

DESARROLLO DE UN REGLAMENTO DE EXPLOTACIÓN PARA LAS ÁREAS DE NAVEGACIÓN Y FLOTACIÓN DE LAS NUEVAS INSTALACIONES PORTUARIAS EN PUNTA LANGOSTEIRA (A CORUÑA)



Elena Rodríguez la Ossa¹
y Fernando Noya Arquero²

INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos fundamentales para la explotación de terminales marítimos es la operatividad de sus áreas de navegación y flotación. El conocimiento del porcentaje de tiempo en que éstas no resultarán utilizables por los buques usuarios, una vez relacionado con el volumen de demanda prevista, da idea de las pérdidas económicas esperables, derivadas de los tiempos de inoperatividad estimados.

El presente estudio tiene como primer objetivo cuantificar de forma estadística dichos porcentajes de tiempo no operativos, para cada una de las áreas consideradas, a la vez que se determinan las estrategias de maniobra durante la navegación, se optimizan, la geometría de las estructuras de atraque, y los sistemas de amarre y defensa, y se define el equipamiento adicional de que debe disponerse en dichos atraques, mas allá de aquel con el que habitualmente cuentan los buques.

La base del estudio de operatividad es la determinación de las condiciones climatológico-marinas consideradas límite para las operaciones de los buques, y la adecuada caracterización estadística de las mismas, de forma que la evaluación de dicha operatividad resulte lo más realista posible.

El segundo objetivo, es permitir la mejora de la planificación y la gestión de los espacios portuarios, mediante la futura integración de los resultados obtenidos en el SIG de explotación del Puerto, una vez se cuente con los sistemas de medida y predicción de las condiciones climatológico-marinas necesarios.

¹ ALATEC

² Autoridad Portuaria de A Coruña

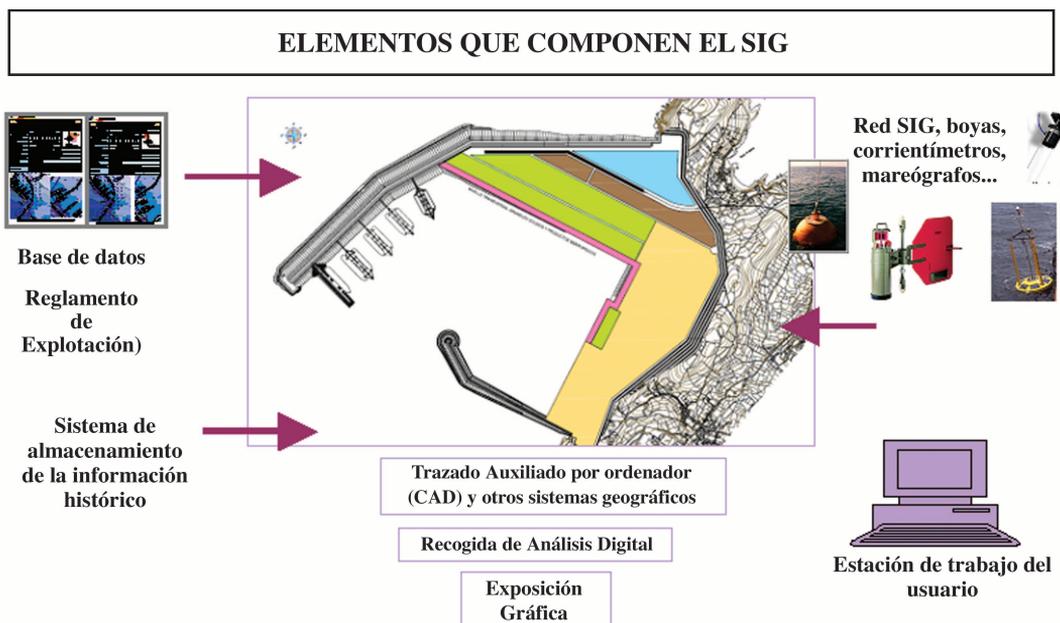


Figura 1.

La ejecución de los trabajos realizados se caracteriza principalmente por:

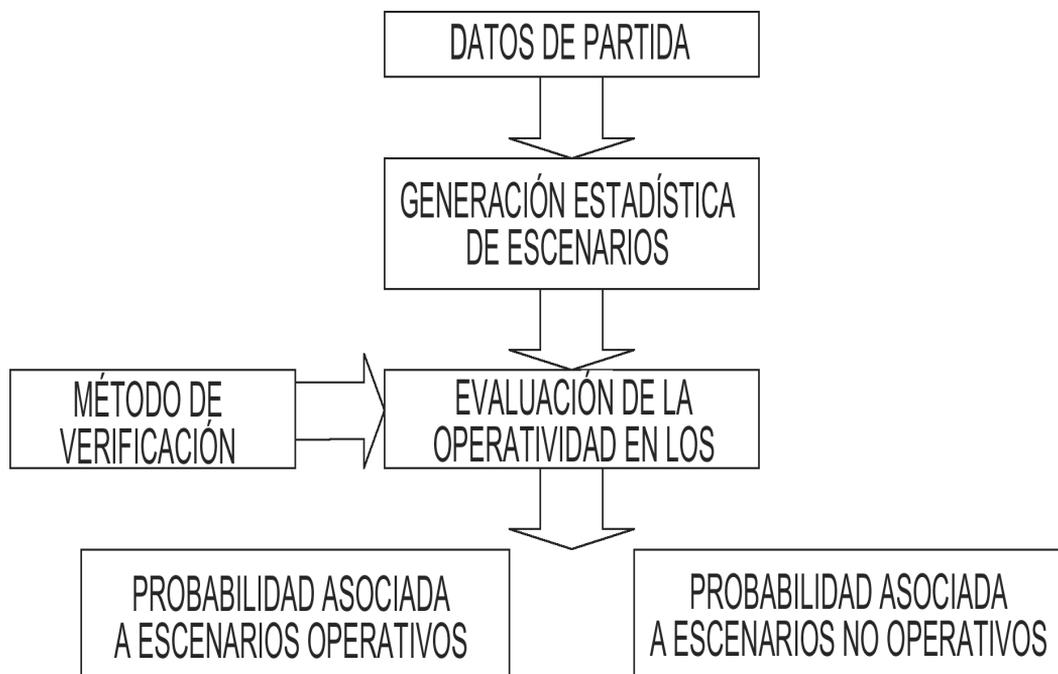
- La calidad de los datos de clima utilizados, habiéndose llevado a cabo estudios en modelo numérico, de propagación y agitación de oleaje, propagación de viento, y modelización de los campos de corrientes generados por el viento y las mareas, en un gran número de situaciones diferentes de acuerdo con las condiciones de la zona.
- La calidad de las herramientas aplicadas para la determinación de las condiciones climatológico-marinas límite para las maniobras de los buques, y para la operación y permanencia de los mismos en los atraques, y la gran cantidad de escenarios analizados, sumándose más de un millar de casos entre simulaciones de maniobras en tiempo acelerado, y simulaciones de comportamiento de los buques amarrados mediante modelo numérico.
- La Calidad del análisis estadístico realizado para la estimación de la operatividad, mediante un método probabilístico de nivel III, que permite evaluar con un buen grado de aproximación, las frecuencias de presentación conjunta de los distintos factores considerados, y obtener resultados mensuales, estacionales o anuales.

METODOLOGÍA

Planteamiento general

La metodología general empleada para realizar el Análisis de Operatividad del área de navegación y flotación ha sido la siguiente:

- **Datos de partida:** recopilación de los datos relevantes para el proyecto. En general estos datos se han clasificado en:
 - Condicionantes de proyecto.
 - Factores de Uso y Explotación.
 - Factores del Medio Físico.
- **Generación de escenarios:** A partir de la caracterización estadística de los datos de partida disponibles se ha generado un elevado número de escenarios posibles, asociados a una determinada probabilidad de ocurrencia, simulando así la casuística real del proyecto. Cada escenario particular queda definido por el valor concreto de todas las variables que conforman el escenario tipo.
- **Evaluación de la operatividad en los escenarios:** Una vez generada una base estadística de escenarios posibles, se evalúa la operatividad en cada uno de ellos. La posibilidad de operar en un escenario concreto se evalúa mediante simulaciones numéricas de la operación deseada bajo las condiciones marcadas por el escenario (simuladores de maniobras en tiempo acelerado, y de comportamiento del buque amarrado).
- **Evaluación de la probabilidad de tiempos de operatividad e inoperatividad:** Dado que los distintos escenarios están asociados a una probabilidad de ocurrencia determinada, una vez establecida la operatividad o inoperatividad de cada uno de ellos, es inmediato determinar la probabilidad de operatividad e inoperatividad de cada caso analizado.



Datos de partida

Condicionantes de proyecto

- **Geometría de la obra y del terreno.** Se caracterizan por los parámetros que inciden en las operaciones evaluadas en cada caso, características de las áreas de navegación y áreas de flotación (obstáculos para la navegación, cotas de muelles, calados, etc.).
- **Sistema de atraque y amarre.** Una vez optimizado, queda caracterizado por sus características geométricas, y físicas (curvas fuerza-deformación de amarras y defensas, esfuerzos máximos admisibles, etc.).
- **Equipos de carga y descarga.** Se han caracterizado por los parámetros límite admisibles para su uso (movimientos de los buques, viento, etc.). A falta de datos precisos respecto de los equipos a instalar, se han tomado como referencia las prescripciones de la ROM 3.1-99 y el PIANC.
- **Cierre por nocturnidad.** Se caracteriza por la posibilidad o no de que las instalaciones resulten accesibles u operativas en un determinado horario.

Factores de uso y explotación

- **Buque (qb).** Se han caracterizado por sus dimensiones y por los parámetros que afectan a su comportamiento en navegación o en el amarre de acuerdo con los modelos numéricos utilizados.

Factores del medio físico

- **Oleaje (qo).** Se ha caracterizado mediante tres variables dependientes entre sí; la altura de ola significativa (H_s), el período (T) y la dirección (θ).
- **Viento (qv).** Se ha caracterizado mediante las variables velocidad de viento (V_v) y dirección (θ_v), dependientes entre sí.
- **Corriente (qc).** Se ha caracterizado mediante las variables velocidad de corriente (V_c) y dirección (θ_c), dependientes entre sí.
- **Estado de marea (qm).** Se ha caracterizado por el nivel del agua (M) y la situación de marea, creciente o vaciante.
- **Visibilidad (qn).** Se ha caracterizado por la visibilidad mínima disponible (N).

Generación estadística de escenarios

Dado que habitualmente, la ubicación de las fuentes de datos disponibles (boyas de registro de oleaje, estaciones meteorológicas, mareógrafos, etc.), no corresponde a

la de cada una de las zonas de interés, es necesario, en primer lugar, trasladar dichos datos mediante herramientas adecuadas, más o menos habituales en la ingeniería marítima y portuaria, tales como modelos de propagación o agitación de oleaje, propagación de viento, modelos hidrodinámicos que permitan determinar los campos de corrientes, etc.

Por otro lado, con objeto de acotar el número de escenarios a analizar, y poder evaluar la operatividad asociada a los mismos, es necesario analizar las frecuencias de presentación conjunta de los valores asociados a cada escenario, durante los períodos de tiempo que resulten de interés.

Sin embargo, si bien la caracterización de los regímenes medios de algunas variables individuales, es relativamente sencilla, siendo suficiente aproximado disponer de periodos de registro relativamente cortos (3-5 años), la caracterización conjunta de varias variables, resulta en general mucho más compleja, y requiere de períodos de registro mucho mayores.

De acuerdo con ello, cuando se dispone de periodos de registro simultáneos de varias variables, suficientemente largos, se considera que el enfoque más fiable es la utilización directa de los datos medidos, una vez trasladados al área de estudio, teniendo en cuenta el desfase temporal que corresponda, respecto de la fuente de datos utilizada en cada caso.

Este es el caso, del viento y el oleaje en el presente estudio, para los que se disponía de un periodo de registro conjunto de unos 7 años, que daba lugar a unos 28.000 datos horarios simultáneos.

DATOS DE VIENTO	DATOS DE OLEAJE
Estación de Malpica 1998-2004 (datos recogidos cada 1/2 hora)	Boya de Langosteira 1998-2006 (datos recogidos cada hora)

Tabla 1

En otros casos, es necesario establecer simplificaciones que relacionen de forma más o menos directa, los valores de algunas de las variables consideradas. En este caso por ejemplo, se ha considerado que:

- Las mareas son independientes del resto de factores, y no resultan limitantes para las maniobras de los buques.
- Las corrientes son generadas por el viento y la marea, de acuerdo con las simulaciones en modelo realizadas.
- Las nieblas son independientes del resto de factores, con la limitación de que no puedan presentarse restricciones de visibilidad que impidan las maniobras, en simultaneidad con vientos de velocidades superiores a 6 m/s, para lo que ha sido

necesario concentrar las probabilidades de presentación correspondientes a cada uno de los periodos considerados, sobre aquellos instantes en los que la velocidad de viento resulta menor que la referida.

Con todo ello, se lleva a cabo la generación estadística de los escenarios, según el siguiente esquema, en el que se indica en cada caso, si el valor de la variable considerado en cada instante, procede de datos registrados (R), o se ha generado por simulación según el método de Montecarlo, a partir de la caracterización estadística de cada variable, y las ligaduras referidas anteriormente (S).

Oleaje			Viento		Marea		Corriente		Visibilidad
θW	Hs	T	θv	Vv	Situación	Nivel	θv	Vc	V
R	R	R	R	R	S	S	Asociados al viento y la marea		S

Tabla 2

Evaluación de la operatividad de cada escenario

Para poder evaluar si cada uno de los escenarios considerados, resulta o no operativo, es necesario definir en primer lugar las Condiciones Límite de Operación, mediante un método de verificación adecuado, que considere el efecto de las variables principales de las que depende que se produzca, o no, la parada operativa.

Como ya se ha comentado, en el caso de las áreas de navegación y flotación, consideradas en este estudio, la posibilidad de operación de los buques se ve afectada por número considerable de variables, por lo que se requiere de modelos matemáticos complejos que permitan evaluar su efecto conjunto de forma fiable, en función de las características de los propios buques y de las instalaciones consideradas.

Los modelos aplicados en este caso son los siguientes:

- **Simulador de maniobras en tiempo acelerado, SHIPMA V.6**, a través del cual se han determinado las condiciones límite para la navegación de los buques, en función de distintos parámetros, tanto relativos a los resguardos de seguridad frente a obstáculos, como al adecuado gobierno de los buques durante las maniobras, etc. La descripción del modelo, los criterios de validez adoptados para la evaluación de las maniobras, y la presentación de los resultados obtenidos, se recogen en los apartados siguientes.

Es importante destacar que, a pesar de que en fases de estudio anteriores, se contrastaron un buen número de simulaciones en tiempo acelerado, con simulaciones en tiempo real, está previsto acometer nuevas simulaciones con objeto de validar los resultados obtenidos en el Reglamento de Explotación. Especialmente, en el caso de las maniobras de atraque en los pantalanes para petroleros, la disposición de cuatro (4) pantalanes dobles, dependiendo de los tamaños de buques

a operar en ellos, restringe el área disponible para la maniobra, a valores menores de los recomendados por la ROM 3.1-99.

- **Simulador de comportamiento del buque amarrado, SHIP MOORINGS**, a través del cual se han determinado las condiciones límite, tanto para las operaciones de carga y descarga de los buques, como para la permanencia de los mismos en los atraques.

En el caso de la carga y descarga de los buques, los parámetros que determinan la viabilidad de las operaciones son, los movimientos máximos admisibles para los equipos que se prevea utilizar, y los esfuerzos máximos admisibles en amarras y defensas.

La posibilidad de permanencia de los buques en los atraques, quedará únicamente limitada por los esfuerzos máximos admisibles en amarras y defensas.

La descripción del modelo, los movimientos y esfuerzos máximos admisibles considerados en cada caso, y la presentación de los resultados obtenidos, se recogen en los apartados siguientes.

Complementariamente, se han establecido algunas limitaciones que restringen de forma directa la viabilidad de las operaciones, tales como:

- Imposibilidad de que se realicen maniobras de acceso con visibilidad inferior a 1.500 m.
- Imposibilidad de realizar operaciones de carga y descarga cuando las velocidades de viento superen las máximas admisibles para los equipos terrestres.

Por otro lado, si bien a nivel teórico todas las variables tienen influencia en la viabilidad de las operaciones consideradas, a nivel práctico, no tiene sentido establecer valores límite de variables que no van a ser conocidas ni controladas en la realidad.

De esta manera, algunas de ellas se han incluido en las simulaciones utilizando sus valores probables o pésimos (asociados a una probabilidad de excedencia muy baja). Este sería por ejemplo el caso de la intensidad de corriente, que, para cada una de las situaciones de viento analizadas, se ha asociado a la fase más desfavorable del ciclo de marea.

Evaluación de la operatividad de las áreas analizadas

Una vez generada la base estadística de escenarios a considerar, y después de haber evaluado cada uno de ellos a través de los métodos de verificación referidos anteriormente (escenarios operativos o no), el paso final es evaluar, a partir de los resultados obtenidos, la operatividad total del área considerada en cada caso. Esto es, determinar el número de horas mensuales, estacionales o anuales, en los que cada una de las operaciones consideradas, son o no viables.

De acuerdo con el método utilizado en este caso, esto resulta inmediato, ya que, asumiendo que cada uno de los escenarios aleatoriamente generados es independiente del resto:

- La probabilidad total de operatividad, será la suma de las probabilidades asociadas a cada uno de los escenarios operativos.
- La probabilidad total de inoperatividad, será la suma de las probabilidades asociadas a cada uno de los escenarios no operativos.

APLICACIÓN

Datos de partida

Condicionantes de proyecto

- **Geometría de la obra y del terreno.** A continuación se muestra la vía de navegación de acceso y salida del Puerto, así como la disposición de atraques analizados.

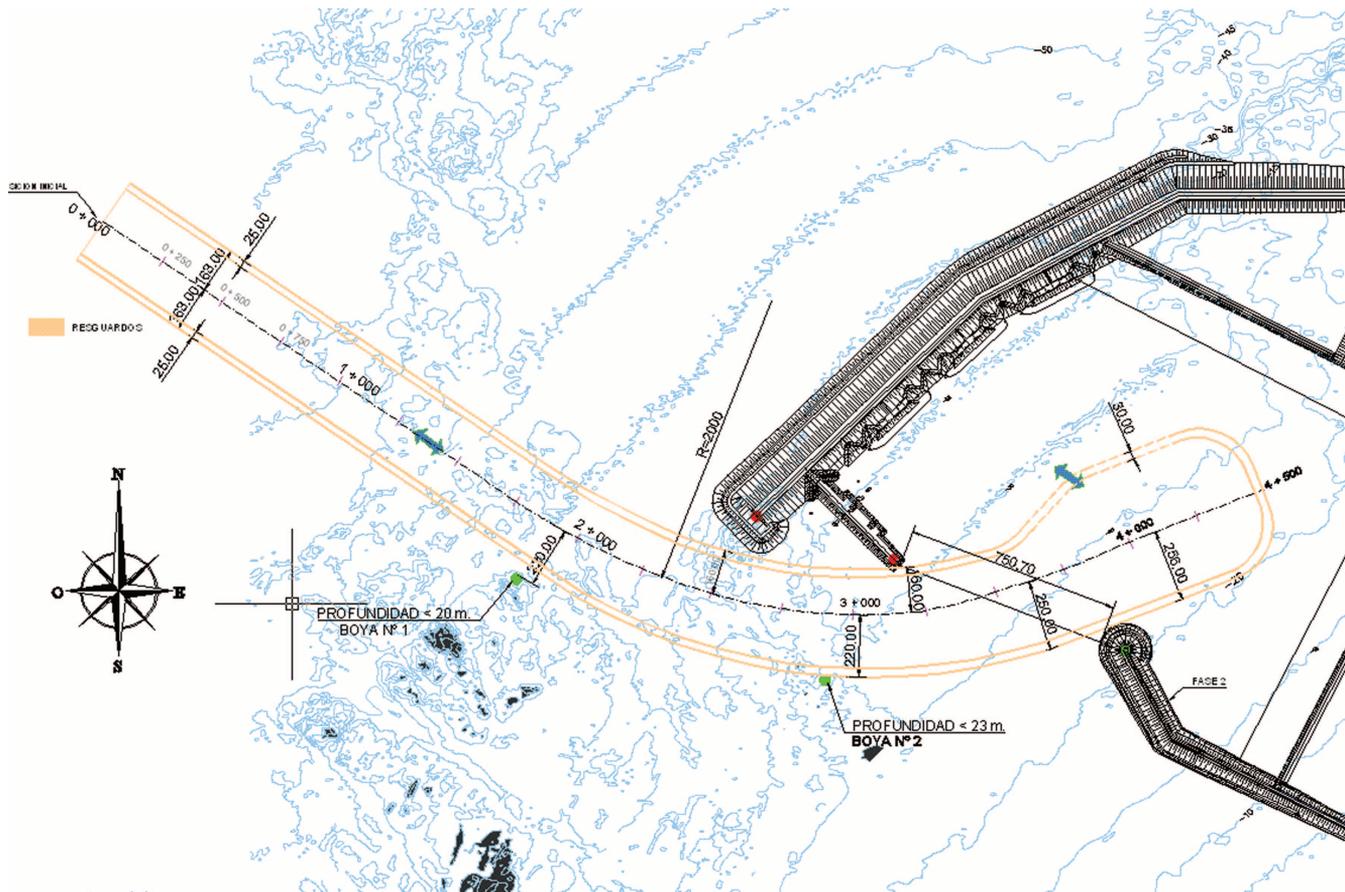


Figura 2.

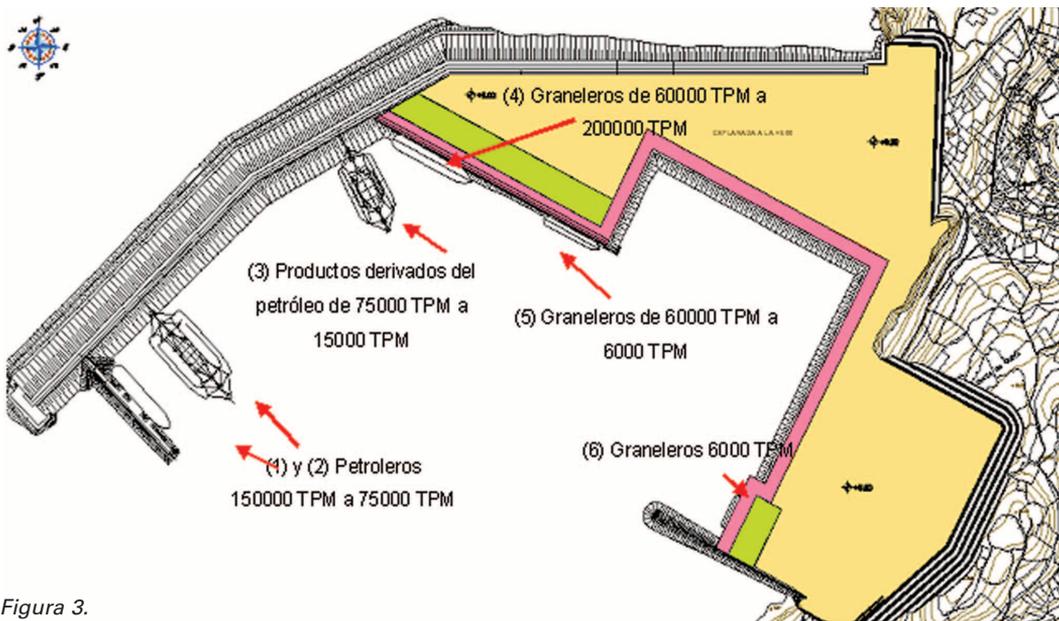


Figura 3.

CRITERIOS DE VALIDEZ PARA LAS MANIOBRAS DE NAVEGACIÓN

Las simulaciones de maniobras han sido consideradas como válidas cuando cumplían los siguientes criterios:

- Disponibilidad de potencia de remolque según la actualmente existente en el Puerto de A Coruña.

Nombre	Potencia (HP)	Tiro (t)	Propulsión
IBAIZABAL UNO	4.500	55	Convencional
SERTOSA TREINTAY DOS	4.100	52	Stern Drive
SERTOSA VEINTIOCHO	4.430	45	Voith
SERTOSA VEINTISÉIS	4.430	45	Voith

Tabla 3

Se ha dispuesto en cada simulación un remolcador Voith a proa y otro a popa. El remolcador azimutal y el convencional se conectarían a los traveses, a una u otra banda del buque para conseguir el momento evolutivo más conveniente en función del viento, oleaje y corriente que actuaran en ese momento.

- Velocidad de navegación al paso por el martillo (inferior a 4m/s).
- Área barrida por el buque a babor o a estribor.
- El ángulo de deriva no podrá exceder de los recomendados por la ROM cuando no exista margen de maniobra (pala de timón y régimen de máquinas).

- El punto teórico de parada se sitúa aproximadamente con el centro del área de reviro, permitiendo ser sobrepasado en 100 m.

Las maniobras han considerado únicamente los requerimientos de espacio en planta, ya que dadas las características de la obra y los tipos de buque estudiados, se dispone en todo momento de resguardo suficiente para realizar la maniobra con seguridad y no resulta necesario abordar el estudio de los requerimientos de espacio en alzado.

CRITERIOS DE VALIDEZ PARA VALIDAR LAS SIMULACIONES DEL BUQUE AMARRADO

Operaciones de carga-descarga

- No superación de los movimientos admisibles para los equipos, según limitaciones del PIANC.
- No superación de los esfuerzos admisibles para las defensas, para ello se introdujeron en el modelo las curvas de tensión/ deformación de los elastómeros.
- No superación de las tensiones admisibles para las amarras, considerándose la no superación del 75 % de la MBL (Mínima carga de rotura) cuando no son amarras sintéticas, y del 55% de la MBL cuando se trataba de amarras de cable de acero.
- Las amarras de tipo sintético no se cargaban mas del 75% de su Carga de Rotura (BL), estando la carga media, en torno al 25 % de la BL, y en situaciones usuales, no excedían del 50% asegurando así la vida útil de la amarra.

El número y tipo de amarras ensayadas en el modelo han sido escogidos teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Los barcos de pequeño tamaño, con capacidad entre 5.000 a 10.000 TPM, utilizan normalmente amarras sintéticas de polipropileno.
- Los buques mayores, en función del tipo, son equipados con amarras sintéticas y/o cables de acero.
- La flota de buques graneleros y petroleros presenta grandes amplitudes en sus movimientos, por lo que permite el uso de amarras de fibra sintética de polipropileno, que ofrece una excelente relación carga / diámetro y carga / peso.

Permanencia del buque amarrado

- No superación de los esfuerzos admisibles para las defensas.
- No superación de las tensiones admisibles para las amarras.

Factores de uso y explotación

La flota se ha discretizado dividiendo los buques esperables por tipología y tamaño, para ello se ha hecho uso de la estadística de buques facilitada por el Puerto de A Coruña, año 2005. La discretización mencionada ha permitido modelizar un número limitado de buques, de manera que resultaran representativos de los buques usuarios del nuevo Puerto.

	Buques de graneles sólidos		
	6.600 TPM	60.000 TPM	210.000 TPM
ENTRADA	EN CARGA	EN CARGA	EN CARGA
SALIDA	LASTRE	LASTRE	LASTRE

	Petroleros de productos		
	4.000 TPM	10.000 TPM	16.400 TPM
ENTRADA	LASTRE	LASTRE	LASTRE
SALIDA	LASTRE	LASTRE	LASTRE

	Petroleros de crudo		
	72.000 TPM	100.000 TPM	150.000 TPM
ENTRADA	EN CARGA	EN CARGA	EN CARGA
SALIDA	LASTRE	LASTRE	LASTRE

Tabla 4. Estados de carga de los buques representativos de la flota de proyecto

Para cada uno de los buques de diseño definidos, se analizaron las maniobras de acceso y atraque, desatraque y salida y reviro en el interior de la dársena.

Factores de medio físico

OLEAJE

Para conseguir la caracterización del oleaje que afecta al Puerto Exterior de Punta Langosteira, se realizó un estudio de propagación que situara el oleaje en la zona de proyecto y posteriormente un estudio de agitación para conocer su comportamiento en el interior del puerto. Las propagaciones fueron realizadas con periodos altos, para trabajar del lado de la seguridad.

A modo de ejemplo se muestran los resultados de la propagación del oleaje en las direcciones NW, con T_p (período de pico) 18s y la dirección WNW con un T_p de 16s, y las agitaciones en WNW, con T_p 14s.

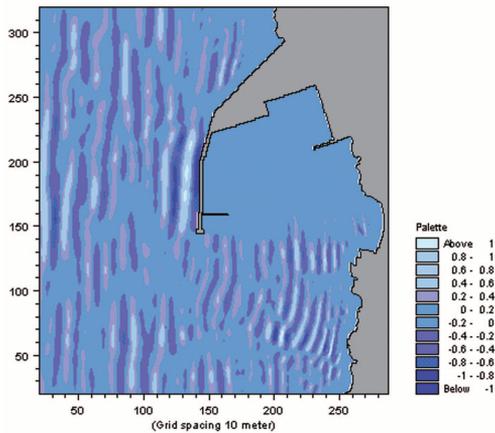


Figura 4. NW - TP 18s.

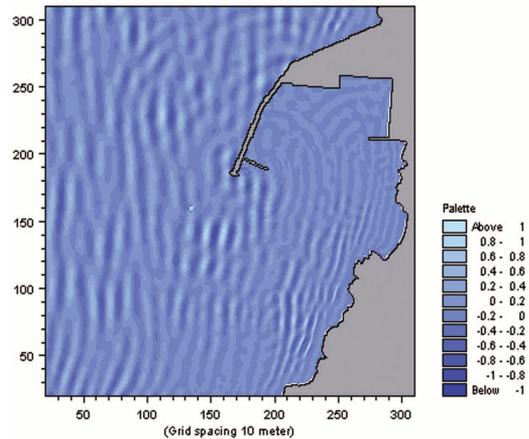


Figura 5. Detalle WNW - TP 16s.

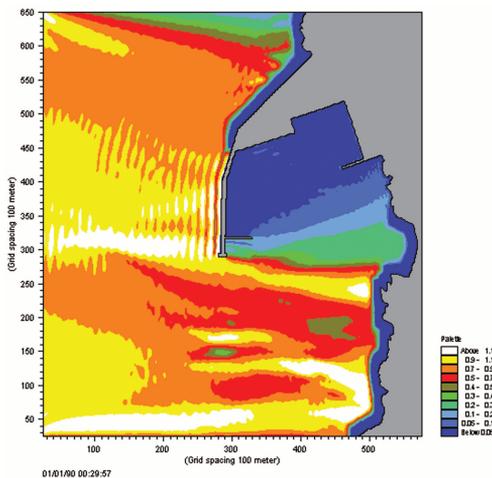


Figura 6. WNW - TP 14S.

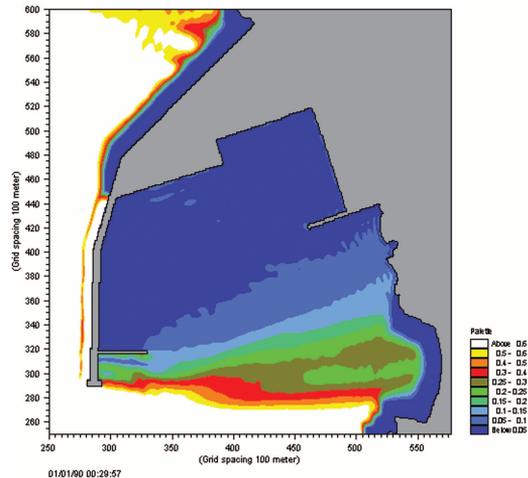


Figura 7. Detalle WNW - TP 14S.

CORRIENTES

El establecimiento y caracterización de las corrientes generadas por marea y viento en las inmediaciones del Puerto de Langosteira ha sido necesario para evaluar la incidencia que dichas corrientes tienen sobre las maniobras que los buques. Ante la configuración en planta del puerto, estas maniobras corresponden tanto a las que se realizarán en la aproximación a dicha instalación como las que se acometerán en su interior, por lo que se analizaron las corrientes en dos áreas distintas: una general en la cual se detalla la zona de la canal de entrada a la instalación y otra más reducida en la cual, el interés se encuentra en la parte interior de la dársena. Las corrientes consideradas son las forzadas por viento y mareas. El viento se utilizó en la simulación en el área interior, mientras que las mareas fueron aplicadas como condición de contorno en el área general.

- A **nivel regional**, se ha analizado la propagación de la onda de marea hacia la entrada del puerto. De este análisis se han extraído las condiciones de contorno para analizar después, las corrientes a nivel local.

Se ha trabajado con las componentes armónicas de la marea en dos puntos de la costa (las amplitudes vienen dadas en cm y las fases en grados sexagesimales):

Punto	Longitud	Latitud	Armónicos principales							
			K1		M2		O1		S2	
			Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase	Amplitud	Fase
NE	8°00' W	43°30' N	77.73	71.03	1180.64	86.84	66.75	321.50	405.73	117.42
SO	9°00' W	43°30' N	78.23	70.71	1150.37	86.25	66.60	321.35	394.69	116.52

Tabla 5

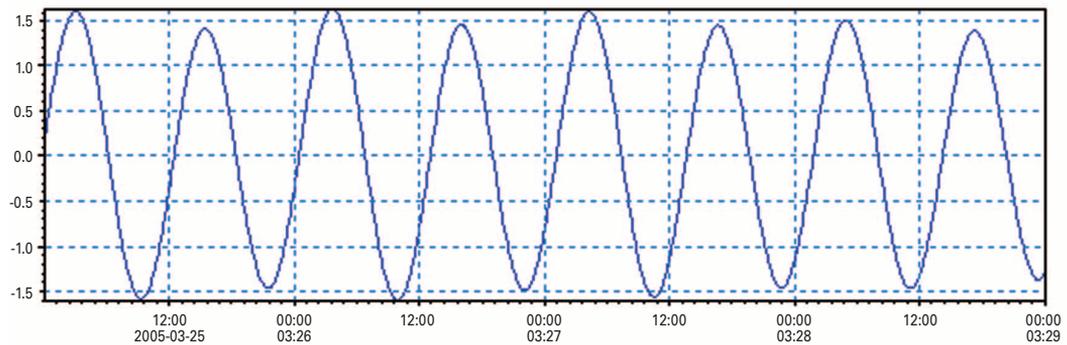


Figura 8. Condición de contorno en borde NE.

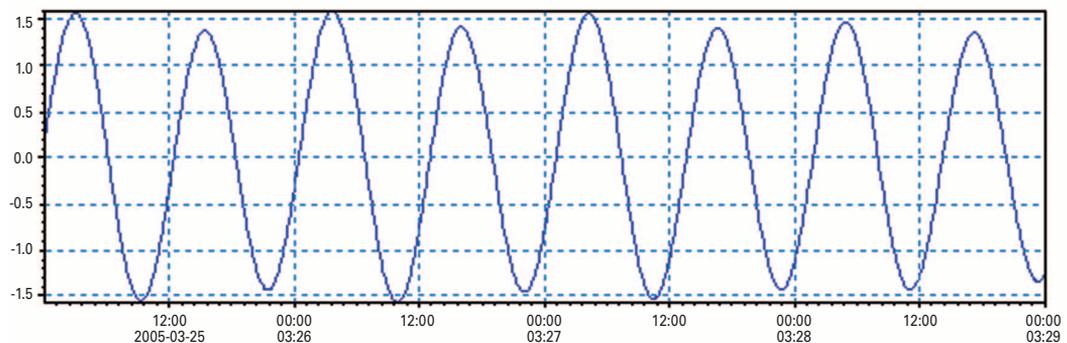


Figura 9. Condición de contorno en borde SW.

- A nivel **local**, han sido combinadas las corrientes generadas por marea, obtenidas del nivel anterior, y las acciones del viento.

El estudio en detalle las corrientes producidas por el viento y las mareas en el interior de la dársena, fue realizado con apoyo del modelo numérico **MIKE-21 HD**, desarrollado por el **DHI (Danish Hydraulic Institute)**.

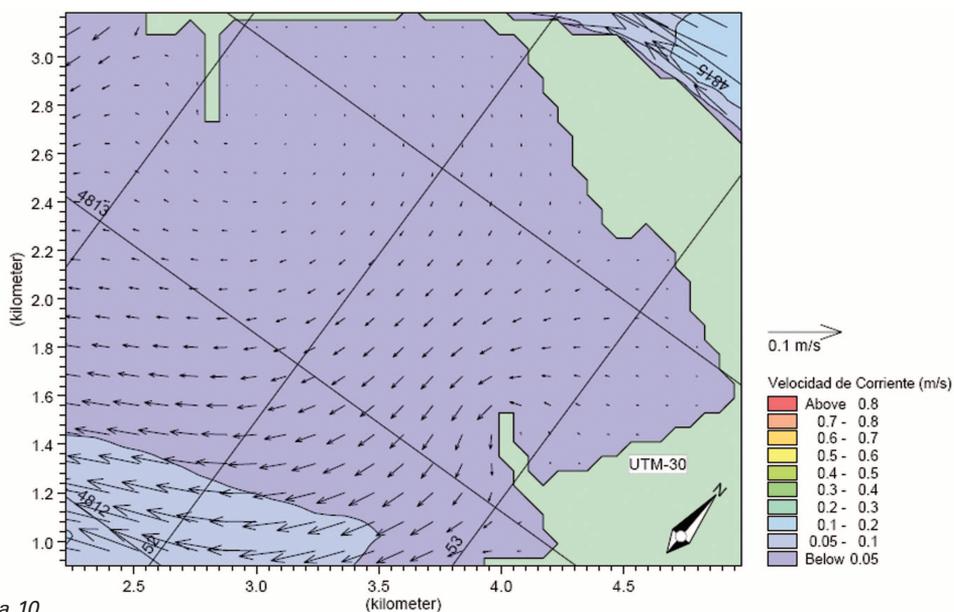


Figura 10.

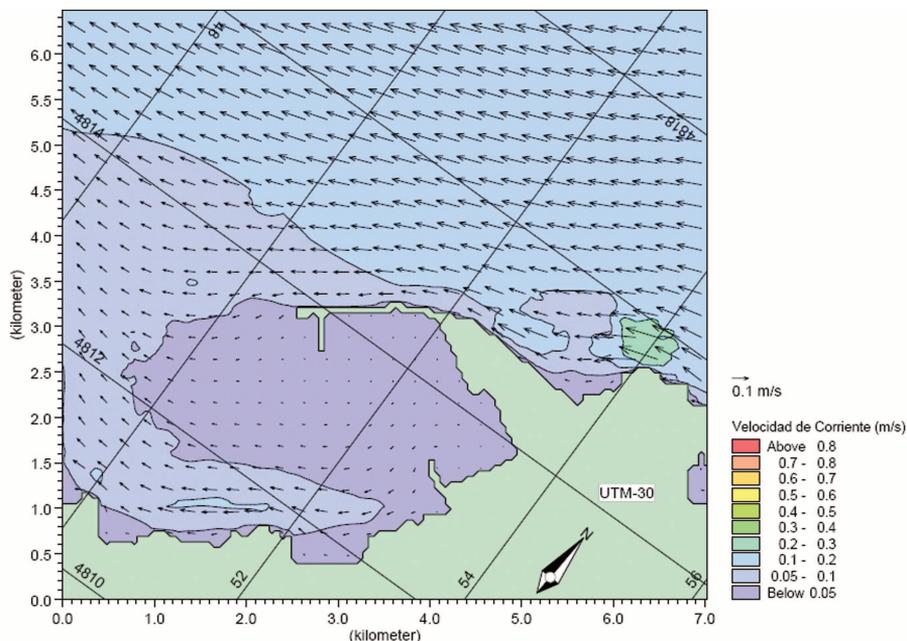


Figura 11.

Los datos de viento, dado que la situación de la estación de medida también difiere de la de las instalaciones consideradas, que existen heterogeneidades topográficas considerables entre ambos puntos, y que la altura y el intervalo de medición son diferentes a los requeridas para el análisis de las maniobras, se modelizó y propagó con el programa WAsP (Wind Atlas Analysis and Application Program), desarrollado por el Instituto Danés RISØ considerando la estructura del puerto, orografía y rugosidad del terreno en la proximidades.

Como resultado de las propagaciones se obtuvieron las direcciones y velocidades del viento en cada uno de los cuatro (4) puntos de control, puntos P1 (vía de aproximación) y puntos P2, P3 y P4 para dársena y atraques.

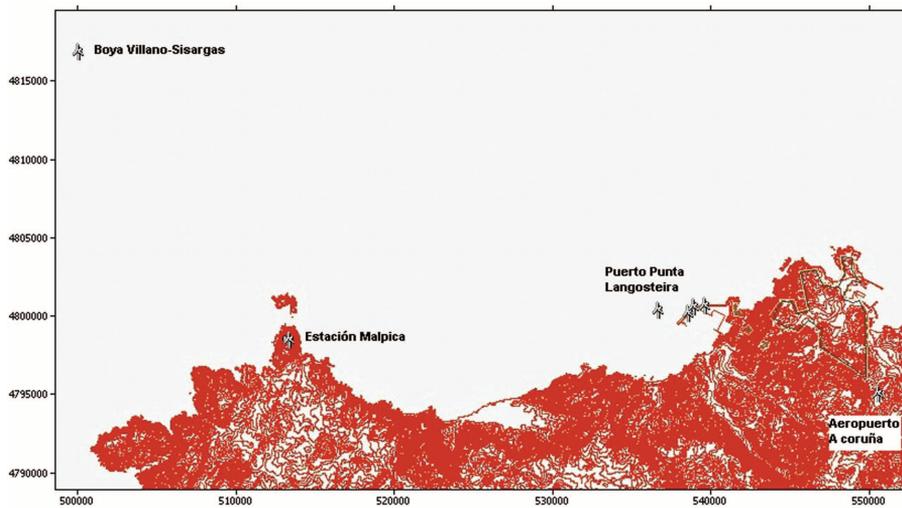


Figura 12.

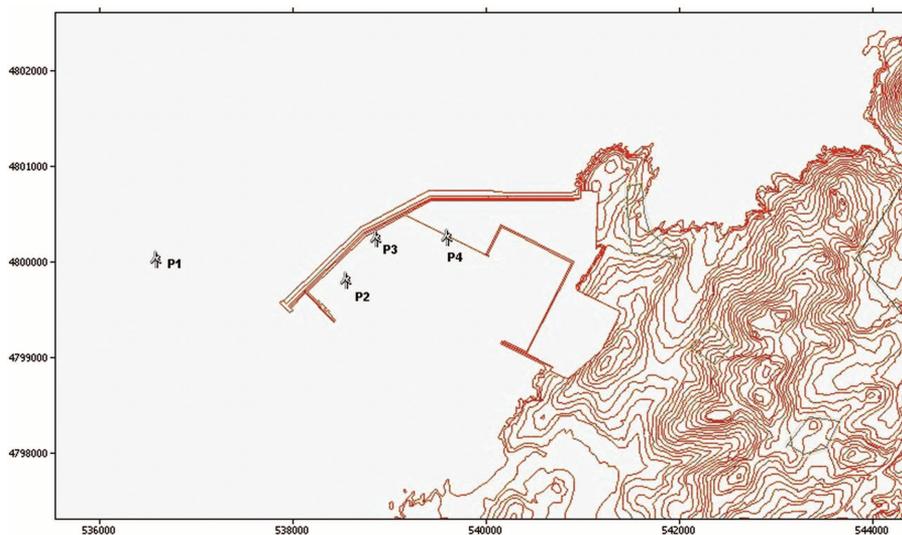


Figura 13.

Generación estadística de escenarios y simulación de maniobras de navegación

Los escenarios climáticos ensayados en su conjunto representan el clima marítimo en el emplazamiento en el año medio climático.

En la siguiente tabla se presentan las combinaciones de oleaje y viento que fueron seleccionado para cada uno de los casos de maniobra (o escenarios) a analizar en el simulador, para cada uno de los buques y tanto en la operación de entrada como en la de salida.

Cada dirección y escalón de altura de ola se combinó con cada una de las 5 direcciones de viento que en conjunto representan la rosa de vientos en el emplazamiento para el año climático medio. El signo *Vv significa precisamente la máxima velocidad de viento a determinar en el simulador que cumple con la aceptabilidad de la maniobra.

Escenarios climáticos ensayados en el simulador		Dirección del viento				
		NE	NNW	NW	SW	SSW
Oleaje del NNW Hs (m)	0-1.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	1.5-2.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	2.5-3.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	3.5-4.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	4.5-5.0	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
Oleaje del NW Hs (m)	0-1.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	1.5-2.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	2.5-3.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	3.5-4.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	4.5-5.0	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
Oleaje del WNW Hs (m)	0-1.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	1.5-2.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	2.5-3.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	3.5-4.5	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv
	4.5-5.0	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv	*Vv

*Vv = máxima velocidad de viento en que la maniobra resulta factible.

Tabla 6

Por otra parte, y en base a ensayos previos de maniobras en el simulador, para cada combinación de oleaje y viento buscaron aquellas desviaciones respecto de la dirección media de viento u oleaje que producían los efectos más desfavorables para el buque y, por tanto, limitaban la velocidad máxima admisible de viento en cada maniobra.

La máxima velocidad de viento simulada fue de 30 m/s, ya que corresponde con la máxima velocidad de viento admitida por la ROM 3.1-99 para la salida de un buque en condiciones límite de permanencia. Si una maniobra resulta aceptable bajo una velocidad de viento de 30 m/s se consideró que la maniobra no fallaba.

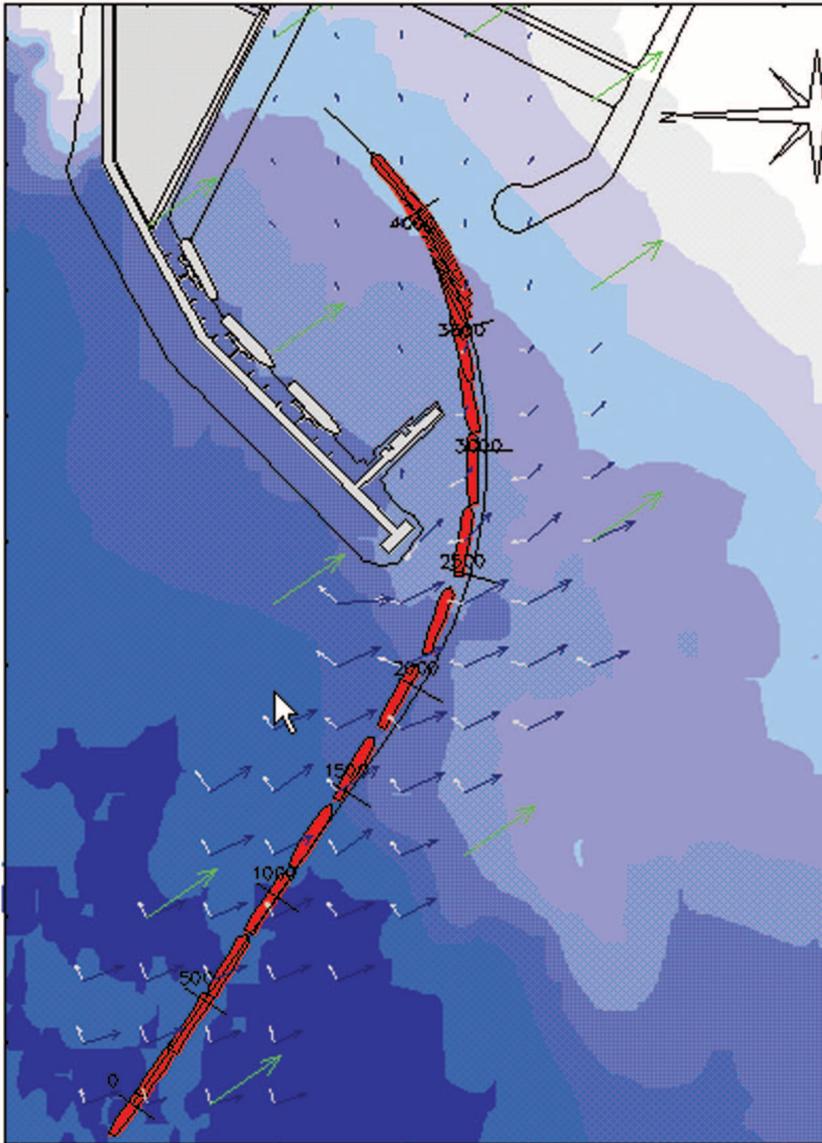


Figura 14. Maniobra de entrada.

Para cada tipo de maniobra, buque, y escenario de clima contemplado en este estudio, se recogieron, en forma de ficha esquemática, los principales parámetros que definían la estrategia de maniobra:

- En cada una de ellas se realizó la evaluación cualitativa y descripción sintética de la maniobra, velocidades aconsejables en cada tramo, regímenes de motor y timón en cada tramo, referencias visuales, principales riesgos de la navegación, flota de remolcadores necesaria, actuación de los remolcadores...

- A partir de los estudios de maniobras anteriormente descritos, se definieron las tablas resumen de las Condiciones Límite y Operatividad estimadas para cada tipo de maniobra y tipo de buque analizado, de fácil manejo y consulta.

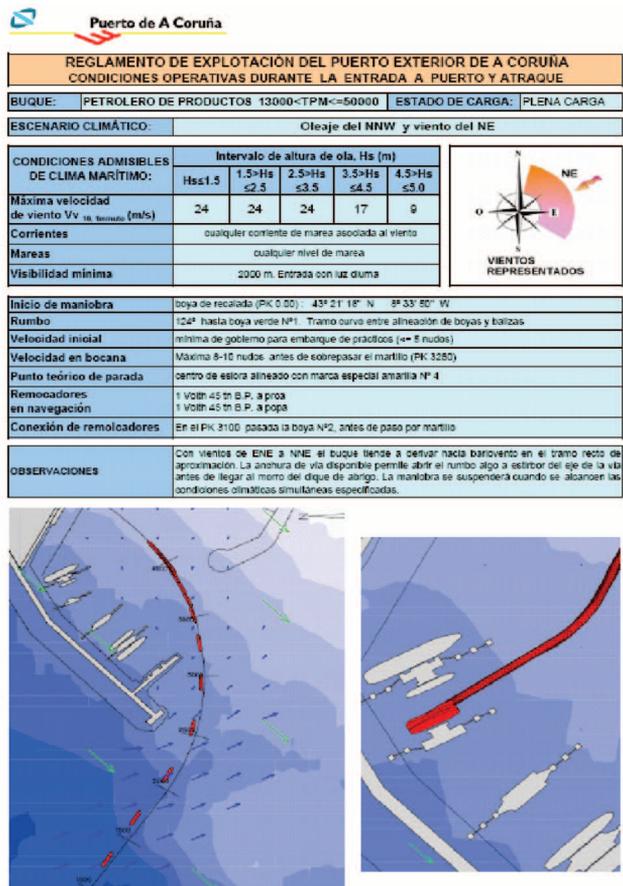


Figura 15. Maniobra tipo en fases de navegación y atraque para oleajes del NNW y vientos del NE.

Faltaría completar los estudios realizados con simulaciones en tiempo real, especialmente para verificar las maniobras de atraque y desatraque para las que el simulador en tiempo acelerado tiene limitaciones.

Generación estadística de escenarios y simulación de buque amarrado

Para el estudio del buque amarrado se utilizó el modelo numérico SHIP-MOORINGS, desarrollado por la empresa holandesa Alkyon Hydraulic Consultancy & Research bv. Mediante dicho modelo, se analizó el amarre de los buques, determinando las condiciones climáticas límite, tanto de operación como de permanencia. Las simulaciones

realizadas han servido también para definir y optimizar la geometría del amarre, definición de defensas, ganchos y bolardos. El SHIP-MOORINGS realiza el análisis dinámico del buque amarrado, por lo que tiene en cuenta la variabilidad de los factores dinámicos así como las curvas tensión-deformación de amarras y defensas.

Previamente a comenzar con las simulaciones, se estudió la energía de atraque generada por cada uno de los buques con el fin de verificar el tipo de defensas y su ubicación geométrica. Este cálculo sirvió para optimizar el diseño facilitado inicialmente.

Los buques usados para realizar las simulaciones fueron modelizados expresamente para el atraque considerado, siendo factores condicionantes del modelo el espacio bajo quilla, o la tipología de la estructura del dique (cajones, pilotes...).

La configuración óptima de amarre fue conseguida a partir de variar amarras, diámetros, materiales, pre-tensión en molinetes, ubicación de ganchos y bolardos e inclusive defensas. Además las direcciones de viento y oleaje fueron sometidas a una variación de $\pm 20^\circ$, con el objetivo de obtener la situación más desfavorable para el barco.

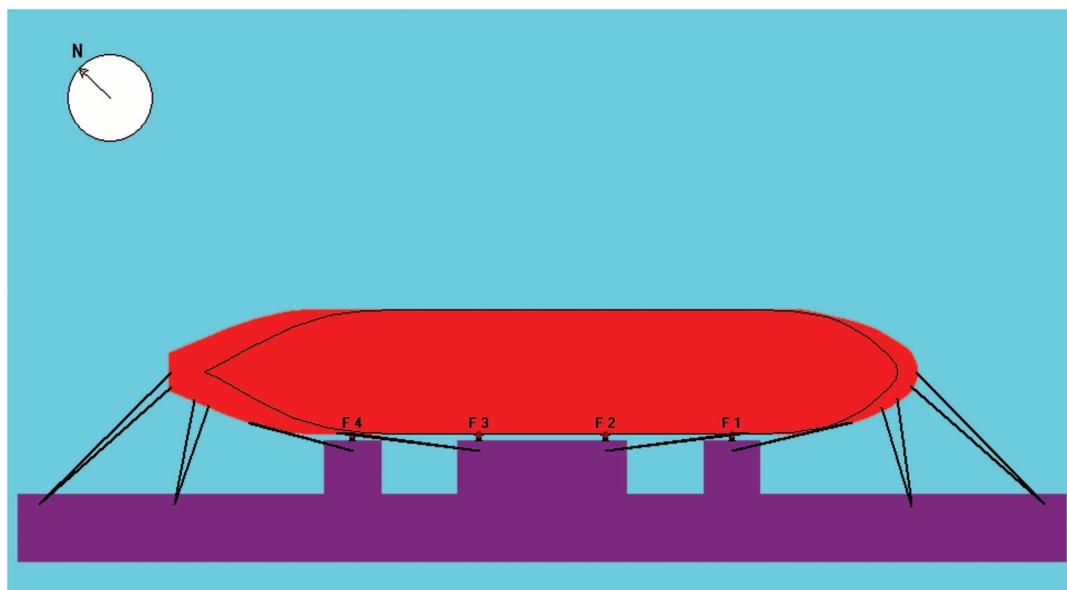


Figura 16. Buque de 150.000 TPM.

Como resultado de aplicar las hipótesis anteriores y analizar los resultados de los estudios previos se obtuvieron las tablas de escenarios analizar, incluyéndose el periodo de pico (T_p) por su influencia en los movimientos del buque amarrado. Se modelizaron tres periodos de oleaje para conocer la influencia de esta variable especialmente importante para los buques de menor porte.

Dir viento		1 (N)	2	3	4	5 (E)	...	15	16
Hs	Tp Oleaje	Vv límite		Vv límite	Vv límite				
Dir oleaje = 5 (E)	1.5	10	20	20	20	20		20	20
		14	20	20	20	20		20	20
		18	18	18	18	18		18	18
	3	10	20	20	20	20		20	20
		14	20	20	20	20		20	20
		18	18	18	18	18		18	18
	4.5	10	20	20	20	20		20	20
		14	20	20	20	20		20	20
		18	18	18	18	18		18	18
	6	10	20	20	20	20		20	20
		14	18	18	18	18		18	18
		18	0	0	0	0		0	0
7.5	10	20	20	20	20		20	20	
	14	18	18	18	18		18	18	
	18	0	0	0	0		0	0	

Tabla 7

Evaluación de la operatividad

Una vez generada la base estadística de escenarios a considerar y después de haber evaluado cada uno de ellos a través de la ecuación de verificación, (escenario operativo o no), el paso final es extrapolar en función de los resultados obtenidos la operatividad total del proyecto. Esto es, asignar al proyecto en cuestión una probabilidad temporal de operatividad (número de horas anuales en los que la operatividad es viable) e inoperatividad (número de horas anuales en los que la operatividad no es viable).

Esto es muy sencillo, puesto que, suponiendo que cada escenario aleatoriamente generado es independiente del resto de escenarios, se procede de la siguiente manera:

- La probabilidad total de operatividad será la suma de las probabilidades asociadas a cada escenario operativo.
- La probabilidad total de inoperatividad será la suma de las probabilidades asociadas a cada escenario inoperativo.

Tiempos de inoperatividad por excedencia de condiciones climáticas

A modo de ejemplo se detallan los tiempos de excedencia de condiciones límite resultado de las simulaciones de las maniobras de navegación.

Los tiempos de excedencia de las condiciones límite de operación y permanencia de los buques amarrados, son calculados con el mismo procedimiento, habiéndose

incluido además el periodo como variable que afecta al tiempo de operación y permanencia de los buques en el atraque.

TIEMPO NO OPERATIVO

La metodología seguida para el cálculo de la inoperatividad asociada conjuntamente a viento y oleaje ha sido la verificación del número de instantes no operativos de entre el número total de datos simultáneos disponibles (27948). Como ejemplo, a continuación se muestra un breve extracto de la tabla de datos simultáneos generados.

Año	Mes	Día	Hora	H_W (M)	DIR_W	V_V (M/S)	DIR_V	Nivel	Visibilidad
1998	7	1	0	0.7	339	2.2978255	52	999	999
1998	7	1	1	0.8	339	1.1424208	35	999	999
1998	7	1	2	0.8	336	0.498202	336	999	999
1998	7	1	3	0.9	333	0.7716716	260	999	999
1998	7	1	4	0.9	329	0.5936957	247	999	999
1998	7	1	5	0.8	326	2.4507387	272	999	999
1998	7	1	6	0.8	325	2.8676942	240	999	999
1998	7	1	7	0.9	322	3.6052479	219	999	999
1998	7	1	8	0.8	318	4.9877794	226	999	999
1998	7	1	9	0.9	316	5.2681327	240	999	999
1998	7	1	10	0.9	319	4.927812	317	999	999
1998	7	1	11	1	316	3.8680791	300	999	999
1998	7	1	12	1.2	314	4.4286339	296	999	999
1998	7	1	13	1.5	315	4.8205207	300	999	999
1998	7	1	14	1.9	317	6.9263185	320	999	999
1998	7	1	15	2.2	319	5.5099834	306	999	999
1998	7	1	16	2.6	323	4.9609729	286	999	999
1998	7	1	17	3.2	326	5.7333611	295	999	999
1998	7	1	18	3.2	326	5.5938283	288	999	999
1998	7	1	19	2.9	330	6.3209008	285	999	999
1998	7	1	20	2.7	334	6.7964388	288	999	999
1998	7	1	21	2.6	333	7.5798251	284	999	999
1998	7	1	22	2.8	332	8.8948423	265	999	999
1998	7	1	23	2.8	325	9.0902838	277	999	999
1998	7	2	0	3.2	328	9.2579735	274	999	999

Tabla 8

La excedencia de las condiciones límite para un buque tanque de 150.000 TPM durante la maniobra de entrada ha sido de **666 h**. Para ello se han contabilizado los fallos por oleaje y viento y niebla, ya que el nivel de marea no resultaba limitativo.

Operatividad	Horas no operativas anuales	Número total datos	Cuenta fallos clima	Cuenta fallos nivel	Cuenta fallos niebla	Cuenta fallos olas viento
0.92410926	664.802917	27.948	2.079	0	586	1.498
0.92368121	668.552566	27.948	2.091	0	601	1.498
0.92474583	659.226508	27.948	2.065	0	576	1.498
0.92331262	671.781456	27.948	2.093	0	603	1.498

horas no op promedio: 666.1

Tabla 9

Dado que las simulaciones de entrada y salida se han realizado para los distintos buques y atraques, las condiciones límite han podido variar ligeramente para el mismo buque si su puesto de atraque era diferente.

De la totalidad de buques y caso simulados, durante las maniobras de navegación no se han obtenido valores menores de **483 h** de excedencia para los valores límite recogidos durante las maniobras de salida y 784 h.

El estudio fue realizado para todos los buques ensayados, maniobras de entrada y salida, incluyendo el atraque y desatraque.

El número de horas de excedencia de condiciones límite en los atraques fue calculado por el mismo procedimiento.

Los resultados finales obtenidos están permitiendo mejorar aspectos constructivos que permitirán reducir el número de horas de excedencia de las condiciones límite.