

Premios

1997

José Ramón Iribarren Alonso 33

1997

Íñigo J. Losada Rodríguez 91

1998

Gonzalo Gómez Barquín 131

1999

Ignacio Sanchidrián Vidal 177

2004

Javier López Lara 209

2005

Juan Diego Pérez Freire 261

2006

Andrés Fernando Osorio Arias 287

2007

Fernando López Mera 341

2009

Ana Ulloa Piñeiro 399

1997

José Ramón Iribarren Alonso

Dimensionamiento en planta de áreas de maniobra de buques. Recomendaciones generales y estudios con simulador

Dimensionamiento en planta de áreas de maniobra de buques. Recomendaciones generales y estudios con simulador

José Ramón Iribarren Alonso

1. Introducción

A la hora de proyectar un canal de acceso a puerto o una zona de maniobra o evaluar la capacidad de una vía navegable preexistente para la recepción de nuevas clases de buques, existen recomendaciones de diversas fuentes que permiten acometer el problema con suficiente conocimiento de causa. Estas guías se basan normalmente en reglas de carácter empírico o semiempírico. En consecuencia, resultan demasiado generales en algunos aspectos, establecen márgenes de seguridad amplios y no contemplan algunos parámetros que podrían ser fundamentales en determinados casos.

Como en otras ramas de la ingeniería, se suelen distinguir un *diseño conceptual* y un *diseño detallado*. En el primer caso se trata de una aproximación inicial al problema, que contempla parámetros generales (traza del canal, anchos, profundidades), de modo que con una información básica y con un proceso de desarrollo rápido, se pueda llegar a una comparación justificada de alternativas.

El segundo paso es lógicamente más profundo, por lo que requiere una mayor información de partida y la utilización de herramientas más elaboradas (modelos físicos o matemáticos, simulador de maniobra, etc.). Los métodos de trabajo disponibles permiten confirmar o corregir resultados previos, analizar condiciones locales más específicas y, sobre todo, revisar condiciones de maniobra que se salen de los criterios generales, especialmente por reducción de los valores recomendados.

Este trabajo presenta en primer lugar algunos de los procedimientos existentes para el diseño conceptual, concretamente los desarrollados por AIPCN-PIANC y la ROM 3.1. Después, expone las características principales de un simulador de maniobra en tiempo real, la metodología de trabajo utilizada para estudios de Ingeniería Portuaria y los resultados



que pueden obtenerse. Se compara también la aplicación de las diversas herramientas en un caso real, el canal del Puerto de Avilés, cuyos resultados sirven también para evaluar algunos aspectos de la metodología aplicada.

2. Recomendaciones para el diseño de canales de navegación y áreas de maniobra

2.1. *Publicaciones AIPCN-PIANC*

A lo largo de los años, la AIPCN-PIANC ha mostrado su interés por desarrollar normas y recomendaciones para el adecuado dimensionamiento de los canales y vías de navegación. En este sentido, y a través de diversas Comisiones y Grupos de Trabajo, ha publicado varias guías de diseño útiles para proyectistas, Autoridades Portuarias y operadores de instalaciones.

Por su aplicabilidad, en los últimos años destacan los Informes Finales “Big Tankers and their Reception” de la *International Oil Tankers Commission* (1973) y “Optimal lay-out and dimensions for the adjustment to large ships of maritime fairways in shallow seas, seastraits and maritime waterways” de la *International Commission for the Reception of Large Ships (ICORELS)* (1980). Estos documentos tratan tanto el dimensionamiento en planta y alzado de canales como de áreas de maniobra (parada, reviro, etc.).

En 1992 se creó el Grupo de Trabajo 30 “Dimensions of channels and fairways. A practical guide”, conjunto con la IAPH (International Association of Ports and Harbours), que cuenta también con la colaboración de la IMPA (International Maritime Pilots Association) y la IALA (International Association of Lighthouse Authorities), recogiendo los resultados del anterior Grupo de Trabajo 7. En 1995 publicó un primer Informe “Approach Channels. Preliminary Guidelines”, un manual de dimensionamiento de canales, tanto en planta como en alzado, en una fase inicial de definición. En la actualidad está desarrollando los contenidos de su Informe Final.

2.2. *ROM 3.1*

Dentro del Programa ROM (“Recomendaciones para Obras Marítimas”) de Puertos del Estado, está en fase de desarrollo la *ROM 3.1* (“Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Accesos y Áreas de Flotación”). Se dispone en estos momentos de un bo-



rrador elaborado por la empresa de ingeniería ALATEC S.A., que está siendo analizado por la correspondiente Comisión Técnica desde mediados de 1996.

Estas recomendaciones presentan los criterios necesarios para la definición de accesos y áreas de flotación relacionados con obras marítimas y portuarias, así como el establecimiento de sus condiciones de operación. Con este fin, analizan en primer lugar las características de los buques que influyen en su maniobrabilidad, las acciones de los agentes externos, la actuación de remolcadores y la forma de ejecución de diversas maniobras habituales.

La parte central de la norma se refiere a los requerimientos de calado y las dimensiones en planta de las diferentes áreas de navegación, incluyendo fondeaderos, vías navegables, bocanas, zonas de maniobra y dársenas, etc.

Finalmente, se exponen también los principios generales de los modelos reducidos, modelos matemáticos y simuladores y se analiza también su aplicación a este tipo de situaciones.

3. Aplicación de simuladores de maniobra de buques para el proyecto de vías de navegación

3.1. Concepto y aplicaciones del simulador

Los simuladores de navegación y maniobra se presentan en el campo de la Ingeniería Portuaria como un potente medio de estudio de nuevas situaciones. Su aplicación se centra fundamentalmente en el diseño de puertos y canales, con el objetivo de orientar al proyectista sobre las posibilidades y restricciones del buque en relación con la infraestructura y condiciones ambientales.

En su versión más avanzada, un simulador de navegación constituye una potente herramienta aplicable a las siguientes funciones:

- *Auxilio al proyecto de obras portuarias*

Un modelo de maniobra es una interesante ayuda para la evaluación integral de las distintas alternativas para la construcción o ampliación de obras portuarias (interferencia de la prolongación de un dique o un nuevo muelle en las maniobras, posibilidad de acceso de determinado tipo y tamaño de buques, influencia de los diversos tempo-



rales de la zona (vientos y oleaje) en la viabilidad de una maniobra, grado de seguridad resultante, trazado económico y seguro de canales de entrada, etc.)

- *Análisis de condiciones de operación*

Elaboración de normas de acceso a puerto (tipo y tamaño de buques, condiciones meteorológicas y de marea, estrategias de maniobra, etc.), estimación de la necesidad de remolcadores (número y potencia) en las maniobras, márgenes de seguridad para el acceso a los atraques en malas condiciones meteorológicas, modificación del uso de atraques (conversión de terminales, etc.).

- *Formación de personal*

Un simulador avanzado puede emplearse también como medio eficaz en la formación de personal de a bordo (Capitanes, prácticos, etc.), tanto en una fase inicial como en cursos de reciclaje. Son campos susceptibles de uso de simuladores el manejo de la instrumentación y equipos de a bordo, el conocimiento de la respuesta física del sistema ante las acciones exteriores, la práctica de procedimientos preestablecidos de comunicación con los remolcadores o los sistemas de control de tráfico, la familiarización con barcos nuevos o de mayor tamaño, el entrenamiento previo en maniobras de entrada en puertos nuevos o cuyas instalaciones han sido modificadas, la definición de métodos de actuación ante emergencias o bajo condiciones meteorológicas extremas, etc.

- *Investigación sobre tráfico portuario*

Diseño y optimización de sistemas de ayudas a la navegación, desarrollo de sistemas de control del buque durante el atraque, establecimiento de procedimientos estandarizados de comunicación, determinación de tiempos de acceso a los diferentes muelles, determinación de períodos de entrada y salida en puertos de marea (conurrencia de mareas, vientos y oleaje para buques de diferentes clases y tamaños), análisis a posteriori de accidentes marítimos, etc.

- *Investigación sobre el buque*

Modelización matemática de la respuesta física del buque en diferentes condiciones de calados, en canales y zonas confinadas; Desarrollo de sistemas de propulsión y go-

bierno más eficaces; Desarrollo de nuevos tipos de remolcadores; Desarrollo de nuevas estrategias para la aplicación de los remolcadores; Estudio y evaluación de nuevos sistemas de navegación, medios de comunicación e instrumentación, etc.

El objetivo principal de un simulador de maniobra de buques en el campo que nos ocupa es la ejecución de estudios relacionados con el acceso a puerto de los barcos bajo diferentes condiciones físicas y ambientales para lograr un adecuado diseño en planta del puerto, el canal de acceso y las zonas de maniobra. Como objetivo secundario, se utiliza en cursos de formación y entrenamiento de prácticos, tanto en un nivel de iniciación como en cursos especializados o de reciclaje.

En España, la aplicación de esta metodología se ha basado en la utilización del sistema SHIMARE, instalado en 1992 en el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, que fue desarrollado por los centros Delft Hydraulics y MSCN (Holanda).

La finalidad de este sistema es reproducir el comportamiento durante la maniobra de un buque específico sometido a la acción del viento, el oleaje y la corriente, y auxiliado por remolcadores. El simulador incluye un modelo matemático que calcula la trayectoria del buque y la evolución del rumbo, con dos importantes características:

- *Interactividad*
- *Operación en tiempo real*

Es un práctico o capitán el que decide y ejecuta las acciones sobre el timón, la máquina y los remolcadores con el objetivo de que el buque siga una trayectoria segura. Para ello, opera sobre una reproducción de los instrumentos del puente (palanca de timón, telégrafo de órdenes a la máquina, indicadores, etc.) y recibe información visual del entorno exterior a través de una pantalla de radar y una perspectiva de la zona de maniobra.

Por otra parte, las operaciones anteriores se desarrollan en tiempo real, por lo que el ciclo de percepción, análisis de información, toma de decisiones y ejecución se realiza en condiciones semejantes a la realidad. De este modo, los capitanes y prácticos pueden incorporarse y colaborar, desde una reproducción simplificada de su ambiente de trabajo habitual, en el proceso de diseño portuario y análisis de operaciones.



**SIMULADORES DE MANIOBRA
(CEPYC-CEDEX)**

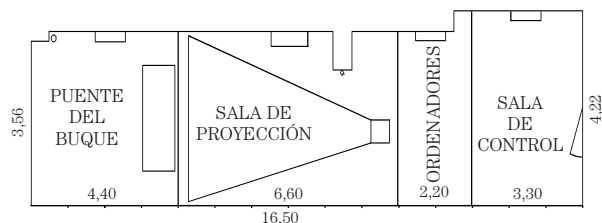


Figura 1. Planta general del simulador del CEDEX.

En consecuencia, el uso de un simulador permite evaluar la viabilidad de una determinada estrategia de maniobra bajo diversas condiciones meteorológicas incorporando la acción del hombre. Por lo tanto, se obtienen orientaciones sobre la forma más adecuada de realizar la maniobra y puede definirse la necesidad, potencia y número de remolcadores a emplear en su ejecución.

Es importante señalar que esta clase de equipos ha sido empleada por diversos centros europeos a lo largo de los últimos años en gran cantidad de estudios, proporcionando resultados de gran fiabilidad. En el caso de los puertos españoles, Pasajes, Santa Cruz de Tenerife, Bilbao, Gijón y Huelva han analizado las maniobras en sus dársenas, existentes o proyectadas, bajo la asistencia técnica de Delft Hydraulics (Holanda), suministrador del simulador del CEDEX.

Desde 1987 el Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX ha desarrollado estudios de maniobrabilidad para los puertos de Motril, Málaga, Castellón, Ibiza, Tarragona, Cartagena, Gijón, La Estaca, Arinaga, Cádiz y Ferrol utilizando el modelo matemático SHIPMA (piloto automático). El modelo SHIMARE (tiempo real) se ha aplicado en diversos estudios para los puertos de Motril, Avilés, Cartagena, Tarifa, Barcelona, Bilbao, La Estaca, Timijiraque, Santa Cruz de Tenerife y Pasajes, lo que ha supuesto el establecimiento de una nueva línea de actuación en el CEDEX.

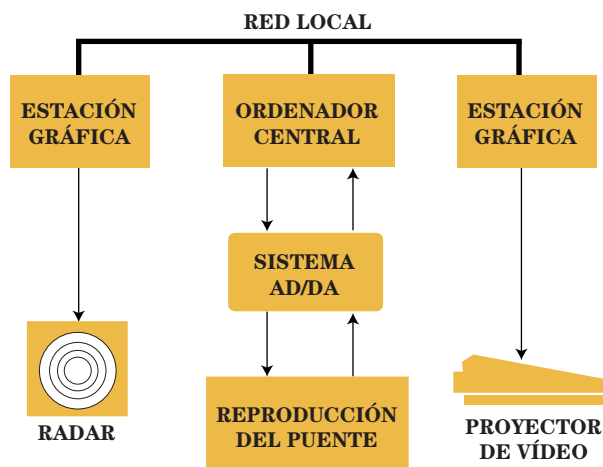


Figura 2. Diagrama de bloques de componentes "hardware".

3.2. Componentes

La figura 1 muestra la planta general de la instalación utilizada por el CEDEX, en la que se distinguen de izquierda a derecha el puente, la sala de proyección, el local de ordenadores y la sala de control.

El sistema de simulación de buques incluye los siguientes componentes de “hardware”, cuya relación puede analizarse en la figura 2:

- Reproducción de las *consolas del puente* con su instrumentación correspondiente.
- *Ordenador principal* (HP-1000 A900), que soporta el modelo matemático del buque y calcula las fuerzas que actúan sobre él a lo largo de la maniobra. Teniendo en cuenta los coeficientes de respuesta del buque, resuelve cíclicamente las ecuaciones de movimiento y proporciona posiciones y rumbos sucesivos.
- Estación gráfica (HP-9000 425t) para la gestión de la *imagen exterior*, que presenta una perspectiva del entorno tal como se ve desde el puente (costa, estructuras del puerto, señalización, etc.).
- Estación gráfica (HP-9000 433t) para la gestión de la *imagen sintética de radar* (contorno de la costa y puerto, contorno del buque, anillos de distancia y líneas de referencia).
- *Sistema de adquisición de datos* para la instrumentación del puente, que comunica al ordenador de cálculo las acciones del práctico sobre las consolas del puente y transmite a su vez a los indicadores los valores a presentar.
- Sistema de generación y presentación de la imagen exterior, mediante un proyector de video de alta resolución y una pantalla transparente.
- *Consola del operador* para el control del proceso de simulación.
- *Consola de remolcadores*, desde la que se determina cuáles están activos durante la maniobra, su punto de conexión al buque y el tiro aplicado en cada instante.
- *Sistema de comunicación VHF* entre el puente y la sala de control.
- *Periféricos* para impresión y dibujo de los resultados de la simulación.

La instrumentación del puente comprende todos aquellos elementos que sean relevantes para el desarrollo de una maniobra genérica. Concretamente, se dispone de:

- Compás giroscópico.
- Indicador de posición del timón.
- Indicador de la velocidad de giro del buque.
- Corredera electromagnética (velocidad respecto al agua).
- Corredera Doppler (velocidad respecto al fondo).
- Indicador de rpm de la(s) hélice(s) principal(es).
- Indicador de rpm de la(s) hélice(s) de maniobra.
- Ecosonda.



- Anemómetro.
- Reloj.

Las órdenes a la máquina y a los elementos de gobierno (timón(es) y hélice(s) de maniobra) se dan utilizando elementos similares a los de a bordo, entre los que se incluyen:

- Telégrafo de órdenes del propulsor principal.
- Palanca de control del timón principal.
- Palancas de control de los timones auxiliares.
- Control de las hélices de maniobra.

En lo que se refiere a los componentes de “software”, los elementos básicos necesarios, siempre susceptibles de desarrollo, comprenden:

- Software general de integración del sistema.
- Modelo matemático de maniobrabilidad.
- Coeficientes hidrodinámicos para los buques.
- Modificación de los coeficientes del buque.
- Pre-proceso de la imagen exterior.
- Generación de la imagen de radar.
- Generación de la imagen exterior.
- Análisis gráfico de los resultados de la simulación.
- Análisis estadístico de los resultados de la simulación.

3.3. Modelo matemático

El sistema de simulación calcula las fuerzas y momentos que sufre el buque, tanto hidrodinámicas, de propulsión y gobierno como producidas por los agentes externos, y resuelve sus ecuaciones de movimiento, considerando únicamente los movimientos en el plano (avance, deriva y guiñada).

El modelo matemático de maniobrabilidad es capaz de reproducir adecuadamente el comportamiento del buque bajo la acción de las siguientes fuerzas:

- Fuerzas hidrodinámicas sobre el casco.
- Fuerzas de propulsión.

- Fuerzas del timón.
- Fuerzas de las hélices de maniobra (proa y/o popa).
- Efectos de los cambios de profundidad.
- Fuerzas debidas a las corrientes, al viento y al oleaje.
- Efectos de succión de orilla.
- Fuerzas ejercidas por los remolcadores.

Las funciones se expresan mediante desarrollos en serie de Taylor, siguiendo el método de Abkowitz, y considerando, por razones prácticas, desarrollos hasta el tercer orden. Algunos aspectos interesantes del modelo son los siguientes:

- Las fuerzas sobre el casco incluyen términos de inercia y acciones de fricción y sustentación.
- En el timón se tiene en cuenta una dependencia hasta el segundo orden respecto al ángulo de giro, las revoluciones de la hélice y la velocidad del buque. La respuesta dinámica del timón se corresponde con lo establecido en la reglamentación.
- Es posible definir sistemas de propulsión bien con motor(es) o con turbina(s), con su correspondiente respuesta dinámica (aceleraciones, régimen de equilibrio, etc.).
- Las fuerzas debidas a la hélice tienen una relación cuadrática con su velocidad de giro, e incluyen la acción lateral cuando ésta gira atrás. Se consideran en principio buques de hélice dextrógira, que pueden ser modificados.
- La acción del viento se simula mediante coeficientes adimensionales de fuerzas y momentos dependientes del ángulo de incidencia sobre el buque. Se incluye viento racheado con intensidades medias definidas localmente.
- El oleaje se incorpora mediante coeficientes adimensionales de resistencia calculados según las experiencias de Lewison, y su acción es proporcional al cuadrado de la altura significativa. Es posible definir un campo de oleaje por alturas y direcciones de propagación locales.
- El efecto de la corriente está modelizado de acuerdo con el principio de movimiento relativo, teniendo en cuenta velocidades y aceleraciones respecto al agua. Se incluye el efecto del gradiente de velocidades a lo largo de la eslora del buque.
- Para la succión de orilla se considera un modelo simple, con coeficientes específicos para cada combinación de coeficiente de bloque, manga y calado, que producen fuerzas y momentos proporcionales a la excentricidad entre las márgenes y al cuadrado de la velocidad del buque.



- Pueden utilizarse hasta cuatro remolcadores simultáneamente, tanto convencionales (propulsión por hélice en tobera) o Voith-Schneider (propulsor orbital), con las correspondientes diferencias en cuanto a su eficacia de actuación en condiciones diferentes. Igualmente, pueden seleccionarse remolcadores trabajando por proa y/o popa con cabo o empujando por los costados (de carnero).
- La fuerza de remolque realmente aplicada depende de la posición y velocidad relativa remolcador-buque remolcado, y su efecto incluye un retardo de 60 segundos desde el reposo hasta el máximo empuje.
- Las hélices de maniobra de proa y/o popa reproducen igualmente la eficacia decreciente con la velocidad de avance del buque.

Es importante destacar algunos efectos que están ausentes en el modelo disponible en el CEDEX y que deben analizarse con cuidado antes de acometer un estudio: No se dispone de anclas, amarras ni defensas. No se reproduce de forma fiable la última fase de la aproximación a un muelle, en la que el confinamiento del agua entre el buque y el paramento del muelle da lugar a fuerzas amortiguadoras por “efecto colchón” que pueden ser relevantes. Por este motivo, es conveniente terminar las simulaciones con el buque bajo control a una manga de distancia del atraque. Sólo se consideran los movimientos del buque en el plano, por lo que los movimientos verticales (“squat” o arfada, balance y cabeceo producidos por el oleaje) no existen en las ecuaciones ni pueden ser apreciados visualmente o por los instrumentos. Tampoco se consideran varadas ni fuerzas de colisión contra estructuras emergidas, aunque lógicamente puede apreciarse esta situación en la sonda.

La formulación del modelo, sin embargo, está desarrollada con una concepción modular, que permite su desarrollo en etapas futuras incorporando nuevas acciones o mejorando la definición de las fuerzas ya incluidas. No se debe olvidar, sin embargo, que es necesario alcanzar un equilibrio entre la precisión del modelo y el esfuerzo de cálculo requerido. El principio básico de actuación se resume en aplicar en cada caso un modelo que contenga las fuerzas predominantes, sin que sea imprescindible incluir todos los efectos con una alta precisión.

El modelo matemático de maniobrabilidad permite la utilización de diferentes tipos de buques de dimensiones variadas, los cuales se incorporan de forma modular en la simulación. En la actualidad, se dispone de veinticuatro barcos distintos (petroleros, bulkcarriers, transbordadores, gaseros, portacontenedores, etc.). Para cada buque, se consideran varias condiciones de carga y resguardos bajo la quilla. Concretamente, cada buque viene definido por dos juegos de coeficientes hidrodinámicos, que corresponden a su compor-

- El coste de la instalación es muy elevado.
- Los costes de personal son también importantes, pues se requiere la actuación coordinada de un equipo de ingenieros, prácticos o capitanes y especialistas en informática.
- Para cada entorno, buque y tipo de maniobra deben efectuarse varias repeticiones de la maniobra con objeto de obtener una muestra estadísticamente aceptable.
- El uso del simulador consume períodos de tiempo largos debido a la forma de trabajo en tiempo real con varias repeticiones de cada maniobra.

El simulador requiere la construcción previa de un modelo matemático y gráfico de la zona a estudiar, en el que se determina la siguiente información de entrada:

- Características de propulsión, gobierno y maniobrabilidad del buque o buques.
- Batimetría y niveles de agua.
- Definición del canal de navegación.
- Campo de corrientes.
- Campo de viento.
- Campo de oleaje.
- Definición de los remolcadores
- Contorno de radar (costa, puerto, boyas, etc.).
- Imagen tridimensional del puerto (costa, diques, muelles, faros, boyas, buques atracados, etc.).

Para la generación del entorno gráfico se utilizan habitualmente paquetes estándar de CAD. El resultado de este trabajo previo se transfiere posteriormente a las estaciones gráficas para su tratamiento en tiempo real sincronizado con la simulación. En el modelo gráfico del puerto se incluyen todos aquellos elementos relevantes en la maniobra (costa, faros, diques, muelles, boyas, grúas, otros buques, etc.), bien porque constituyen obstáculos a su desarrollo o porque proporcionan referencias visuales a tener en cuenta.

3.5. Desarrollo de las maniobras simuladas

Las características principales del uso de un simulador en cuanto al desarrollo de las maniobras son, como se ha indicado ya, la actuación en tiempo real y la interactividad del

hombre con el sistema informático. Esta se entiende como la inclusión del hombre en el ciclo percepción-toma de decisiones-comunicación-ejecución-verificación:

- *Percepción* de información visual (posición del buque a través de la imagen exterior del puerto y la pantalla de radar) e instrumental (indicadores de rpm de la máquina, ángulo de timón, rumbo, corredera, sonda, velocidad y dirección del viento, etc.).
- *Toma de decisiones* a partir de la información instantánea y su comparación con la estrategia predefinida, que se concreta en acciones de máquina, timón, hélice de manobra auxiliar y remolcadores.
- *Comunicación* de las órdenes al timonel y los remolcadores, proceso que debe realizarse con la máxima claridad y comprobando la correcta comprensión de aquellas.
- *Ejecución* de las órdenes sobre los elementos de control disponibles en el puente (palancas, botones, etc.) o en el panel de remolcadores situado en la sala de control.
- *Verificación* de las órdenes mediante la respuesta oral del timonel y/o el patrón de remolcadores y la propia respuesta física del buque.

Este ciclo se repite de forma continuada durante la simulación hasta que acaba la maniobra. El final de la simulación se determina bien por la llegada del buque al muelle previsto con velocidad controlada o por la ocurrencia de una colisión o varada de consecuencias graves. En el caso de un accidente de menor importancia la maniobra continúa en la mayor parte de los casos, con el fin de obtener información sobre los límites de actuación.

Habitualmente, hay al menos dos personas en el puente durante la simulación. Cada una de ellas juega un papel prefijado en el desarrollo de la maniobra:

- *Práctico*: Tiene el mando del buque durante la maniobra. Ha decidido previamente la estrategia de actuación y la lleva a cabo, dando órdenes al timonel sobre el uso de la máquina (avante-parada-atrás y régimen), el timón y la hélice de proa. Igualmente, se comunica a través de la radio VHF con los remolcadores, estableciendo cuántos y en qué posiciones han de operar y solicitando su actuación durante el transcurso de la maniobra.
- *Timonel*: Es un puro ejecutor de las órdenes del práctico acerca del uso de la máquina y el timón. Está obligado a repetir en voz alta sus órdenes a fin de garantizar su correcta comprensión.



A través de la ventana de proa se recibe una imagen del exterior del buque, proyectada sobre una pantalla de grandes dimensiones (3.6 m de anchura x 2.0 m de altura), con una panorámica de 100 grados de amplitud. Esta imagen presenta, de modo simplificado, diques, muelles, boyas, luces y faros, marcas de referencia, otros buques atracados o en navegación, la parte visible del buque propio y, en general, todo aquel objeto relevante a la hora de reproducir la maniobra, por ser un obstáculo o referencia destacada. Se dispone de un conmutador que permite variar durante la maniobra el punto de vista de la perspectiva (vista por proa, por las amuras, por las aletas o por popa). Es también posible realizar la maniobra en diferentes condiciones de luz (día, crepúsculo, noche) y visibilidad (bruma, niebla, etc.).

El subsistema de radar genera una imagen sintética a vista de pájaro sincronizada con la simulación, que se presenta en una pantalla gráfica. En ella se muestran las orillas, obstáculos a la navegación, boyas, buques, etc. situados en las proximidades del buque propio. La imagen de radar puede tratarse para ofrecer presentación con norte verdadero, rumbo relativo o movimiento verdadero, y se dispone de un conmutador de alcance, anillos de distancia controlables y línea de referencia de proa. Todas estas utilidades son modificable a lo largo de la simulación a voluntad del usuario.

Desde la sala de control del simulador se realiza el seguimiento de la maniobra, pues se cuenta, en primer lugar, con la consola principal, desde la que se asegura el correcto funcionamiento del sistema. Por otra parte, hay repetidores de la pantalla de radar y de la imagen exterior, así como de los instrumentos principales del puente (rpm de máquina, posición del timón, rpm de hélices de maniobra, corredera y sonda). Como se ha indicado, el operador del sistema tiene también a su cargo la gestión de los remolcadores en tiempo real, cumpliendo las órdenes recibidas por radio desde el puente. Las fotografías de las figuras 4 y 5 muestran algunos aspectos del puente del simulador durante su operación.

Con el fin de incorporar en la simulación la aleatoriedad del comportamiento humano, se llevan a cabo varias simulaciones en cada condición de maniobra, en general entre 8 y 15. Los resultados de cada una de ellas se almacenan en un fichero resumen en el disco del ordenador, donde se listan posición, rumbo y velocidad del buque en cada instante, acciones sobre la máquina y el timón, uso de remolcadores, fuerzas ambientales, etc. Esta información permite acometer posteriormente un análisis detallado de la ejecución de la maniobra.

3.6. Metodología de análisis de resultados

Se dispone de herramientas informáticas que permiten obtener varias representaciones de los resultados de las simulaciones:

- *Gráfico de trayectoria*, en un dibujo bidimensional que recoge el contorno del puerto y la posición del buque a intervalos de tiempo prefijados.
- *Tablas de valores instantáneos* de diferentes variables (tiempo transcurrido, distancia recorrida, ángulo y velocidad de giro del timón, revoluciones del motor, componentes de la velocidad del barco, fuerzas de remolcadores, etc.) a lo largo de la simulación.
- *Gráficos de series temporales* de las variables anteriores, pudiendo superponer varias series correspondientes a diferentes simulaciones.
- *Gráficos estadísticos de variables*. Agrupando distintas simulaciones de una misma condición, se dibujan los valores medios y desviaciones estándar de cada variable en cada punto del recorrido del buque. De este modo, pueden obtenerse indicaciones sobre las tendencias de actuación en cada zona (uso de la máquina, velocidad del buque, etc).
- *Gráficos del área ocupada* por el buque. En un dibujo bidimensional se presentan el contorno del puerto y la senda ocupada por el buque durante su navegación. Hay diversas variantes, pudiendo dibujar el área ocupada en una simulación en particular, la envolvente de varias realizaciones de la misma condición o incluso una interpretación probabilística del área ocupada, asociando una determinada distribución a los bordes.

Las figuras 6, 7 y 8 muestran algunos ejemplos de estos resultados gráficos.



Figura 4. Aspecto del simulador en funcionamiento.



Figura 5. Aspecto del simulador en funcionamiento.

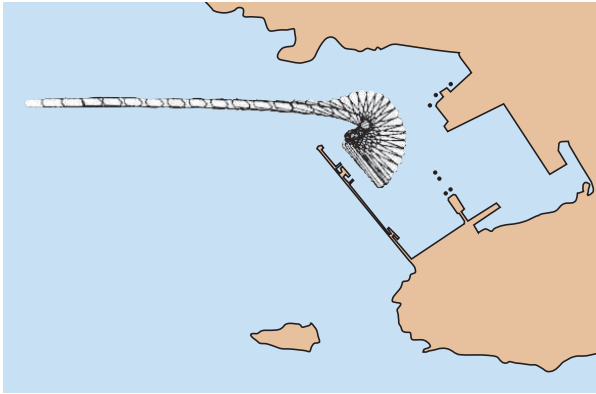


Figura 6. Gráfico de trayectoria simulada.

Utilizando esta información, pueden llevarse a cabo dos tipos de análisis de los resultados de la simulación: El primero, denominado “valoración experta”, se refiere a cada ejecución en particular, se apoya en la experiencia de ingenieros, capitanes y prácticos, y se concreta en la evaluación de aspectos específicos de la maniobra: velocidad en determinados puntos de referencia, distancias a los límites del canal, uso de propulsión y timón, requerimientos de remolcadores, etc. La opinión del práctico que realiza la maniobra y sus apreciaciones durante el desarrollo de ésta tienen, evidentemente, un peso fundamental en el proceso de valoración.

También es posible realizar un análisis estadístico más detallado de las distintas fases de la maniobra en el caso de contar con un número suficiente de repeticiones. Se contemplan aquí tanto las acciones de control ejecutadas durante la simulación (uso de máquina, timón, hélices de maniobra y/o remolcadores) como la respuesta del buque (posiciones y velocidades, derrota, distancias de paso a obstáculos, etc.).

Bajo el punto de vista de la Ingeniería Portuaria, es muy interesante un estudio del área ocupada por el buque durante su recorrido y su interferencia con los límites de la zona navegable. Así, se pueden valorar cualitativa y cuantitativamente los siguientes aspectos:

- Cuáles son los puntos críticos de la trayectoria.
- Cuál es el riesgo de accidente en cada zona.
- Cuál es la dificultad comparada de distintas disposiciones de bocanas, canales o zonas de maniobra.
- Qué influencia tienen las condiciones meteorológicas.

Para el análisis del área ocupada por el barco durante la maniobra se define una trayectoria de referencia, sobre la que se marcan distancias recorridas. A su vez, en esta trayectoria se fijan secciones transversales, en cada una de las cua-

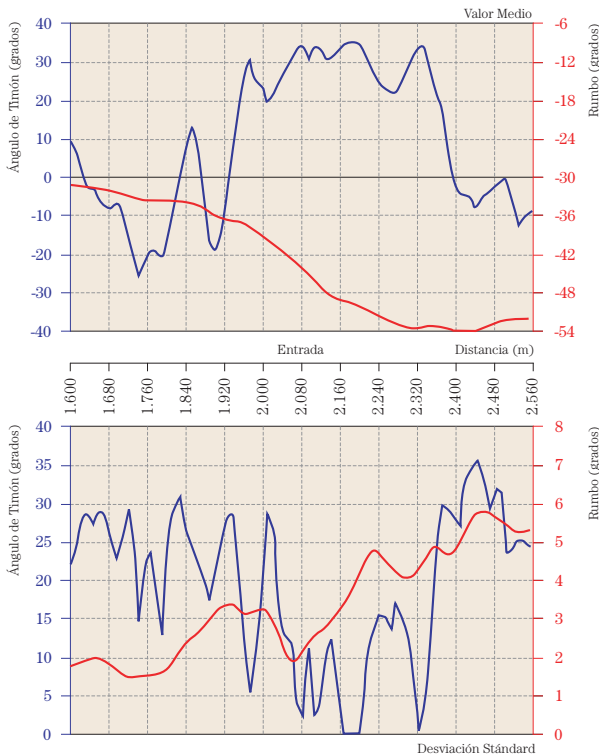


Figura 7. Gráfico de series temporales de diversas variables.

les se define el ancho navegable. El análisis se realiza habitualmente con secciones de cálculo cada 50-100 m, según la extensión de la zona a estudiar.

Tras cada simulación de una maniobra, se almacenan en disco las posiciones sucesivas del buque. Concretamente, en cada sección de las anteriores se conocen las posiciones del extremo de babor del buque (proa o popa), de su centro geométrico y del extremo de estribor (proa o popa). De este modo, puede calcularse el área ocupada por el buque en su evolución como la envolvente de las diferentes posiciones de sus extremos.

Una vez repetida la maniobra varias veces en las mismas condiciones, puede calcularse el valor medio y la desviación de dichas tres posiciones sobre cada una de las secciones. Con ello se define una distribución normal que explica estadísticamente el área ocupada por el buque (ver figura 9).

La *probabilidad de colisión o invasión* en cada una de las secciones puede calcularse entonces entrando con los límites laterales de la zona navegable en las sucesivas distribuciones normales. La cola inferior (por babor) o la cola superior (por estribor) darán la probabilidad de navegar –en cada sección considerada– por fuera de la zona segura y constituyen un indicador aproximado de cuáles son las zonas de riesgo y en qué medida (ver figura 9).

Como se indicaba más arriba, pueden entonces construirse varios tipos de gráficos de resultados:

- *Envolventes*: Senda obtenida como la envolvente de todas las simulaciones realizadas, o eliminando la maniobra más extrema en cada sección.
- *Trayectoria media del buque*: Línea con la posición media del centro del buque en cada sección.

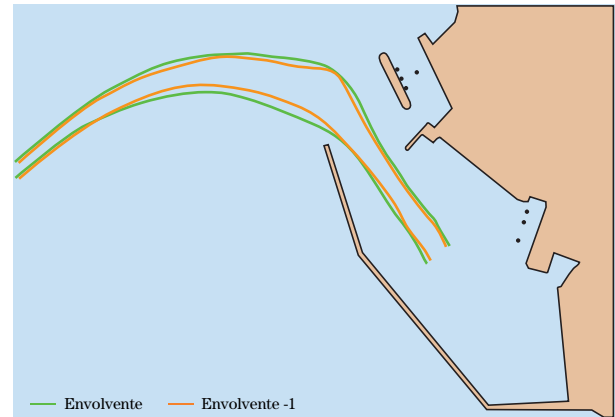


Figura 8. Gráfico de envolvente de área ocupada.

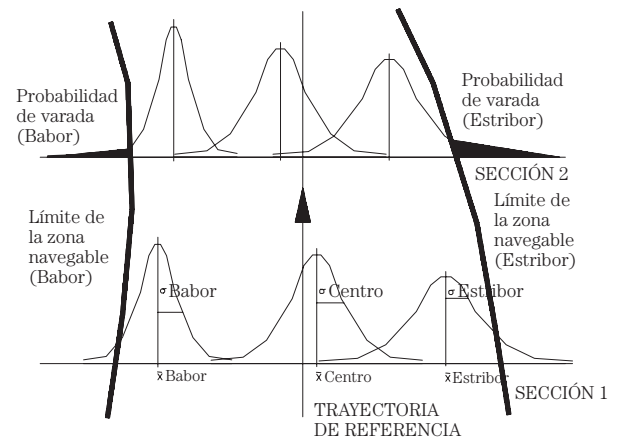


Figura 9. Distribución normal de la posición del centro y extremos del buque.

- *Área ocupada con determinada probabilidad de excedencia:* Fijado un valor de probabilidad de excedencia, pueden dibujarse las líneas de borde del área ocupada correspondientes, según la distribución normal considerada para los extremos del buque. Así, el área 1% recogerá las posiciones extremas de los costados del buque asociadas al 1% de probabilidad de excedencia, es decir, 1 buque de cada 100 sobrepasará los límites de esa zona al realizar la maniobra en las condiciones simuladas.
- *Bandas de confianza de las líneas de excedencia:* Basándose igualmente en la distribución considerada para los bordes del área ocupada, pueden construirse las curvas con la banda de confianza al nivel deseado de la curva de excedencia anterior.

Estos gráficos permiten apreciar rápidamente las zonas de riesgo en la maniobra y comparar la ejecución con diferentes buques o bajo distintas condiciones meteorológicas.

En todo caso, para interpretar los resultados que se presentan, es fundamental tener en cuenta un principio estadístico básico: La población a analizar en el estudio es el total de las maniobras posibles en las condiciones definidas. Sobre ellas se ha extraído una muestra, consistente en un número limitado de repeticiones simuladas de cada maniobra.

La distribución estadística obtenida para la muestra no es la que corresponde a la población total, sino solamente una estimación de ésta. En otras palabras, todos los estadísticos anteriormente expuestos (medias, desviaciones, valores de excedencia, etc.) no deben tomarse como valores fijos, sino afectados de una cierta variabilidad alrededor de los valores medios estimados.

Al aumentar el tamaño de la muestra (número de simulaciones), se reduce lógicamente la variabilidad de los resultados y la distribución muestral se aproxima más a la de la población. Ahora bien, el incremento de tamaño de la muestra supone un coste importante en horas de simulación, por lo que se debe buscar un equilibrio entre la precisión de los resultados y el coste de su obtención.

3.7. Ventajas e inconvenientes

La aplicación de esta herramienta tiene importantes ventajas tanto para el campo de la Ingeniería Portuaria como para el de la navegación y practica, entre las que cabe citar:

- Permite analizar las condiciones de proyecto o de operación de vías de navegación y zonas de maniobra en áreas portuarias con una alta especificidad (topografía, condiciones meteorológicas, buque, procedimientos establecidos de operación, particularidades locales, etc.).
- El uso de un modelo interactivo en tiempo real incorpora la influencia del factor humano en el desarrollo de las maniobras.
- La concurrencia de prácticos, capitanes e ingenieros portuarios en el proceso de diseño conduce a un análisis mucho más completo del problema.
- Los resultados son de mayor precisión que los obtenidos mediante reglas empíricas o por vía de estudios con modelos matemáticos de piloto automático.
- Basándose en los resultados de la simulación, puede desarrollarse un conjunto detallado de normas o recomendaciones de acceso al puerto teniendo en cuenta los tipos y dimensiones de los buques, las condiciones ambientales y el uso de los remolcadores. En definitiva, puede llegar a evaluarse el “down-time” del puerto por motivos físicos y meteorológicos.
- Es posible realizar un análisis de riesgo para las maniobras basado en métodos estadísticos particularmente desarrollados para este propósito.
- El uso de simuladores permite acelerar, en los aspectos directamente relacionados con el modelo, la formación de Oficiales de Marina Mercante y Prácticos mediante el uso de una herramienta técnica de alta calidad y bajo coste comparado con el uso de un buque real.
- Un simulador de maniobra de buque es una herramienta enormemente útil para la formación continua de prácticos y capitanes en ejercicio, por su capacidad de reproducir situaciones nuevas, extremas o de emergencia manteniendo los distintos parámetros bajo control.
- Los sistemas de simulación están fundamentalmente basados en equipos informáticos, en los que tienen un peso elevado tanto la potencia de cálculo numérico como los sistemas de tratamiento de gráficos. Se trata de campos que están experimentando un vertiginoso crecimiento, lo que permite augurar un futuro de enorme desarrollo.

Por otra parte, la aplicación de un simulador para estudios portuarios tiene presenta también ciertos aspectos negativos o inconvenientes:

- Los simuladores son equipos costosos y de relativamente rápida obsolescencia, que requieren fuertes inversiones de adquisición y actualización.
- Se basan en tecnologías complejas, lo que supone disponer de equipos de técnicos muy especializados y establecer métodos de formación continua.

- Necesitan de la actuación coordinada de un equipo de ingenieros, prácticos, capitanes y especialistas en informática, lo que implica también importantes costes de personal.
- El desarrollo de un estudio completo y de calidad consume generalmente períodos de tiempo largos, si se desean cubrir múltiples escenarios de maniobra, pues de cada maniobra simulada se realiza un elevado número de repeticiones y en tiempo real.
- Se requiere, además, disponer de complejos métodos de análisis de resultados, que consumen recursos informáticos significativos.
- El modelo de comportamiento del buque es limitado. En la mayoría de los habitualmente utilizados faltan algunas fuerzas que pueden ser relevantes, como fondeo, colisión, succión de orilla u otras, o no están reproducidas con el suficiente detalle.
- En el mismo sentido, los coeficientes hidrodinámicos de los buques son necesariamente simplificados, no abarcan con la precisión suficiente la totalidad de las situaciones posibles, y además son difíciles de adquirir y desarrollar.

4. Un caso de comparación: el canal de Avilés

De entre los estudios desarrollados por el CEDEX para Puertos del Estado, se ha seleccionado el caso del Puerto de Avilés como término de comparación entre los métodos de dimensionamiento empíricos y la aplicación de un simulador interactivo. A continuación se analizan las hipótesis consideradas en cada una de las aproximaciones, el método de cálculo y los resultados obtenidos.

4.1. Características del Puerto de Avilés

El Puerto de Avilés se extiende a lo largo de la Ría del mismo nombre, de unos 10 km de longitud total, con una carrera de marea máxima de 4.50 m. El canal de entrada, de 1.500 m de longitud, está parcialmente resguardado de los oleajes y vientos predominantes, de componente NW, pero la aproximación se hace complicada en condiciones de temporal. El Muelle de Raíces fue recientemente ampliado 250 m en su extremo Sur a fin de aumentar su capacidad. Al mismo tiempo, el canal de acceso y el área de maniobra se dragaron a la cota -9 m, con el objeto de permitir el acceso seguro de buques de mayores dimensiones. La planta general del puerto se muestra en la figura 10.





Figura 10. Planta general del Puerto de Avilés (año 1997).

El buque de cálculo para el nuevo muelle fue un bulkcarrier tipo Panamax de 48.000 TPM. Las dimensiones principales de este tipo de buque son: 200 m de eslora total, 32.2 m de manga y hasta 11 m de calado a plena carga, para un desplazamiento de hasta 55.000 t. En el canal se distinguen tres partes: Un primer tramo recto de unos 1.000 m, la curva de Pachico y un área rectilínea de 3.400 m de longitud desde el Muelle de Raíces hasta los Muelles de Ensidesa. El tramo recto del canal está dragado a la cota -10 m en su parte inicial (unos 120 m) para pasar después a la cota -9 m. La anchura navegable es de 102 m (ver figura 11), siendo la anchura total en la coronación de los muros de encauzamiento de 160 m. La curva supone un cambio de rumbo hacia estribor de unos 75 grados de amplitud, y su trazado se caracteriza por un radio en el eje de unos 825 m y una anchura navegable en torno a 90 m, igualmente dragada a -9 m.

La maniobra de entrada habitual (ver figura 12) comienza a una milla de la boca del canal hacia el Noroeste. El buque llega con rumbo Sudeste navegando a unos 5 nudos.

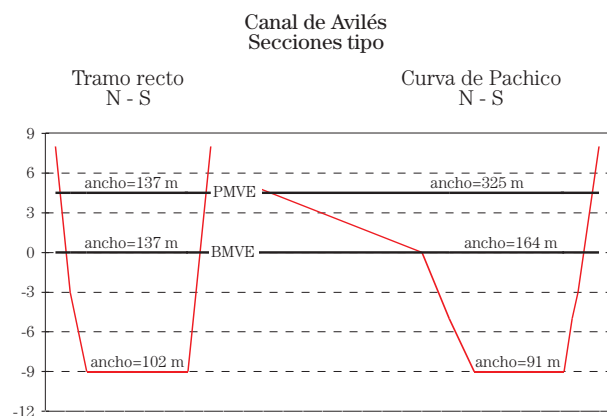


Figura 11. Secciones tipo del canal de Avilés.

En esta primera fase predomina el efecto del oleaje de popa de dirección N o NW, que hace difícil mantener el control del buque (deriva y guiñada). En consecuencia, acceder al canal se convierte en una tarea dificultosa. En el tramo recto del canal, la altura de ola decrece rápidamente. La mayor dificultad en este sector es mantener la derrota en un paso estrecho, donde el buque se ve sometido a la acción de fuerzas y momentos de succión de las orillas. Dado el importante calado, la maniobra debe comenzar al menos con un nivel de agua de 3 m sobre BMVE. Con mareas vivas, éste se alcanza 2 horas antes de la pleamar, por lo que cabe esperar corrientes llenantes, de popa, de hasta 30 cm/s, que harán más difícil el control del buque.

La curva de Pachico representa un fuerte cambio de rumbo y un estrechamiento del canal. Por ello, la velocidad del buque debe mantenerse lo más baja posible en el tramo anterior, de modo que pueda realizarse un cambio de rumbo seguro. Los vientos de través, bien del Oeste (invierno) o del Nordeste (verano), suponen una dificultad añadida. Una vez superada la curva, se llega a la zona de Raíces, donde se dispone de suficiente longitud libre para detener el buque y revirar para el atraque, si fuera necesario.

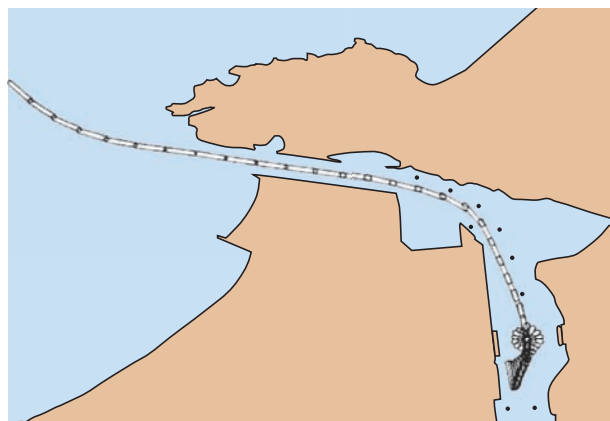


Figura 12. Trayectoria de acceso a Avilés (Ampliación de Raíces).

Dado el Clima Marítimo de la zona, se consideraron para el análisis de dimensionamiento dos direcciones de oleaje: Norte y Noroeste, con alturas significantes respectivas de 2 y 3 m. A cada una de ellas se le asoció una dirección de viento, Nordeste y Oeste respectivamente, con velocidades de 20 nudos (Beaufort 5). Se estudió también una condición de calma (oleaje Noroeste de $H_s=1$ m con viento Oeste $v=3$ nudos) como referencia. La frecuencia de presentación de estas condiciones puede estimarse en unos 75 días/año (calma), 40 días/año (viento Oeste) y 24 días/año (viento Nordeste).

4.2. Aproximación por métodos empíricos

4.2.1. Metodología AIPCN-PIANC

El método desarrollado por el Grupo de Trabajo 30 de PIANC comienza por definir el buque (o buques) de cálculo. Éste se determina por sus malas características de maniobrabilidad, grandes dimensiones, especial sensibilidad a los efectos del viento o carga peligrosa. En este caso, dicho buque viene ya predefinido, un bulkcarrier Panamax de eslora 200 m, manga 32.2 m y calado hasta 11 m, de elevadas dimensiones en relación al canal de acceso.

En cuanto al trazado de la vía navegable, se recomienda seguir una trayectoria recta, y si no es factible, definir tramos rectos conectados por el menor número de curvas posible. Este es el caso de Avilés, como se ha indicado, con la curva de Pachico enlazando el tramo inicial del canal con la zona de Raíces. Los tramos rectos deben tener una longitud mínima de 5 esloras, en este caso 1.000 m. Se cumple, por tanto, esta recomendación tanto para el primer tramo como para el segundo, desde la salida de la curva hasta el nuevo muelle.

Es conveniente evitar corrientes y vientos transversales al eje del canal, a fin de facilitar la evolución del buque. En este caso, las corrientes de marea, llenantes o vaciantes, siguen básicamente el eje del canal salvo en la curva. El viento, por el contrario, se cruza al buque en la curva y el segundo tramo, tanto si sopla del Oeste como del Nordeste. Sin embargo, la morfología de la zona impide otras alternativas de trazado.

Las curvas, de acuerdo con las recomendaciones PIANC, deben tener el menor ángulo posible, obligando a cambios de rumbo progresivos, de entre 30 y 45 grados como máximo. Mayores alteraciones dificultan seriamente el control de la posición del buque. Todo lo anterior se establece en la hipótesis de que el buque es capaz de trazar la curva por sus propios medios, sin la ayuda de remolcadores.

La curva de Pachico supone un cambio de rumbo de 75 grados, muy por encima de lo recomendable. Como se ha dicho, la morfología local no permite evitar esta situación sin recurrir a modificaciones sustanciales en la zona de San Juan de Nieva. Se trata, pues, de un punto de elevada dificultad, y será conveniente añadir a la capacidad de evolución del buque de cálculo la asistencia de remolcadores.



Por otra parte, el radio mínimo de las curvas se considera en torno a 2 esloras en aguas profundas y casi 3 esloras en profundidad limitada (resguardo bajo quilla del 10% de calado), todo esto en calma y utilizando ángulos de timón máximos (próximos a 35 grados). Es recomendable poder trazar las curvas con un menor uso del timón (15-20 grados), de modo que se disponga de una cierta capacidad de gobierno adicional en caso de necesidad.

El radio deseable se establece mediante un gráfico que relaciona el resguardo bajo quilla disponible con el ángulo de timón requerido. En este caso, suponiendo $h/T=1.20$ (relación profundidad/calado del buque), situación correspondiente a pleamares importantes, y para un ángulo de timón elevado (30 grados), resulta un radio de 4.64 esloras, o 927 m. Como puede verse, un valor superior al disponible (825 m), lo que reafirma el hecho de que la curva de Avilés es una zona de alta dificultad de maniobra para el buque analizado.

Debe señalarse que el gráfico mencionado se basa en datos de comportamiento de un buque portacontenedores, de formas de casco finas por su elevada velocidad en servicio, cuyas características de maniobrabilidad son muy diferentes a las del bulkcarrier, de coeficiente de bloque mucho más alto (0.80-0.85 frente a 0.65-0.70). Los radios obtenidos del gráfico serán, por tanto, algo superiores a lo que cabe esperar para este buque, pero aun así, el radio existente en el canal es muy inferior a lo deseable para una maniobra cómoda.

El informe de la International Oil Tankers Commission, centrado en petroleros de 100.000 a 300.000 TPM, buques mucho mayores que el que aquí se estudia, llega a recomendar radios de curva superiores a 5 esloras, 1.000 m en este caso, bastante más amplios que el radio real.

Para dimensionar el ancho de la zona navegable, en términos de número de mangas del buque, se considera una anchura básica, a la que se van añadiendo sobreamplios necesarios por diversos motivos (vientos o corrientes transversales, oleaje, corrientes longitudinales, calidad de las ayudas a la navegación, márgenes de seguridad a las orillas, márgenes de separación a vías laterales de navegación, resguardo adicional por cargas peligrosas, etc.). La anchura básica viene definida por el espacio mínimo que requiere el buque para navegar en calma por el canal teniendo en cuenta la capacidad del práctico para detectar desviaciones respecto al eje gracias a las referencias visuales disponibles, el tiempo de respuesta una vez detectada la desviación y la capacidad del buque para corregir dicha desviación, de acuerdo con sus características de maniobrabilidad.



En este caso, para determinar el ancho básico puede estimarse una maniobrabilidad moderada, pues si bien el bulkcarrier analizado presenta en general buena capacidad de respuesta, la navegación a muy baja velocidad y con un reducido resguardo bajo quilla, como es el caso, perjudica sus cualidades. Debe tomarse, entonces, un valor $1.5*B=48.3$ m (B =manga del buque).

En la curva se navega además con un cierto ángulo de deriva para lograr el equilibrio de fuerzas, lo que incrementa el ancho ocupado por el buque. En aguas profundas, el aumento puede estar entre el 100% y el 160%, mientras que en profundidades limitadas se alteran las fuerzas hidrodinámicas y se producen menores aumentos (30-40% para $h/T=1.1$). Se puede tomar en general un valor $L^2/8R$, lo que supone en este caso 6.1 m, para dar un total de 54.4 m. Existe igualmente una figura que relaciona el ancho ocupado en una curva con el resguardo bajo quilla y el ángulo de timón. Como indicación, se obtiene para $h/T=1.20$ y 30 grados de timón un valor de $1.46*B=46.8$ m, al que habría que añadir la imprecisión en la posición del buque.

De nuevo, debe mencionarse que el valor anterior está basado en los resultados para un portacontenedores, por lo que no es aplicable sin un análisis más detallado.

La maniobra de acceso a Avilés debe realizarse necesariamente a la menor velocidad posible, en torno a 5-6 nudos, dadas las restricciones de espacio, por lo que no es necesario incrementar el ancho por este motivo.

En cuanto a los agentes ambientales, no se produce viento transversal relevante en el tramo recto, pues, de acuerdo con las indicaciones de los prácticos, el Nordeste se viene a la proa en esa zona por la topografía, y el Oeste se abre muy ligeramente de la popa. En la curva, por el contrario, ambas direcciones de viento afectan negativamente al control de buque. Siguiendo las reglas de PIANC, a una intensidad de 20 nudos con baja velocidad de navegación le corresponde un sobreaño de $0.5*B=16.1$ m.

En la misma línea, la corriente llenante cerca de la pleamar, condición necesaria para la entrada de buques de gran calado, acompaña al buque sin componentes transversales en el tramo recto, pero en la curva se cruza al buque, con un gradiente longitudinal sensible. Su velocidad, de acuerdo con las medidas y modelos numéricos utilizados, llega a unos 25 cm/s (0.5 nudo), a la que corresponde un sobreaño de $0.2*B=6.4$ m.



En cualquier caso, la componente longitudinal es reducida en ambos tramos, inferior a 1.5 nudos, por lo que no requiere anchura adicional.

El oleaje sólo alcanza al tramo inicial del canal, y se requiere en esa zona más espacio de seguridad para compensar las desviaciones inducidas por las oscilaciones del buque. Con períodos elevados (16-18 s), no infrecuentes en la zona, que producen olas de longitud del orden de la eslora, y alturas hasta 3 m, las reglas establecen un ancho adicional de valor $0.5*B=16.1$ m.

Otro aspecto que puede afectar al ancho del canal es la calidad de las referencias visuales o las ayudas a la navegación. En este caso son buenas, tanto en la recta, con orillas bien visibles y señalizadas y la iglesia de Laviana como marca de enfilación del canal, como en la curva, con boyas a ambos lados que delimitan la zona navegable. Así pues, corresponden sobreamplios de $0.1*B=3.2$ m en ambas zonas.

En todo el canal, el resguardo bajo quilla es inferior al 50% ($h/T < 1.5$) y las zonas de contacto en caso de salida del canal son duras (escolleras de las márgenes, muelles de San Juan, etc.), por lo que debe tomarse $0.2*B=6.4$ m más.

Dada la limitación de profundidad habitual ($h/T < 1.2$), debe tomarse un ancho adicional de $0.2*B=6.4$ m.

No es necesario disponer una anchura adicional de separación de vías ya que, para buques de estas dimensiones, el canal es de un solo sentido de navegación.

No hay riesgos especiales derivados del tipo de carga (graneles no contaminantes ni inflamables), aunque la presencia de orillas rígidas y duras recomienda fijar un margen de seguridad adicional que, dada la baja velocidad de maniobra, se establece en $0.5*B=16.1$ m, tanto en la recta como en la curva.

En resumen, resultan las siguientes anchuras necesarias en las condiciones de operación descritas:

- Anchura(recta) = $1.5*B$ (anchura básica) + $0.5*B$ (oleaje) + $0.1*B$ (ayudas a la navegación) + $0.2*B$ (fondo) + $0.2*B$ (profundidad) + $0.5*B$ (orillas) = $3.0 * B = 97$ m
- Anchura(curva) = $1.5*B$ (anchura básica) + $L^2/8R$ (curva) + $0.5*B$ (viento) + $0.2*B$ (corriente) + $0.1*B$ (ayudas a la navegación) + $0.2*B$ (fondo) + $0.2*B$ (profundidad) + $0.5*B$ (orillas) = $3.2 * B + 6.1$ m = 109 m



Las recomendaciones PIANC establecen que la anchura en la curva no debe ser menor que en la recta, lo que se cumple aquí. Por otra parte, la anchura calculada debe de aumentarse cuando se trate de curvas especialmente agudas o de radio reducido con respecto a los valores recomendados. No existen indicaciones sobre el incremento adicional, pero no parece excesivo considerar un mínimo de 16 m más ($0.5*B$), lo que llevaría a un ancho total en la curva de unos 125 m. Finalmente, en situaciones como ésta se insiste en disponer una señalización adecuada y más abundante, que permita apreciar la posición del buque con mayor precisión.

Comparando estos valores con los existentes en el canal, se aprecia que el ancho del tramo recto (102 m) se ajusta al valor calculado, por lo que la maniobra con el buque descrito sería viable en las condiciones mencionadas. Por el contrario, el ancho necesario en la curva excede con mucho el espacio disponible (90 m), incluso con la indeterminación del margen adicional necesario por el difícil trazado. Por tanto, la maniobra mencionada no sería segura en las condiciones de viento y corriente seleccionadas. Reduciendo los sumandos correspondientes a estos dos conceptos, resulta un valor estricto de 87 m, al que habría que añadir algo más por las dificultades de trazado o confiar en la asistencia de remolcadores de suficiente capacidad.

4.2.2. Metodología ROM 3.1

La ROM 3.1 comienza analizando diversos aspectos del trazado de la vía navegable. Como el método anterior, recomienda seguir trayectorias lo más rectilíneas posible, evitando igualmente oleajes, corrientes y vientos transversales. Los diferentes tramos rectos irán conectados por el menor número posible de curvas.

Los tramos rectos deben tener, si es factible, una longitud mínima de 10 esloras, en este caso 2.000 m, especialmente en los tramos anteriores y posteriores a un paso estrecho (bocana, etc.). Esta recomendación produce valores muy elevados en relación con el espacio disponible.

En cuanto a las curvas, el radio mínimo recomendado es de 5 esloras (1.000 m en este caso), con ángulos no superiores a 30 grados, si es posible. Si el ángulo que forman los tramos rectos es superior, se recomienda aumentar el radio de la curva, hasta valores



de 10 esloras o más. Como se ha indicado, la curva de Pachico supone un fuerte cambio de rumbo de 75 grados, y su radio está limitado a 825 m (sólo 4.1 esloras del buque de cálculo).

Para el cálculo del ancho de la vía, se considera una anchura nominal B_n más una anchura B_r de reserva para inestabilidad de las márgenes del canal (taludes, fallo geotécnico, etc.). La anchura nominal se determina en tramos rectos o curvos con formulaciones específicas para condiciones oceanometeorológicas (viento, oleaje, corriente) fijas o variables.

En el tramo recto, se considera necesaria, en primer lugar, una anchura igual a una manga B (32.2 m), más el sobreancho $L \cdot \sin \hat{\alpha}$ producido por la eventual navegación con un cierto ángulo de deriva $\hat{\alpha}$. Esta deriva puede ser causada por la acción de la componente transversal del viento, el oleaje o la corriente. Como se ha indicado, en las condiciones de cálculo fijadas para Avilés sólo existe componente transversal para el viento del Oeste, que incide a unos 10 grados por la aleta. Teniendo en cuenta las velocidades del viento y del buque y la forma de la obra muerta, una sencilla fórmula conduce a estimar un ángulo de deriva del orden de 1.5 grados. El sobreancho necesario es entonces de 5.2 m.

Otro factor de estimación de la anchura es la diferencia entre la verdadera posición transversal del buque y la correspondiente estimación por parte del capitán o práctico. En este caso se trata de posicionamiento visual entre márgenes próximas con marcas en tierra, siendo la maniobra realizada por prácticos experimentados en las condiciones locales, por lo que este sumando puede evaluarse en ± 10 m.

El siguiente sumando contempla la desviación adicional del buque tras las acciones de corrección del error anterior. Para buques de maniobrabilidad media, como es el caso, se toma $2 * 0.2 * B = 12.9$ m.

Finalmente, se toma un resguardo adicional a cada banda para evitar los fenómenos de succión y rechazo de orillas. Para una velocidad de navegación de 5-6 nudos, con taludes rígidos en las orillas, resulta $2 * 0.5 * B = 32.2$ m.

En resumen, la anchura necesaria en el tramo recto es:



- $\text{Anchura}(\text{recta}) = B + 5.2 \text{ m (deriva)} + 2 * 10 \text{ m (error de apreciación)} + 2 * 0.2 * B \text{ (respuesta de buque a la corrección)} + 2 * 0.5 * B \text{ (resguardo a orillas)} = 2.4 * B + 25.2 \text{ m} = 102.5 \text{ m}$

Para la curva, se empieza tomando los valores anteriores. Se tiene, por tanto, una manga, más el sumando por deriva provocada por viento y corriente transversales, que sí están presentes en la curva. En el caso del viento Oeste, se suman ambos efectos, resultando un ángulo de deriva aproximado de 12.5E, bastante notable. Por el contrario, con viento Nordeste se oponen, y el ángulo de deriva es de unos 3E. En otro orden de cosas, la tendencia de giro inducida por viento y corriente favorecerá el trazado de la curva con viento Oeste y será perjudicial con viento del Nordeste, lo que no se contempla en las reglas de dimensionamiento.

A este valor se añade, en primer lugar, un sobreancho por la senda del buque en el trazado de la curva (rabeo de la popa). Como en las normas PIANC, se puede tomar un sobreancho en el giro de L2/8R, correspondiente a un giro alrededor del centro de la eslora, típico de buques de formas llenas en zonas de baja profundidad. Es decir, 6.1 m más.

El error de estima de la posición transversal puede tomarse también como $\pm 10 \text{ m}$, ya que la curva está bien balizada mediante boyas.

El sumando de respuesta del buque a las acciones correctoras aumenta con respecto al considerado en tramos rectos en un valor $0.4 * B$ para buques con maniobrabilidad media. En conjunto, pues, $0.8 * B$.

Finalmente, se consideran los mismos resguardos con respecto a las orillas, dada la configuración del canal en la curva. En total, por tanto:

- $\text{Anchura}(\text{curva}) = B + 43.2 \text{ m (deriva Oeste)} + 6.1 \text{ m (rabeo en el giro)} + 2 * 10 \text{ m (error de apreciación)} + 0.8 * B \text{ (respuesta de buque a la corrección)} + 2 * 0.5 * B \text{ (resguardo a orillas)} = 2.8 * B + 69.3 \text{ m} = 159.5 \text{ m}$

Como ya ocurría con el método PIANC, el ancho disponible en el tramo recto (102 m) resulta suficiente para el desarrollo seguro de la maniobra en las condiciones descritas. Por el contrario, el ancho del canal en la curva (90 m) es claramente insuficiente, por lo que habría que limitar las condiciones meteorológicas para el acceso o disponer medios auxiliares de maniobra.



4.3. Aproximación con simulador

Como se ha indicado, se simularon las maniobras de acceso con un bulkcarrier Panamax de 200 m de eslora a plena carga, con calado de 10.8 m, como buque de cálculo para el nuevo muelle y el dragado del canal y la zona de maniobra. El modelo de maniobra utilizado permite reproducir el comportamiento específico de un buque de esta clase, en lo que se refiere a sus características hidrodinámicas, propulsión, gobierno, navegación con resguardo bajo quilla limitado (20% del calado), efectos de succión de orilla sobre un casco de formas muy llenas y sensibilidad a la acción del oleaje, el viento y la corriente.

Las condiciones meteorológicas simuladas, como se ha indicado, fueron Calma (Viento Oeste de 3 nudos y oleaje Noroeste Hs=1 m), Oeste Bf 5 (Viento Oeste de 20 nudos y oleaje Noroeste Hs=3 m) y Norte Bf 5 (Viento Nordeste de 20 nudos y oleaje Norte Hs=2 m). Las frecuencias de excedencia asociadas a cada una de ellas son 70-110 días/año, 25-35 días/año y 8-15 días/año, respectivamente. Se definió con detalle la distribución de alturas y direcciones de oleaje, basándose en los resultados de la aplicación de modelos de propagación de oleaje. Igualmente, se estableció el campo de viento (velocidades y direcciones), teniendo en cuenta algunos efectos locales (encañonamientos y cambios de dirección), así como la presencia de rachas aleatorias.

En cuanto a la corriente, se dispuso el campo de velocidades y direcciones correspondiente a una llenante de carrera 4.0 m, 2 horas antes de la pleamar, cuando se dan las condiciones más pesimistas que puede encontrar un buque de las características descritas. Como es sabido, la marea llenante acompaña al buque en su entrada y dificulta el gobierno y el control de la arrancada, al reducir la velocidad relativa al agua. Por otra parte, la distribución de velocidades se obtuvo también de la aplicación de modelos numéricos, detectándose en la curva una significativa componente transversal y un marcado gradiente longitudinal, que afecta negativamente el control del buque.

Otros aspectos relevantes fueron la reproducción de los remolcadores utilizados en este tipo de maniobras (número, potencia, tiro, situación con respecto al buque remolcado, forma de trabajo), así como el respeto a la estrategia de actuación local, siguiendo las recomendaciones recibidas de los prácticos de Avilés (referencias de posición, velocidades del buque, aspectos a evitar, recursos de actuación, etc.).

Se realizó un total de 49 repeticiones de la maniobra de entrada en las diversas condiciones, lo que supuso casi 55 horas de simulación. Previamente, se habían realizado unas 20 maniobras más con el objetivo de que el práctico se familiarizase con la situación. Cada condición de maniobra se repitió entre 15 y 17 veces.

Para el análisis de los resultados se estableció un sistema de coordenadas basado en la trayectoria del buque, extendiéndose el eje del canal desde la marca 2400 m (bocana) hasta la 4200 m (final de la curva). Sobre esta línea se definieron secciones transversales cada 100 m. El tramo recto abarcaba las secciones 2-9 (2500-3200) y la curva las secciones 12-18 (3500-4100).

Las figuras 13, 14 y 15 muestran el análisis gráfico del área ocupada por el buque en las diversas condiciones (Calma, Oeste y Norte) tras la realización de las 15-17 simulaciones enunciadas. Se presentan en estos gráficos la trayectoria media del centro del buque y las líneas de excedencia del área ocupada con probabilidades 10% y 1%.

Los resultados obtenidos siguiendo la metodología expuesta en el apartado 3.6 se recogen en las figuras 16 a 18 (anchura del área ocupada asociada al 1% de excedencia, intervalo de confianza al 90% de los valores anteriores y anchura 1% más el intervalo de confianza).

El análisis de los gráficos permite elaborar varias conclusiones: En primer lugar, el ancho requerido en la curva es claramente superior al del tramo recto en las tres condiciones meteorológicas consideradas. Además, y como cabía esperar, se necesita más espacio en la maniobra con viento y oleaje que en calma. Concretamente, en el tramo recto, los anchos con probabilidad de excedencia 1% son de 76 m en calma, 80 m con Oeste y 90 m con Norte. En la curva, los

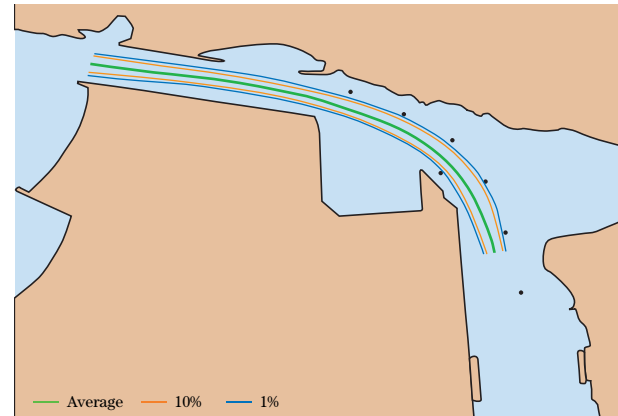


Figura 13. Líneas de excedencia del área ocupada (Calma).

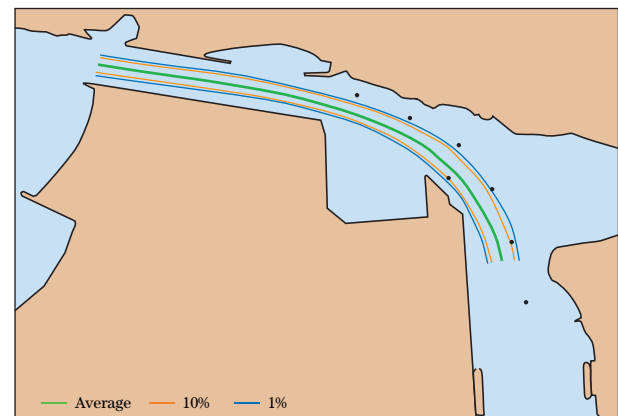


Figura 14. Líneas de excedencia del área ocupada (Oeste).

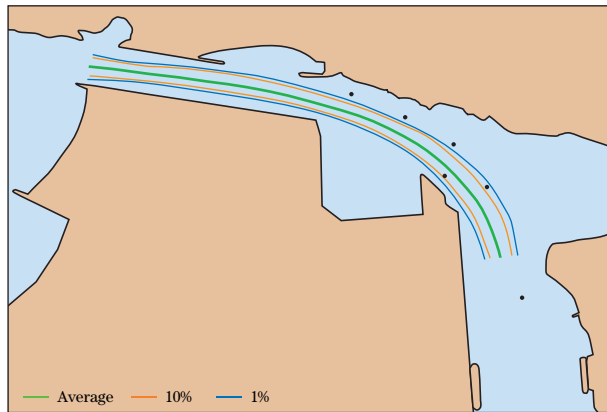


Figura 15. Líneas de excedencia del área ocupada (Norte).

valores correspondientes suben a 104 m, 123 m y 135 m, respectivamente.

Para determinar la precisión con que se calculan estos valores, puede acudir a la evaluación del intervalo de confianza. Este resulta ser, al nivel 90%, de $\pm 8-9$ m en el tramo recto para las tres condiciones. En la curva se produce una mayor dispersión, y el intervalo se amplía a ± 12 m en calma y $\pm 15-16$ m con vientos fuertes.

Globalmente, si se toman como criterio de proyecto los valores de excedencia con probabilidad 1% más un intervalo de confianza, resulta que la condición de viento Nordeste es la crítica para dimensionar el ancho del canal, con 99 m en el tramo recto y 151 m en la curva. Si se comparan estas cifras con las dimensiones existentes, se comprueba que el canal es adecuado en la zona recta para el acceso de buques como el de cálculo en las condiciones consideradas. Sin embargo, la curva queda escasa de anchura, por lo que habrían de establecerse limitaciones de operación por condiciones meteorológicas.

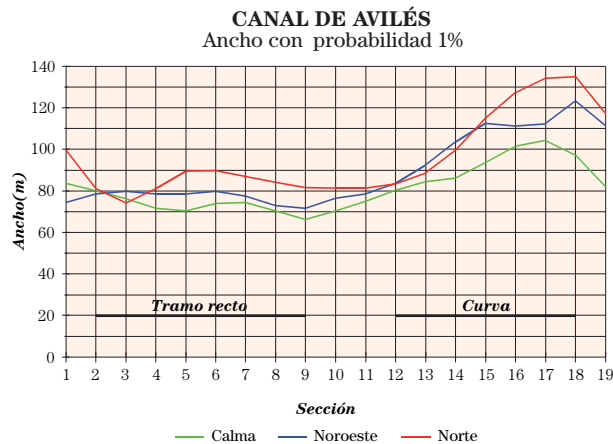


Figura 16. Anchura de canal con probabilidad de excedencia 1%.

4.4. Comparación de resultados

La metodología utilizada por las distintas recomendaciones presenta notables diferencias:

Las reglas de PIANC asignan un ancho básico en el que contemplan la maniobrabilidad del buque (buena, media, pobre) e incorporan globalmente la estima de posición del práctico y la respuesta del buque. La ROM 3.1 analiza estos aspectos con mayor detalle y llega a considerar el tipo de referencias utilizadas (visual, instrumental, etc.) y los conocimientos particulares del ejecutor de la maniobra.

Ambos métodos dan importancia a las acciones transversales (viento, corriente, oleaje), estimando los ángulos de deriva correspondientes, de nuevo con mayor detalle en la ROM. PIANC tiene también en cuenta la presencia de oleaje de cualquier dirección o corriente longitudinal como motivos de perturbación en la evolución del buque, pero no entra a valorar situaciones específicas. En todo caso, las condiciones meteorológicas a evaluar serán necesariamente simplificadas, sin pretender incorporar efectos locales.

En las curvas, se consideran sobreanchos semejantes por el rabeo de la popa, pero quedan a la discreción del proyectista mayores aumentos en caso de curvas especialmente complejas (radio limitado o ángulos superiores a 30E).

Ninguno de los dos métodos prefija un nivel de riesgo en el desarrollo de la maniobra, aunque PIANC tiene en cuenta el tipo de fondo y la peligrosidad de la carga a la hora de asignar márgenes de resguardo.

En ambos casos, se echan en falta valoraciones sobre la dificultad de control del buque ante la presencia de oleaje, viento o corriente de popa, que suponen siempre una dificultad añadida al desarrollo de la maniobra y, por lo tanto, mayores imprecisiones en la posición del barco. Tampoco hay referencias a los efectos de gradientes longitudinales de corriente (distinta intensidad en proa y popa), que suponen momentos de giro importantes, al igual que la succión de orilla, salvo que ésta se intenta minimizar con unos resguardos de referencia.

Ninguno de los métodos empíricos busca excesiva precisión en lo que se refiere al comportamiento concreto del buque según su tipo, salvo algunas referencias muy genéricas. Quedan demasiados factores a juicio del proyectista, lo que podría fácilmente conducir a errores.

En general, las recomendaciones de la ROM 3.1 son más detalladas que las presentadas por el Grupo 30 de PIANC, combinando resultados empíricos con cálculos aproximados de las dimensiones asequibles. Abarcan además diferentes zonas de navegación no contempladas por éste (bocanas, zonas de reviro, fondeaderos, áreas de emergencia, etc.).

Analizando los anchos resultantes para el Canal de Avilés utilizando los tres métodos expuestos, puede construirse la tabla 1.



Resultados del dimensionamiento (Anchura del canal)

	<i>Tramo recto</i>		<i>Curva</i>	
	Calma	Viento	Calma	Viento
PIANC 30	81 m	97 m	103 m	125 m
ROM 3.1	97 m	103 m	136 m	160 m
Simulador (1% exced + 90% conf)	84 m	99 m	116 m	151 m

Comparando los valores obtenidos con las dimensiones reales del canal, se concluye que la anchura del tramo recto (102 m) permitiría el acceso de buques como el seleccionado en las condiciones meteorológicas descritas. Los tres métodos proporcionan resultados muy similares, que quedan bastante ajustados al canal existente.

Lo contrario ocurre en la curva, donde todos los valores obtenidos superan con creces el ancho disponible (90 m). Queda claro que la curva de Pachico supone una dificultad considerable en el tránsito por el canal de Avilés, por su reducido radio y fuerte ángulo, a lo que se suman las acciones ambientales en sentido transversal. Esta maniobra no sería, por tanto, recomendable con los umbrales de operación fijados a priori. Incluso en calma, el efecto de la corriente transversal lleva los resultados ligeramente por encima de lo admisible.

Los valores más altos se obtienen, de forma sistemática, aplicando la ROM. Las cifras más bajas corresponden a las recomendaciones PIANC, mientras que el simulador produce valores intermedios (con 1% de probabilidad de excedencia más un intervalo de confianza al 90%), pero generalmente más próximos a los de PIANC.

Es llamativo que, en calma, la ROM produzca resultados mucho más elevados, mientras PIANC y simulador presentan una gran coincidencia. Al añadir el efecto del viento, el ancho en la recta aumenta muy poco considerando el método ROM (5 m), mientras que el incremento es de 15-16 m con los otros métodos. En la curva, el incremento es más homogéneo, con 22-24 m para los métodos aproximados y hasta 35 m en el simulador.

Hay que señalar que el método de PIANC presenta un sumando de anchura por la dificultad de trazado de la curva (bajo radio y fuerte cambio de rumbo) que se tomó como $0.5 \cdot B$, dado que no se concreta qué aumento debe darse. Si se aplicara un valor algo superior, los resultados se ajustarían más a los del simulador.



5. Análisis de la metodología empleada en el simulador

5.1. Selección de condiciones de simulación

Un estudio de dimensionamiento o el análisis de las condiciones de operación de una vía navegable realizado con un simulador no es bueno de por sí. Requiere equilibrar los medios materiales, la calidad de los modelos y los conocimientos de los expertos involucrados. Un ejemplo a evitar sería el de un estudio con un pobre modelo hidrodinámico de los buques, condiciones hidrometeorológicas mal seleccionadas o reproducidas y sin una estrategia de actuación clara y definida, aunque fuera realizado en un simulador avanzado con magnífica instrumentación, gráficos de alta calidad con 360 grados de amplitud e incluso sonido.

Es imprescindible establecer una buena metodología de trabajo, que incluya, entre otros aspectos:

- Elaborar una buena formulación del problema, con una completa recopilación de información general y local, que permita definir claramente los objetivos del estudio.
- Disponer de o construir un modelo hidrodinámico adecuado de los buques a estudiar.
- Analizar los fenómenos relevantes (corriente, oleaje, viento, succión de orilla, remolcadores, etc.) en el caso concreto objeto de estudio.
- Seleccionar un modelo matemático de agentes ambientales adecuado a esos fenómenos y suficientemente preciso.
- Analizar los factores de percepción transcendentales (referencias visuales o instrumentales, señalización, sistemas de posicionamiento, factores de visibilidad (luminosidad, niebla, lluvia, etc.), estimación de posición y velocidad, sonidos, movimientos, etc.).
- En función de los datos anteriores, realizar una adecuada selección de las condiciones a simular, que con

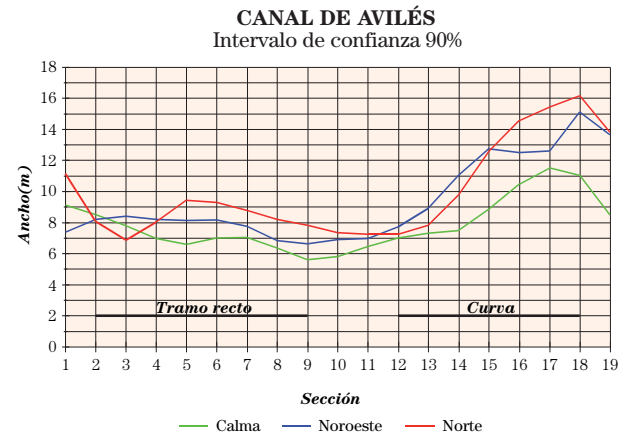


Figura 17. Intervalo de confianza al 90% de la anchura de canal con probabilidad de excedencia 1%.

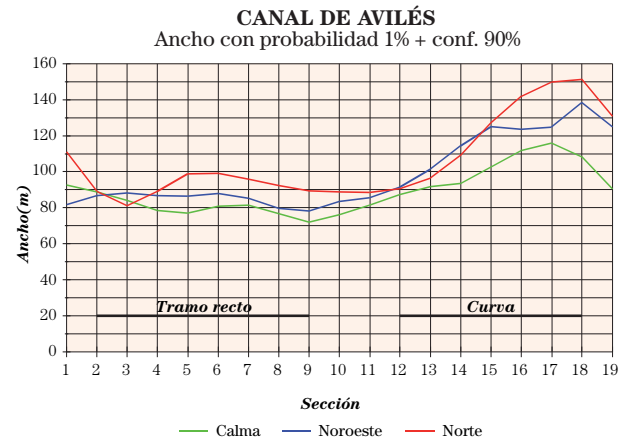


Figura 18. Anchura de canal con probabilidad de excedencia 1% más intervalo de confianza 90%.

el mínimo volumen de utilización del sistema proporcione el máximo de información útil.

- Seleccionar la herramienta (tipo de simulador) más adecuada para el análisis del problema específico, valorando especialmente el modelo matemático de maniobrabilidad, la calidad del sistema visual y la instrumentación disponible.
- Construir los modelos sintéticos de puerto-buque-remolcadores-condiciones ambientales, con la precisión y calidad suficiente. En este proceso, es fundamental mantener un estricto control de la configuración actualizada de cada uno de los escenarios, teniendo en cuenta el elevado número de parámetros involucrados.
- Decidir el número de prácticos que realizarán las simulaciones y sus características (ya sean locales, para disponer de un mejor conocimiento de la forma de trabajo habitual en el puerto en cuestión y ceñirse a las cualidades de quienes realmente gestionarán la situación; neutrales, ante situaciones que requieran especial objetividad; o una combinación de ambos en distintas fases del estudio).
- Seleccionar a los profesionales (ingenieros, capitanes, prácticos, etc.) que participarán en el estudio.

Una vez dispuesto el modelo y antes de pasar a realizar las simulaciones, es fundamental establecer una estrategia de actuación homogénea (condiciones de comienzo y final de las maniobras, referencias intermedias en su desarrollo (puntos de paso, velocidades, etc.), forma de utilización de remolcadores, etc.), que será seguida por todos los actores de la simulación. En su caso, se decidirán de común acuerdo modificaciones o variantes de tal estrategia.

Ya en la fase de simulación, debe determinarse el orden y ritmo de ejecución de las maniobras. Tras una primera fase de familiarización con los diferentes escenarios seleccionados, se acometerán las maniobras válidas para el estudio. Así puede eliminarse el “factor de aprendizaje”, y llegar a esta etapa con la preparación suficiente y libres del sesgo que pueda establecer la acomodación al buque simulado.

En la ejecución de las sucesivas maniobras, deben evitarse secuencias preestablecidas (maniobras con dificultad creciente o decreciente, todas las maniobras bajo una condición realizadas de forma consecutiva, etc.), buscando por el contrario alternar de modo aleatorio las diferentes condiciones. De este modo, la calidad de los resultados obtenidos para cada condición será independiente de las demás. Como consecuencia, las diferentes simulaciones pueden ser suficientemente representativas de lo que cabe esperar en la situación real. Otro aspecto a valorar es el ritmo de simulación. Debe ser lógicamente el mayor posible, a



fin de obtener un uso eficaz de la instalación y reducir el plazo de realización del estudio, pero respetando siempre la eventual fatiga de los ejecutores de las simulaciones. Si esto ocurriera, los resultados presentarían también tendencias dispersas que deben evitarse.

5.2. Número de simulaciones por condición

Uno de los aspectos objeto de discusión al plantearse un estudio en el simulador es el número de simulaciones que es necesario realizar en cada escenario de maniobra. Lógicamente, un mayor número de repeticiones de las maniobras aportará una información más precisa sobre los límites específicos de cada condición, pero debe equilibrarse con el coste de obtención de los datos (horas de trabajo, utilización del sistema, tiempo de análisis de resultados, etc.).

Apoyándose en los resultados obtenidos para el Puerto de Avilés, para el que se dispone de un número relativamente alto de repeticiones de la maniobra de acceso por el canal, se ha realizado un análisis de sensibilidad al número de simulaciones. Concretamente, se estudian dos secciones, la número 7 ($s=3000$) en el centro del tramo recto, frente al Emballo, y la número 15 ($s=3800$), en la Curva de Pachico (extremo Norte de Raíces). La condición meteorológica es la “Norte” (oleaje Norte $H_s=2$ m, viento Nordeste $v=20$ nudos).

A partir de las 17 repeticiones realizadas, se ha extraído un elevado número de combinaciones de 16, 15, 12, 10, 8 y 5 simulaciones, intentando valorar los resultados obtenidos en la hipótesis de que sólo se hubiera ejecutado ese número de repeticiones de la maniobra. A fin de valorar la representatividad de las muestras, se presenta en la tabla 2 el número de combinaciones posibles y las realmente analizadas:

Maniobra de acceso al Puerto de Avilés

Combinaciones de simulaciones analizadas a partir de 17 disponibles

Nº de repeticiones	Nº de combinaciones posibles	Nº de combinaciones estudiadas	Porcentaje sobre posibles
16	17	17	100%
15	136	34	25%
12	6.188	85	1.37%
10	19.448	221	1.14%
8	24.310	153	0.63%
5	6.188	204	3.30%

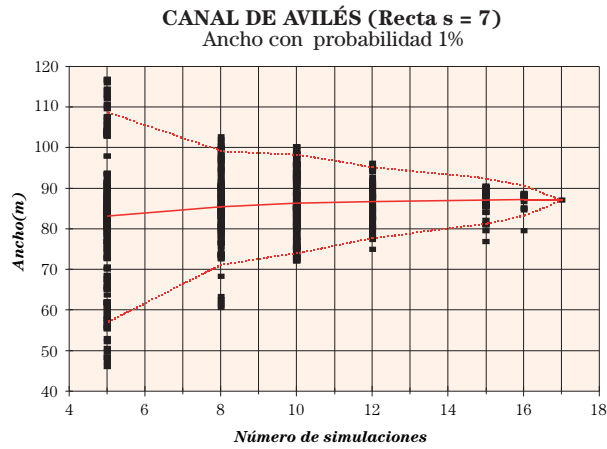


Figura 19. Anchura de canal con probabilidad de excedencia 1% según el número de simulaciones (Tramo recto).

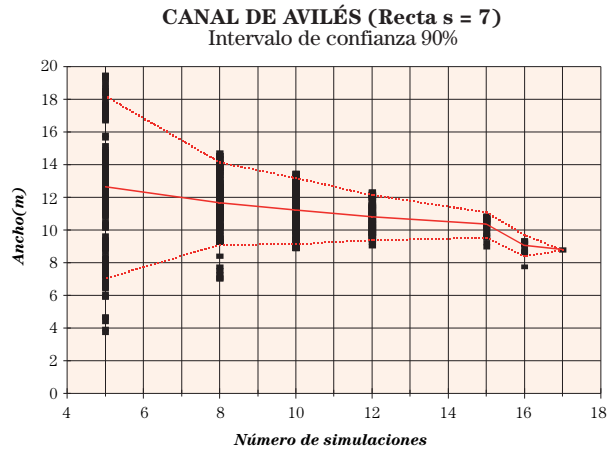


Figura 20. Intervalo de confianza al 90% de anchura 1% según el número de simulaciones (Tramo recto).

El método de análisis aplicado es el mismo descrito en el apartado 3.6, considerando una distribución normal para la posición de los extremos de babor y estribor del buque, sobre la que se calculan las distancias asociadas a una determinada probabilidad de excedencia, así como sus intervalos de confianza.

El primer aspecto evaluado es el ancho de canal correspondiente a una probabilidad de excedencia del 1%. Los resultados se presentan en las figuras 19 (tramo recto) y 22 (curva). Estos gráficos muestran los puntos con los resultados correspondientes a cada una de las combinaciones, junto con la línea central de valores medios de todas las combinaciones y las líneas de trazos que limitan las zonas con el 90% de probabilidad.

El valor medio esperable para el ancho de canal aumenta ligeramente con el número de simulaciones, subiendo desde 83 m (5 repeticiones) hasta los 87 m resultado de las 17 simulaciones realizadas, en el caso del tramo recto. Una tendencia comparable se aprecia en la sección de la curva, aumentando el ancho desde 110 m (5 simulaciones) hasta 115 m (17 simulaciones). A partir de 10 repeticiones, la línea de valor medio se estabiliza sensiblemente. Lo más destacable, sin embargo, es la diversidad de valores que podrían obtenerse según el número de simulaciones realizadas: Así, para la sección recta, una combinación de sólo 5 maniobras podría producir requerimientos de anchura de canal con cualquier valor entre 57 y 109 m; Con 10 maniobras simuladas, el resultado obtenido podría estar entre 74 y 98 m; Con 15 maniobras, la variación estaría ya entre 81 y 93 m.

Otro parámetro interesante es el intervalo de confianza ligado a los valores anteriores, que permite estimar la precisión esperable en la medida de la anchura del canal, según el número de simulaciones realizadas. Las figuras 20 (tramo

recto) y 23 (curva) recogen estos valores. En este caso, la estimación central del intervalo de confianza del 90% para el ancho con probabilidad de excedencia 1% se va reduciendo, en el tramo recto, desde 12.6 m (5 repeticiones) hasta 8.8 m (17 simulaciones realizadas). En la sección de la curva ocurre algo semejante, pasando de 16.9 a 12.6 m. Los gráficos muestran también que los intervalos de confianza obtenidos para diversas combinaciones difícilmente bajarán de los correspondientes a la realización de las 17 maniobras mencionadas, pero pueden en cambio, aumentar hasta 18.5 m (10 simulaciones en la curva) o incluso 25.6 m (5 maniobras).

Combinando los dos resultados anteriores, pueden valorarse las anchuras de canal correspondientes al 1% de excedencia, a las que se añade el 90% de intervalo de confianza resultante en cada caso (ver figuras 21 y 24), que es la dimensión que se tomaría para el proyecto. La estimación central para el tramo recto es prácticamente estable en torno a 96-97 m. Lo mismo se aprecia en la curva, con valores entre 127 y 129 m. De todos modos, si se ejecutaran sólo 5 maniobras, el ancho resultante para el canal podría tomar cualquier valor entre 64 y 127 m, para el tramo recto, y entre 73 y 181 m, para la curva. Se trata de variaciones inaceptables para un diseño riguroso. En el caso de realizar 10 simulaciones por condición, los resultados más probables estarían entre 83 y 112 m (recta) o 101 y 156 m (curva). Llegando a 15 repeticiones de la maniobra, los límites se quedarían entre 91 y 104 m (recta) o 117 y 140 m (curva).

Los resultados del análisis anterior demuestran que un estudio orientado al dimensionamiento de canales, bocanas o zonas de maniobra requiere la realización de un elevado número de simulaciones en cada condición, si se busca un nivel de precisión y fiabilidad suficiente. Habitualmente, en cada escenario de maniobra se repite la maniobra un mí-

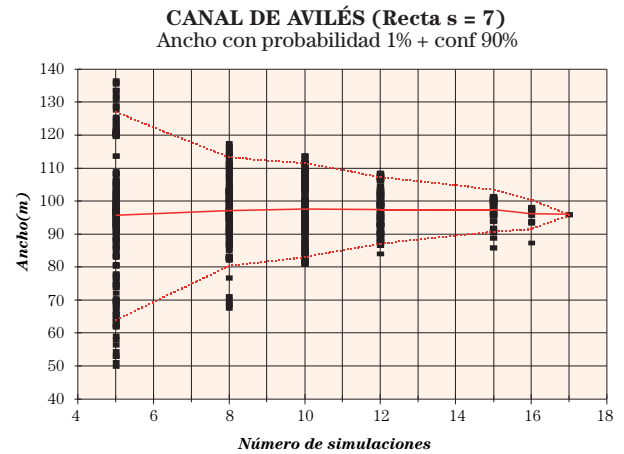


Figura 21. Anchura de canal 1% + intervalo de confianza 90% según el número de simulaciones (Tramo recto)

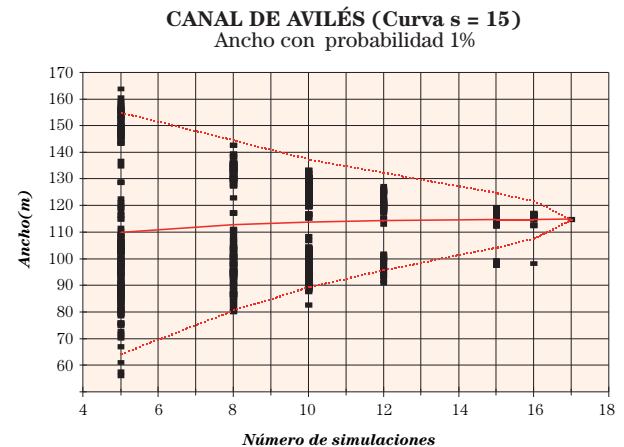


Figura 22. Anchura de canal con probabilidad de excedencia 1% según el número de simulaciones (Curva).

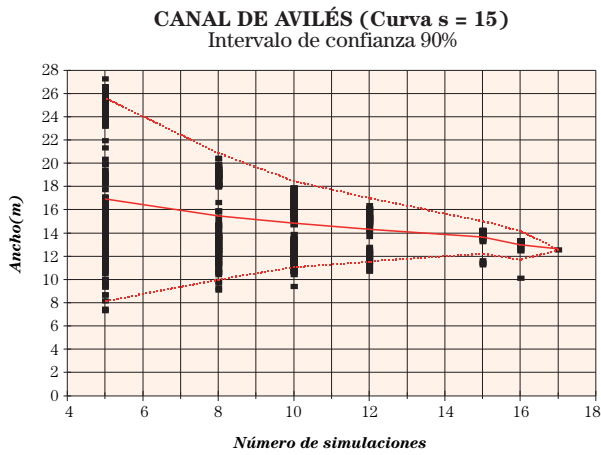


Figura 23. Intervalo de confianza al 90% de anchura 1% según el número de simulaciones (Curva).

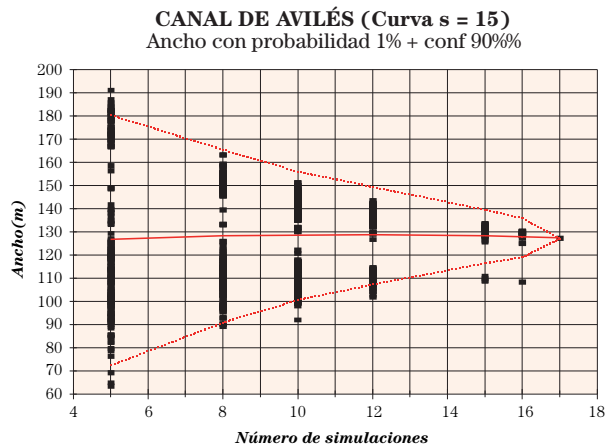


Figura 24. Anchura de canal 1% + intervalo de confianza 90% según el número de simulaciones (Curva)

nimo de 8-10 veces. Quedan patentes los beneficios derivados de un mayor número de simulaciones (12-15 o más), que habrá que valorar en cada caso contra el coste de ejecución del estudio. En todo caso, debe desarrollarse un análisis crítico de los resultados, con el fin de determinar los márgenes de error en los valores obtenidos.

5.3. Nivel de excedencia

Otro aspecto a considerar es la determinación del nivel de excedencia que se debe tomar como umbral en el análisis del área ocupada durante las maniobras simuladas. Este proceso comenzará normalmente con el establecimiento de un riesgo admisible en la vía navegable, ligado a una serie de condicionamientos que se analizan a continuación. La distribución de Poisson relaciona el nivel de riesgo en la vida útil con la probabilidad de fallo individual:

$$P = 1 - (1 - f)^N$$

- donde P = Riesgo admisible en la vía navegable
- f = Probabilidad de fallo en el desarrollo de una maniobra independiente
- N = Número de maniobras que se realizan a lo largo de la vida útil de la vía

En este sentido, el concepto de “fallo” se refiere a la salida de las márgenes de la vía navegable (varada o colisión con estructuras laterales) por las meras dificultades de gobierno del buque, y no a eventuales fallos de operación en la máquina, el timón o ambos, ni a errores o averías en la actuación de los remolcadores. Estos últimos aspectos requerirían métodos de análisis diferentes.

La vida útil se define en la ROM 0.2-90 como el tiempo en que se prevé en servicio la estructura, o en este caso, la vía

navegable o zona de maniobra. En general, es difícil de establecer, pues lógicamente se carece de información sobre los eventuales cambios que puedan realizarse en el futuro (dragado de canales, ensanche, nuevos diques que alteren bocanas, etc.). Con todo, y al igual que en el proyecto de cualquier otra estructura, debe fijarse un valor de referencia, basándose en “la probabilidad y posibilidad de cambios en las circunstancias y condiciones de utilización previstas en el proyecto como consecuencia de variaciones en operaciones o tráfico portuario, y la viabilidad de refuerzos (?) o readaptaciones a nuevas necesidades de servicio” (ROM 0.2-90).

En el caso de las vías navegables pueden aplicarse los criterios de determinación de vida útil establecidos en la ROM, diferenciando vías de carácter general o específico y seleccionando el nivel de seguridad (1, 2 o 3) según el riesgo de pérdida de vidas humanas o daños medioambientales en caso de accidente. De este modo, puede recogerse la influencia de tres factores decisivos en la definición de la seguridad de las vías navegables:

- *Las características físicas de la zona:* Se valora en este punto la probabilidad de que una varada o colisión se traduzca en daños al buque (fondos blandos –arenosos–, que reducen dicha probabilidad, o de roca, que actúan en sentido contrario; márgenes de canal rígidas –taludes de escollera o muros de gravedad– o deformables –orillas naturales de materiales blandos, etc.–).
- *El tipo de tráfico:* Puede tener una influencia drástica sobre las consecuencias derivadas de un accidente (productos contaminantes, inflamables o peligrosos, que darían lugar a vertidos, escapes, incendios o explosiones; pasajeros, que constituyen una “carga” especialmente sensible, etc.).
- *El entorno de la vía navegable:* Debe sopesarse aquí la existencia de zonas habitadas, instalaciones en áreas industriales o espacios de valor medioambiental destacado en las proximidades de la zona de navegación que pudieran sufrir las consecuencias de un eventual accidente. Igualmente, la trascendencia en relación al resto del tráfico del puerto (cierre por bloqueo de un canal o bocana estrecho ante la presencia de un buque varado o hundido, etc.).

Sin embargo, parecen excesivas las cifras de vida útil establecidas en la ROM de acuerdo con estos criterios (entre 15 y 100 años), ya que están orientadas al dimensionamiento de una estructura resistente más que a la operación de una instalación, como es el caso. Está fuera del alcance de este trabajo el establecimiento de períodos concretos para cada uno



de los casos, pero parece intuitivamente admisible considerar cifras del orden de la mitad o la tercera parte (entre 5 y 30 años).

Una vez determinada la vida útil, el número total de maniobras a desarrollar vendrá dado por la frecuencia de buques de las condiciones de proyecto que accedan al puerto. Este dato (un buque al mes, a la semana, diario, etc.) se apoyará en estimaciones de tráfico o en estadísticas de tráfico real, según los casos, que deben ser aportados por la Autoridad Portuaria, concesionario u operador correspondiente.

Así pues, el nivel de riesgo admisible P queda definido como la probabilidad de que se produzca la varada o colisión de al menos un buque a lo largo del período de utilización de la vía navegable. Siguiendo igualmente los criterios establecidos en la ROM 0.2-90, debe establecerse “en función de sus características físicas y económicas, las repercusiones económicas directas e indirectas en caso de inutilización parcial o total y la estimación de pérdidas humanas en caso de destrucción o rotura (?)”. Parece igualmente adecuado aplicar un método como el de la tabla 3.2.3.1.2, que comienza por discriminar riesgo de iniciación de averías frente a destrucción total. La primera situación sería la más comparable en el caso de varada o colisión en maniobras a baja velocidad o en zonas con márgenes blandas, donde es poco probable que el buque llegue a sufrir daños severos. En un segundo paso se evaluarían las repercusiones económicas (daños al propio buque, a estructuras o equipos del puerto, instalaciones próximas, cierre de accesos, contaminación, etc.), distinguiendo niveles bajo, medio y alto. Finalmente, se evaluaría la posibilidad de daños a las personas (a bordo del buque o en las proximidades), que lógicamente fuerza a reducir el riesgo admisible.

Los niveles de riesgo establecidos en la ROM se extienden desde 0.05 a 0.50 según los condicionamientos anteriores, y parecen adecuados para el problema que se trata.

En consecuencia, una vez determinados el nivel de riesgo admisible (P), la vida útil (L) y la frecuencia de tráfico (b), lo que produce un número de maniobras $N = L * b$, puede determinarse la probabilidad de excedencia f de las márgenes de la vía de navegación en una maniobra individual:

$$f = 1 - (1 - P)^{1/Lb}$$

La figura 25 permite evaluar la importancia relativa de los distintos parámetros considerados. Muestra las probabilidades individuales de excedencia de las márgenes de la zona



de maniobra correspondientes a diferentes combinaciones de vida útil (o número total de buques) y nivel de riesgo.

En el caso de Avilés, la vida útil del canal se estimaría en 25 años según la ROM 0.2-90, como obra de carácter específico con nivel de seguridad 2 (interés general con riesgo moderado de pérdida de vidas humanas). De acuerdo con los comentarios anteriores, esta cifra parece elevada para la estimación de las condiciones de seguridad en el canal. La frecuencia de acceso de buques de las dimensiones establecidas sería de uno mensual (300 maniobras en el tiempo total). La frecuencia de presentación de las condiciones meteorológicas consideradas límites de operación está en el entorno del 12% del tiempo, lo que da lugar a unas 40 maniobras en estas condiciones. El nivel de riesgo de varada admisible podría ser de 0.50 para un buque granelero (coste de pérdidas moderado, eventual reparación del buque, eventual cierre del puerto, pequeña posibilidad de pérdida de vidas). En estas condiciones, la probabilidad de excedencia del área ocupada a considerar es la del 1.7%. Como margen de seguridad, el análisis anterior se ha concentrado en la línea del 1% de excedencia.

5.4. Distribución utilizada

Otro de los temas objeto de análisis es establecer cuál es la distribución más adecuada para la posición de los bordes laterales del buque, que delimitan el ancho del área ocupada. Como se ha indicado, es habitual utilizar una distribución normal, que se ajusta en cada sección calculando la media y la desviación de las distancias al eje del canal o al borde del mismo. Ahora bien, en primer lugar, ésta es una distribución simétrica, que no encaja exactamente con el concepto que se analiza. En efecto, dada la presencia del práctico o capitán y como consecuencia de sus acciones de

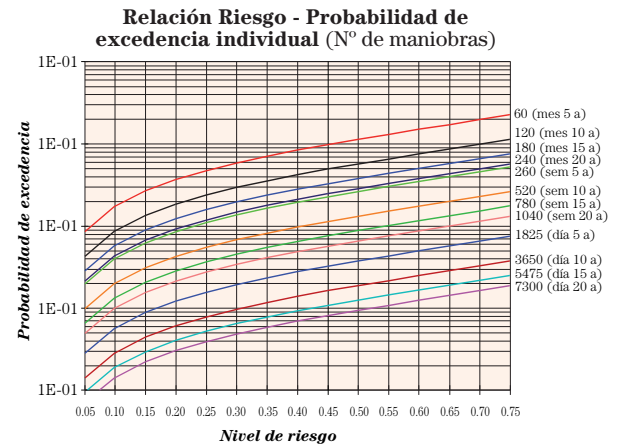


Figura 25. Relación entre riesgo admisible en la vida útil y probabilidad de excedencia en una maniobra.

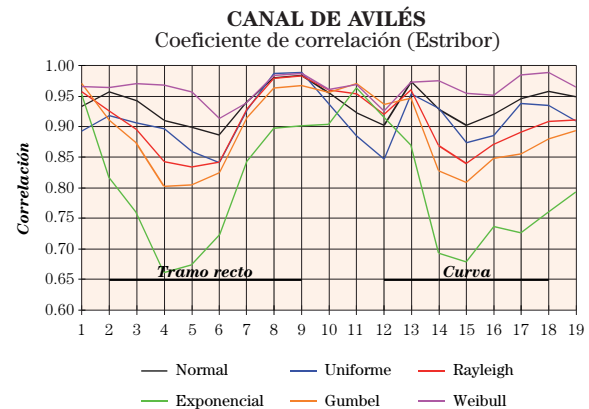


Figura 26. Coeficiente de correlación obtenido para diversas distribuciones (Estribor).

control, es lógico esperar que se produzca una mayor tendencia a ir hacia el centro del canal que hacia los bordes, evitando situaciones de riesgo, por lo que deberían considerarse distribuciones de menor simetría. En segundo lugar, el interés del proyectista es evaluar la posición de los valores extremos, ligados a probabilidades de excedencia reducidas. En esta cuestión, y al igual que en otros campos de la estadística aplicada a la ingeniería (clima de oleaje o viento, por ejemplo), puede ser interesante manejar otro tipo de distribuciones más adecuadas.

De nuevo, utilizando los resultados de las simulaciones en el Puerto de Avilés (condición “Norte”) se ha realizado un análisis del ajuste de diferentes distribuciones. Dicho ajuste se ha realizado en las bandas de estribor y babor para las 19 secciones descritas, extendiéndose desde la bocana hasta el final de la curva de Pachico.

Las distribuciones estadísticas comparadas han sido las siguientes, siendo $F(x)$ la función de distribución:

Normal (Biparamétrica. μ =media ó=desviación)

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} \exp \left[-\frac{(t - \mu)^2}{2 \sigma^2} \right] dt$$

Uniforme (Biparamétrica. A=inicio del escalón B=anchura del escalón)

$$F(x) = (x - A) / B$$

Exponencial (Biparamétrica. A, B)

$$F(x) = 1 - \exp [- (x - A) / B]$$

Rayleigh (Biparamétrica. A, B)

$$F(x) = 1 - \exp [- [(x - A) / B]^2]$$

Gumbel (Biparamétrica. A, B)

$$F(x) = \exp [- \exp [- (x - A) / B]]$$

Weibull (Triparamétrica. A, B, C)

$$F(x) = 1 - \exp [- [(x - A) / B] ^ C]$$

Los criterios de comparación utilizados han sido, por una parte, la valoración de los coeficientes de correlación lineal en las distintas secciones, y por otra, el grado de ajuste en las proximidades de los valores extremos. De este modo, puede establecerse qué distribuciones son las más adecuadas para el problema que se presenta, al menos en las circunstancias de la maniobra en Avilés.

Los resultados obtenidos en este experimento para las diversas distribuciones se presentan en las figuras 26 a 30. En primer lugar, se muestran los coeficientes de correlación en las diferentes secciones, distinguiendo los ajustes por el lado de estribor y el de babor. Como resumen, se comparan los coeficientes de correlación medios en la totalidad de las secciones, en el tramo recto (secciones 2 a 9) y en la curva (secciones 12 a 18).

Pueden establecerse las siguientes conclusiones: La distribución que presenta los mejores ajustes es la de Weibull, con coeficientes de correlación superiores a 0.955. No es de extrañar, pues en comparación con el resto se dispone de un tercer parámetro libre para optimizar el ajuste. La distribución gaussiana muestra también buenos ajustes, por encima de 0.933 de media. Tanto la distribución de Rayleigh como de Gumbel proporcionan igualmente buenos resultados, pero se aprecia una marcada diferencia entre las bandas de estribor (correlación menor de 0.91) y la de babor (correlación media superior a 0.93).

Sorprende la pobre calidad del ajuste para la distribución exponencial, que no llega a una correlación media de 0.9 y está muy descompensada entre las bandas de babor y es-

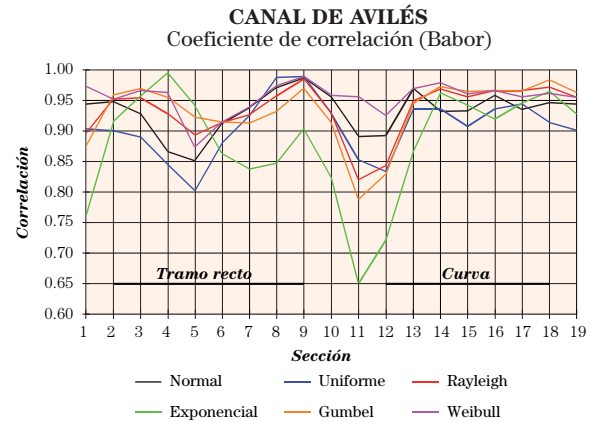


Figura 27. Coeficiente de correlación obtenido para diversas distribuciones (Babor).

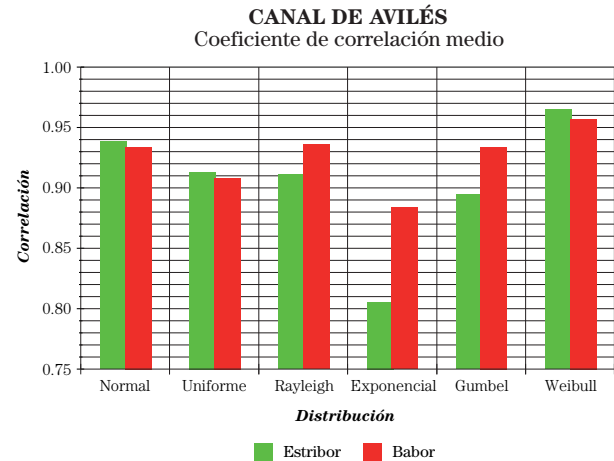


Figura 28. Coeficiente de correlación medio para diversas distribuciones (Trayectoria completa).

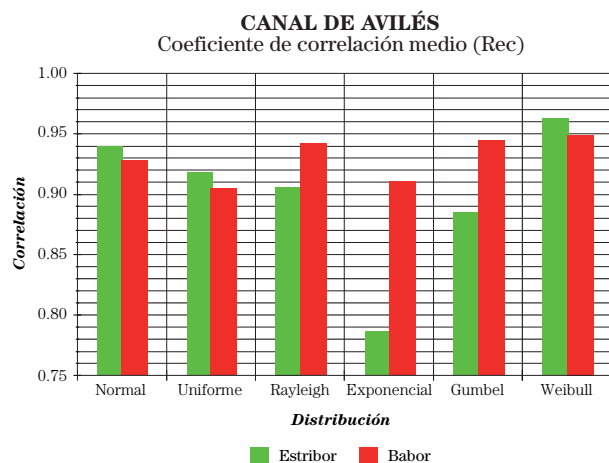


Figura 29. Coeficiente de correlación medio para diversas distribuciones (Tramo recto).

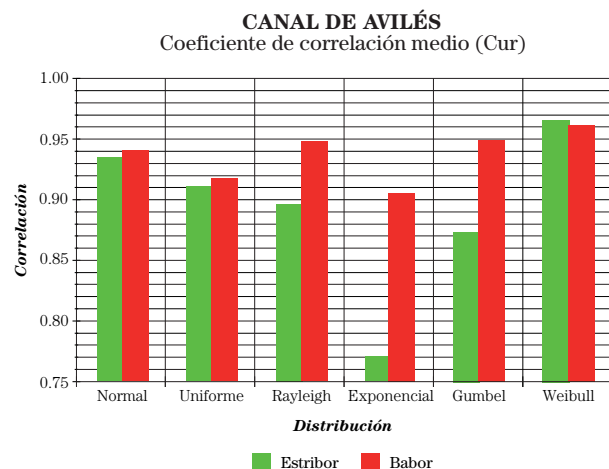


Figura 30. Coeficiente de correlación medio para diversas distribuciones (Curva).

tribor, mostrando además fuertes altibajos en las distintas secciones. Llama también la atención que la distribución uniforme, a pesar de su simple formulación, da aparentemente buenos resultados. Sin embargo, es desaconsejable, pues conceptualmente se aleja de los objetivos perseguidos en la determinación de la probabilidad de excedencia de los bordes del canal.

Se han calculado también los anchos ligados a la probabilidad de excedencia 1% y sus intervalos de confianza al 90% para las diversas distribuciones, como se hizo en el apartado 4.3. Las figuras 31 a 33 recogen estos valores.

El ancho con probabilidad de excedencia 1% resulta ser, en el tramo recto, de 92 m para la distribución Weibull frente a los 90 m de la normal. La distribución uniforme produce un valor de 74 m, que queda exageradamente del lado de la inseguridad y confirma que es claramente poco apropiada para un problema de extremos. Rayleigh y Gumbel dan lugar a valores bastante más elevados, de 104 m y 119 m, respectivamente, que no parecen adecuados. Finalmente, el uso de la distribución exponencial llevaría a considerar un ancho de canal de 134 m, muy elevado y a la vez poco fiable dada la mala calidad del ajuste.

En la zona de la curva se aprecian tendencias semejantes, resultando el ancho según Weibull (138 m) algo superior al obtenido con la distribución normal (135 m). De nuevo, los 110 m de la uniforme son inaceptables, mientras Rayleigh y Gumbel producen valores más elevados (163 m y 190 m), sin llegar a los 216 m de la exponencial.

Analizando el intervalo de confianza al 90% de los umbrales anteriores, el valor de referencia de la distribución normal es de ± 9.5 m en la recta y ± 16 m en la curva. La distribución de Weibull produce valores en torno a ± 12 m en ambos tra-

mos, como corresponde a un mejor grado de ajuste que se traduce en resultados de mayor precisión. Las demás distribuciones producen peores resultados, con $\pm 15-16$ m para Rayleigh, $\pm 14-18$ m para Gumbel, $\pm 17-19$ m para la uniforme y $\pm 18-24$ m para la exponencial.

Así pues, el ancho con probabilidad de excedencia 1% más el intervalo de confianza 90%, valor que se utilizaría normalmente para el proyecto, quedaría como referencia para la distribución normal en 99 m en el tramo recto y 151 m en la curva. Como se ha indicado, la distribución de Weibull produce valores semejantes con buena fiabilidad, 102 m y 148 m en los tramos descritos. Rayleigh y Gumbel darían lugar a anchuras de proyecto muy superiores, de 117-133 m (recta) y 178-206 m (curva). Una vez más, la distribución uniforme no es recomendable, al dar valores de 89 m y 128 m, muy escasos en comparación con los de referencia. El extremo opuesto es la distribución exponencial, que llegaría hasta 150 m y 238 m, valores excesivos producidos por la mala calidad del ajuste.

En resumen, parece apropiado utilizar distribuciones del tipo Weibull o Normal, que con los medios informáticos adecuados son fácilmente tratables. La primera de ellas permite una mejor calidad de ajuste, lo que produce resultados más fiables. Además, al no ser simétrica se aproxima mejor al problema que se quiere describir y da lugar a anchuras más ajustadas. Por el contrario, parecen rechazables tanto la distribución uniforme como la exponencial, por diferentes motivos. Es conveniente, sin embargo, analizar con detalle cada uno de los casos, pues las condiciones particulares de la maniobra (en este caso, un canal recto corto y angosto seguido de una curva fuerte de escasa anchura, con marcada influencia del viento y la corriente) impondrán restricciones a la actuación del práctico, afectando lógicamente a la muestra estadística.

CANAL DE AVILÉS
Ancho con probabilidad 1%

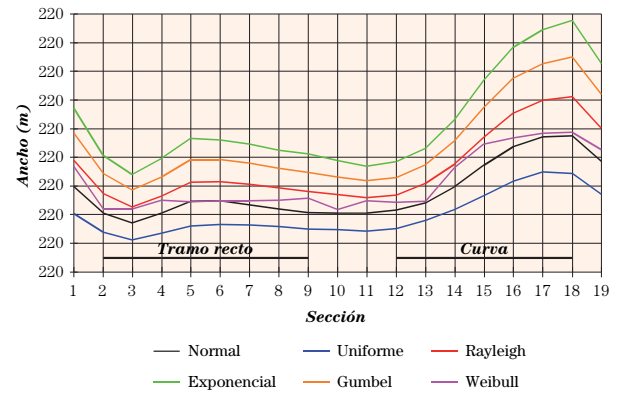


Figura 31. Anchura de canal con probabilidad de excedencia 1% para diversas distribuciones.

CANAL DE AVILÉS
Intervalo de confianza 90%

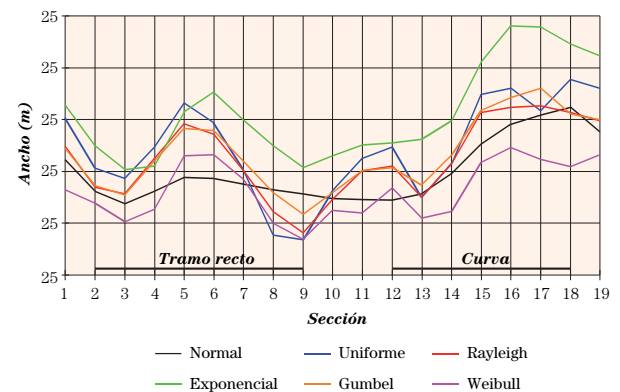


Figura 32. Intervalo de confianza al 90% de anchura 1% para diversas distribuciones.

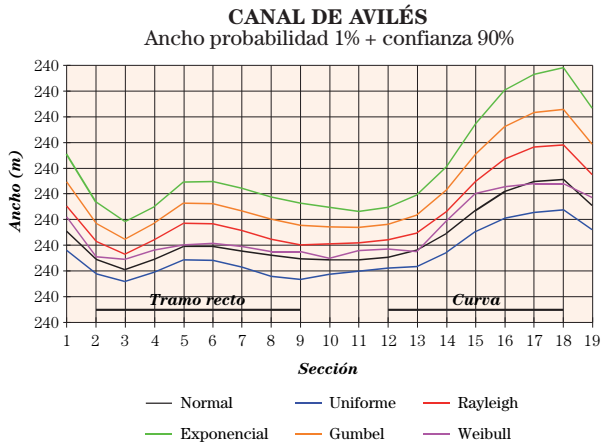


Figura 33. Anchura de canal 1% + intervalo de confianza 90% para diversas distribuciones.

5.5. Otros métodos

En cuanto a los métodos de análisis de resultados más habituales, pueden distinguirse dos grandes grupos: Por una parte, aquéllos que consideran las diferentes secciones de paso por el canal como *independientes* unas de otras, y se concentran en definir las distribuciones individuales por las bandas de estribor y babor, como los que se han presentado hasta el momento. Dentro de éstos, pueden aplicarse distribuciones estadísticas convencionales para el cálculo de extremos, como se ha visto, o manejar formulaciones más complejas (Pearson tipo III, por ejemplo) o incluso medir la desviación con respecto a una distribución gaussiana, por medio de la estimación del sesgo o la kurtosis.

Existen otros métodos con un enfoque diferente, que presuponen la *interdependencia* de secciones de paso sucesivas. Bajo esta perspectiva, se intenta construir un modelo que relacione el punto de paso por una sección (distancia al borde del canal) con el correspondiente a la sección anterior o anteriores, basándose en los resultados de las diferentes simulaciones. Esta aproximación al problema no presupone la forma de la distribución de los puntos de paso, sino que intenta deducir los parámetros de actuación del práctico y la capacidad de respuesta del buque bajo los condicionantes ambientales y los medios de maniobra disponibles. En efecto, siendo $y_{n,i}$ la distancia al borde en la sección “n” del canal obtenida en la simulación “i”, puede establecerse un modelo de regresión lineal:

$$y_n = A + B * y_{n-1} + Z_n$$

un modelo de regresión cuadrática:

$$y_n = A + B * y_{n-1} + C * y_{n-2} + Z_n$$

o incluso un modelo autorregresivo (AR):

$$y_{n,i} = A + B * y_{n-1,i} + C * y_{n,i-1} - B * C * y_{n-1,i-1} + Z_{n,i}$$

En todos los casos, los parámetros A , B , C se obtienen por medio de un ajuste por mínimos cuadrados, y Z_n es una variable aleatoria distribuida normalmente de acuerdo con el error cuadrático medio del ajuste.

Los parámetros del ajuste vendrán determinados por las acciones del práctico y la respuesta efectiva del buque en las condiciones de ejecución de la maniobra. Lo normal sería que respondieran a varios principios de actuación: Cuando el buque está centrado en el canal, las acciones de control no son muy intensas, y los puntos (y_n, y_{n-1}) presentarán una gran dispersión; Al acercarse al borde del canal en una sección, lo deseable es corregir el punto de paso en la siguiente, es decir, $y_{n-1} > y_n$, o lo que es lo mismo, $B < 1$ en el modelo de regresión lineal, con una menor dispersión de los datos; Si el buque ha llegado a las proximidades del borde del canal en una sección, debe haber corregido esta situación en la siguiente, so pena de exceder los límites de la zona navegable, lo que se traduce en $A > 0$ (modelo lineal); finalmente, las acciones de control son lógicamente más intensas cuanto más próximo está el buque al borde del canal, lo que explica la conveniencia de utilizar en algunos casos formulaciones cuadráticas con $C > 0$.

La metodología de actuación tiene tres fases: En primer lugar, se realizan las simulaciones interactivas que serán base para los cálculos posteriores; Después, se realizan los ajustes y se calculan los parámetros en cada una de las secciones, con lo que queda definida la “conducta” del sistema práctico-buque; Finalmente, se pasa a simular numéricamente, normalmente por el método de Montecarlo, un elevado número de maniobras realizadas bajo esos condicionantes, lo que permite evaluar el riesgo de cada situación y los puntos críticos.

La limitación fundamental de estos métodos es que requieren la ejecución de un mayor número de simulaciones en tiempo real. En efecto, ya que se busca definir el comportamiento en los bordes del canal, es necesario disponer de datos que efectivamente se sitúen cerca de las márgenes. La gran mayoría de las maniobras simuladas acabarán normalmente con éxito, con posiciones del buque cerca del eje, por lo que, por una parte, habrá pocos datos interesantes, pero además, un alto número de datos dispersos alterará la calidad del ajuste en los bordes.



Otra metodología avanzada se basa en utilizar cadenas de Markov para describir no sólo el punto de paso en una sección, sino también la tendencia de movimiento (hacia el eje o hacia el borde). Normalmente, se define una serie de celdas o “calles” en cada sección transversal, y se registra en cada simulación la “calle” ocupada y la relación con la “calle” correspondiente a la sección anterior (centrífuga, mantenida o centrípeta). Si se construye un modelo estadístico que describa adecuadamente estos parámetros, la probabilidad de varada corresponderá evidentemente a la probabilidad de encontrarse en una “calle” exterior del canal con tendencia centrífuga. Esta metodología requiere todavía un importante trabajo de desarrollo, pero además es muy costosa, pues supone una vez más un gran número de simulaciones.

6. Conclusiones

La AIPCN-PIANC ha publicado en los últimos años varias recomendaciones para el dimensionamiento en planta y alzado de vías de navegación. Los más actualizados son “Optimal lay-out and dimensions for the adjustment to large ships of maritime fairways in shallow seas, seastraits and maritime waterways” (1980) y “Dimensions of channels and fairways. A practical guide” elaborado por el Grupo de Trabajo 30, que está desarrollando un Informe Final más detallado.

En España, está en proceso de elaboración la ROM 3.1. (“Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Accesos y Áreas de Flotación”), sobre un borrador de ALATEC S.A. Estas recomendaciones presentan los criterios necesarios para la definición de requerimientos de calado y dimensiones en planta de las diferentes áreas de navegación, incluyendo fondeaderos, vías navegables, bocanas, zonas de maniobra y dársenas, etc.

Por otra parte, los simuladores de maniobra de buques resultan ser medios extremadamente eficaces para el desarrollo de estudios de Ingeniería de Puertos, en lo que se refiere al diseño detallado de áreas de navegación y maniobra. Para ofrecer la mayor funcionalidad, estos sistemas deben ser capaces de adaptarse a condiciones de simulación variables (configuración del puerto, condiciones meteorológicas y físicas, buques diferentes, etc.). Por tanto, un diseño modular es la mejor solución tanto a corto como a medio plazo.

Los simuladores de navegación y maniobra constituyen igualmente una potente herramienta para la formación y entrenamiento de Capitanes, Oficiales y Prácticos de Puerto.



En el caso de las vías de navegación en áreas portuarias, pueden ser un medio muy beneficioso para la familiarización con nuevas infraestructuras o condiciones de operación modificadas.

El modelo matemático de maniobrabilidad del buque constituye el núcleo del sistema. Por tanto, debe ser tan completo y preciso como sea posible y a la vez eficiente, de modo que pueda operar en tiempo real, teniendo en cuenta los tiempos de respuesta de los equipos informáticos disponibles.

Una de las grandes ventajas de la utilización de un simulador es la capacidad de reproducir las condiciones de proyecto u operación de vías de navegación y zonas de maniobra en áreas portuarias con una alta especificidad (topografía, condiciones meteorológicas, buque, etc.), lo que produce resultados de mayor precisión que los obtenidos mediante reglas empíricas o mediante la aplicación de modelos matemáticos de piloto automático.

Los sistemas de simulación están fundamentalmente basados en equipos informáticos, elementos que están experimentando un vertiginoso crecimiento, lo que permite augurar un futuro de enorme desarrollo. Es de esperar también que los modelos de comportamiento de los buques, necesariamente simplificados, mejoren en el futuro con los trabajos de investigación en marcha.

La aplicación del simulador en estudios de dimensionamiento de canales y zonas de maniobra o análisis de sus condiciones de operación debe limitarse a situaciones verdaderamente relevantes, ya que se trata de estudios costosos, tanto por los equipos utilizados y los técnicos (ingenieros, prácticos, capitanes e informáticos) involucrados, como por su plazo de ejecución, ya que las maniobras simuladas se realizan en tiempo real y con un elevado número de repeticiones.

Los métodos de dimensionamiento aproximados presentan notables limitaciones a la hora de describir el comportamiento específico de los buques en maniobra y toman en consideración la influencia de los agentes ambientales sólo de forma parcial y aproximada, despreciando algunos aspectos en el desarrollo de la maniobra que podrían determinar su viabilidad o no. Por otra parte, no prefijan un nivel de riesgo específico, lo que dificulta la interpretación de los resultados. Sin embargo, requieren relativamente poca información de partida, y dan indicaciones útiles como primera aproximación. Se ha com-



probado que las recomendaciones de la ROM 3.1 son más detalladas que las elaboradas por el Grupo 30 de PIANC, combinando resultados empíricos con cálculos aproximados en algunos aspectos.

En la aplicación del simulador, es fundamental establecer una buena metodología de trabajo, lo que conlleva, entre otros aspectos, elaborar una buena formulación del problema, construir un modelo hidrodinámico de los buques a estudiar, analizar los fenómenos relevantes y seleccionar un modelo matemático adecuado y preciso. A partir de este punto, deben seleccionarse cuidadosamente las condiciones a simular y construir los modelos sintéticos de puerto-buque-remolcadores-condiciones ambientales. Debe establecerse a priori una estrategia de actuación homogénea en el desarrollo de las simulaciones que permita obtener resultados coherentes.

De la comparación realizada tomando como referencia el canal de Avilés, se deduce que los tres métodos (PIANC, ROM y simulador) coinciden en considerar suficiente la anchura en el tramo recto, de modo bastante ajustado, y claramente escasa en la curva, para las condiciones meteorológicas consideradas. La ROM proporciona los valores más altos de manera sistemática, mientras las cifras más bajas corresponden a las recomendaciones PIANC. En la curva, donde tiene mayor incidencia la acción del viento y la corriente, las diferencias entre los tres métodos de cálculo aumentan.

El análisis de sensibilidad al número de simulaciones demuestra que es necesario realizar al menos 10 repeticiones en cada escenario de maniobra, si se busca un nivel de precisión y fiabilidad suficiente, para evitar una excesiva dispersión de resultados. Son evidentes los beneficios derivados de un mayor número de simulaciones (12-15 o más), aspecto que debe valorarse en cada caso contra el coste de ejecución del estudio. En todo caso, deben analizarse cuidadosamente los resultados, con el fin de determinar los márgenes de error en los valores obtenidos.

Es posible desarrollar un análisis probabilístico de las dimensiones del canal siguiendo las pautas establecidas en la ROM 0.2-90 (definición de la vida útil de la vía, fijación del riesgo admisible, estimación de tráfico). En este caso, el riesgo queda definido como la probabilidad de que se produzca la varada o colisión de al menos un buque a lo largo del período de utilización de la vía navegable. Como se ha indicado, la distribución de Poisson permite relacionar ese riesgo admisible con el nivel de excedencia umbral en el análisis del área ocupada durante las maniobras simuladas. De este modo, puede recogerse

la influencia de tres factores decisivos en la definición de la seguridad de las vías navegables, como son las características físicas de la zona (propiedades de fondos y márgenes), el tipo de tráfico (productos contaminantes, inflamables o peligrosos, pasajeros, etc.) y las condiciones del entorno de la vía navegable (zonas habitadas, instalaciones en áreas industriales o espacios de valor medioambiental).

Se consideran excesivas las cifras de vida útil establecidas en la ROM de acuerdo con estos criterios (entre 15 y 100 años), orientadas más al cálculo de una estructura resistente que a la operación de una instalación. Está fuera del alcance de este trabajo el establecimiento de períodos concretos para cada caso, pero parece intuitivamente admisible considerar cifras del orden de la mitad o la tercera parte (entre 5 y 30 años). En cuanto a la determinación del nivel de riesgo, son adecuadas tanto la metodología (valoración de características de la instalación, repercusiones económicas del fallo, eventuales pérdidas de vidas humanas) como las cifras establecidas (0.05 a 0.50) en la ROM 0.2-90.

La distribución más adecuada para la posición de los bordes laterales del buque, que delimitan el ancho del área ocupada, ha sido también analizada. La distribución normal, comúnmente utilizada, es una distribución simétrica, que no encaja exactamente con el concepto que se analiza, teniendo en cuenta las acciones de control del práctico, que tenderá en la medida de lo posible a mantener el centro del canal y evitar los bordes. Por otra parte, el interés se centra en evaluar la posición de los valores extremos, ligados a probabilidades de excedencia reducidas, por lo que puede ser interesante manejar otro tipo de distribuciones más adecuadas.

Tras valorar el uso de diversas distribuciones, los resultados indican, al menos en el caso que se ha tratado, que parece conveniente acudir a las del tipo Weibull o Normal. La primera de ellas permite una mejor calidad de ajuste a los datos simulados, lo que produce resultados más fiables. Además, al no ser simétrica se aproxima mejor al problema que se quiere describir y da lugar a anchuras de canal más estrictas. Tanto la distribución de Rayleigh como la de Gumbel proporcionan igualmente buenos resultados, pero hay diferencias notables entre las bandas de estribor y babor. Por el contrario, son rechazables tanto la distribución uniforme, que conceptualmente se aleja de los objetivos perseguidos y produce anchuras muy reducidas, como la exponencial, que muestra una pobre calidad de ajuste y presenta además fuertes altibajos en las distintas secciones con resultados sobredimensionados. De todos modos, es conveniente analizar con detalle cada caso, pues las condiciones particulares de la maniobra (en este caso, un canal recto corto y an-



gosto seguido de una curva fuerte de escasa anchura, con marcada influencia del viento y la corriente) impondrán restricciones a la actuación del práctico, afectando lógicamente a la muestra estadística.

Los métodos avanzados de análisis, basados en la interdependencia de resultados en las distintas secciones, ya sea por análisis de regresión o por cadenas de Markov, son muy prometedores. Sin embargo, esta metodología requiere todavía un importante trabajo de desarrollo, y es además muy costosa, pues presupone la realización de un gran número de simulaciones, del orden de varias decenas por condición.

Como conclusión final, puede afirmarse que la mayor ventaja de utilizar un simulador para la ejecución de un proyecto de Ingeniería Portuaria es la interactividad entre el hombre, el buque y el ambiente, que permite reproducir el complicado entorno de trabajo en el que se desarrollan las maniobras. Por otra parte, la cooperación entre ingenieros portuarios, capitanes y prácticos constituye el mayor beneficio, con vistas a obtener proyectos de mayor calidad, economía y eficacia.

7. Agradecimientos

- Al CEDEX, por darme la oportunidad de trabajar en este apasionante campo disponiendo de los medios y herramientas más avanzadas.
- A mis compañeros de trabajo en el simulador, José María Montero, Gonzalo Montero y Julio Fernández Brun, sin cuya colaboración los estudios no serían posibles.
- A Puertos del Estado y a múltiples Autoridades Portuarias (especialmente Almería-Motril, Avilés, Gijón, Cartagena, Barcelona, Santa Cruz de Tenerife, Pasajes, Bilbao, Ferrol) por su cooperación a lo largo de numerosos estudios de maniobra de buques en los últimos años, así como por la oportunidad de participar en la elaboración de la ROM 3.1 (“Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Accesos y Áreas de Flotación”).
- A los miembros del Working Group 20 del PIANC (“Capability of ship manoeuvring simulator models for approach channels and fairways in harbours”), por lo mucho que aprendí con ellos durante las reuniones del grupo.
- A Ton Burgers, Jos van Dorn, Ben Pieffers, Freek Verkerk y otros ingenieros de Delft Hydraulics (Holanda), con los que he tenido la oportunidad de conocer en profundidad el uso de los simuladores de maniobra de buques para su aplicación en la ingeniería de puertos.



- A numerosos Prácticos (Gijón, Avilés, Cartagena, Santa Cruz de Tenerife, Bilbao, Pasajes, entre otros), por su cooperación y su transmisión de conocimientos y experiencias sobre un entorno de trabajo tan especial.
- A los Capitanes de la Dirección General de Marina Mercante y de SASEMAR colaboradores del CEDEX en el simulador (Francisco Sánchez Fariñas, Gerardo Barrio, Isidro García Carrasco, Carlos Cal) de los que tanto hemos aprendido en los últimos años.
- A María Jesús Martín Soldevilla, Jefe de Sector de Estudios Portuarios del Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, y a Paloma Aberturas, Licenciada en Ciencias Exactas de la Fundación Agustín de Bethencourt y colaboradora del CEDEX, por su ayuda en la aclaración de conceptos estadísticos y en la aplicación de la metodología de los análisis.

8. Referencias

- “International Oil Tankers Commission. Big Tankers and their Reception” Final Report of Working Group PIANC. Suplemento al Boletín PIANC 16. 1973.
- “International Commission for the Reception of Large Ships. Optimal lay-out and dimensions for the adjustment to large ships of maritime fairways in shallow seas, seastraits and maritime waterways” Final Report of Working Group 4 PIANC. Suplemento al Boletín PIANC 35. 1980.
- “Approach Channels. Preliminary Guidelines” First Report of Working Group PTC II-30 PIANC. Suplemento al Boletín PIANC 87. Abril 1995.
- “Approach Channels. A Guide for Design” Final Report of Working Group PTC II-30 PIANC (en fase de desarrollo).
- ROM 0.2-90. “Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias” MOPU. Centro de Publicaciones. Abril 1990.
- ROM 3.1. “Recomendaciones para el Proyecto y Construcción de Accesos y Áreas de Flotación” Puertos del Estado. Borrador de ALATEC S.A. en fase de desarrollo.
- “Principles of Naval Architecture” Ed. Comstock. SNAME, 1967.
- Abkowitz, M. “Lectures on Ships Hydrodynamics. Steering and Manoeuvrability” Hydrog Aerodynamiks Laboratorium, 1964.
- “Capability of ship manoeuvring simulation models for approach channels and fairways in harbours” Final Report of Working Group PTC II-20 PIANC. Suplemento al Boletín PIANC 77. 1992.
- “Navigation simulator for CEPYC” Oferta. Delft Hydraulics. Marzo 1989.

- W. A. de Vries. "Nautical risk analysis in port and fairway design" Delft Hydraulics. Diciembre 1990.
- "Nautical training program" Delft Hydraulics & Nautical College Rotterdam. Guide to the Course. Enero 1987.
- H. van de Beek. "Considerations on the analysis of data generated by simulation models" MARIN, Wageningen. 1990.
- H. van de Beek. "Validation of a ship manoeuvring simulator. A methodological view" MARIN, Wageningen. 1990.
- José R. Iribarren, José M. Montero "Ampliación del Muelle de Raíces (Puerto de Avilés). Simulación de la maniobra de acceso" Informe CEDEX 21-493-9-120. Madrid, Diciembre 1995.
- A. Burgers. "A Mathematical Model for the Calculation of the Harbour Entrance Manoeuvre" 7th International Harbour Congress. Amberes, Mayo 1978.
- A. Burgers, K. Peerlkamp. "On the Determination of the Width of Harbour Approach Channels. An Attempt at Rational Design" 8th International Harbour Congress. Amberes, Junio 1983.
- A. Burgers, G.J.A.Loman. "Statistical Treatment of Ship Manoeuvring Results for Fairway Design" Boletín PIANC 45. 1985.
- A. Burgers, M. Kok. "The Statistical Analysis of Ship Manoeuvring Simulator Results for Fairway Design based on the Interdependency of Fairway Cross-sections Transit" 9th International Harbour Congress. Amberes, Junio 1988. Delft Hydraulics Publication 422. Octubre 1989.
- W.A. de Vries. "Nautical Risk Analysis in Port and Fairway Design" Delft Hydraulics Publication 443. Diciembre 1990.
- D. Webb. "Navigation Channel Design using Real-time Marine Simulation" Dredging'94. ASCE, Noviembre 1994.

