

Paper CA1111_Ayuso_C - MODELO DE RIESGOS DE NAVEGACIÓN MEDIANTE MODELOS DE MANIOBRA DE AUTOPILOTO EN COMBINACIÓN CON ANÁLISIS DE DATOS AIS Y SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL

Ayuso, Carmen; Atienza, Raúl; Redondo, Raúl
SIPORT21

Email: carmen.ayuso@siport21.com

ABSTRACT: Durante los últimos años, Siport21 ha investigado la construcción de modelos de riesgos de navegación que permitan estimar, a coste reducido, el riesgo de varada de buques, bajo las distintas condiciones locales y para todo tipo de buque. El presente trabajo muestra la metodología desarrollada para crear estos modelos, que presentará ejemplos prácticos de aplicación que demuestren y faciliten la comprensión de la metodología, la información de partida necesaria y la utilidad para el diseño y operación de vías navegables, en la línea más avanzada que establecen tanto la metodología PIANC como ROM (España). Este trabajo se enmarca en el tema 8, "Sistemas de información fluvial aplicada a la seguridad de la navegación".

El modelo de riesgos desarrollado se basa en la utilización de modelos de maniobra de autopiloto "fast-time", tales como SHIPMA, ya que estos permiten ejecutar en tiempo reducido y coste aceptable miles de escenarios de maniobra, necesarios para generar modelos de riesgo global, en los que se consideran todos los tipos de buque que constituyen el tráfico local, sometidos a una amplísima gama de combinaciones climáticas en la zona de navegación. Sin embargo, los modelos de autopiloto prescinden del factor humano, que es sustituido por un algoritmo de control "fijo" y por ello carecen de "aleatoriedad" en la ejecución de cada maniobra individual lo que, a priori, no permitiría la realización de un análisis probabilista.

Para solventar este inconveniente y tener en cuenta el factor humano "local", es necesario analizar las recomendaciones nacionales e internacionales de diseño de canales (ROM y PIANC), analizar resultados de maniobras reales, basadas en registros de datos AIS, y resultados de estudios de maniobras en simulador en tiempo real, lo que permite ajustar y calibrar los parámetros del modelo de autopiloto, estableciendo valores adecuados y asumiendo unas distribuciones estadísticas que permiten obtener un nivel de aleatoriedad ajustado a la operativa real y local (Modelos de Nivel III de la ROM). De esta forma, se consigue:

- Apoyándose en las recomendaciones ROM y PIANC, así como en los registros AIS de maniobras reales locales, calibrar los coeficientes de autopiloto ajustando distribuciones estadísticas para cada tipo de buque a lo largo de la vía navegable.
- En base a los resultados de estudios de simulación en tiempo real disponibles en las zonas más críticas de la navegación, calibrar el modelo de riesgos elaborado.

Los resultados del modelo de riesgos resultan, por tanto, de la combinación de recomendaciones nacionales e internacionales (ROM y PIANC), modelos de maniobra de autopiloto "fast-time", registros de maniobras reales (datos AIS), y resultados de simulador en tiempo real, parámetros clave de validación y verificación.

Estos modelos de riesgo pueden emplearse como soporte al diseño de canales, relacionando alternativas de trazado-anchura-profundidad con un nivel de seguridad global de cara al análisis coste-beneficio. También pueden utilizarse en combinación con sistemas de gestión del tráfico, permitiendo así conocer en todo momento y en función de las condiciones particulares de cada maniobra (viento, corrientes, mareas, oleaje, etc.) el riesgo de varada por salirse de la vía de navegación, para así adaptar o ajustar la planificación de operaciones en base a criterios objetivos de riesgo asumible.

1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se centra en presentar de forma genérica la metodología desarrollada por Siport21 para construir modelos de riesgos de navegación que permitan estimar, a coste reducido, el riesgo de varada de buques por exceder los límites de la vía de navegación bajo las distintas condiciones locales y para todo tipo de tráfico.

El modelo de riesgos calcula, automáticamente, la probabilidad de exceder los límites de varada (en planta). Como resultado de acceder a la aplicación o módulo con unos determinados datos de entrada (buque, velocidad, condiciones externas, etc.), y teniendo en cuenta la disposición en planta y la batimetría real del área de navegación, el modelo devolverá la probabilidad de varada individual.

Mediante el cálculo de los riesgos individuales para los distintos tráficos, y en función del número de buques de cada tipo, se puede determinar la probabilidad de varada global.

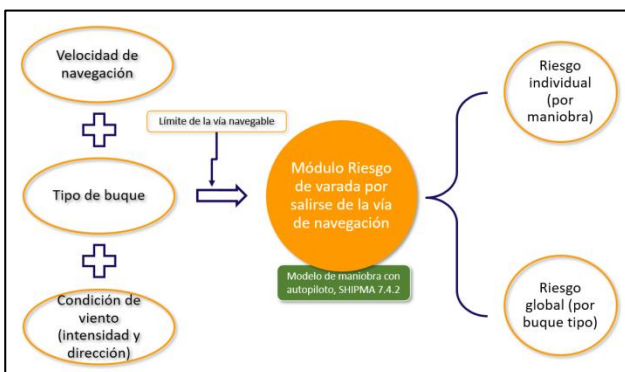


Figura 1: Diagrama del módulo de riesgos de varada por exceder los límites de la vía navegable.

Estos modelos de riesgo pueden:

- Emplearse como soporte al diseño de vías y canales de navegación, relacionando alternativas de trazado, anchura y profundidad con un nivel de seguridad global de cara al análisis coste-beneficio.
- Utilizarse en combinación con sistemas de gestión del tráfico, permitiendo así conocer en todo momento y, en función de las condiciones particulares de cada maniobra (viento, corrientes, mareas, oleaje, etc.) el riesgo de varada individual por salirse de la vía de navegación, para así adaptar o ajustar la planificación de operaciones en base a criterios objetivos de riesgo asumible.

2 METODOLOGÍA

Para determinar el riesgo de varada de los buques por exceder los límites de la vía navegable durante su maniobra, se han de seguir las siguientes etapas de estudio:

- **Análisis detallado de operaciones actuales.** Para poder diseñar un modelo fiable y realista, se ha de contar con un entendimiento completo y detallado del desarrollo de la navegación en el área de estudio (estrategia de maniobra, espacios de navegación disponibles, etc.).
- **Construcción del modelo de riesgos.** Empleando el modelo de maniobras "fast-time" con autopiloto (SHIPMA), se incluirán desviaciones y dispersiones a lo largo de toda la navegación para dotar de variabilidad el modelo determinista, de tal forma que requiere el análisis de las condiciones y requerimientos de espacio de acuerdo con las recomendaciones ROM o PIANC.
- **Validación y verificación de los resultados.** Tras la construcción del modelo de riesgos, éste ha de ser comparado, validado y verificado por medio de registros de maniobras reales (datos AIS) así como simulaciones en tiempo real.

2.1 Análisis detallado de operaciones actuales

El análisis en detalle de las operaciones actuales permite conocer en profundidad las estrategias operativas con las que se afrontan.

Como fuentes de información principales para poder evaluar y analizar la operativa real local, se destacan las siguientes:

- Datos AIS.
- Entrevistas a Prácticos Locales.
- Entrevistas con entidades portuarias (Capitanía Marítima, Autoridad Portuaria, etc.).
- Estudios previos de simulador en tiempo real con la participación de expertos en el área de estudio.
- Estudios técnicos de las condiciones físicas.

Esta fase de análisis resulta crítica para la construcción del modelo de riesgos, pues sentará las bases de su desarrollo. Cuanto mayor sea el nivel de detalle de la información disponible, de mayor realismo se podrá dotar al modelo de riesgos de varada.

2.2 Construcción del modelo de riesgos

Para obtener el riesgo de exceder los límites de la vía navegable, el módulo consulta una base de datos creada a partir de un número extenso de maniobras realizadas por medio del modelo numérico de maniobra de buques con autopiloto "fast-time", SHIPMA. Este modelo reproduce el comportamiento de un buque específico durante la ejecución de las maniobras de acceso o salida de puerto, sometido a la acción de los agentes ambientales (viento, corriente, oleaje, profundidad limitada, etc.). Para ello, dispone de un piloto automático que desarrolla las acciones necesarias para mantener una trayectoria objetivo predefinida. Las maniobras que conforman esta base de datos han de cumplir los siguientes requisitos:

- Ser ejecutadas de forma realista, es decir, manteniendo prácticas y criterios náuticos locales, como se realizan habitualmente por Capitanes y Prácticos.
- Cubrir un conjunto de **escenarios de simulación reales** para alimentar la base de datos, garantizando un adecuado nivel de precisión en los resultados. (velocidades, estrategias, condiciones climáticas, etc.)
- Realizar una **calibración del modelo** que garantice el mínimo error de este.
- Contar con la **aleatoriedad y dispersión**, necesaria para incluir en los resultados aquellos factores que el modelo numérico de maniobra de buques con autopiloto (SHIPMA) no tiene en cuenta (errores de posicionamiento, de tiempo de respuesta, de sistemas de balizamiento, etc.) y así transformar el uso de un programa determinista al marco probabilista. Esta aleatoriedad se basa en distribuciones estadísticas que permiten mantener el sentido físico y náutico de las maniobras.

Para poder cumplir con estos requisitos, resulta necesario llevar a cabo análisis detallado previo del desarrollo de las operaciones en el área de estudio.

2.2.1 Calibración de los parámetros de entrada

La calibración de las maniobras tiene como objetivo asegurar que las maniobras realizadas para el modelo de riesgos sean ejecutadas de forma realista, manteniendo las mismas prácticas habituales que se realizan localmente por Capitanes y Prácticos, y reproduciendo las mismas condiciones externas, minimizando así el error en el modelo.

Para ello, una vez analizadas las condiciones locales se ajustan y calibran los siguientes parámetros:

- Condiciones de simulación.
- Eje de navegación.
- Estrategia de maniobra.
- Autopilotos.

2.2.1.1 Condiciones de simulación

El primer paso para calibrar los parámetros de entrada es definir y acotar el área de estudio, incluyendo información relativa a la disposición en planta y batimetría, así como a las ayudas a la navegación.

La correcta definición de la profundidad en la zona de estudio resulta crítica, pues el modelo de riesgos por exceder los límites de la vía tomará en consideración la profundidad límite de varada para cada buque tipo, por lo que los resultados dependen, en gran medida, de la información batimétrica disponible.

2.2.1.2 Eje de navegación

Uno de los factores clave en el uso de SHIPMA es la definición de la trayectoria de referencia (representativa del eje de navegación), dado que afecta a las acciones a tomar por el autopiloto.

Es importante destacar que el hecho de emplear una determinada trayectoria de referencia no garantiza la navegación centrada sobre la misma, sino que el buque empleará los recursos disponibles para tratar de lograrlo. Existen factores que pueden oponerse a ello. A modo de ejemplo, en la figura inferior se observan comparativamente dos maniobras que emplean distintos ejes de navegación, pero bajo las mismas condiciones externas.

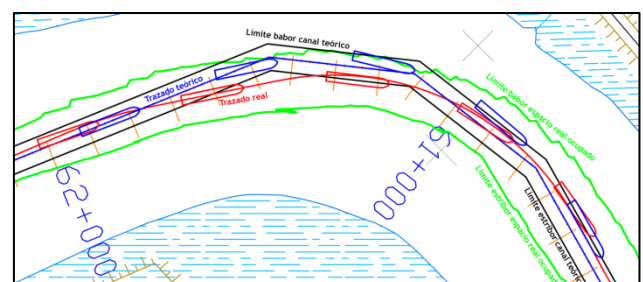


Figura 2: Diferencias entre distintos ejes de navegación.

Se puede observar cómo, para el tramo curvo más severo, el buque se separa en mayor medida de su trayectoria deseada que para el trazado más suavizado.

2.2.1.3 Estrategia de maniobra

Tras contar con unas condiciones de simulación calibradas, y un eje de navegación definido tal como se encuentra en la zona de estudio, el siguiente paso es reproducir una estrategia de maniobra de forma similar a la realidad.

Los parámetros que comprenden la estrategia de maniobra son los siguientes:

- Velocidad del buque. Puede ser variable a lo largo de la navegación. A pesar de que este valor siga unas recomendaciones o limitaciones establecidas por normativa, es relativamente común que exista una cierta variabilidad en la velocidad que siguen los buques a lo largo de su navegación. Se trata, por tanto, de obtener un valor de velocidad de referencia.
- Uso de máquina (para alcanzar las velocidades analizadas) y timón (para gobernar y mantenerse próximo al eje de navegación).
- Uso de medios auxiliares de maniobra, tanto propios del buque (hélices de maniobra) como externos (remolcadores) a lo largo de la navegación.
- Zonas de parada. Identificación de las zonas de parada o de reducción de velocidad, así como uso de medios para ejecutar esta fase (parada inercial, con máquina atrás, o con ayuda de remolcadores).

2.2.1.4 Autopilotos

El último elemento por calibrar son los propios autopilotos empleados durante las simulaciones, que dictan con qué intensidad y anticipación se hace uso de los medios de maniobra disponibles para tratar de corregir desviaciones con respecto al eje de navegación.

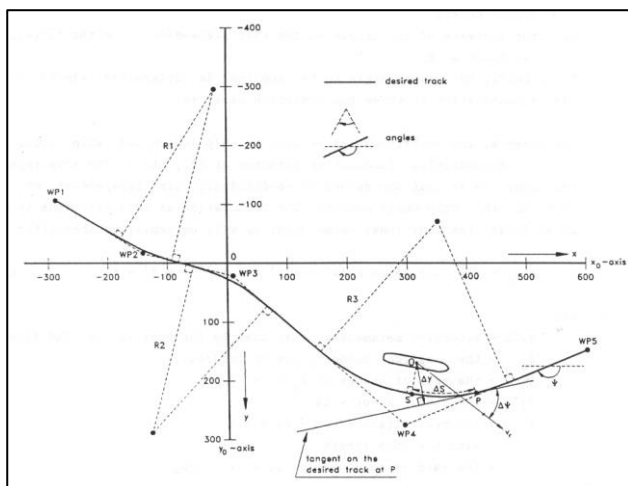


Figura 3: Funcionamiento de SHIPMA.

En base a la definición de los autopilotos se calculan las fuerzas necesarias para mantener al buque centrado en el eje de navegación, al tiempo que los agentes externos son compensados. Además, también determinan la intensidad de uso de los medios de maniobra y gobierno disponibles. Para definir los autopilotos el modelo dispone de dos conjuntos de coeficientes:

- Distancia de anticipación. Indica a qué distancia observa el Capitán o Práctico a cargo de la maniobra para evaluar la desviación del buque con respecto al eje de navegación y tomar acciones. Representa, por tanto, la habilidad del Capitán o Práctico.
- Coeficientes de autopiloto. Indican la sensibilidad ante las distintas desviaciones con respecto a la trayectoria deseada: desviación lateral o desviación de rumbo. Representa, por tanto, la habilidad del timonel.

En función de los autopilotos seleccionadas, se puede forzar a seguir la trayectoria o a mantener el rumbo de manera más forzada, o, a un compromiso entre ambos como es práctica habitual para navegar en canales restringidos bajo condiciones exigentes. La siguiente imagen muestra casos de autopilotos opuestos, de seguimiento de trayectoria y de seguimiento de rumbo.

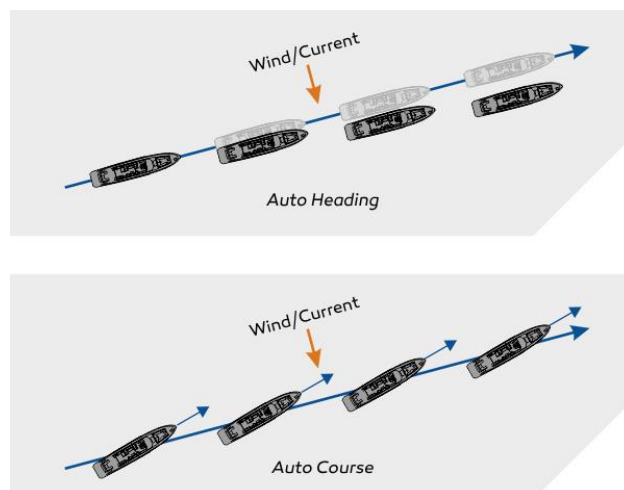


Figura 4: Comparativa entre autopiloto de rumbo (arriba) y autopiloto de trayectoria (abajo)

Para calibrar los autopilotos del modelo, se seleccionan una o varias maniobras reales (a ser posible, realizadas por los Prácticos locales), bien a partir de datos AIS, o bien realizadas en simulador en tiempo real.

Las maniobras de referencia seleccionadas han de ser lo suficientemente representativas de las condiciones de simulación del área de estudio. Una vez reproducidos o calibrados tanto las condiciones de simulación, como el eje de navegación y la

estrategia de maniobra, se varían los autopilotos de manera que, mediante un proceso iterativo, se minimiza el error entre las maniobras de referencia y los resultados de las simulaciones.

De esta forma, se pueden obtener unos autopilotos calibrados de referencia, promediando los valores resultantes, así como la dispersión de los mismos, representativa del factor humano en la navegación.

2.2.2 Escenarios a analizar. Espacio ocupado como consecuencia de un determinado ángulo de deriva

El espacio ocupado como consecuencia de la navegación con un determinado ángulo de deriva es resultado directo de la ejecución de una maniobra en el modelo SHIPMA bajo la acción de los distintos agentes externos, y es considerado en el diseño determinista como “sobrecancho de la senda del buque”.

Para poder cubrir este sobrecancho, es preciso definir una matriz de simulación que cubra una serie de escenarios de maniobra representativos de la realidad del área de estudio. Se han de tomar en consideración los siguientes elementos:

- Dimensiones y características de maniobra del buque. Tras analizar el tráfico actual en la zona de estudio, se han de seleccionar para el análisis aquellos buques que, por sus características o dimensiones, resulten críticos en la zona de estudio.
- Posteriormente, es posible aplicar la frecuencia de acceso de cada buque tipo definido para obtener el riesgo de varada global en el área navegable.
- Velocidad del buque (estrategia de maniobra). En caso de haberse detectado variabilidad en la velocidad con que acceden los buques, también será preciso evaluar distintos escenarios de velocidad, pues es un agente ciertamente influyente sobre los resultados.
- Nivel de agua. En caso de que la marea sea significativa, será preciso también tomar en consideración distintos escenarios de nivel de agua, pues es un elemento que afecta sobre la maniobra del buque.
- Condiciones hidro-meteorológicas (viento, corriente e intensidad). Del mismo modo, será necesario seleccionar una serie de escenarios de viento (dirección e intensidad), corriente (dirección e intensidad) y oleaje (dirección, altura significativa y periodo de pico). Para ello, será preciso discretizar estos agentes en distintas direcciones y magnitudes.

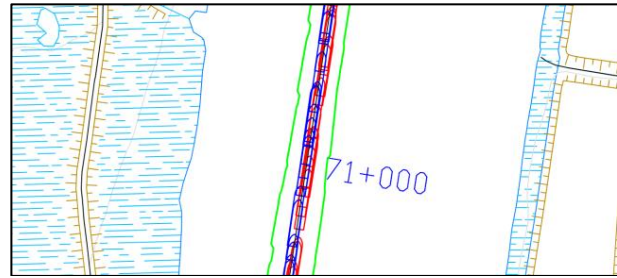


Figura 5: Efecto de la dirección del viento sobre la maniobra

La ejecución de maniobras cubriendo la matriz de simulación establecida alimentará la base de datos del módulo de riesgos.

La combinación de los distintos escenarios considerados (n buques \times m velocidades \times i condiciones hidro-meteorológicas \times j niveles de agua) puede dar lugar fácilmente a miles o incluso decenas o centenas de miles de maniobras a ejecutar. Por este motivo la definición de la matriz de simulación óptima supone una fase del estudio crítica y ha de ser cuidadosamente evaluada con el fin de optimizar la relación precisión – coste temporal.

2.2.3 Aleatoriedad y dispersión de las variables

Dado que el SHIPMA es un modelo determinista en tiempo acelerado, y que, por tanto, no cuenta con factor humano, no incluye elementos tales como errores de posicionamiento, de tiempo de respuesta o de los sistemas de señalización y balizamiento. Por ello, es preciso dotar al sistema de una cierta aleatoriedad que cubra estos errores con precisión.

2.2.3.1 Espacio ocupado como consecuencia de errores de posicionamiento

Este espacio es considerado en el diseño determinista como “sobrecancho por errores de posicionamiento” y representa la diferencia entre la verdadera posición del buque y la posición estimada por el Capitán o Práctico a cargo de la maniobra, utilizando los medios de información y ayuda a la navegación disponibles.

Este espacio no es resultado directo de la ejecución de una maniobra. En su lugar, se ha de incluir como variable aleatoria en la definición de la propia trayectoria de referencia, pues se trata de un error de interpretación de la información y ayudas a la navegación, cuya función es determinar el eje de la vía. De este modo, como resultado de la repetición de una misma maniobra considerando esta variabilidad, se obtendría el espacio ocupado por el buque como consecuencia de los errores de posicionamiento.

En caso de disponer de distintas fuentes de información (PPU, radar, pares de boyas,

referencias fijas en tierra, etc.) que, en conjunto, permitan minimizar este error, la dispersión de la trayectoria de referencia para introducir este sobreancho podría omitirse.

2.2.3.2 Espacio ocupado como consecuencia del tiempo de respuesta

El espacio ocupado resultante del tiempo de respuesta es considerado en el diseño determinista como “sobreancho para respuesta” desde el instante en que se detecta la desviación del buque en relación con su posición teórica (trayectoria de referencia o eje de la vía navegable) y el momento en que la corrección es efectiva. De nuevo, el modelo SHIPMA no permite incluir este sobreancho de manera inmediata, por lo que se ha de introducir en forma de aleatoriedad sobre los propios coeficientes de autopiloto, representativos de la antelación e intensidad con que se emplean los distintos recursos de gobierno del buque para mantener su navegación sobre la trayectoria de referencia.

En caso de disponer de información lo suficientemente detallada, se puede emplear la dispersión en los autopilotos obtenida durante el proceso de su calibración, lo que aportaría un grado muy detallado de realismo a los resultados. En la siguiente figura, se puede observar, a modo de ejemplo, la variación en los resultados derivada de usar los autopilotos promedio, mínimo y máximo (para una determinada probabilidad de excedencia). En el caso de ejemplo, la dispersión produciría un sobreancho debido a tiempos de respuesta de unos 25 m a cada banda.

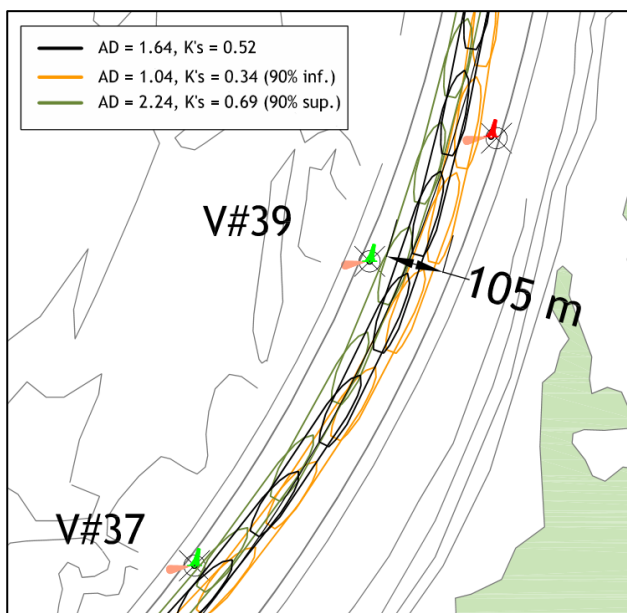


Figura 6: Sobreancho de aplicar dispersión en los autopilotos resultante de la calibración de estos.

En caso de no disponer de información suficiente, se puede recurrir a las recomendaciones nacionales e internacionales de diseño portuario. En ellas, se recomienda emplear los siguientes valores, para un buque Panamax.

De acuerdo con las recomendaciones internacionales, este espacio toma los siguientes valores en función del tipo de tramo de que se trata:

- Tramo recto.
 - o Maniobrabilidad buena: 0.00-0.11 veces la manga a cada banda.
 - o Maniobrabilidad media: 0.11-0.23 veces la manga a cada banda.
- Tramo curvo.
 - o Maniobrabilidad buena: 0.23-0.45 veces la manga a cada banda.
 - o Maniobrabilidad media: 0.45-0.91 veces la manga a cada banda.

No obstante, estas recomendaciones no distinguen entre tipos de tramos curvos en función de su intensidad o severidad. Asignar cierto grado de variabilidad a los coeficientes de autopiloto del modelo permite dotar a los resultados de sensibilidad a la severidad del tramo o complejidad.

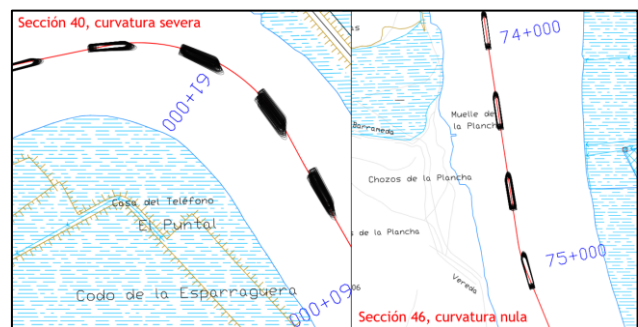


Figura 7: Sensibilidad de la dispersión en los autopilotos a la severidad del tramo.

2.2.3.3 Espacio ocupado como consecuencia de errores en los sistemas de señalización y balizamiento

Este espacio es considerado en el diseño determinista como “sobreancho para cubrir el error que pudiera derivarse de los propios sistemas de balizamiento”. Así, por ejemplo, en caso de que el posicionamiento visual estuviese referido a la navegación entre alineaciones de boyas, este error se asemejaría al borneo que puedan presentar los pares de boyas con respecto a su posición teórica, en función de las condiciones climáticas que actúen sobre ellas.

Los errores derivados de los propios sistemas de balizamiento afectan directamente sobre la trayectoria de referencia a definir en el modelo de maniobra. El error numérico de los sistemas de balizamiento es directamente trasladable a la variabilidad en la trayectoria de referencia (eje de

navegación) en aquellos nodos correspondientes a la posición del sistema de balizamiento en cuestión. En caso de existir distintas fuentes de información (PPU, radar, pares de boyas, referencias fijas en tierra, etc.) que, en conjunto, permitan minimizar este error, la dispersión en la trayectoria de referencia para introducir este sobreancho podría omitirse.

2.2.4 Ejecución y análisis de resultados

Cada escenario a analizar se ha de ejecutar un número suficiente de veces con el fin de someter las maniobras a análisis estadístico. Dichas maniobras se diferencian entre sí gracias a la aleatoriedad y dispersión con que se ha dotado al modelo, representativos de errores de posicionamiento, tiempo de respuesta o señalización.

Como resultado del análisis estadístico, se obtienen el valor medio y la desviación estándar de las posiciones de los costados de babor y estribor para las maniobras realizadas (cada escenario de simulación). Con ello, se define una distribución normal que explica estadísticamente el área ocupada por el buque.

Esta metodología viene descrita tanto en normativas nacionales como internacionales (como PIANC) y es de aplicación directa para el modelo de riesgos.

La probabilidad de exceder los límites de la vía navegable puede calcularse entrando con los límites laterales de la zona navegable en las distribuciones normales a lo largo de toda la navegación.

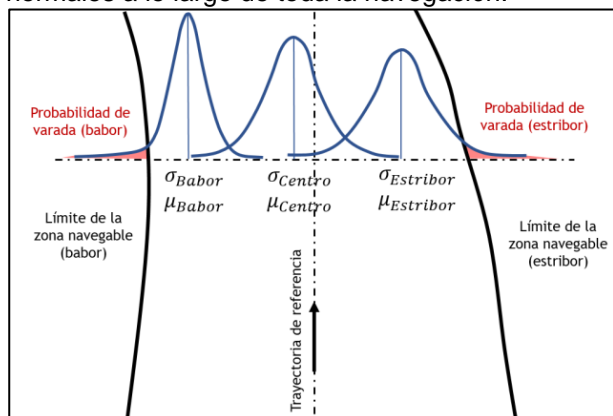


Figura 8: Distribución normal de la posición del centro y extremos del buque.

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. Por tanto, es determinante para los resultados identificar cuál es el límite de varada a considerar en el cálculo de la probabilidad de varada.

La siguiente imagen muestra un ejemplo de los resultados de área de navegación requerida, tras aplicar el análisis estadístico, expresados como espacio necesario a las bandas de estribor y babor, para dos escenarios de velocidad del buque (líneas magentas y amarillas). Se muestran, también, los límites de batimetría real a la cota de varada (líneas negras) y el espacio ocupado por las maniobras reales (extraídas de datos AIS, líneas verdes), a ambas bandas.

En ella, se puede apreciar cómo el espacio ocupado por las maniobras reales de los datos AIS (verde), ocupan un ancho muy superior al modelo de riesgos (magenta y amarillo), lo que indica que la navegación es optimizable.

Del mismo modo, se aprecia cómo la navegación real (verde) sigue el perfil de la batimetría (negro), indicando cómo la navegación por parte de los Prácticos sigue el canal natural del río, siguiendo su perfil, en vez de mantener una navegación "centrada en el canal de navegación teórico.

Estos resultados muestran que:

- Para realizar un modelo de riesgos en base a maniobras reales de Prácticos, se deben considerar y calibrar maniobras en base a resultados de datos AIS.
- El modelo de riesgos permite evaluar el margen de optimización disponible en cada caso determinado, así como las medidas a tomar necesarias para alcanzar una optimización deseada (cambio en la estrategia de maniobra, obras de dragado, buque máximo accesible, límites hidrometeorológicos, etc.).

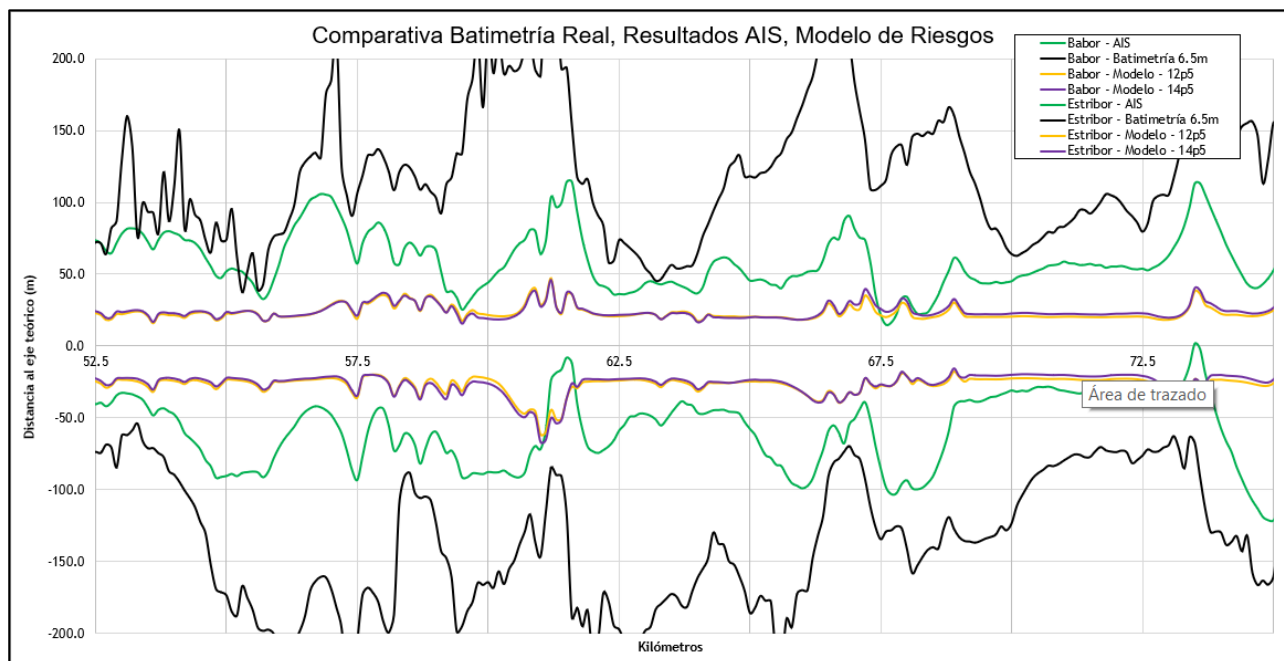


Figura 9: Distribución normal de la posición del centro y extremos del buque.

A los resultados obtenidos puede ser necesario, además, agregar unos márgenes adicionales con el fin de permitir la navegación del buque sin que resulte afectada por los efectos de succión y rechazo de márgenes.

Tras aplicar el análisis estadístico a las maniobras realizadas, se puede obtener riesgo de varada por exceder los límites de la vía navegable.

2.2.4.1 Riesgo individual

Se trata del riesgo de varada por exceder los límites de la vía para una maniobra de entrada de un buque determinado, bajo unas condiciones hidrometeorológicas específicas y con una velocidad en cada sección.

Bajo estas condiciones, el módulo de riesgos por exceder los límites de la vía navegable consultará la base de datos creada a partir de un extenso número de maniobra realizadas con el modelo con autopiloto SHIPMA, las cuales permiten evaluar el espacio ocupado en detalle. Como resultado, el módulo devolverá una señal tipo semáforo que indicará si una maniobra resulta o no viable. La determinación de la viabilidad, o no, de la maniobra, dependerá, tanto de la probabilidad de varada

determinada por el modelo de riesgos, como por la probabilidad de varada admisible, considerada como umbral, y frente a la que contrastar los resultados. Existe información adicional más detallada que puede ser obtenida para cada maniobra individual:

- La máxima probabilidad de exceder los límites de la vía navegable en cada sección, de forma que el usuario será capaz de modificar el parámetro velocidad, por secciones, en caso de que el riesgo sea resulte inaceptable.
- Tiempo de espera necesario de forma que, para las condiciones de entrada (buque tipo y velocidad de navegación), la maniobra resulte viable.

Este tipo de resultados facilitan la toma de decisiones en tiempo real, manteniendo en todo momento unos criterios de navegación segura. La siguiente imagen muestra un ejemplo de la probabilidad de varada por sección y condición climática obtenida del modelo de riesgos para una velocidad determinada.

Sec	Calma	10N	10E	10S	10W	15N	15NE	15E	15SE	15S	15SW	15W	15NW	20N	20NE	20E	20S	20SW	20W	20NW	25S	25SW	25W
1	1.1%	0.7%	0.1%	0.9%	0.9%	3.3%	1.9%	0.1%	0.1%	3.0%	1.3%	1.3%	0.1%	0.1%	0.9%	1.6%	8.5%	1.0%	1.3%	0.0%	13.0%	0.5%	3.5%
2	2.5%	1.8%	0.7%	2.0%	2.5%	4.4%	2.9%	0.4%	0.4%	4.0%	2.7%	2.6%	0.5%	0.6%	2.6%	3.3%	8.6%	1.8%	3.4%	0.5%	11.5%	1.4%	5.9%
3	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
4	0.5%	0.5%	0.3%	0.7%	0.3%	0.1%	0.8%	1.0%	1.8%	0.1%	1.0%	0.3%	1.2%	0.6%	0.6%	0.2%	0.2%	0.3%	0.2%	5.3%	0.0%	0.5%	0.3%
5	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
6	0.2%	0.1%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.4%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.5%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
7	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
8	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
9	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
10	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
11	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
12	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
13	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
14	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
15	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
16	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
17	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
18	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.0%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%
19	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
20	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
21	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
22	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
23	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
24	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
25	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

Figura 10: Ejemplo de resultados de probabilidad de varada por sección y condición climática.

Estas tablas de resultados muestran la probabilidad de varada en cada sección de la vía de navegación y en función de distintas condiciones climáticas. Cada velocidad de navegación, buque y maniobra (entrada/salida) analizada, e incluida en el modelo, dispone de una tabla similar para la determinación de la probabilidad de varada. Esto permite:

- Verificar la viabilidad de las maniobras.
- Identificación de la velocidad óptima de navegación que minimice el riesgo de varada.
- Identificación de los límites hidrometeorológicos de acceso óptimos para reducir el riesgo de varada.
- Identificación de secciones del área de navegación críticas en las cuales, un dragado puntual pueda conllevar un incremento significativo de la operatividad.

2.2.4.2 Riesgo global

Una vez completada la base de datos que alimenta el módulo de riesgos, y conocidos los valores de frecuencia de presentación de cada uno de los

escenarios, resulta inmediato el cálculo del riesgo de varada global a lo largo de la navegación para un determinado tipo de tráfico.

Este tipo de resultado permite, entre otros:

- Conocer de forma muy detallada la operatividad de la vía navegable, para un determinado riesgo máximo admisible.
- Analizar si el incremento de un tráfico a futuro permite mantener el riesgo global en los límites deseables sin tener que realizar actuaciones adicionales.
- Analizar si el incremento de riesgo que supone un nuevo tráfico u operación permite mantener el riesgo global en los límites deseables.
- Comparar riesgos por tipos de tráfico.

Este tipo de resultados facilitan la toma de decisiones en fases de diseño, alcanzando el equilibrio óptimo entre maximizar la operatividad y minimizar riesgo por debajo de los niveles inadmisibles.

La siguiente imagen muestra la relación entre los niveles de riesgo individuales y los periodos de retorno y número de operaciones.

			Periodo de Retorno								
			800	500	250	200	150	100	50	25	5
Número de Buques	1 año	1	1.25E-03	2.00E-03	4.00E-03	5.00E-03	6.67E-03	1.00E-02	2.00E-02	4.00E-02	2.00E-01
	1 trimestre	4	3.13E-04	5.00E-04	1.00E-03	1.25E-03	1.67E-03	2.51E-03	5.04E-03	1.02E-02	5.43E-02
	1 mes	12	1.04E-04	1.67E-04	3.34E-04	4.18E-04	5.57E-04	8.37E-04	1.68E-03	3.40E-03	1.84E-02
	2 mes	24	5.21E-05	8.34E-05	1.67E-04	2.09E-04	2.79E-04	4.19E-04	8.41E-04	1.70E-03	9.25E-03
	1 semana	52	2.41E-05	3.85E-05	7.71E-05	9.64E-05	1.29E-04	1.93E-04	3.88E-04	7.85E-04	4.28E-03
	2 semana	104	1.20E-05	1.92E-05	3.85E-05	4.82E-05	6.43E-05	9.66E-05	1.94E-04	3.92E-04	2.14E-03
	3 semana	156	8.02E-06	1.28E-05	2.57E-05	3.21E-05	4.29E-05	6.44E-05	1.29E-04	2.62E-04	1.43E-03
	4 semana	208	6.01E-06	9.62E-06	1.93E-05	2.41E-05	3.22E-05	4.83E-05	9.71E-05	1.96E-04	1.07E-03
	5 semana	260	4.81E-06	7.70E-06	1.54E-05	1.93E-05	2.57E-05	3.87E-05	7.77E-05	1.57E-04	8.58E-04
	6 semana	312	4.01E-06	6.42E-06	1.28E-05	1.61E-05	2.14E-05	3.22E-05	6.48E-05	1.31E-04	7.15E-04
	7 semana	364	3.44E-06	5.50E-06	1.10E-05	1.38E-05	1.84E-05	2.76E-05	5.55E-05	1.12E-04	6.13E-04
	14 semana	728	1.72E-06	2.75E-06	5.51E-06	6.89E-06	9.19E-06	1.38E-05	2.78E-05	5.61E-05	3.06E-04

Figura 11: Niveles de riesgo individual asociados a distintos periodos de retorno y densidad de tráfico de buques.

2.3 Validación del modelo de riesgos

Una vez el modelo de riesgos ha sido construido y completado, es de gran importancia verificar y validar los resultados. Para ello, herramientas de simulación avanzadas como es el simulador de maniobras en tiempo real permiten reproducir las mismas condiciones que las contempladas en el modelo, incluyendo la participación y experiencia de Capitanes o Prácticos y, por tanto, el factor humano real.

Dado que se trata de una herramienta de simulación con un coste temporal significativamente superior (tiempo real), resulta necesario seleccionar únicamente aquellos escenarios o maniobras cuyo riesgo resulte crítico (límite de viabilidad). Además, en caso de que el área de navegación considerada sea muy extensa, se seleccionarán también únicamente aquellas secciones de navegación identificadas como críticas, y que permitan calibrar y

evaluar el modelo tanto en tramos rectos como en tramos curvos.

Una vez seleccionados los escenarios críticos, se han de realizar repeticiones de maniobras sobre los mismos con el fin de analizar de nuevo estadísticamente las áreas de navegación requeridas.

Los resultados de este análisis han de ser comparados con los resultados del modelo de riesgos. Las posibles diferencias que puedan surgir entre ambas herramientas de simulación habrán de ser evaluadas con el fin de calibrar y corregir el modelo de riesgos construido.

La siguiente imagen muestra un ejemplo con la comparativa del resultado del ancho ocupado por el buque en su navegación obtenido mediante el modelo de riesgos basado en SHIPMA y las maniobras realizadas en el simulador en tiempo real bajo las mismas condiciones.

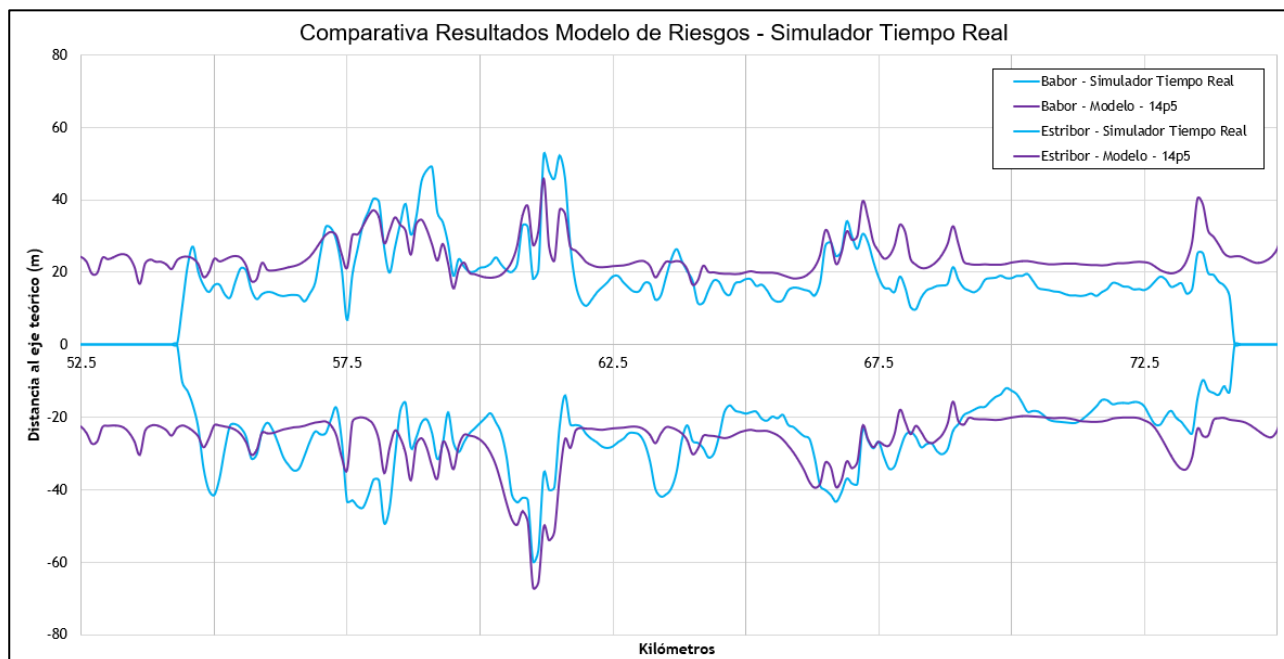


Figura 12: Comparativa de resultados entre el modelo de riesgos y los resultados del simulador en tiempo real.

La comparativa de los resultados de las maniobras realizadas en el simulador en tiempo real u obtenidas de datos AIS, basadas en maniobras reales de Prácticos, permiten calibrar y modificar el modelo de riesgos de tal forma que se pueda ajustar el resultado en los diversos tramos rectos y curvos, para incrementar la precisión del modelo de riesgos final.

3 CONCLUSIONES

La creación de modelos de riesgos para determinar la probabilidad de varada de distintos buques y bajo distintas condiciones climáticas basado en modelos numéricos de maniobra es viable y aporta grandes beneficios, tanto desde el punto de vista de diseño de canales y vías de navegación, como desde el punto de vista operativo y de mantenimiento.

Cuanta mayor precisión tenga el modelo de maniobra empleado para la creación del modelo de riesgos, más exactos serán los resultados. Sin embargo, la creación de un modelo de riesgos basado únicamente en simulaciones en tiempo real es inviable debido al elevado coste, tanto económico como temporal, que supondría.

Los modelos de maniobra "fast-time" tales como SHIPMA que permiten realizar decenas de miles de maniobras en un corto plazo y a un coste reducido, son las herramientas más adecuadas para su uso en la creación de modelos de riesgos.

Para poder crear un modelo de riesgos basado en un programa inicialmente determinista, se ha construido una metodología que permita aportar la aleatoriedad adecuada al sistema, para ello se combina con recomendaciones de diseño de canales, nacionales e internacionales, maniobras

reales de acuerdo con registros AIS, y estudios de simulador en tiempo real.

El conocimiento de la zona de navegación, la capacidad de análisis de maniobras de buques y de datos AIS, el conocimiento de maniobrabilidad de buques, así como de las prácticas de diseño de canales de navegación, según recomendaciones nacionales e internacionales, como el PIANC, son pasos críticos en el proceso.

Esta metodología, basada en una calibración inicial del modelo numérico de maniobra "fast-time" (eje de navegación, autopilotos, trayectoria de referencia, etc.), en la aplicación de una aleatoriedad a las variables fundamentales, y, finalmente en una calibración con resultados de simulador en tiempo real, tiene grandes posibilidades a futuro, pues los beneficios y el conocimiento que aporta en una industria cada vez más informatizada, controlada y consciente de los riesgos, son innumerables.

Entre los principales beneficios del uso de modelos de riesgos específicos para las zonas de navegación encontramos:

- Identificación de la velocidad óptima de navegación que minimice el riesgo de varada.
- Identificación de los límites hidrometeorológicos de acceso óptimos para reducir el riesgo de varada.
- Identificación de secciones del área de navegación críticas en las cuales, un dragado puntual pueda conllevar un incremento significativo de la operatividad.
- Conocer de forma muy detallada la operatividad de la vía navegable, para un determinado riesgo máximo admisible.

- Analizar si el incremento de un tráfico a futuro permite mantener el riesgo global en los límites deseables sin tener que realizar actuaciones adicionales.
- Analizar si el incremento de riesgo que supone un nuevo tráfico u operación permite mantener el riesgo global en los límites deseables.

REFERENCIAS

“Approach Channels. A Guide for Design” (1997), PIANC (Asociación Internacional de Navegación)

“Harbour Approach Channels Design Guidelines” (2014), PIANC (Asociación Internacional de Navegación)

“ROM 3.1-99 Proyecto de la Configuración Marítima de los Puertos; Canales de Acceso y Áreas de Flotación” (2000), Puertos del Estado

“Determining the horizontal dimensions of ship manoeuvring areas – General recommendations and simulator studies” (1998), José R. IRIBARREN