se estima tomando esta condición de marcha oblicua en cuenta.

Las corrientes cruzadas afectan la capacidad de un buque para mantener un rumbo, mientras que las corrientes longitudinales afectan su capacidad de maniobrar y para detenerse. Como se mencionó anteriormente, la maniobrabilidad de un buque cambia a medida que su relación profundidad/calado se aproxima a la unidad. Como resultado, su capacidad para hacer frente a las corrientes también cambiará a medida que la profundidad del agua sea menos profunda.

En algunos puertos, las corrientes pueden ser demasiado fuertes en ciertas etapas de la marea para permitir que algunos buques naveguen con seguridad. Esto puede causar que sus llegadas y salidas se restrinjan a un horario determinado de períodos (o 'ventanas de marea') en el ciclo de las mareas. Esto implica que habrá momentos (acceso tiempo de inactividad) por lo que el canal no estará disponible para dichos buques. La aceptabilidad del tiempo de inactividad depende de criterios económicos y de seguridad.

Las olas influirán naturalmente en el diseño de la profundidad del canal como resultado de la verticalidad del buque con movimientos (cabeceo, levantamiento y balanceo). Sin embargo, también pueden tener efectos en el ancho de diseño. El buque generalmente hace un movimiento de guiñada en las olas debido a las fuerzas de las olas inestables.

Por lo tanto, el ancho del canal debe incluir la deriva debida a dicha guiñada. Además de fuerzas de onda inestables, hay fuerzas de deriva de onda constantes de segundo orden, que son similares a fuerzas del viento. Estas fuerzas de deriva de las olas pueden ser consideradas dependiendo de las condiciones locales de las olas.

La visibilidad restringida (que generalmente se considera inferior a 0,5 nm) tendrá un impacto directo en el tamaño, tipo y densidad del tráfico permitido para operar. Por ejemplo, el tráfico puede regularse en un solo sentido, el movimiento de buques de carga peligrosa puede ser prohibido, o el movimiento de embarcaciones generalmente sin piloto puede requerir los servicios de un piloto. Si la visibilidad se deteriora a un nivel extremo, es posible que la seguridad de los remolcadores puede verse comprometida y, por lo tanto, el movimiento de grandes embarcaciones dentro del área puede verse reducido o prohibido. Si los períodos de poca visibilidad ocurren con frecuencia, el espacio entre las marcas de canal deben reducirse en consecuencia.

3.9 Código y Normas Relacionadas con la velocidad de ataque

En el Congreso Internacional de Navegación de 1953 en Roma, el Prof. Baker examinó la velocidad de ataque basándose en observaciones de campo en terminales marítimas expuestas, ubicadas en el Reino Unido y el Golfo Pérsico. Su trabajo fue ampliado por Saurin y Broisma y dieron como resultado las llamadas curvas de Broisma.

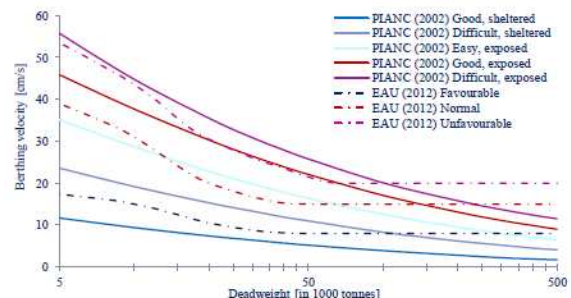


Figura 6. Valor medio de diseño de la velocidad de atraque según PIANC WG 33 y velocidad de atraque característica según EAU1 (2012) en función de las condiciones de atraque y el tonelaje de peso muerto del buque (DWT).

Broisma recopiló velocidades de atraque utilizando sistemas de atraque en tierra en tres atracaderos en Rotterdam y uno en Escocia. Los valores medios de velocidad de atraque se denominaron velocidades normales de atraque y representan un período de retorno de 30 años basado en 100 maniobras de atraque por año.

Las recomendaciones alemanas para estructuras frente al mar EAU 2012 y la ROM española 0.2-90 recomiendan el uso de la velocidad de atraque característica. En estas recomendaciones, se supone que la velocidad

de atraque de los grandes buques de navegación marítima con un DWT superior a aproximadamente 50.000 toneladas es independiente del tamaño y tipo de buque. Además, se consideran tres categorías de condiciones de navegación. Las recomendaciones alemanas para estructuras frente al mar EAU 2012 no incluyen información sobre la fiabilidad de las curvas de velocidad, pero se refieren a la ROM 0.2-90. Las tablas de velocidad de atraque en la ROM español parecen estar basadas en un período de retorno de 50 años.

La recomendación general de la OCDI japonesa y el Eurocódigo EN 1990 no cubren este tema. Las curvas originales de Brolsma fueron reproducidas y publicadas en PIANC WG 33 y ligeramente modificadas con el tiempo por la norma británica BS 6349. Al aplicar las curvas de velocidad de atraque de Brolsma, es importante tomar nota del término "diseño medio" como se incluye en PIANC WG 33. Es importante señalar que este valor no es igual a la velocidad media de atraque de un buque. El análisis del artículo original de Brolsma revela que las medidas fueron extrapoladas. Las curvas de velocidad de atraque asociadas se derivaron para una frecuencia de atraque de 3.000 embarcaciones durante un período de referencia de 30 años. Esto equivale a 100 atraques por año, suponiendo dos buques transportadores de crudo muy grandes (VLCC) por semana.

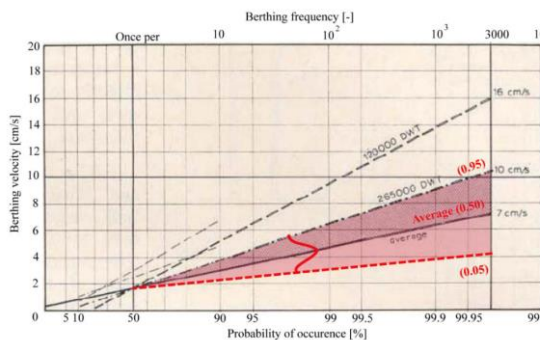


Figura 7. Extrapolación de 150 medidas derivadas por Brolsma en rojo.

Se muestra una extrapolación de velocidades de atraque hasta 3.000 maniobras. Brolsma mostró que el valor medio (línea continua que representa el cuantil 0,50) de un buque tanque VLCC (265.000 DWT) en un período de recurrencia de 30 años fue de aproximadamente 7 cm/s. Las velocidades de atraque con un 5% de probabilidad de superación en un período de recurrencia de 30 años (líneas discontinuas que representan el

cuantil 0,95) fueron de aproximadamente 10 cm/s y 16 cm/s para los petroleros VLCC y Aframax (120.000 TPM), respectivamente. Un período de recurrencia cercano a los 30 años está en línea con los valores prácticos de la industria para la vida útil de diseño de las estructuras marinas en la década de 1970.

3.9.1 PIANC WG 33

Incluye un capítulo relacionado con la determinación de las velocidades de atraque, en el que las velocidades de atraque están en función del tonelaje de peso muerto del buque (DWT).

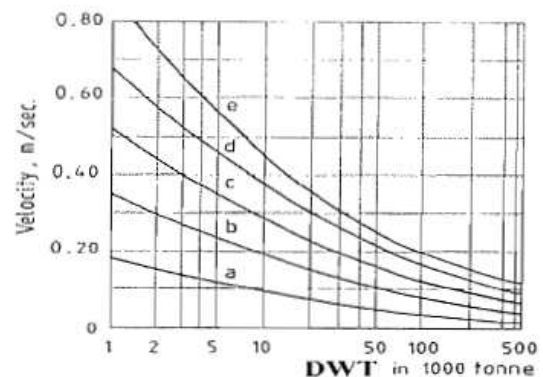


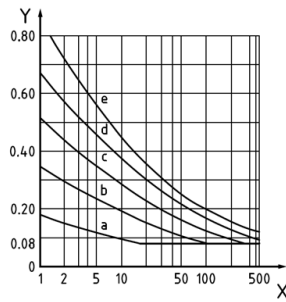
Figura 8. Gráfico de Brolsma.

Vessel Size (Displacement tonnes)	Closing Velocities (m/s)
500-8,000	0.3-0.5
10,000-45,000	0.25-0.4
50,000-85,000	0.2-0.3
100,000-200,000	0.2-0.25
330,000 and up	0.15-0.25

Figura 9. Velocidades de atraque para operaciones de buques.

3.9.2 Norma británica BS6349-4 (2014)

Recomienda el uso de una velocidad de atraque característica y no una velocidad de atraque media. En segundo lugar, la velocidad de atraque de diseño se expresa en función del desplazamiento del buque y no del peso muerto. Finalmente, BS 6349-4 estipula que se debe utilizar una velocidad de atraque característica mínima de 0,08 m/s en el diseño, independientemente de las condiciones reales de atraque.



Key
X Water displacement, in 1 000 t
Y Characteristic velocity, in m/s, perpendicular to the berth

Figura 10. Velocidad de atraque de diseño transversal según BS 6349-4.

3.9.3 ROM española (1990) y EAU alemana (2012)

La ROM español ofrece otro enfoque para estimar una velocidad de atraque de diseño. Al igual que las curvas de Brotsma, las velocidades de atraque recomendadas por ROM son valores medios pero basados en un período de retorno de 50 años. Pero, al igual que en BS6349-4, las velocidades transversales de atraque recomendadas por la ROM están vinculadas al desplazamiento del buque y no al peso muerto. Además, las curvas del ROM distinguen entre maniobras de atraque con y sin asistencia de remolcador. Finalmente, de acuerdo con los estándares BS 6349-4, ROM también proporciona velocidades de atraque longitudinales recomendadas.

Dependiendo de las condiciones ambientales (viento, olas y corrientes), se proporcionan tres curvas: condiciones favorables (línea continua), condiciones intermedias (guión punteado), y condiciones muy desfavorables (línea discontinua).

Las velocidades de atraque en EAU (2012) se basan en la ROM española (1990).

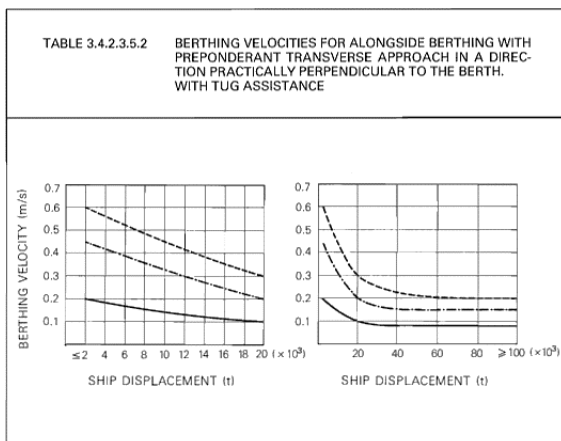


Figura 11. Velocidades de atraque de la ROM española para atraque con aproximación transversal preponderante con asistencia de remolcador.

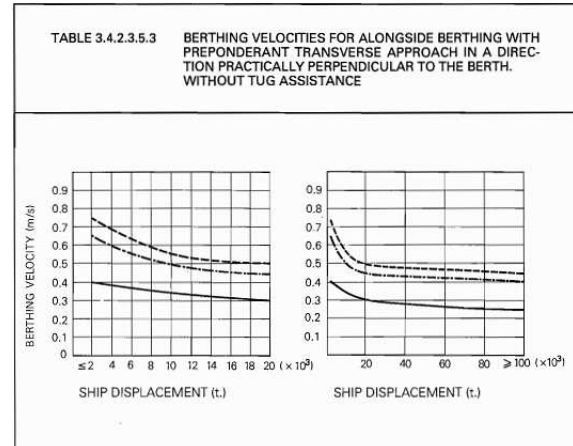


Figura 12. Velocidades de atraque de la ROM española para atraque con aproximación transversal preponderante sin asistencia de remolcador.

3.9.4 Norma técnica japonesa OCDI (2009)

La norma técnica japonesa OCDI (2009) vincula la velocidad de atraque con el peso muerto de los buques. De acuerdo con la mayoría de las otras recomendaciones, concluye que "[...] cuanto más grande es el buque, menor tiende a ser la velocidad de atraque". Las recomendaciones de la OCDI se basaron en una encuesta realizada por Moriya que estableció velocidades promedio de atraque perpendiculares a la línea de defensa para buques de carga general, portacontenedores y roll on-roll off (Ro Ro) de automóviles.

Dead Weight Tonnage (DWT)	Berthing velocity (cm/s)			
	General cargo ships	Container ships	Pure car carriers	All ships
1,000class	8.1	—	—	8.1
5,000class	6.7	7.8	—	7.2
10,000class	5.0	7.2	4.6	5.3
15,000class	4.5	4.9	4.7	4.6
30,000class	3.9	4.1	4.4	4.1
50,000class	3.5	3.4	—	3.4
All ships	5.2	5.0	4.6	5.0

Figura 13. Valor medio de las velocidades de atraque por tipo de buque según lo recomendado por OCDI (2009).

3.10 Medición de la Velocidad de Atraque

Hay varias soluciones disponibles para recopilar datos de atraque y/o ayudar a los

operadores y capitanes en tiempo real durante el proceso de atraque. Los llamados sistemas de ayuda al atraque (BAS) han existido durante algunos años y se dividen en dos categorías principales:

- a) Sistemas en tierra que usan mediciones de rango de puntos fijos desde dos o más puntos, comúnmente usando láser o microondas para medir las distancias hacia adelante y hacia atrás desde la línea de atraque en las defensas hasta el casco del buque, y las velocidades (hacia adelante y hacia atrás) perpendiculares a la línea de atraque.
- b) Sistemas basados en buques que consisten en Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) aumentados para posicionamiento, rumbo y velocidad sobre el fondo, una brújula GNSS para determinar el rumbo verdadero y un giroscopio de sistemas microelectromecánicos (MEMS) para medir la velocidad de giro o la velocidad de guiñada.

Los registros de ambas tecnologías son fuentes útiles de datos para que los diseñadores y operadores determinen la velocidad de aproximación real, el rumbo sobre el fondo, la posición (rumbo) y, en algunos casos, la velocidad angular inmediatamente antes, durante y después de que la embarcación impacte contra las defensas elásticas. Dichos datos pueden requerir un grado de procesamiento posterior para extraer la información necesaria para análisis e investigaciones adicionales.

Los datos extraídos de los archivos de transmisión del Sistema de identificación automática (AIS) tienen un uso muy limitado para estimar las velocidades de atraque y los ángulos de aproximación, ya que la tecnología AIS se basa en el sistema GPS para el posicionamiento, que a menudo no tiene la resolución y precisión necesarias para una estimación precisa de bajas velocidades. Otro factor son las frecuencias de actualización relativamente bajas del sistema AIS que rara vez permiten capturar el momento preciso del atraque.

3.10.1 Sistemas de ayuda al atraque en muelles

Los BAS (*Berthing Aid Systems*) colocados en muelle se han utilizado durante varias décadas.

Los sistemas láser son ahora el método más común para medir el alcance de los buques, aunque también se han utilizado sistemas de microondas en algunos muelles. La mayoría de los BAS permanentes se implementan en terminales de petróleo y gas, muelles de carga a granel u otras estructuras vulnerables a altas velocidades y ángulos de atraque, donde los BAS forman parte de la evaluación de peligros y la mitigación de riesgos.

3.10.2 Láseres Fijos y Portátiles

El principio de funcionamiento del láser BAS es el tiempo de vuelo (TOF), que mide el tiempo que tarda un pulso láser en viajar al objetivo y regresar. Los láseres modulados a menudo se usan en BAS ya que funcionan con mayor precisión en distancias más grandes. Los láseres modulados no miden directamente el tiempo de un solo viaje de ida y vuelta. En cambio, un láser modulado varía la fuerza del pulso rápidamente para producir una señal que cambia con el tiempo. El tiempo de retardo se mide indirectamente comparando la señal saliente del láser con la señal retardada que regresa del objetivo.



Figura 14. Láser típico en su carcasa protectora para una terminal de petróleo o gas.

Un par de láseres colocados a una distancia conocida miden la distancia desde la línea de atraque hasta el casco del buque hacia adelante y hacia atrás. El cambio en el alcance a lo largo del tiempo se usa para calcular la velocidad de aproximación perpendicular a la línea de atraque en relación con las dos ubicaciones de láser. Se utiliza geometría simple para calcular el ángulo de atraque.

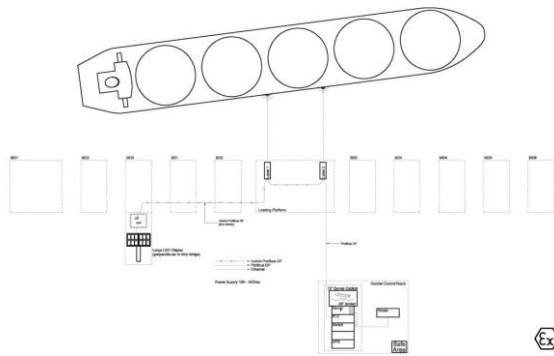


Figura 15. Disposición general de un BAS láser montado en estructura.

Algunos sistemas láser BAS tienen un modo de amarre para proporcionar una alerta temprana si los buques se están alejando del muelle.

La principal ventaja del BAS basado en láser es su alta precisión, típicamente un rango de ± 2 cm y una velocidad de ± 1 cm/s. También ofrecen altas tasas de actualización de datos. La precisión del láser es adecuada para detectar las desviaciones y el retroceso de las defensas elásticas durante los eventos de atraque, lo que podría proporcionar a los operadores una indicación de si las mismas han sido sobrecomprimidas. La energía de atraque, calculada a partir de los parámetros del buque y los datos del láser, se puede comparar con la desviación y el ángulo de compresión de las defensas observado para validar el rendimiento.

El BAS basado en láser supone que el área objetivo, que idealmente se encuentra dentro de la sección paralela del cuerpo medio de la embarcación, es plana. Las medidas de rango no tienen en cuenta las ondulaciones de proa, las puertas laterales u otras características del casco que podrían dar lugar a lecturas inexactas. La mayoría de los petroleros y graneleros tienen secciones intermedias paralelas relativamente grandes y sin rasgos distintivos, lo que significa que es poco probable que tales errores sean significativos. Sin embargo, las líneas finas y las geometrías de casco más complejas de muchos portacontenedores, cruceros y embarcaciones similares significan que un haz estrecho no puede identificar y adaptarse a estas características.

3.10.3 Pantallas de ayuda de atraque

Un sistema BAS instalado en un muelle a menudo consiste en un sistema de medición

(generalmente basado en láser) y un software de visualización que se usa en la sala de operaciones que permite monitorear y registrar la maniobra de aproximación en tiempo real. Los datos que se muestran suelen ser la velocidad de aproximación hacia adelante y hacia atrás, la distancia a la línea de atraque y el ángulo de atraque. Las alarmas se pueden configurar para advertir sobre velocidad y ángulo de aproximación excesivos.

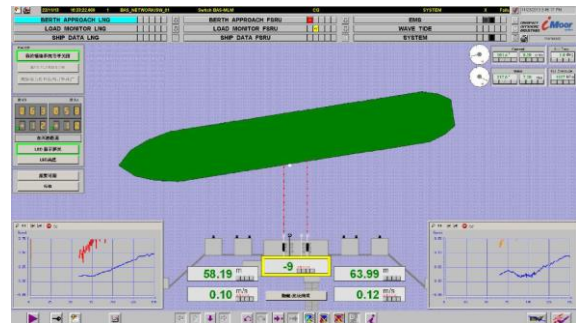


Figura 16. Pantalla del sistema de ayuda al atraque disponible en una sala de operaciones.



Figura 17. Las pantallas de matriz LED se pueden girar hacia el capitán durante el atraque.

Las pantallas de BAS en el muelle brindan una vista simple y no interactiva de la información, incluida la distancia y la velocidad hacia adelante y hacia atrás. Algunas pantallas incluyen un sistema de advertencia de "semáforo" preconfigurado para cambiar de verde a ámbar y luego a rojo si la velocidad de atraque excede los umbrales predeterminados.

Los capitanes han informado confusión sobre las unidades de velocidad. Tradicionalmente, la mayoría de los capitanes están familiarizados con los nudos, mientras que la mayoría de las pantallas BAS usan cm/s. No todas las pantallas muestran claramente las unidades de

velocidad de atraque, por lo que los capitanes deben estar familiarizados con las pantallas en cada muelle.

3.10.4 Sistemas de ayuda al atraque a bordo

Los BAS a bordo suelen ser soluciones portátiles que lleva el práctico (unidades portátiles de pilotaje o PPU) o, a veces, sistemas instalados de forma permanente en la embarcación. Las PPU son utilizadas por los capitanes desde el punto de embarque para la navegación hasta el puesto de atraque, maniobras de viraje o balanceo, y para la aproximación final al puesto de atraque. El BAS a bordo proporciona datos de posición, rumbo, velocidad de giro, velocidad y rumbo sobre el suelo que se utilizan para superponer el perfil de una embarcación en una carta de navegación utilizando un software de visualización de cartas.



Figura 18. PPU de doble antena totalmente reforzadas utilizadas para la navegación y el atraque.



Figura 19. Los capitanes utilizan pantallas portátiles durante las maniobras de atraque.

Los capitanes son los principales usuarios de los datos de PPU. Por lo general, prefieren los sistemas portátiles en los que conocen la calidad y la configuración de los datos de ángulo y velocidad de atraque en tiempo real, estando bajo su control.

3.10.5 Posición GPS

El BAS a bordo utiliza sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) para determinar la latitud y la longitud WGS84 de la embarcación en la antena principal o de posición. GNSS incluye las constelaciones de satélites GPS (EE. UU.), GLONASS (ruso), Galileo (Unión Europea) y BeiDou (chino).

Un ajuste de posición requiere que la antena GNSS "vea" al menos cuatro satélites, pero con múltiples constelaciones es común que 10 o más satélites sean visibles para la antena GNSS en un momento dado. Los rovers móviles utilizados para el atraque de precisión, generalmente se basan en receptores GNSS de calidad topográfica que tienen una mejor precisión que los receptores menos costosos destinados a la navegación general.

Los métodos de aumento más comunes son el GPS con corrección diferencial (DGPS) y la cinemática en tiempo real (RTK). Ambos utilizan matrices de estaciones base terrestre que emplean antenas fijas como puntos de referencia terrestres para generar datos de corrección que luego se transmiten mediante diferentes métodos al móvil.

3.10.6 Velocidad de giro (ROT)

La velocidad de giro (ROT) también se conoce como "tasa de guiñada" o "velocidad angular". La ROT se mide usando un giroscopio MEMS integral dentro del rover. Se logra una precisión típica de más de 1 grado por minuto con giroscopios MEMS de alta calidad. Esto generalmente se considera mejor que lo que el ojo humano puede detectar, lo cual es una consideración importante para los capitanes que necesitan detectar el inicio temprano de los cambios de dirección mientras navegan, cuando giran y durante la maniobra final de atraque.

La velocidad angular se utiliza en la fórmula de cálculo de energía de atraque completo y, a menudo, se supone que es cero. Si se recopilan, la disponibilidad de datos giroscópicos permitiría evaluar adecuadamente

la contribución de la velocidad angular en la estimación de la energía de atraque junto con la velocidad de traslación.

3.10.7 Curso sobre fondo (COG)

Course over Ground (COG) se refiere a la verdadera dirección de rumbo de la embarcación a lo largo del vector de velocidad (V). En el cálculo de la energía de atraque, se suele suponer que el vector de velocidad es perpendicular a la línea de atraque (VB). Sin embargo, si el COG incluye una componente de velocidad paralela a la línea de atraque (VL), esto puede tener una influencia significativa en la proporción de la energía cinética del buque que debe absorber la defensa, debido a su efecto en el ángulo del vector de velocidad. Si se recopilan o se evalúan a partir del procesamiento posterior, los datos COG podrían permitir la evaluación adecuada de la contribución de los componentes de velocidad longitudinal y perpendicular a la energía de atraque.

3.10.8 Software de pilotaje

El software de pilotaje recopila datos de PPU, los muestra en tiempo real para obtener información del capitán. Los datos también se guardan para futuras reproducciones o procesamientos. El perfil de la embarcación se representa a escala en función de las entradas de eslora y manga. Las ubicaciones de las antenas de posición y rumbo se ingresan para mostrar la verdadera orientación de la embarcación con la distancia precisa a las estructuras o líneas de atraque virtuales. Los remolcadores y otras embarcaciones se muestran para un mejor conocimiento de la situación.

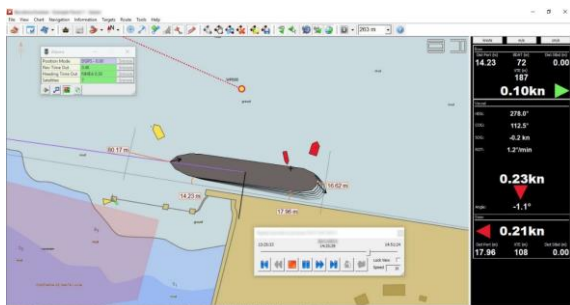


Figura 20. El software de pilotaje muestra los datos de la embarcación y los movimientos previstos, superpuestos a las cartas de navegación.

Las flechas vectoriales confirman la dirección en tiempo real de la proa y la popa, con flechas que varían en longitud proporcionalmente a la velocidad en tiempo real. Aunque muchos capitanes trabajan naturalmente en nudos, las velocidades de los buques se pueden mostrar en diferentes unidades. Los datos de PPU se procesan mediante filtros de Kalman para predecir la posición futura de la embarcación, lo que proporciona al capitán información rápida sobre los cambios en la dinámica durante el atraque. Los mismos datos se pueden analizar posteriormente para proporcionar la velocidad y el vector de atraque, el ángulo de atraque y la velocidad de giro en el momento del contacto.

4. ESTUDIOS

En la terminal de contenedores del Puerto de Bremerhaven, Alemania, se colocó un sistema de medición permanentemente instalado en un área de donde suelen atracar los buques portacontenedores más grandes. Dado la posición expuesta, se decidió utilizar un sistema estacionario basado en tecnología de radar con registro electrónico automático las 24 horas del día de las maniobras de atraque. Para ello, 13 sensores se instalan en una longitud de alrededor de 430 metros para medir la velocidad de atraque de un buque en cada punto particular, junto con la compresión de la defensa durante el atraque.

Los resultados de cuatro años de mediciones se presentan a continuación. Durante este periodo se registraron y evaluaron 1.082 maniobras de atraque utilizables. Los conjuntos de datos se pueden utilizar, entre otros, para mostrar los siguientes datos clave:

- Velocidad de atraque hasta el punto de contacto entre el barco y la defensa
- Ángulo de atraque del buque
- Compresión de la defensa elástica afectada
- Energía total de atraque de la maniobra

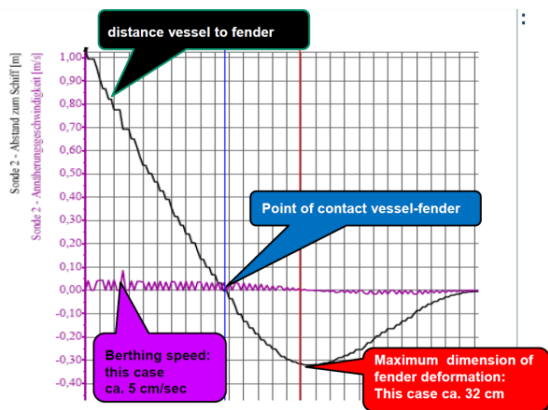


Figura 21. El software de pilotaje muestra los datos de la embarcación y los movimientos previstos, superpuestos a las cartas de navegación.

5. CONCLUSIÓN

En función del trabajo expuesto, la posibilidad de visualización del sistema real es actualmente única en el mundo y ofrece posibilidades para comparar las energías de atraque teóricas calculadas utilizando las recomendaciones internacionales con la energía medida en el sistema real. Con este tipo de comparación, se pueden detectar desviaciones en los valores de energía medidos, lo que ofrece la oportunidad de investigar por qué las pautas de diseño posiblemente producen resultados diferentes en relación a los datos de velocidad y el vector de atraque, el ángulo de atraque, la velocidad de giro en el momento del contacto, compresión de las defensas y absorción de energía en relación a sus coeficientes.

Por último, se considera fundamental utilizar los sistemas de información para definir la navegación de los buques en el canal y en la aproximación a muelle.

6. REFERENCIAS

Escalante, R., Sivori, G. (2018). La navegación como sistema. Cátedra Diseño de Vías Navegables. EGIP. Universidad de Buenos Aires.

WG N° 121 MarCom. (2014). Harbour Approach Channels Design Guidelines. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. PIANC.

WG N° 135 MarCom. (2014). Design Principles for Small and Medium Marine

Container Terminals. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. PIANC.

WG N° 145 MarCom. (2022). Berthing Velocity Analysis of Seagoing Vessels Over 30,000 DWT. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure. PIANC.

Hein, C. (2014). Berthing Velocity of Large Container Ships. Congreso Mundial PIANC. San Francisco, USA.