



IX CONGRESO NACIONAL DE LA ATPYC

02-04 OCTUBRE 2024 | A CORUÑA

CONTRIBUCIÓN DE PUERTOS Y COSTAS A LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA



La Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPYC) celebra en A Coruña del 2 al 4 de octubre de 2024 una nueva edición de su congreso nacional, que en esta ocasión alcanza ya su novena edición. Una iniciativa que se encuentra plenamente consolidada en el calendario de cuantos trabajamos en el sector portuario y costero, que vemos en el congreso una oportunidad de compartir conocimientos y experiencias técnicas de interés para el sector. Desde la Asociación estamos seguros de que esta nueva edición del congreso ofrece, como ha ocurrido en todas las ediciones anteriores, una alta calidad tanto en las ponencias técnicas que se presenten como en el debate que surja de ellas.

Para 2024 el lema elegido ha sido “Contribución de puertos y costas a la transición energética”, un campo de plena actualidad y que está marcando, y lo seguirá haciendo con más fuerza en los próximos años, el desarrollo del conjunto de la sociedad, y del que nuestro sector, como cualquier otro, no puede permanecer al margen. Pretendemos que sea un congreso abierto a múltiples temas, puesto que la transición energética es un elemento transversal que atraviesa el conjunto de procesos y actividades a la que nos enfrentamos en nuestra actividad profesional: estrategias de adaptación al cambio climático, nuevos combustibles, retos en el desarrollo de la eólica marina, proyectos working with nature, nuevas tecnologías etc. Todos estos aspectos tienen cabida en la temática del congreso, lo que entendemos ayuda a configurar un programa de amplio espectro e interés para el colectivo técnico que conforma la ATPYC.

Es un momento propicio para la reflexión acerca de cuáles son los aspectos y los retos a los que la técnica portuaria y costera deberá hacer frente en los próximos años, y debemos ver esta situación como una oportunidad y nunca como una amenaza. El congreso de A Coruña 2024 se configura como un escenario que permite aportar conocimiento y valor añadido a la planificación, diseño, construcción y explotación de nuestras infraestructuras, abriendo camino hacia nuevas formas de trabajar, que hoy pueden resultar novedosas, pero que en un futuro cercano es de esperar que estén plenamente consolidadas.

Finalizo agradeciendo la inestimable colaboración que nos brindan tanto Puertos del Estado como la Autoridad Portuaria de A Coruña como anfitriona, sin cuyo entusiasta apoyo, aliento y dedicación no habría sido posible desarrollar esta iniciativa.

MANUEL ARANA BURGOS

Presidente de la Asociación Técnica de Puertos y Costas



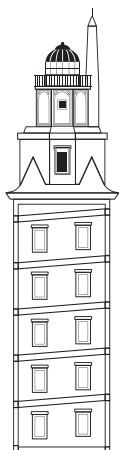
Autor: Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPyC)

Edita: Asociación Técnica de Puertos y Costas (ATPyC)

Imprime: V.A. Impresores, S.A.

Depósito Legal: M-20083-2024

Edición: Octubre 2024



IX CONGRESO NACIONAL DE LA ATPYC

02-04 OCTUBRE 2024 | A CORUÑA

CONTRIBUCIÓN DE PUERTOS Y COSTAS A LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA



Asociación
Técnica de
Puertos y
Costas



Puertos del Estado



Puerto de A Coruña
Autoridad Portuaria de A Coruña

COMITÉ ORGANIZADOR

Álvaro Rodríguez Dapena

Presidente de Puertos del Estado

Martín Fernández Prado

Presidente Autoridad Portuaria de A Coruña

Pilar Parra

Directora Corporativa Puertos del Estado

Angustias Lerín del Abril

Dirección Corporativa. Jefe de Protocolo y Eventos Corporativos. Puertos del Estado

Juan Diego Pérez Freire

Director de la Autoridad Portuaria de A Coruña

Manuel Arana Burgos

Director de Planificación y Desarrollo. Puertos del Estado. Presidente ATPyC

Ana Lope Carvajal

Jefe de Área de Planificación de Infraestructuras. Puertos del Estado. Junta Directiva de la ATPyC

Ramón Castro González

Jefe de División de Relaciones Institucionales y Comunicación de la Autoridad Portuaria de A Coruña

COMITÉ TÉCNICO

Andrés Guerra Sierra

Jefe de Departamento de ASG. Autoridad Portuaria de A Coruña

Victoria Bajo González

Jefe de Departamento de Infraestructuras. Autoridad Portuaria de A Coruña

Itziar Rodríguez Aguirre

Jefe de Área de Evaluación Ambiental de Proyectos y Planes. Puertos del Estado

Ana Lope Carvajal

Jefe de Área de Planificación de Infraestructuras. Puertos del Estado. Junta Directiva de la ATPyC

Ana Ulloa Piñeiro

Fundadora y Directora Aporta Consultores Estratégicos S.L. Junta Directiva de la ATPyC

Noelia González Patiño

Jefe del Servicio de Obras Marítimas. Dragados. Junta Directiva de la ATPyC

Ignacio de la Peña Zarzuelo

Consejero Delegado Retailgas. Junta Directiva de la ATPyC

JUNTA DIRECTIVA

Presidente

Manuel Arana Burgos

Puertos del Estado

Secretaria:

Ana Lope Carvajal

Puertos del Estado

Rafael Aznar Alonso

D-Marín

Sara Calvo Fernández

Mcvahera

José M^a Gómez Fuster

Autoridad Portuaria de Cartagena

Noelia González Patiño

Dragados

Iñaki Lasfuentes Martínez

Prosertek

Alfonso Peña López-Pazo

Autoridad Portuaria de Huelva

Ignacio de la Peña Zarzuelo

Retailgas

Juan Antonio Rodríguez Pardo

Portos de Galicia

Ana Ulloa Piñeiro

Aporta Consultores

Prólogo

Celebramos este año 2024 la novena edición del Congreso Nacional de la Asociación Técnica de Puertos y Costas, para la que se ha elegido como temática principal la contribución de nuestro sector al proceso de transición energética en el que estamos inmersos, y que se configura sin duda como un reto capital al que, como sociedad, hemos de hacer frente.

Desde el punto de vista del sistema portuario de titularidad estatal, en línea con lo marcado dentro del nuevo Marco Estratégico que está vigente desde octubre de 2022, trabajamos en una estrategia basada en fomentar, desde nuestro papel de Administración Pública, políticas de mejora del desempeño ambiental, que no se circunscriban estrictamente a lo que es la actividad de la Autoridades Portuarias, sino que se extiendan al resto de las actividades y actores dentro del puerto y se irradian al conjunto del sector logístico y a la cadena del transporte, lado mar y lado tierra, en la que estamos inmersos. Este compromiso de mejora medioambiental se configura como un elemento básico para hacer de nuestros puertos enclaves estratégicos que contribuyan a un desarrollo sostenible de nuestra economía y nuestra sociedad, como plantea el propio Marco Estratégico al colocar en pie de igualdad las tres dimensiones en las que este documento se sustenta; la dimensión económica, la dimensión ambiental y la dimensión social.

Esta estrategia medioambiental está, además, sustentada por un amplio conjunto de requerimientos normativos que se han venido desarrollando a lo largo de los últimos años a diversos niveles, a través de los cuales los distintos poderes legislativos han plasmado la importancia fundamental que otorgan a esta problemática, poniendo sobre la mesa diversas exigencias y requerimientos que habrá que poner en práctica al objeto de hacerle frente.

Así, y sin ánimo de resultar exhaustivo, merece la pena mencionar por su especial impacto, que, en línea con el acuerdo de la COP-21 celebrada en París en 2015, las instituciones europeas han venido reforzando en los últimos años su política en este campo. La Comisión Europea presentó en 2018 una estrategia (COM 2018 773) para una economía climáticamente neutra en 2050, para, con posterioridad, lanzar el Pacto Verde Europeo,

el cual incluye un paquete de medidas orientadas a liderar desde Europa una transición 'justa' hacia una economía limpia y descarbonizada. En esta línea de acción se enmarca el paquete 'fit for 55' que adelanta a 2030 un conjunto de exigentes compromisos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que para el caso concreto del transporte marítimo y los puertos se plasman singularmente a través de los reglamentos AFIR y FueEU Maritime, así como en la extensión de la Directiva de ETS al ámbito marítimo. Además de compromisos que vienen articulándose a través de otras organizaciones internacionales, singularmente OMI, de impacto directo en nuestra actividad. Y desde un punto de vista nacional, destacar que en España el artículo 16 de la Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y de transición energética, incorpora un capítulo específico para el transporte marítimo y los puertos.

En relación con los requerimientos que los paquetes legislativos imponen, en los próximos años avanzaremos de forma intensa en líneas de trabajo encaminadas a la descarbonización del transporte marítimo, tales como la electrificación de muelles (servicio OPS) o los desarrollos de los servicios de suministro a buques de nuevos combustibles de baja huella o neutros en carbono. En este último caso, los puertos y sus entornos más próximos se configuran como elementos clave en la política de generación, almacenamiento, distribución y suministro de estos nuevos combustibles, aspectos que serán tratado de forma específica a lo largo del congreso.

Y a todo lo anterior no podemos dejar de añadir en papel que van a tener que jugar los puertos como elementos clave de apoyo al sistema energético nacional en lo que se refiere a la generación de energía limpia, singularmente la eólica marina, a la que este Congreso presta una especial atención. En este ámbito, el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030 (PNIEC), que proporciona el marco director del programa de inversiones y reformas para una transición energética y ambiental que desarrolle las capacidades estratégicas de la economía verde en España, contempla el desarrollo de una estrategia española para el despliegue de la eólica marina y las energías del mar, coordinada con los "Planes de Ordenación del Espacio

Marítimo” (POEM), en los que se identifican las zonas para la ubicación de las instalaciones eólicas marinas en las diferentes demarcaciones marinas españolas.

Dicha estrategia se ha desarrollado en la “Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica Marina y las Energías del Mar en España” y en ella se establece como objetivo un desarrollo de la eólica marina en España que permita disponer a corto plazo de una potencia instalada de entre 1-3 GW antes de 2030. En este marco, y extrapolando su futuro más allá del horizonte 2030, se espera que el desarrollo del mercado a nivel nacional tenga una evolución acelerada en los próximos años que habrá que atender, para lo cual las instalaciones portuarias son elementos indispensables, particularmente en el caso de la tecnología flotante, teniendo en cuenta que las dimensiones de los diversos componentes asociados hacen que su montaje y transporte, y en muchos casos la propia fabricación, sólo se puedan llevar a cabo en puerto, dada la inviabilidad de que estas estructuras se puedan trasladar mediante transporte terrestre.

Dicho todo lo anterior, la temática de “contribución de puertos y costas a la transición energética”, dada su plena actualidad y su importancia para el futuro del sector, se configura como referencia argumental del congreso, al hilo de la cual se irán desarrollando el conjunto de ponencias y presentaciones que se recogen en el presente libro.

No quiero terminar sin agradecer el papel activo de la Autoridad Portuaria de A Coruña como anfitriona del evento y felicitar al Comité Técnico a la hora de diseñar un programa de gran interés para el sector. Estoy convencido de que este IX Congreso será un éxito y animo a la Asociación Técnica de Puertos y Costas a continuar con esta línea de trabajo que contribuye sin duda, a un mejor desarrollo de nuestros puertos.

Álvaro Rodríguez Dapena

Presidente de Puertos del Estado
Presidente de Honor de la Asociación Técnica de Puertos y Costas

Índice

Metodología de elaboración del Índice de resiliencia operativa portuaria y propuesta de cuantificación económica Estefanía Couñago Blanco, Fernando José León Mateos, Carlos Rodríguez-García	9
Estrategia de Adaptación de las Infraestructuras y Servicios Portuarios para el Establecimiento de Nuevas Empresas de Energías Renovables Vinculadas al Hidrógeno Verde Fermín Rol Rol	15
Transición energética en el Puerto de Huelva e infraestructuras asociadas Rocío López Picón	19
La descarbonización del Transporte Pesado como oportunidad industrial en los Puertos Aitor Arzuaga Munsuri	25
Abordando los Retos del Cálculo de la Huella de Carbono en Puertos Españoles: Implicaciones para la Descarbonización del Sector Marítimo Sara Calvo Fernández, Victoria Ferreiroa Ruibal, Julián García Rodríguez	29
Inclusión de nuevos materiales bajos en carbono en las licitaciones de las obras portuarias César Bartolomé Muñoz, Rafael Rueda Arriete	37
Transición energética del ecosistema de puertos, marinas y cofradías de pescadores de Catalunya: Metodología para la definición de las Estrategias Jordi Garriga, Xavier Pascual	43
Protocolo certificado de acceso y salida de buques. Puerto exterior de A Coruña José Ramón Iribarren, Raúl Atienza, Carlos B. Cal, Andrés Guerra, Juan Diego Pérez Freire	51
Optimización del binomio seguridad-operatividad en el Puerto Exterior de Punta Langosteira mediante Inteligencia Artificial Andrés Figuero, Humberto Carro, José Sande, Enrique Peña, Raquel Costas, Alberto Alvarelos, Juan Rabuñal, Andrés Guerra, Juan Diego Pérez	61
Recomendaciones de seguridad marítima para las Instalaciones Renovables Marinas Juan Marcos Gómez Menchón, Federico Navarro Cabrera	69
Monitorización del ruido submarino en la Bahía de Algeciras para el seguimiento y protección de cetáceos Fidel Ruiz Torres	77
Nuevos desarrollos en la caracterización de la energía undimotriz en puertos Antonio Tomás, Cristina Casal, Eva Romano-Moreno, Álvaro Rodríguez Luis, Gabriel Díaz-Hernández, Alejandro González Valle, Raúl Guanchez	83

Diseño y modelización de dispositivos de energía undimotriz instalados en diques: prototipo en el Puerto de Valencia	
Carlos Quijada, Diego Simón, José Landete, Javier Abanades	93
Instalación de pila de hidrógeno verde en el Puerto de Palma. Proyecto <i>Green Hysland</i>	
Rafael Grau Grau, Cristina Alburquerque Otero, Jorge Martín Jiménez	103
Peiraos do solpor	
Gerardo González Álvarez, Elisa Romero González, Francisco Barreiro Romano	111
Simulación predictiva de los requerimientos de Onshore Power Supply (OPS) en Puertos	
Raúl Redondo, Raúl Atienza, José Ramón Iribarren, Arturo Medio, Luis Ulla	117
Despliegue del OPS en Algeciras y Tarifa	
Manuel Díaz Gómez, Francisco Iglesias Andrades	125
Los puertos para la industria eólica marina flotante. Perspectiva de un promotor	
Daniel González Martín, Brice Le Normand, Walid Oulmane, Jorge Porres Sánchez-Chiquito	131
TRIWIND. Plataforma Flotante para la industria FOW	
Ismael Verdugo, Javier Berenguer, Gonzalo Berenguer	139
Desarrollo de parques eólicos con tecnología flotante en España y en Europa: Retos y oportunidades para los puertos españoles	
José-Luis Monsó, Thomas Conduché	149

Metodología de elaboración del Índice de resiliencia operativa portuaria y propuesta de cuantificación económica

Estefanía Couñago Blanco

Investigadora, Universidade de Vigo, e.blanco@uvigo.gal

Fernando José León Mateos

Investigador, Universidade de Vigo, f.leon@uvigo.gal

Carlos Rodríguez-García

Investigador, Universidade de Vigo, c.rodriguez@uvigo.gal

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es uno de los retos más importantes a los que se enfrenta la sociedad de nuestros días. Entre sus consecuencias, en las próximas décadas se prevén importantes interrupciones en los sistemas socioeconómicos globales (Howard-Grenville *et al.*, 2014). Esto se debe, en gran medida, al aumento gradual en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos y a la subida del nivel del mar (IPCC, 2022). Bajo estas condiciones, las comunidades costeras son especialmente vulnerables debido a su exposición directa a dichos eventos. Los puertos, en su condición de nodos clave de las cadenas de suministro globales, se erigen en infraestructuras críticas que presentan un alto nivel de vulnerabilidad a los efectos del cambio climático. En este contexto, los encargados de la toma de decisiones necesitan herramientas que les faciliten la toma de decisiones en lo referente a las tareas de adaptación a la nueva realidad. El presente estudio recoge el diseño metodológico del índice de resiliencia portuaria (IRP) desarrollado en el **puerto exterior de A Coruña**, que, incluyendo a todas las partes interesadas, permite determinar el nivel de resiliencia operativa de los procesos portuarios ante el cambio climático. Nuestra metodología, secuenciada en varias fases, permite además estimar los costes económicos, tanto directos como indirectos, de las decisiones adoptadas para adaptarse al cambio climático.

2. ÍNDICE DE RESILIENCIA PORTUARIO

El índice de resiliencia portuaria es una herramienta estratégica orientada a facilitar la toma de decisiones. Su finalidad es definir una serie de medidas específicas y focalizar los recursos en aquellas áreas donde tendrán una mayor repercusión en la resiliencia global del Puerto. La metodología diseñada para el desarrollo del índice de resiliencia (Figura 1), se desarrolla en las tres fases que se detallan a continuación (León-Mateos *et al.*, 2021).

2.1. Contextualización

En primer lugar, se procedió a identificar los *stakeholders* del Puerto, personas expertas en los distintos ámbitos relacionados con la temática (cambio climático, infraestructuras, operativa, etc.) y los principales procesos operativos. A continuación, mediante un proceso de revisión de literatura y con la colaboración de la Autoridad Portuaria, Meteogalicia, CETMAR y el grupo de investigación GEAMA de la Universidad de A Coruña, se determinaron los distintos condicionantes que tienen influencia en el Puerto.

Por un lado, los condicionantes internos, entendidos como las características propias del Puerto, el capital humano existente o los factores de resiliencia, es decir, aquellos factores de los que el puerto dispone o podría disponer

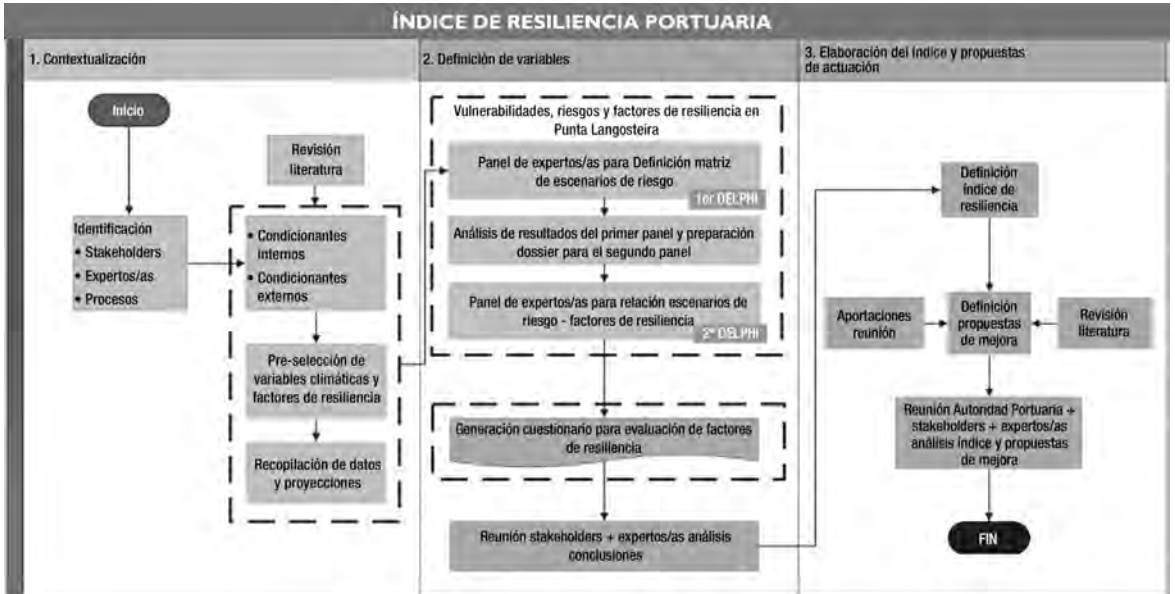


Fig. 1. Metodología de desarrollo del índice de resiliencia portuario.

para mejorar su resiliencia. En total se identificaron 20 de estos factores agrupados en 5 dimensiones de resiliencia (gobernanza, colaboración y comunicación, infraestructuras y equipamientos, capacidad de adaptación, y gestión del riesgo).

Por otro lado, los condicionantes externos, que pueden ser no climáticos como las condiciones socioeconómicas del entorno, o climáticos y oceánico-meteorológicos (precipitaciones, la altura del oleaje, velocidad del viento, ...) definidos según una línea base establecida en 2018 y una serie de proyecciones para 2050 según un escenario de Vía de Concentración Representativa (RCP) 8.5 (pesimista).

2.2. Definición de variables

Esta fase se centra en determinar en qué medida puede afectar el cambio climático al Puerto y cómo éste puede afrontar sus posibles impactos negativos. A tal efecto y empleando la metodología Delphi, se pidió a un total de 22 personas expertas identificadas en la fase anterior que, durante tres rondas, valorasen en qué medida los 8 elementos oceánico-meteorológicos suponían un riesgo para los 12 procesos portuarios identificados en la fase de contextualización.

Los participantes respondieron al cuestionario de forma anónima. Después de cada sesión, se les proporcionó información agregada sobre los resultados para que pudieran converger lo más posible en sus puntuaciones durante la siguiente ronda.

Como resultado, se obtuvo un total de 13 escenarios de riesgo medio y alto. Estos escenarios, junto con los factores de resiliencia identificados en la fase anterior conformaron una segunda consulta Delphi que, en este caso, permitió conocer en qué medida cada uno de los factores de resiliencia contribuye a minimizar el riesgo de los 13 escenarios. A continuación, se elaboró un cuestionario para determinar, mediante la consulta a stakeholders, el grado de desempeño del puerto en cuanto a los factores de resiliencia.

2.3. Elaboración del índice y propuestas de mejora

En la última fase, se desarrolla el índice de resiliencia del Puerto (IRP) para determinar el margen de mejora existente en cuanto a la adaptación del Puerto al cambio climático. Empleando los datos obtenidos en la fase de definición de variables, el IRP se calculó de la siguiente manera (Figura):

$$IRP = \beta_1 Dm_1 + \beta_2 Dm_2 + \beta_3 Dm_3 + \dots + \beta_n Dm_n (2)$$

Donde:

$\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ = pesos obtenidos tras la normalización de los resultados Delphi.

Dm_1, Dm_2, \dots, Dm_n = valores que los stakeholders otorgaron a las dimensiones de resiliencia según el cuestionario de autoevaluación.

Como resultado de la aplicación de este modelo al caso del Puerto Exterior de A Coruña, se obtuvo el siguiente resultado, donde la puntuación mínima (resiliencia nula) es 0 y la máxima (total resiliencia) es 1.000:

$$\begin{aligned} IRP &= 195 * 65,06\% + 193 + 61,94\% + 217 * \\ &48,15\% + 202 * 47,47\% + 193 * 36,95\% \\ &\quad \downarrow \\ IRP &= 518 \end{aligned}$$

Cabe destacar que este resultado no pretende ser una evaluación del desempeño, sino mostrar cuál es el margen

de mejora de la resiliencia del Puerto y qué factores de resiliencia se debe actuar para lograrlo, con el fin de orientar los esfuerzos del puerto hacia aquellas áreas en las puedan suponer un mayor impacto.

De este modo, el IRP permite desagregar los resultados tanto por d como por factor de resiliencia. Por ejemplo, según el resultado anterior se puede extraer que las dimensiones que, en ese momento, aportaban una mayor resiliencia al Puerto eran el de gobernanza y el de colaboración y comunicación, con 127 puntos sobre 195 y 120 sobre 193, respectivamente. No obstante, la dimensión de mayor peso a la hora de determinar la resiliencia fue el de "Infraestructuras y equipamientos" que, según los resultados del índice, contaba con un amplio margen de mejora.

Finalmente, a la vista de estos resultados y tras la celebración de un taller en el que participaron las personas expertas, los stakeholders y miembros de la Autoridad Portuaria, se definieron una serie de propuestas de actuación dirigidas a reducir dicho margen. El resultado fueron 18 propuestas de actuación agrupadas en 5 líneas de adaptación, tal y como se muestra en el ejemplo de la tabla 1.

Línea de adaptación	Desarrollo de modelos de predicción más eficientes
1	
OBJETIVO	
Anticipar la evolución de los elementos climáticos y oceánico-meteorológicos más críticos en el entorno portuario de A Coruña con mayor fiabilidad y antelación de modo que permitan establecer medidas de adaptación y operativas más efectivas.	
PROPUESTAS DE ACTUACIÓN	
PRIORIDAD	
1.1. Reforzar la captación de datos climáticos y oceánico-meteorológicos, tanto en el exterior como en el interior del Puerto.	Alta
1.2. Establecer un protocolo de seguimiento de la evolución de los modelos climáticos y unos criterios umbral que permitan estimar su posible afectación al Puerto.	Media
1.3. Sistematizar un proceso de diálogo entre quienes realizan las predicciones/proyecciones climáticas y oceánico-meteorológicas y los destinatarios de las mismas.	Media
1.4. Realizar periódicamente un proceso de prospectiva con personas expertas en el que, además de las proyecciones climáticas y oceánico-meteorológicas, se traten las tendencias futuras en los procesos y operativa portuaria, así como en las tecnologías navales.	Baja

Tabla 1. Ejemplo de línea de adaptación y las correspondientes propuestas de actuación.

3. Evolución del índice

3.1. Segunda medición

Desde que se realizó la primera evaluación de la resiliencia operativa mediante el IRP en 2019, la APAC ha puesto en marcha una serie de medidas susceptibles de afectar a la resiliencia del puerto exterior de A Coruña.

Para evaluar la evolución de la resiliencia del Puerto Exterior de A Coruña tras la aplicación de estas medidas, se realizó una segunda evaluación utilizando el IRP en octubre de 2021 (Couñago-Blanco *et al.*, 2024). La Tabla 2,

muestra la comparación de los resultados obtenidos en las dos evaluaciones.

En esos dos años, la puntuación del IRP ascendió a 640. Además, se registró un aumento significativo en la resiliencia operativa (más del 30%) en la dimensión de gestión de riesgos en este mismo período. Así, el nivel de resiliencia del puerto exterior de A Coruña muestra una mejora de 122 puntos con respecto a 2019.

Esto permitió no solo validar el indicador propuesto como una herramienta para evaluar y mejorar la resiliencia portuaria, sino también determinar la efectividad de las medidas

	Ponderación	Estado en 2019	Estado en 2021
Gobernanza	195	65,06%	68,49%
Colaboración y comunicación	193	61,94%	68,61%
Infraestructuras y equipamientos	217	48,15%	58,13%
Capacidad de adaptación	202	47,47%	57,52%
Gestión del riesgo	193	36,95%	68,23%

Tabla 2. Comparativas mediciones IRP puerto exterior A Coruña (2019-2021).

llevadas a cabo (es decir, medidores de calado, colaboración con las partes interesadas para adoptar medidas que contribuyan a la autosuficiencia energética del puerto, primeros pasos para convertirse en un puerto verde, etc.).

recto como indirecto del cambio climático (Figura 2). Además, estos datos nos permitirán analizar, desde un punto de vista económico, la correlación existente entre el aumento de la resiliencia y la reducción los costes provocados por el cambio climático.

3.2. Cuantificación económica del impacto en caso de inacción

Actualmente, se está desarrollando una cuarta fase que permitirá la cuantificación económica del impacto tanto di-

La estimación del **impacto directo** se determinará teniendo en cuenta principalmente dos aspectos. Por un lado, la interrupción de la actividad portuaria, la cual se cuantificará determinado los días en que cada proceso se ve afectado por los escenarios de riesgo prioritarios pre-

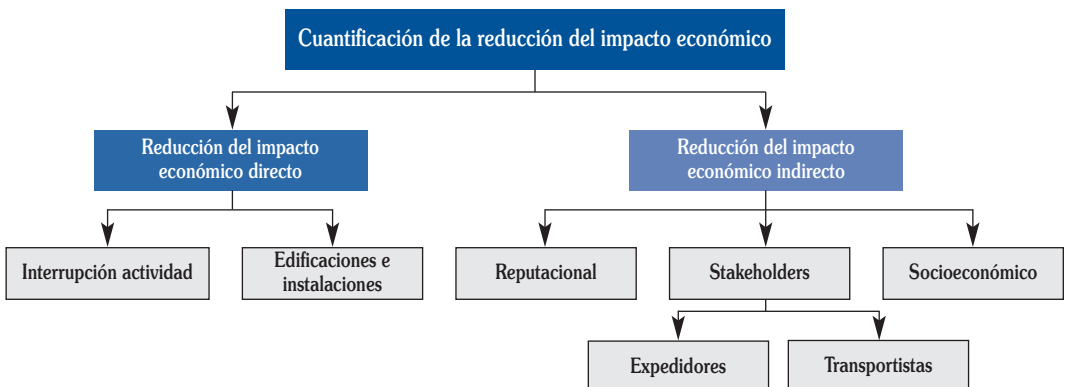


Fig. 2. Tipología de impactos a cuantificar. Fuente: Elaboración propia.

viamente identificados para, seguidamente, asignar un coste diario a la interrupción de cada proceso:

$$CA = \sum (C_{id} * d_{int} * BFR)$$

Donde:

C_{id} = Coste de interrupción diario.

d_{int} = días medios de interrupción.

β = ponderación Factor Resiliencia/Escenario riesgo.

FR = Desempeño por Factor Resiliencia

Por otro lado, el daño a las edificaciones e instalaciones portuarias. Esto se cuantificará a través del coste total de reparación de las edificaciones/instalaciones potencialmente afectadas por eventos de inundación derivados de los escenarios de riesgo. El coste total de reparación se calcula mediante la fórmula adaptada de Karagiannis *et al.* (2019) para infraestructuras eléctricas:

$$TRC = \sum_{i=1}^n f(x_i) RV_i \quad (2)$$

Donde:

i : 1, 2, ..., n = edificación/instalación perteneciente a cada tipo.

RV_i = valor de reemplazo de cada edificación/instalación.

$f(x_i)$ = función de profundidad-daño del tipo de edificación/instalación.

x_i = profundidad de la inundación en cada edificación/instalación i .

En cuanto al **impacto directo**, este estaría formado por tres aspectos. En primer lugar, el impacto reputacional. La frecuencia de desastres naturales en un puerto específico puede impactar directamente a los distintos agentes que operan en el mismo. Un puerto que sufre este tipo de eventos con regularidad, inevitablemente se vuelve menos atractivo para los inversores y los clientes. Además, las compañías de seguros podrían aplicar recargos al valor de la carga transportada y entregada dado el alto riesgo que supone esta situación (Zhang y Lam, 2015; Zhang *et al.*, 2020). Según estos autores este cálculo se llevaría a cabo bajo la siguiente fórmula (Zhang *et al.*, 2020):

$$C_{reputacional} = v u_{ij} T r_{recargo} \quad (3)$$

Donde:

v = valor promedio por tonelada o TEU.

u_{ij} = rendimiento diario en toneladas o TEU.

T = tiempo de interrupción en días.

$r_{recargo}$ = tasa de recargo.

En segundo lugar, está el impacto sobre los stakeholders. Cuando los puertos se ven afectados por eventos climáticos extremos, los expedidores son los primeros en sufrir pérdidas. Principalmente, estas pérdidas están compuestas por dos tipologías de costes: el coste de inventario y el coste de oportunidad (Qu & Meng, 2012). La pérdida de inventario se refiere a los costes de almacenamiento de la carga durante la interrupción del transporte, generalmente calculados en función del valor del inventario. Por su parte, el coste de oportunidad está relacionado con el poder adquisitivo actual del dinero y puede variar en el futuro, estimándose a través de intereses o inflación acumulada (Zhang y Lam, 2015; Zhang *et al.*, 2020). Así, la pérdida económica total es la suma de ambos componentes (Zhang *et al.*, 2020):

$$C_{expedidores} = I u_{ij} T + MARR \cdot v u_{ij} T \quad (4)$$

Donde:

I = coste diario de inventario de la carga por tonelada o TEU.

$MARR$ = tasa mínima atractiva de retorno.

Tras los expedidores, los transportistas son los siguientes en sufrir pérdidas económicas tras la ocurrencia de eventos extremos. Estas pérdidas suelen incluir los costes que enfrentan al no poder generar ingresos durante la interrupción del puerto. En el ámbito del transporte marítimo, una empresa de línea se compromete a cumplir con un tiempo de entrega, y el transportista asume los riesgos de cualquier retraso. Por ello, la tarifa de flete se utiliza para calcular las pérdidas de los transportistas. Este componente de pérdida se estima mediante (Zhang y Lam, 2015; Zhang *et al.*, 2020). Por lo tanto, el coste para los transportistas se calculará de la siguiente manera (Zhang *et al.*, 2020):

$$C_{transportistas} = R u_{ij} T \quad (5)$$

Donde:

R = tarifa de flete de la carga por tonelada/TEU por día.

En tercer y último lugar, el impacto sobre el entorno socioeconómico del Puerto: determinando el efecto en cascada de la interrupción del puerto, y cómo afecta esto a la producción, el empleo y otros aspectos de la economía local y regional mediante los multiplicadores input-output (Verschuur *et al.*, 2022). La mayoría de los autores (ej.,

Frechtling and Horváth, 1999; Miller and Blair, 2009; Ke ek *et al.*, 2016; Surís-Regueiro y Santiago, 2018; Li *et al.*, 2013) recomiendan el uso de estos multiplicadores por tener en cuenta que los efectos sobre la renta, producción o empleo varían de acuerdo con el sector donde se produzca el incremento inicial del gasto. El análisis input-output permite observar los efectos de retroalimentación que un shock inicial en la demanda final (en este caso la ocurrencia de eventos oceánico-meteorológicos extremos) produce sobre las diferentes ramas productivas como consecuencia de las interrelaciones entre ellas. En este sentido, las tablas input-output (TIO) ofrecen una visión cuantitativa de las interdependencias entre los diferentes agentes económicos (empresas, familias, administraciones públicas) que tienen lugar en el territorio de referencia.

4. AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, este trabajo no habría sido posible sin la colaboración de la Autoridad Portuaria de A Coruña, en especial de su jefe del Dpto. de Sostenibilidad, Andrés Guerra. Asimismo, se contó con la colaboración de Meteogalicia, del Centro Tecnológico del Mar y del grupo de investigación GEAMA de la Universidade da Coruña. Por otra parte, este proyecto ha recibido apoyo financiero del programa de la Unión Europea Interreg V-A España-Portugal (POCTEP) 2014-2020, a través de 0262_MARRISK_1_E, y del proyecto de I+D+i PID2022-136983NB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033/FEDER, EU.

5. REFERENCIAS

COUÑAGO-BLANCO, E., LEÓN-MATEOS, F., SARTAL, A., & LÓPEZ-MANUEL, L. (2024). *Improving the Resilience of Seaports to the Effects of Climate Change Port Resilience Index as a Tool for Decision-Making*. En *Handbook of Energy and Environment in the 2021st Century*. Technology and Policy Dynamics. ASIF, M.; GULLER, S. & KHALID, M. London: Ed. CRC Press.

FRECHTLING, D. C., & HORVÁTH, E. (1999). Estimating the multiplier effects of tourism expenditures on a local economy through a regional input-output model. *Journal of travel research*, 37(4), 324-332.

J. HOWARD-GRENVILLE, S. BUCKLE, B. HOSKINS, & G. GEORGE (2014). Climate change and management, *Acad. Manag. J.* 57 (3) 615–623.

KARAGIANNIS GM, CARDARILLI M, TURKSEZER ZI, SPINONI J, MENTASCHI L, FEYEN L, & KRAUSMANN E (2019). "Climate change and critical infrastructure—storms". European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/986436>.

KE EK, D., AJDELA HRUSTEK, N., & DUŠAK, V. (2016). Analysis of multiplier effects of ICT sectors—a Croatian case. *Croatian Operational Research Review*, 7(1), 129-145.

LEÓN-MATEOS, F., SARTAL, A., LÓPEZ-MANUEL, L., & QUINTAS, M. A. (2021). "Adapting our sea ports to the challenges of climate change: Development and validation of a Port Resilience Index" en *Marine Policy*, (130, 104573).

LI, S., BOWDIN, G., HESLINGTON, E., JONES, C., JONES, S., MULLIGAN, J., ... & JAGO, L. (2013). The economic impact of the UK meeting & event industry. Meeting Professionals International Foundation.

MILLER, R. & BLAIR, P. (2009), *Input–Output Analysis. Foundations and Extensions*, Second Editions, Cambridge. Cambridge University Press.

SURÍS-REGUEIRO, J. C., & SANTIAGO, J. L. (2018). A methodological approach to quantifying socioeconomic impacts linked to supply shocks. *Environmental Impact Assessment Review*, 69, 104-110.

VERSCHUUR, J., KOKS, E. E., & HALL, J. W. (2022). "Ports' criticality in international trade and global supply-chains" en *Nature communications*, (13(1), 4351).

ZHANG, Y., & LAM, J. S. L. (2015). "Estimating the economic losses of port disruption due to extreme wind events" en *Ocean & Coastal Management*, (116, 300-310).

ZHANG, Y., WEI, K., SHEN, Z., BAI, X., Lu, X., & SOARES, C. G. (2020). Economic impact of typhoon-induced wind disasters on port operations: A case study of ports in China. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50, 101719.

QU, X., & MENG, Q. (2012). The economic importance of the Straits of Malacca and Singapore: An extreme-scenario analysis. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 258-265.

Estrategia de Adaptación de las Infraestructuras y Servicios Portuarios para el Establecimiento de Nuevas Empresas de Energías Renovables Vinculadas al Hidrógeno Verde

Fermin Rol Rol

Jefe de Área de Proyectos Estratégicos e Innovación. Autoridad Portuaria de Cartagena
ferminrol@apc.es

1. INTRODUCCIÓN

Desde el establecimiento en los años 50 de la primera refinería en el valle de Escombreras, el puerto de Cartagena ha sido uno de los principales puertos energéticos de España. La Unión Europea está implementando normas regulatorias e incentivos económicos con objetivos establecidos para 2030 y 2050, acelerado en 2021 con la guerra de Ucrania y el objetivo REPowerEU, junto además con una creciente presión de la opinión pública, para que la energía consumida en Europa, no solo la eléctrica, provenga de fuentes renovables, consiguiendo de esta forma la total descarbonización de la energía consumida en la Unión Europea.

Hoy en día el 20 % energía consumida en UE es de origen eléctrico y solo parte de esta energía eléctrica es de origen renovable (46 % en 2023). Se prevé cierta evolución energética hacia la eléctrica como pueden ser los coches eléctricos, consumos domésticos, etc. Aún así continuará existiendo una mayoría de energía consumida que no pueda ser atendida por la electricidad, como son ciertas industrias y movilidad de camiones, buques y aviones.

Esta transición requiere una evolución en el diseño energético europeo, tanto en el ámbito eléctrico como en el de la movilidad, hacia las energías renovables. Las industrias energéticas asentadas en el entorno del puerto de Cartagena, así como las nuevas industrias, deben adaptarse, pasando de ser, España y el puerto de Cartagena, un país eminentemente importador de hidrocarburos fósiles, a la producción de energías renovables, tanto en su vertiente eléctrica, como de movilidad, lo que representa una oportunidad histórica, tanto para España como para el puerto de Cartagena, el poder convertirnos por primera

vez en un país exportador de energía, principalmente de movilidad a través de los puertos españoles.

La transición energética hacia las energías renovables es una gran oportunidad para el puerto y las empresas existentes y futuras del valle de escombreras, ya que en el mismo se dan las posibilidades de aprovechamiento circular de recursos, tanto energéticos (frío/calor/energía renovable), como la reutilización de agua por medio de la depuración (99% en la Región de Murcia) o bien la desalación de agua de mar, utilizando para ello energías renovables

De esta forma el valle de Escombreras, además de evolucionar hacia un valle energético sostenible, también será un ejemplo internacional de economía circular.

Para cumplir con ese objetivo 2050, cualquier solución pasa por los combustibles sintéticos a base de hidrógeno verde: metanol verde, amoníaco verde, propio hidrógeno verde, etc.. El transporte de estos productos se podrá realizar por camión, o principalmente por tubería o buque, pudiéndose ser transportando también en alguna base aceitosa para que en destino se vuelva a segregar el hidrógeno verde.

El hidrógeno verde es un vector energético. Se necesitará más energía para producirlo, que la propia energía que genera.

Las zonas de producción de hidrógeno verde deben situarse en primer lugar cerca de las zonas de actual demanda de hidrógeno: refinerías de hidrocarburos, fábricas de fertilizantes y próximas a un puerto para la exportación de excedentes en buque.

Además, deberán estar situadas próximas a las zonas donde la producción de la energía renovable es más económica: en España actualmente fotovoltaica en el sur y eólica en zonas de vientos habituales.

2. DESARROLLO

Este cambio histórico en la matriz energética europea, que también se está planteando en otras partes del mundo, debe realizarse de manera gradual y a escala en los próximos años. Esto representa una oportunidad histórica para que los puertos situados cerca de estas nuevas zonas de producción energética puedan adaptar sus infraestructuras y servicios para satisfacer la nueva demanda de mercancías.

Históricamente, los puertos españoles, como gestores landlord, para las industrias de graneles líquidos, hemos facilitado suelo para concesiones e infraestructuras portuarias, principalmente pantalanes para atraques y superficies para la instalación de tuberías entre la concesión y el atraque.

3. NECESIDADES PORTUARIAS

Respecto a las necesidades portuarias para las nuevas energías, la Autoridad Portuaria debe ser proactiva en los siguientes aspectos:

1. Atraques: Por razones de economía en el transporte y métodos de producción energética, los volúmenes unitarios serán más reducidos, por lo que los atraques deben adaptarse a buques de menor porte que los actuales buques de crudo.
2. Superficies: Para estos desarrollos se requieren grandes superficies, que pueden no estar disponibles dentro del dominio público portuario, por lo que es necesario identificar suelos disponibles en el entorno portuario.
3. Rack de Tuberías: Una vez identificados y clasificados los suelos disponibles, la Autoridad Portuaria debe promover una vía de conexión entre dichos suelos y el puerto, tanto para transporte por carretera como, principalmente, por tubería.
4. Materia Prima - Agua: Para producir hidrógeno verde es fundamental disponer de agua industrial. La Auto-

ridad Portuaria debe facilitar que los organismos competentes o iniciativas privadas resuelvan esta situación en un horizonte de pocos años. Esta agua puede ser de segundo uso (procedente de depuradoras) o desalada.

5. Materia Prima - Electricidad: El hidrógeno verde no es una fuente de energía, sino un vector energético, por lo que se requiere una gran cantidad de energía de origen renovable. Es crucial disponer de capacidad suficiente en la red eléctrica para evitar cuellos de botella. La Autoridad Portuaria debe ser proactiva con el Ministerio de Industria y Puertos del Estado, así como con otros organismos para asegurar la capacidad de la red.
6. Otras Materias Primas: El hidrógeno verde, debido a su complejidad y costo en transporte, podría transportarse como metanol (requiere carbono) o amoníaco (requiere nitrógeno). Para el nitrógeno, se puede utilizar el aire, y para el carbono, fuentes renovables como el CO₂ biogénico. La Autoridad Portuaria debe identificar fuentes de emisión de CO₂ biogénico y promover la captación y transporte del mismo hasta los centros de producción de hidrógeno verde, así como la instalación de industrias especializadas en la captura del CO₂, ya que el biogénico por sí solo no podrá cubrir la demanda futura de todo el CO₂ que se va requerir.
7. Este papel promotor de la Autoridad Portuaria, debe realizarse por medio de colaboraciones innovadoras, tanto tecnológicas como administrativas, abarcando un espectro lo más amplio posible de agentes interesados que persigan estos fines. Además de definir bien el marco de colaboración, son piezas clave para el éxito, la obtención de posibles ayudas públicas innovadora, tanto EU, como nacionales, regionales y de los puertos 4.0, para el desarrollo y la eficiencia de estas nuevas formas de generar energías renovables. Todo ello, en colaboración con otros organismos y empresas, tanto nacionales, como europeas e internacionales

4. CONCLUSIÓN

Lejos de desviar estas industrias energéticas hacia otros lugares, esta situación representa una oportunidad histórica para los puertos españoles, localizados cerca de zonas de producción de energías renovables. La necesi-

dad de energía renovable es tan grande que se requerirán múltiples emplazamientos para cumplir con los objetivos europeos para 2050. España, con sus ventajas en costos energéticos, tiene la oportunidad de liderar esta

transición, no sólo a nivel Europea, sino también a nivel internacional, representando para los puertos españoles igualmente una oportunidad para planificar la adaptación a estas nuevas energías.

Transición energética en el Puerto de Huelva e infraestructuras asociadas

Rocío López Picón

Jefa Departamento Sostenibilidad y Transición Energética, Puerto de Huelva
rlp@puertohuelva.com

1. INTRODUCCIÓN

El nuevo marco estratégico de Puertos del Estado establece claramente la posición del Sistema Portuario respecto a la transición energética: “los puertos deben convertirse en punta de lanza de estas estrategias de mitigación rápida del calentamiento global”, asumiendo para ello inversiones e intervenciones directas o indirectas para alcanzar la neutralidad climática. Los puertos se enfrentan así a importantes desafíos, cobrando un papel protagonista para cumplir con los grandes objetivos de descarbonización.

El transporte marítimo, por su parte, se enfrenta a una transición global hacia fuentes de energía y combustibles alternativos. A día de hoy, los futuros combustibles presentan importantes retos, muchas soluciones tecnológicas aún no están maduras y no existe una única opción para la flota mundial.

La descarbonización está requiriendo grandes esfuerzos, investigaciones y desarrollos tecnológicos e inversiones públicas y privadas para la adaptación del sector marítimo y de las infraestructuras, instalaciones y servicios de los puertos, especialmente lo relativo a la producción, almacenamiento, suministro y distribución de energías y combustibles alternativos.

En el caso del Puerto de Huelva, al igual que en el resto, se están implementando soluciones orientadas a la descarbonización de la actividad portuaria, los servicios como el suministro eléctrico a buques, la dotación de infraestructuras eléctricas para atender demandas, instalaciones para la generación de energías renovables, etc. Este cambio energético será fundamental para la transición hacia un puerto neutro en emisiones.

Sin embargo, de forma adicional, el Puerto de Huelva como puerto industrial y eminentemente energético que es, está por otro lado, asumiendo un importante papel en la promoción e impulso de proyectos vinculados a la producción de nuevos combustibles que aporten valor al puerto y a las cadenas logísticas. Esto, lo posicionará como uno de los clústeres energéticos más importantes del Sur de Europa, y para ello se están desplegando elevadas inversiones públicas y privadas para que se desarrollen eficazmente las actividades logísticas e industriales relacionadas con los nuevos combustibles y nuevas formas de energía.

Todo esto va a transformar radicalmente el Puerto de Huelva, no sólo por la transición a la energía primaria consumida para lograr ser un puerto neutro en carbono, sino por la transformación de su sector industrial energético, de los tráficos asociados a los futuros combustibles, las nuevas redes de servicio para la logística de estos, el bunkering de combustibles alternativos, etc.

El Puerto de Huelva será un Puerto estratégico en el mapa de los nuevos combustibles, especialmente en la estrategia europea del hidrógeno verde y sus vectores energéticos asociados como el metanol y amoníaco verdes.

2. INSTRUMENTOS Y POLÍTICAS DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA RELACIONADAS CON LOS PUERTOS Y EL TRANSPORTE MARÍTIMO

Desde los compromisos adquiridos con el Acuerdo de París para limitar el calentamiento global por debajo de los 2 °C, realizando esfuerzos para limitarlo a 1,5 °C, el objetivo de la Unión Europea ha sido claro: alcanzar la de neutralidad climática en 2050, lo que implica reducir, al

menos, un 90% de las emisiones brutas totales de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990, para 2050, y el 10% restante será absorbido por los sumideros de carbono. Además, Europa ha establecido un ambicioso objetivo intermedio de reducción de las emisiones del 55% en 2030 con respecto a 1990, y también plantea alcanzar para 2050 un sistema eléctrico 100% renovable.

Estos objetivos se articulan en diferentes instrumentos destacando el Pacto Verde Europeo, la Ley Europea del Clima y el paquete “Fit for 55” que en Julio de 2021 establecía las medidas para ese primer hito de reducir las emisiones de GEI en un 55% en 2030, e ir avanzando así hacia la neutralidad climática europea en 2050.

Dentro de este paquete de medidas, las propuestas que, de mayor relevancia sobre el transporte marítimo, son Energy Tax Directive (ETD) Maritime, AFIR Reglamento de Infraestructuras de Combustibles Alternativos, EU ETS Maritime Sistema de Comercio de Emisiones Marítimas y Fuel EU Maritime.

El sector transporte representa una cuarta parte de las emisiones de efecto invernadero, para lograr la neutralidad climática es necesaria una reducción del 90% de sus correspondientes emisiones. Algunos de los puntos que el Green Deal considera clave para alcanzar el objetivo son:

- Impulso del transporte por ferrocarril y marítimo. Se plantea como objetivo que el 75% del transporte de mercancía por carretera pase a ser por ferrocarril o fluvial en vías interiores navegables.
- Reducción de la contaminación del transporte marítimo: regular el acceso a los buques más contaminantes y obligar a los buques atracados a utilizar electricidad en tierra.

Asimismo, en el nuevo Libro Blanco de la Unión Europea “Transporte 2050” se recogen diferentes iniciativas para lograr reducir las emisiones del sector transporte, algunas de ellas son:

- Conseguir que el 40% del combustible de la aviación sea sostenible, bajar las emisiones de carbono y reducir las emisiones del transporte marítimo en un 40%.
- Transferir parte del transporte de mercancías o pasajeros por carretera a otros modos como el ferroviario o la navegación fluvial, poniéndose como objetivos un 30% en 2030 y más del 50% en 2050.

Adicionalmente, dado que los GEI de los buques no se incluyeron en el Acuerdo de París de 2015, en 2018, la OMI adoptó una Estrategia Inicial de GEI para reducir las emisiones de GEI del transporte marítimo internacional. El objetivo es reducir la intensidad media del carbono (CO2 por tonelada-milla), en al menos un 40% para 2030 y en un 70% en 2050, así como reducir las emisiones totales en al menos un 50% para 2050, en comparación con 2008.

3. EL PUERTO DE HUELVA

El Puerto de Huelva está situado en la fachada Sur-Atlántica de la Península Ibérica, asentado en el estuario que forma la confluencia de los ríos Tinto y Odiel, pertenecientes ambos a la cuenca del Tinto, Odiel y Piedras. Constituye el puerto comercial más occidental de Andalucía y el de mayor extensión de superficie del sistema portuario estatal. Abarca una superficie de 1.700 hectáreas, en las que dispone de 8,5 kilómetros de muelles públicos y privados.

La confluencia de los ríos Tinto y Odiel en la zona denominada Punta del Sebo divide al puerto en dos áreas, por un lado, el llamado Puerto Exterior que se extiende desde la mencionada Punta del Sebo hasta el comienzo de la canal de navegación conocido como “Canal del Padre Santo” y, por otro lado, el Puerto Interior que abarca la zona portuaria aguas arriba de la Punta del Sebo. La lámina de agua del Puerto de Huelva por su parte comprende un total de 7.409,04 ha en Aguas Exteriores y de 2.092,11 ha en Aguas Interiores. La morfología longitudinal de la zona de servicio permite una ordenación clara y bien estructurada del espacio tal como se muestra en la siguiente imagen.

El Puerto de Huelva es un puerto Core de la Red Básica de Transporte Europeo (Core Network) integrado en las redes transeuropeas de transporte (TEN-T) tanto de ferrocarril (transporte de mercancías) como de carretera a través del Corredor Atlántico constituyendo el nodo marítimo-terrestre que une la parte terrestre del Corredor Atlántico con las Islas Canarias. Además, se encuentra conectado con el Corredor Mediterráneo a través de su plataforma ferroviaria de Majarabique localizada en el municipio de Sevilla.

Respecto al tráfico de mercancías, 2023 cerró con 30.078.896 Tn, correspondiendo el 75% a graneles líquidos, eminentemente energéticos con más de 22 millones de toneladas, siendo igualmente relevante el más de 1.300.000 tn de productos químicos que posicionan al puerto en el primer puerto estatal en el manejo de estos productos.



Fig. 1. Zona de servicio del Puerto de Huelva. Fuente: Autoridad Portuaria de Huelva (2023).

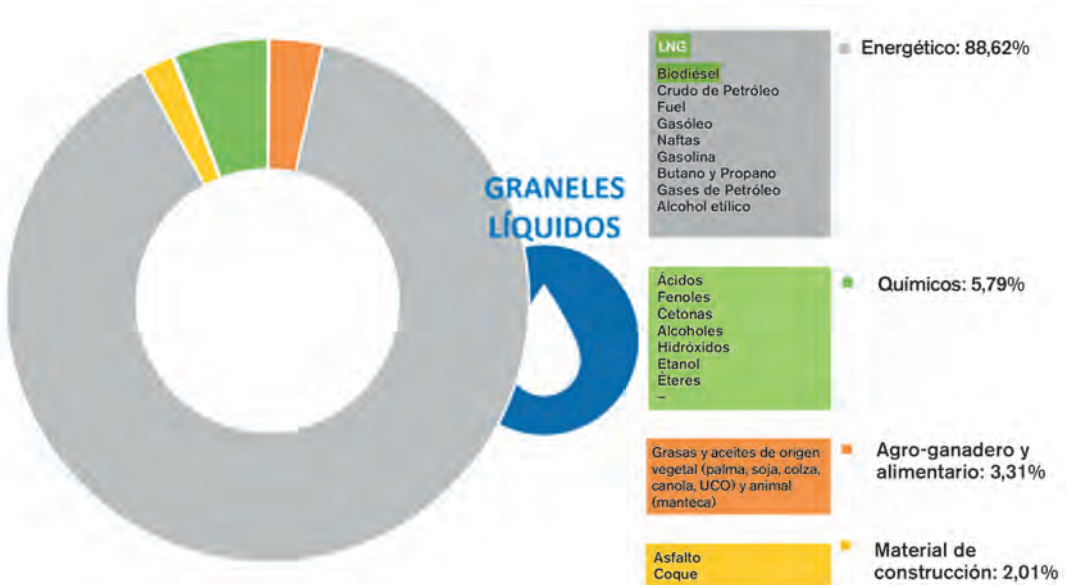


Fig. 2. Graneles líquidos en Puerto de Huelva. Fuente: Autoridad Portuaria de Huelva (2023)

4. LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN EL PUERTO DE HUELVA

Como se ha comentado, en Europa y en España, el sector logístico en general y con mayor peso, las operaciones de transporte de mercancías deben asumir objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para 2030, que irán escalando hasta alcanzar la neutralidad climática en 2050. El Pacto Verde Europeo

es la estrategia de crecimiento destinada a transformar la Unión en una sociedad equitativa y próspera, con una economía moderna, eficiente en el uso de los recursos y competitiva, con un objetivo de neutralidad climática a 2050 con uno intermedio de reducción neta de emisiones de gases de efecto invernadero de al menos un 55 % en 2030. En este contexto, los puertos como nodos logísticos en la interfaz tierra-mar deben ser capaces de atender las demandas de infraestructuras y

servicios que contribuyan a la sostenibilidad global de las cadenas logísticas.

Este cambio energético fundamental para la transición hacia un puerto neutro en emisiones va a transformar radicalmente el Puerto de Huelva, donde actualmente existe un esquema básico de uso de energías basado en la utilización de combustibles fósiles, muy dependiente del gas natural y de los derivados del petróleo.

Constituye por tanto la estrategia energética del Puerto de Huelva, un elemento fundamental para la viabilidad de la actividad portuaria a medio y largo plazo.

Conscientes de ello, el Puerto de Huelva dispone de una hoja de ruta en su estrategia energética que nos llevará a ser un puerto estratégico en el mapa de los nuevos com-

bustibles, tanto en su producción como logística, y posicionados en la estrategia europea del hidrógeno verde; un puerto con diferentes soluciones de electrificación tanto en el transporte de mercancías dentro del puerto, como en la maquinaria de manipulación de las cargas; un puerto con generación de energía limpia como base para garantizar tanto la producción de combustibles alternativos así como la sostenibilidad energética de edificios e infraestructuras.

En este sentido, los ámbitos de trabajo se dividen en dos bloques:

- BLOQUE I:

Ámbitos que se consideran más vinculados a los servicios generales y los servicios portuarios. En esta parte, la APH tendría una implicación más importante

BLOQUE I		ÁMBITO
Autoridad Portuaria	A1	Eficiencia Energética edificios e instalaciones propias.
Servicios Portuarios / Movilidad	A2	Manipulación de las cargas/pasaje.
Servicios Portuarios / Combustibles alternativos	A3	Suministro eléctrico de buques. "On Shore Power supply."
Servicios Portuarios / Combustibles alternativos	A4	Infraestructuras para bunkering de combustibles con bajo carbono (sintéticos, biofuels, biogas).
Autoridad Portuaria	A5	Generación energía renovable dentro del puerto.

en cuanto a compromiso y asignación de recursos. Se corresponde con los bloques de instalaciones de la APH y servicios portuarios de atención al buque. En este primer bloque se incluye también la generación de energías renovables dentro del ámbito portuario.

- BLOQUE II:

Ámbitos que están más relacionados con el clúster Industrial, la integración puerto-ciudad y el Hub energético. Estos ámbitos requieren un enfoque estratégico

BLOQUE II		ÁMBITO
Hub Energético/Autoridad Portuaria	A6	Infraestructuras de conversión de energía: energía verde a hidrogeno, amonio, metanol, gas a energía, etc.
Hub Energético/Autoridad Portuaria	A7	Refuerzo de la red eléctrica o implementación de nuevas instalaciones eléctricas. Smart Grid.
Hub Energético/Autoridad Portuaria	A8	Hubs de almacenamiento de energía baja en carbono. Hidrógeno, amonio.
Autoridad Portuaria/ Puerto Ciudad	A9	Descarbonización del transporte (carretera, ferrocarril)
Clúster Industrial	A10	Economía circular para aprovechar desechos mediante su transformación en energía, químicos, etc.
Clúster Industrial	A11	Descarbonización del clúster industrial. Aumento de electrificación en los procesos industriales. Modificación de energía primaria de los procesos.
Clúster Industrial	A12	Transformación del clúster industrial tradicional

más amplio con unas líneas de actuación y objetivos a cumplir a medio y largo plazo y una mayor implicación del sector privado con proyectos e inversiones, así como público en cuanto a la planificación.

5. FUTURO CLÚSTER ENERGÉTICO DEL PUERTO DE HUELVA

Sin duda, los nuevos combustibles son el elemento más relevante en la transición energética del Puerto de Huelva por diferentes motivos:

- El Puerto de Huelva forma parte del principal Polígono Industrial petroquímico de Andalucía y el segundo de España, un tejido industrial energético y químico con más de 60 años de experiencia en la producción y logística de combustibles y productos químicos, por lo que dispone de infraestructuras, instalaciones y servicios portuarios adaptados a graneles líquidos energéticos y químicos que pueden dar servicio al H₂ y sus derivados de forma inmediata.

- La Industria del Puerto de Huelva es el mayor consumidor de H₂ de España, una tercera parte del H₂ consumido en España, se hace en la industria de Huelva.
- La posición de un puerto en la red RTE-T se evaluará no solo en función del tonelaje, sino también de su contribución a la transición energética.
- Disponibilidad de suelo portuario, capacidad infraestructural y conectividad marítima y terrestre.
- Condiciones excelentes en el territorio para disponer de los inputs necesarios para la fabricación de nuevos combustibles: energía renovable, agua, CO₂ biogénico...
- Know how industrial y mano de obra especializada.

Esto está conllevando un despliegue de proyectos e infraestructuras que darán soporte a los nuevos combustibles, fundamentalmente los ligados a la que a día de hoy será la mayor planta de metanol verde de Europa y una de las cinco mayores del mundo, que junto a otros como



Fig. 3 Principales proyectos del hub energético de los nuevos combustibles del Puerto de Huelva.
Fuente: Autoridad Portuaria de Huelva (2024).

los del Valle Andaluz del H₂ Verde y los promovidos por empresas como CEPSA, Fertiberia, ENAGAS, etc., contribuirán a la autonomía y a la seguridad energética de España y de la UE en su conjunto.

Los principales actores del hub energético y los nuevos combustibles a producir serán los siguientes:

Para dar soporte a los nuevos proyectos vinculados al H₂ y sus derivados, el nuevo plan estratégico del Puerto prevé una serie de actuaciones para facilitar la implantación industrial, que se traducen en una serie de proyectos recogidos en el plan de inversiones orientados a infraestructuras y servicios para la logística de los futuros combustibles:

- Plan de inversiones de 400 m€ hasta 2030 con incremento de terminales marítimas vinculadas a los graneles líquidos energéticos y químicos.
- Incremento de la capacidad del acceso marítimo.
- Incremento de capacidad de la conectividad ferroviaria.
- Desarrollo de una estrategia de desarrollo de hub de bunkering de nuevos combustibles.
- Culminación de la digitalización de la operativa portuaria para optimizar la eficiencia de los procesos, especialmente en lo relativo al suministro de nuevos combustibles al área de influencia marítima del Puerto.

La descarbonización del Transporte Pesado como oportunidad industrial en los Puertos

Aitor Arzuaga Munsuri

Director General, Alba Emission Free Energy S.A.

1. INTRODUCCIÓN

Los puertos son al mismo tiempo hubs del transporte y de logística multimodal, y bases fabriles en las que se implantan numerosas industrias pesadas que necesitan dichos servicios. Además, los puertos tienen por delante el reto de la descarbonización, en el que pueden jugar un rol doble de sujeto activo y pasivo. La descarbonización del transporte pesado supone una oportunidad para el desarrollo de los combustibles renovables descarbonizados y toda su cadena de valor tecnológica e industrial, que se apoya en la generación de energía renovable, la producción de hidrógeno verde y la captura y utilización de CO₂ de aplicaciones de difícil descarbonización, y su transporte y distribución como producto final.

Como consecuencia de las normativas de la Unión Europea ReFuel EU Aviation y ReFuel EU Maritime, que implican obligaciones de reducción del CO₂ en el transporte pesado y la inclusión de dichos sectores en el comercio de emisiones ETS, existe una oportunidad estratégica para localizar una industria de muy alto valor añadido y gran impacto económico en España, a la par que reforzar su posición geoestratégica. La planta demo de producción de combustibles sintéticos en construcción en el puerto de Bilbao será un proyecto singular y estratégico para lograr aprovechar esta oportunidad de mercado que nos abre la descarbonización, y el desarrollo industrial asociado en España.

2. LAS EMISIONES DE CO₂ EN EL TRANSPORTE PESADO

El transporte es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones de CO₂, y a diferencia de otros sectores, con-

tinúan aumentando. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente, en 2020 las emisiones del transporte constituían el 23,2% de las emisiones totales en la UE. Cada tipo de transporte deberá utilizar diferentes soluciones para su descarbonización.

Según la IEA, la aviación contribuye aproximadamente al 3% de las emisiones globales de CO₂, y en el intervalo 1985-2019, las emisiones de este subsector se doblaron. El transporte marítimo de mercancías supone también unas emisiones globales en torno al 3%, según la IMO. Ambos sectores realizan una contribución muy relevante a las emisiones de CO₂, y son también muy difíciles de descarbonizar por su naturaleza y particularidades de operación.

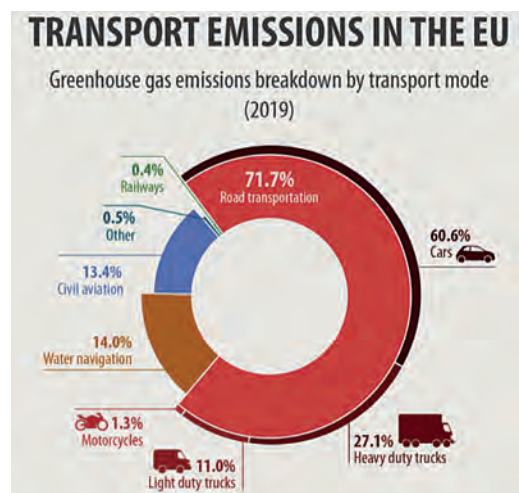


Fig. 1. Emisiones del sector transporte por subsectores en la UE 2019 (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2022).

La larga duración de la vida útil de los activos (barcos, aviones) es una característica clave, y hace que la estrategia viable de descarbonización para el sector sea buscar una solución “drop in”, compatible con la flota existente actual y en el futuro. La vida útil típica de un avión comercial es de entre 25 y 30 años. La vida útil de un barco de transporte es de entre 30 y 50 años. Por otro lado, las limitaciones inherentes al transporte aéreo y marítimo (sensibilidad al peso, al coste, distancias de los recorridos...), hacen que desde el punto de vista tecnológico no existan alternativas que, a corto o medio plazo, permitan evolucionar los aviones o barcos para que puedan funcionar de forma económica con mecanismos de propulsión descarbonizados.

La Unión Europea está liderando el impulso normativo. La regulación europea RefuelAviation EU, parte del paquete Fit-for-55, ya propone unos umbrales mínimos de adopción de combustibles renovables sintéticos. En el caso del transporte marítimo, la regulación RefuelMaritime EU, impulsará la adopción de combustible renovable sintético con umbrales a partir de 2031.

3. LA OPORTUNIDAD INDUSTRIAL DE LOS COMBUSTIBLES SINTÉTICOS

Para fabricar combustible renovable sintético (bien sea e-diesel, e-metanol, o e-keroseno), se precisa energía

eléctrica renovable, agua, y CO₂ capturado, bien de la atmósfera (cuando esto sea técnicamente viable) o de procesos industriales no descarbonizables actualmente. Esto se puede ver en el diagrama de la figura 2.

La península ibérica cuenta con un notable recurso eólico, y fotovoltaico para la producción de electricidad renovable. Se prevé que en el horizonte 2030, España sea un “hub” de producción de energías renovables. El Plan Nacional Integrado de Energía y clima (realizado en 2021) contemplaba una predicción de capacidad de generación eólica de 50GW y fotovoltaica de 36GW, cifra que previsiblemente se quedará muy corta.

La ubicación estratégica de la península ibérica en Europa Occidental y la proximidad a los grandes núcleos de consumo europeos proporcionará mejores costes logísticos para llegar a los núcleos consumidores.

Existen numerosos núcleos industriales que generan emisiones de CO₂ de difícil eliminación técnica, que pueden proporcionar el otro ingrediente necesario para la producción del combustible renovable. La absorción de este CO₂ permite a dichas industrias mejorar su competitividad y extender el plazo para afrontar procesos de descarbonización cuando las tecnologías estén más maduras (y bajen sus costes). Además, algunos de estos polos emisores industriales están ubicados en puertos.

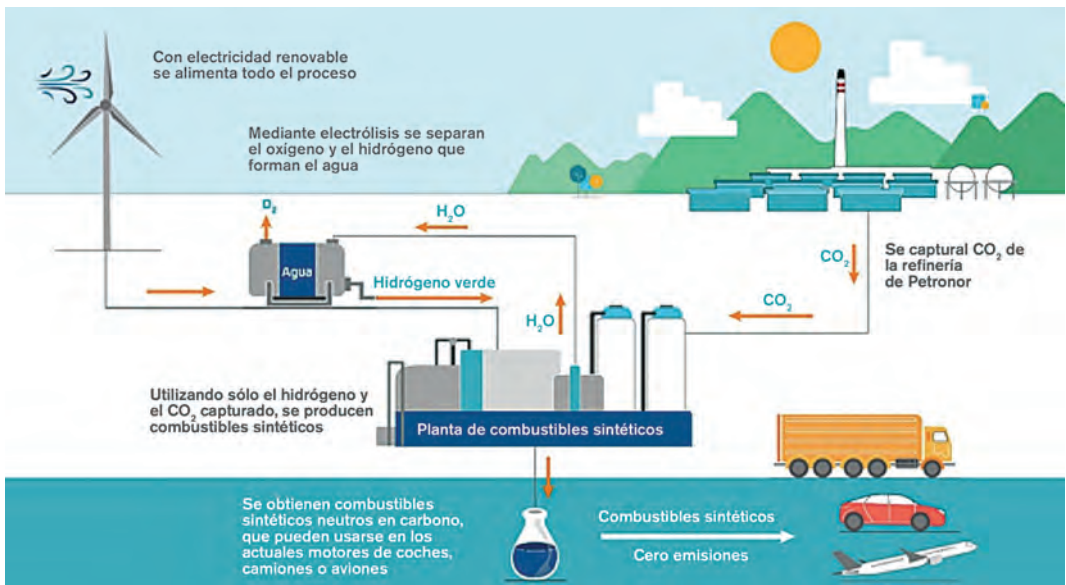


Fig. 2. Esquema de producción de combustibles renovables (fuente Repsol).

Aprovechar la oportunidad derivada de la descarbonización del transporte pesado requiere impulsar el desarrollo y adaptación de una cadena de valor, apoyada en las capacidades tecnológicas e industriales que ya existen. Además, se precisa la validación de los procesos y nuevas tecnologías involucradas a escala industrial, ya que la descarbonización tendrá que producirse en un marco de eficacia económica, y los combustibles renovables tendrán que poder producirse a un coste competitivo.

La planta demo de producción de combustibles sintéticos de Petronor (a través de su filial Alba Emission Free Energy) y Aramco, en construcción en el puerto de Bilbao con una inversión superior a 160M€, y que estará operativa a primeros de 2026, supone un proyecto de enorme relevancia estratégica y uno de los pioneros en

el ámbito en el mundo. La planta, con una producción de combustibles sintéticos, de 8000 litros/día, tiene como objetivo demostrar la viabilidad tecnológica de esta vía de obtención de combustibles, que son neutros en emisiones de CO₂, y realizar las pruebas de validación en flotas de aviones y barcos, de cara a acometer una futura planta de escala industrial y gran capacidad de producción.

La producción de combustibles renovables para la descarbonización del transporte pesado en Europa será una gran oportunidad económica e industrial para lograr los objetivos climáticos a la vez que se mejorará la seguridad de suministro energético, mediante una actividad industrial que irá ligada en gran medida a los puertos y que generará un gran valor añadido en torno a ellos.

Abordando los Retos del Cálculo de la Huella de Carbono en Puertos Españoles: Implicaciones para la Descarbonización del Sector Marítimo

Sara Calvo Fernández

Directora, MC VALNERA, S.L., scf@mcvalnera.com

Victoria Ferreiroa Ruibal

Jefa de proyectos, MC VALNERA, S.L., vfr@mcvalnera.com

Julián García Rodríguez

Jefe de proyectos, MC VALNERA, S.L., jgr@mcvalnera.com

1. INTRODUCCIÓN

La aprobación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), establecidos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas el 25 de septiembre de 2015, introdujeron, por medio de su Objetivo nº14, la acción a corto y medio plazo de “Conservar y utilizar sosteniblemente los océanos, los mares y los recursos marinos”, dando especial relevancia a la conservación y desarrollo sostenible de los océanos, junto con el conjunto de actividades desarrolladas en los mismos, generando un impulso internacional a la conservación del medio marino.

La sensibilización mundial acerca de la necesidad de establecer unos compromisos universales transversales para la colaboración en materia de desarrollo sostenible es un aspecto clave de las estrategias de las administraciones y sector privado, que afecta a todos los sectores económicos y productivos.

La importancia y alcance de los objetivos estratégicos definido por cada una de las administraciones y Autoridades Portuarias españolas, europeas y mundiales, así como la actividad desarrollada en los mismos, no deben ser distantes de la importancia otorgada a los océanos dentro de la Estrategia definida por la ONU, a pesar de que, en una primera instancia, el Acuerdo de París de 2015 excluyera al transporte marítimo y aéreo. Esto es debido a que las infraestructuras portuarias consisten en la interfaz tierra-mar esencial para el desarrollo del transporte marítimo de mercancías, el cual es la base de la economía

mundial y cuyo pilar ha sido la globalización de las relaciones comerciales entre países.

De esta manera, dentro del citado ODS nº14, el transporte marítimo se ha convertido en un eje clave para la consecución del objetivo, tanto desde el punto de vista del buque y de su navegación, como de la actividad portuaria debida a su interacción con el puerto, entendido este como un nodo básico y fundamental de la cadena de suministro global.

Los puertos, como esenciales en la cadena logística, deben reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y apoyar la descarbonización global, jugando un papel clave en el descenso de las emisiones del sector marítimo. La Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética, establece un marco para la descarbonización en puertos, fijando objetivos y medidas para lograr la neutralidad de carbono para 2050. En los siguientes puntos, se analiza cómo la estimación de la huella de carbono en los puertos es de aplicación en la descarbonización de los puertos, así como los desafíos de su cálculo en los puertos.

2. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN PUERTOS

La estimación de la huella de carbono, comúnmente evaluada en toneladas de CO₂ equivalente (CO₂ eq.), facilita la evaluación de los impactos globales asociados a una

actividad, así como la identificación de aquellas etapas u operaciones que se consideren más problemáticas desde el punto de vista ambiental. Por ello, su cálculo es esencial a la hora de elaborar planes de reducción, ya que conforma un punto de partida primordial para cualquier organización a la hora de impulsar estrategias y acciones encaminadas a reducir las emisiones y optimizar los consumos energéticos.

El desafío del cálculo de la huella de carbono en los puertos españoles implica medir emisiones directas e indirectas, considerando diversas fuentes como el transporte marítimo, la gestión de carga y las operaciones terrestres. Cada aspecto de la operación portuaria influye en las emisiones de GEI, desde el consumo de combustibles fósiles hasta las actividades asociadas como el transporte marítimo y terrestre. Es crucial entender cómo cada componente contribuye a la huella de carbono total del sector portuario.

A través de la huella de carbono se identifica la cantidad de GEI liberada a la atmósfera por cada fuente de emisión detectada en una organización. Habitualmente, para clasificar las fuentes de emisión se emplea el término alcance:

el alcance 1 cubre emisiones directas de fuentes controladas por la organización, el alcance 2 abarca el uso de energía eléctrica, y el alcance 3 se relaciona con emisiones sobre las cuales la organización no tiene control.

Para una organización, calcular los dos primeros alcances es esencial, ya que en él incluyen todas las fuentes de emisión sobre las que tiene control. En el caso de una Autoridad Portuaria, estos alcances incluyen el consumo de combustibles fósiles y el consumo de energía eléctrica en sus instalaciones. Sin embargo, para las Autoridades Portuarias, el alcance que más impacto y fuentes de emisión contiene es el tercero, pues engloba, entre otras, las emisiones asociadas a las empresas presentes en el puerto, de los vehículos y equipamientos terrestres, y de los buques que operan en el mismo. Esta exposición aborda este último aspecto, centrándose en los retos de su estimación y reducción de su incertidumbre.

Debido a la urgencia de mitigar el cambio climático y la implicación creciente de las Autoridades Portuarias, cada vez es más habitual calcular el alcance 3 para aplicar medidas de bonificación que favorezcan la reducción de estas emisiones.

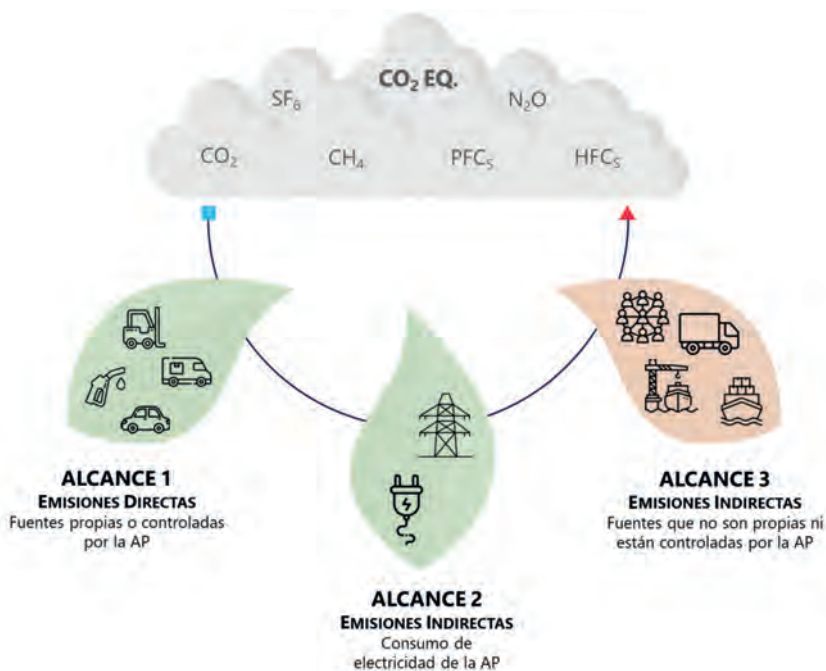


Fig. 1. Alcances de la huella de carbono. Fuente: MCVALLNERA (2024).

En base a la metodología oficial aplicada por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico en la Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización, con el fin de contar con un instrumento de cálculo que se adapte a las singularidades de la actividad portuaria, Puertos del Estado con el apoyo del CEDEX elabora la Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono en puertos, la cual se toma como referencia principal para realizar cálculos de huella de carbono para Autoridades Portuarias.

3. RETOS DE LA ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO EN PUERTOS: BUQUES

Es reconocida la complejidad asociada a la medición precisa de la huella de carbono en los puertos, especialmente las correspondientes al alcance 3, debido a la diversidad de actividades y fuentes de emisión involucradas.

puesta por Puertos del Estado, adaptada a la casuística particular de las Autoridades Portuarias.

3.1. Guía de Puertos del Estado

Como se ha mencionado, la Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono en puertos, en adelante, Guía PdE, es un documento metodológico que permite estimar la huella de carbono atribuible al paso de las mercancías y pasajeros en cada puerto español de interés general.

De esta forma, la Guía PdE cuenta con un epígrafe dedicado a la estimación de las emisiones del tráfico marítimo en el puerto, considerando que son aquellas que producen los buques de mercancías en la zona de servicio durante las fases de crucero, maniobra y atraque.

Así, la estimación para cada tipología de buque se basa en el producto de las potencias de los motores principales

$$HC_{TMI-Fase} = \sum_j \left[PN_{MP} \times FC_{MP-Fase} \times t_{MP-Fase} \right] \times FE_{MPi} + \sum_j \left[PN_{MA} \times FC_{MA-Fase} \times t_{MA-Fase} \right] \times FE_{MAi}$$

Motores principales
Motores auxiliares

Potencia nominal
Factor de carga del motor
Duración de cada fase

Fig. 2. Emisiones en el transporte marítimo. Fuente: Puertos del Estado (2020).

Dentro del alcance 3 existen dos grandes grupos de emisiones: el de las organizaciones externas que operan dentro del puerto y el del tráfico marítimo y terrestre. Las emisiones del primer grupo se pueden calcular a través de la obtención de los datos de consumo de cada empresa y la aplicación de la metodología del MITERD, siendo este un cálculo preciso y correcto, aunque también costoso, ya que implica la colaboración de un gran número de agentes para la obtención de datos reales y claros. Sin embargo, en el caso de los tráficos terrestre y marítimo, lo más habitual es recurrir a métodos de estimación debido a la complejidad de la obtención de datos reales.

Debido a la necesidad de hacer estimaciones, con el objetivo de obtener unos resultados totales veraces, debe procurarse que estas se ajusten a la realidad lo máximo posible. A continuación, se analiza la metodología pro-

y auxiliares por los porcentajes de uso de cada uno y por el tiempo que dura cada fase, todo ello multiplicado por el factor de emisión correspondiente.

En la Guía PdE se indican los porcentajes de uso (factores de carga) de los motores principal y auxiliar en cada fase, así como el porcentaje de tiempo de uso de cada motor. Además, se incluyen tablas donde indican valores de referencia de los tiempos de estancia media y la potencia nominal de los motores de los buques por tráfico y puerto del sistema portuario español.

Si bien los datos y la metodología propuestos en la Guía PdE son aceptables para comenzar con los cálculos del alcance 3 de una Autoridad Portuaria, en algunos casos, pueden contar con una incertidumbre elevada. En los siguientes puntos, se analizan las variables implicadas en la estimación de emisiones del transporte marítimo, pres-

tando especial atención a aquellas que más incertidumbre pueden presentar.

3.2. Variables con incertidumbre

Se considera que las variables más sensibles a la variación de los resultados son, por un lado, el buque seleccionado como el buque tipo para cada tráfico considerado y, por otro lado, la duración de cada fase de la navegación en el recorrido de dicho buque por la zona de servicio portuaria.

3.2.1. Buques tipo

El dato en el que se basan las estimaciones y, por ende, el que más influencia tendrá en las mismas, es la selección del buque o buques tipo para cada tráfico considerado. Su relevancia viene derivada de que, a igualdad de combustible empleado, las emisiones producidas están directamente relacionadas con la potencia de los motores del buque seleccionado.

Para realizar la selección, en la Guía PdE se incluyen unos valores de referencia para potencias medias de buques en función del puerto de escala y el tipo de tráfico. Se trata de una información que no tiene en cuenta la distribución de las escalas en el puerto de estudio, ya que únicamente se proporcionan los datos de un solo buque tipo. Además, se trata de una información que data del año 2013 y que no se actualiza de forma periódica.

Esto puede dar lugar a dos fuentes de error:

- *Existencia de más de un buque tipo*: al no tener en cuenta la distribución de las escalas en cada puerto, es posible que en algún caso exista más de un buque tipo para una misma tipología de tráfico, bien por diferencia de tamaños o incluso por diferencia de rutas.
- *Selección de un buque tipo no ajustado a la realidad*: puede ocurrir que en algún caso el buque tipo indicado en la Guía PdE no se ajuste a la realidad. Si bien el buque tipo de un puerto puede ser el mismo durante varios años, es habitual que las Autoridades Portuarias lleven a cabo actuaciones para ampliar la capacidad de sus muelles o para acoger nuevos tráficos, por lo que los datos podrían quedarse obsoletos.

Exceptuando el caso de que hubiera varios buques tipo y todos ellos fueran de menor potencia que el indicado en la Guía PdE o, en caso de haber uno, que sea equivalente al de la Guía, la realización de las estimaciones partiendo de este dato no se encontraría del lado de la seguridad, estando infravalorado tanto el tamaño de los buques como las emisiones producidas.

3.2.2. Trayectorias y tiempos de escala

Debido a que tanto el factor de carga como el porcentaje de uso de los motores es diferente para cada fase de la navegación (crucero, maniobra y atraque), es necesario realizar la distinción entre estas tres etapas. Así, otra de las variables influyentes en los cálculos es la duración media de la escala de cada buque tipo, así como el tiempo de permanencia del mismo en cada fase de la navegación.

En la Guía PdE, de igual forma que se establecen las potencias medias de los buques, se indica la estancia media de un buque según puerto y tipo de tráfico.

A través del establecimiento de parámetros que determinan el comienzo y el final de cada fase de la navegación, se extraen la duración de los estados de crucero, maniobra y atraque. Es necesario establecer trayectorias tipo y suponer las velocidades a las que circulan los buques durante cada fase. Esto puede ocasionar varias fuentes de error, entre otras:

- *Selección de una ruta*: aunque en general el trayecto habitual seguido por los buques de cada tipo de tráfico es conocido e intuitivo, la obtención de trayectorias reales minimiza los posibles errores.
- *Selección de velocidades por fases*: la selección de la velocidad a la que circula el buque influye sobre la estimación de la duración de cada fase, aspecto relevante por la diferencia de uso de los motores en cada una de ellas.

Igual que en el caso de los buques tipo, la incertidumbre de partida en estas variables es elevada.

En los próximos epígrafes se exponen posibles mejoras en la obtención de datos que, de emplearse, permiten que las estimaciones se encuentren más próximas a la realidad de cada puerto.

3.3. Reducción de la incertidumbre

Los avances tecnológicos actuales permiten mejorar la metodología propuesta en la Guía PdE a través del uso de los datos de la Red AIS (Automatic Identification System). Mediante el uso de esta fuente de datos es posible conocer en tiempo real la identificación de los buques, su posición, rumbo o velocidad, reduciendo la incertidumbre en las variables indicadas previamente, obteniendo así estimaciones más veraces.

3.3.1. Buques tipo

Las características del buque o buques tipo para cada tipología de tráfico en el puerto de estudio conforman la base para la valoración de las emisiones.

Los datos AIS permiten conocer el número de escalas de cada tipología que se han realizado en un puerto a lo

largo de un periodo de tiempo determinado. El tratamiento de los datos permite analizar la distribución de las escalas con el objetivo de determinar si es o no necesario tomar más de un buque tipo. Así, en lugar de seleccionar un solo buque tipo por tráfico, se seleccionan los grupos que sean más adecuados dependiendo de cada caso. En la siguiente imagen se puede observar cómo, a través de análisis de la distribución mencionada, se extrae que lo óptimo es la selección de 4 buques tipo.

Además, mediante este método de selección, los buques empleados se adaptan al tráfico real del puerto en el periodo de tiempo correspondiente, un aspecto que tanto puede mantenerse constante como puede variar notablemente entre varios años.

La selección de los buques tipo es un paso crucial para realizar un análisis de emisiones adecuado, ya que la variación en el tamaño y, por consiguiente, en la potencia, produce desviaciones relevantes en los totales obtenidos.

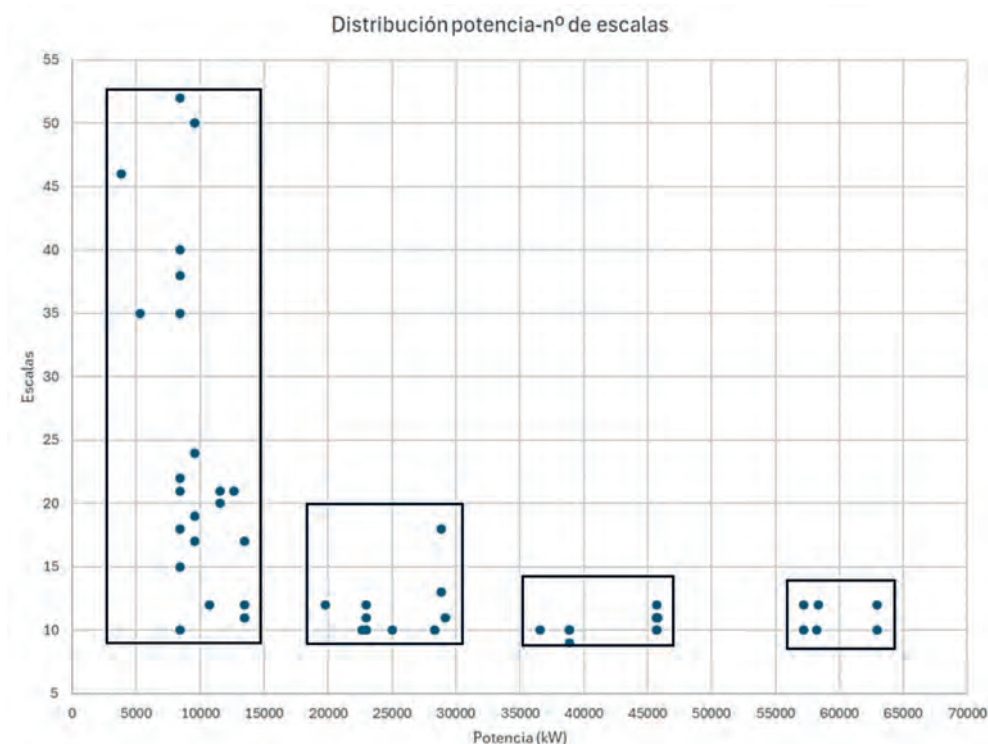


Fig. 3. Ejemplo de distribución de potencias y número de escalas de una tipología de tráfico de un puerto de SPE.
Fuente: MCVALNERA (2023).

Por ejemplo, en uno de los casos de estudio, para un tráfico específico se observa una variación en las potencias de los motores principales de los buques tipo analizados del 170% y el 360% respectivamente con respecto al caso base tabulado. Dado el impacto significativo de esta variable en el cálculo de emisiones, se considera que el análisis previo de buques tipo es fundamental en la estimación de la huella de carbono.

3.3.2. Trayectorias y tiempos de escala

Como se ha mencionado previamente, para conocer la duración de cada fase de la navegación de cada buque tipo es necesario establecer rutas tipo y velocidades de trayecto para cada fase, lo que introduce imprecisiones en los cálculos.

Los datos AIS permiten conocer la posición y velocidad de cada buque en intervalos de tiempo seleccionados,

por lo que su utilización permite reducir hasta casi eliminar el error asociado a la estimación de las rutas seguidas por los buques, pues es posible realizar mapas de todas las trayectorias seguidas por un buque en un periodo de tiempo y en un puerto determinado.

Asimismo, a través del establecimiento de parámetros que determinan el comienzo y el final de cada fase y con el tratamiento de los datos de posicionamiento y velocidad, se obtienen los estados de crucero, maniobra y atraque de cada buque tipo.

En la Figura 4 siguiente se muestra gráficamente un ejemplo de trayectoria de un buque tipo, distinguiendo por colores la distancia recorrida en cada fase de la navegación. En este aspecto, en uno de los casos de estudio, en el análisis se observa una variación en los tiempos de escala de hasta un 58% inferior a los contemplados como referencia.

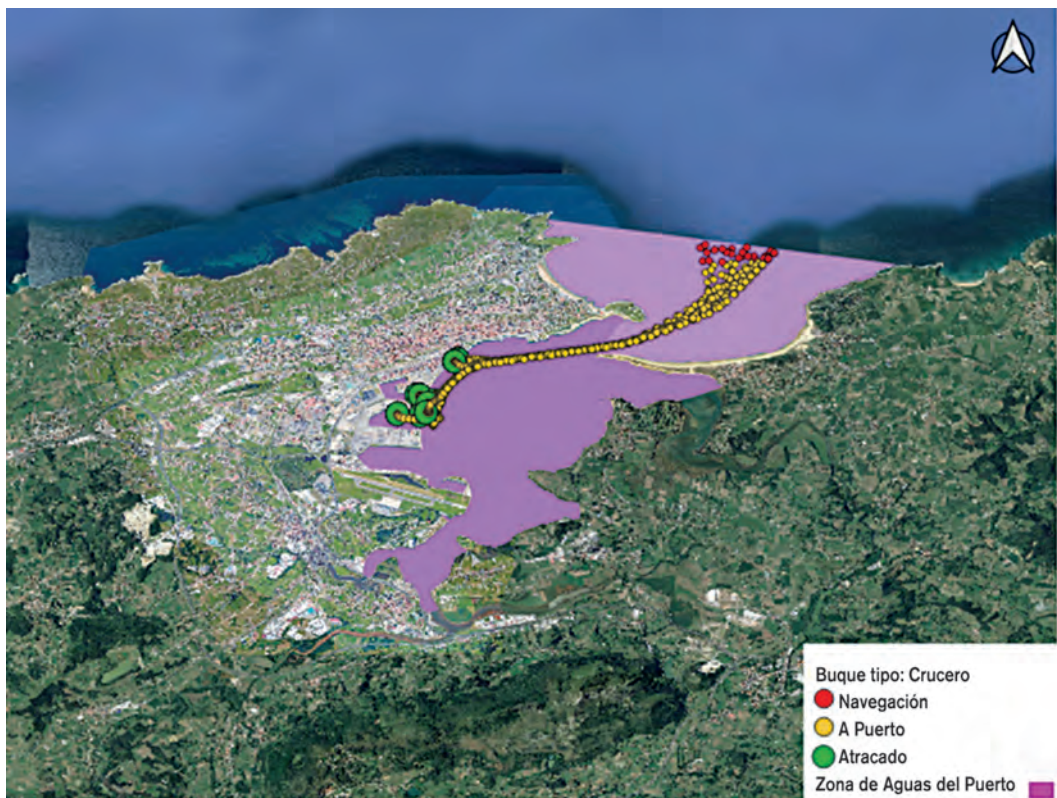


Fig. 4. Ejemplo de ruta y fase de un buque tipo. Fuente: MCVALNERA (2023).

3.4. Coste de cálculo

Una vez expuestas y analizadas algunas de las variables que más imprecisión introducen en los cálculos de emisiones en el transporte marítimo, conviene analizar el coste de cálculo que tiene su reducción.

Si bien con el uso de los datos AIS se obtienen resultados más ajustados a la realidad, debe tenerse en cuenta que su tratamiento y análisis lleva aparejada una necesidad de aumento de recursos por parte del equipo de trabajo, siendo requerido un mayor esfuerzo y dedicación.

Con la aplicación de la Guía PdE en el ámbito del transporte marítimo, se obtienen estimaciones preliminares que permiten identificar aquellas fuentes donde puede ser de interés realizar un análisis más detallado como el que se logra con el uso de los datos AIS.

Asimismo, el empleo de información más precisa es interesante en puertos de menor tamaño o en determinadas áreas que se encuentren próximas a zonas concretas como núcleos de población, zonas industriales o zonas sensibles medioambientalmente, donde el estudio y la aplicación de medidas mitigadoras o reductoras es de gran importancia.

En relación con lo anterior, es de utilidad el empleo de mapas de emisiones en el análisis del impacto socioeconómico y en la toma de decisiones. Los mapas de emisiones permiten evaluar la incidencia de las emisiones de GEI en una zona determinada y determinar su influencia, por lo que constituyen herramientas prácticas a la hora de priorizar acciones dentro de una zona portuaria.

3.5. Conclusiones

Aunque continúan existiendo incertidumbres, como las estimaciones de los factores de carga de los motores, el uso de datos en tiempo real permite obtener las emisiones asociadas al transporte marítimo con una precisión más elevada. No obstante, la aplicación de los datos de la Guía PdE es de gran utilidad para realizar una primera aproximación de las emisiones asociadas a los buques, permitiendo detectar de una forma ágil y sencilla cuáles son las áreas más problemáticas en el sentido medioambiental.

La mayor concienciación de las Autoridades Portuarias y organizaciones ha ido permitiendo, a lo largo de los años, la implementación de algunos aspectos que facilitan la reducción de las emisiones de GEI: inversiones en fuentes de energía renovables, eficiencia energética y aplicación de convenios de buenas prácticas en los puertos, a través de los cuales las organizaciones externas consiguen bonificaciones por la aplicación de medidas de reducción o el cálculo de emisiones; la redacción de Pliegos de concesiones en los que se exigen medidas de reducción o cálculo de emisiones; o la electrificación de muelles, aspecto que está comenzando su andadura en España, entre otros. Con respecto al sistema Onshore Power Supply (OPS), se trata de una medida tomada por las Autoridades Portuarias para reducir notablemente su alcance 3, ya que los buques se alimentarían con suministro eléctrico durante su estancia en el puerto, en detrimento del uso de combustibles fósiles. Si bien el gran reto será contar con capacidad de suministro y lograr que toda la electricidad suministrada provenga de fuentes renovables (garantía de origen).

Aunque de menor escala, existen otros retos en los cuales las Autoridades Portuarias ya se encuentran inmersas que supondrían reducciones en la huella de carbono, como por ejemplo la renovación de las flotas de vehículos y de los parques de maquinaria dentro del puerto, empleando otros que utilicen combustibles limpios; y la concienciación y cambio de los hábitos en el transporte terrestre y/o el cambio de combustibles.

Para todas estas medidas de reducción es relevante una estimación lo más precisa posible de las emisiones producidas, evitadas y compensadas, con el fin de evaluar su idoneidad y repercusión.

4. REFERENCIAS

GREENHOUSE GAS PROTOCOL (2013), Technical Guidance for Calculating Scope 3 emissions, World Resources Institute & World Business Council for Sustainable Development.

MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y RETO DEMOGRÁFICO (2024), Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora de una organización, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, NIPO: 280-14-241-8.

PUERTOS DEL ESTADO (2020). Guía metodológica para el cálculo de la huella de carbono en puertos.

España, “Ley 7/2021, de 20 de mayo, de cambio climático y transición energética.”, BOE-A-2021-8447, 22 de mayo de 2021, 121, 46.

UNE-EN ISO 14064-1:2019, Gases de efecto invernadero. Parte 1: Especificación con orientación, a nivel de las organizaciones, para la cuantificación y el informe de las emisiones y remociones de gases de efecto invernadero.

Inclusión de nuevos materiales bajos en carbono en las licitaciones de las obras portuarias

César Bartolomé Muñoz

Director de Tecnología de IECA, cbartolome@ieca.es

Rafael Rueda Arriete

Director de IECA Levante, rrueda@ieca.es

1. INTRODUCCIÓN

Desde la publicación del Pacto Verde Europeo, la UE ha focalizado sus esfuerzos en la descarbonización de la economía, con objetivos concretos de reducción de un 55% de las emisiones de GEI en 2030 con respecto al escenario base de 1990 y la neutralidad carbónica en el año 2050.

En este contexto, la Unión Europea ha identificado la compra pública como la principal palanca para la consecución de estos objetivos, puesto que supone entre un 10 y un 15% del PIB de la Unión. Por este motivo, desde 2004, la UE ha animado a los estados miembros a implementar procedimientos de compra pública sostenible mediante directrices generales y reglas jurídicas, en su mayoría de carácter voluntario.

De manera específica, la UE publicó en 2014 las Directivas 24 y 25, cuyo objetivo era poner a disposición de las administraciones públicas una herramienta que les permitiera superar la limitación del precio inicial de compra, de manera que pudieran así tener en cuenta el impacto total del producto a lo largo de su ciclo de vida completo, incluido el uso, el mantenimiento y el final de la vida útil, internalizando así las externalidades ambientales y sociales. En España, la Directiva 2014/24/UE se traspuso mediante la Ley 9/2017, de Contratos del Sector Público, que entró en vigor en marzo de 2018 y que incluye la necesidad de considerar criterios adicionales a la oferta económica.

Sin embargo, esta cláusula de la nueva Ley de Contratos del Sector Público, es decir, considerar criterios adicionales a la oferta económica, como pueden ser criterios de descarbonización, tiene una doble limitación. Por un lado,

la necesidad de objetivizar cualquier criterio diferente del económico y, por otro, garantizar que estos criterios no económicos de adjudicación se cumplen a lo largo de la ejecución del proyecto.

Este es el reto al que se enfrentan las administraciones públicas y en el que es necesario comenzar a trabajar desde una perspectiva estrictamente técnica para que los entes públicos dispongan de herramientas que permitan que todos los agentes compitan en igualdad de condiciones y que los procesos de evaluación sean transparentes y objetivos.

2. COMPROMISOS DE DESCARBONIZACIÓN DE LAS ADMINISTRACIONES PÚBLICAS CONTRATANTES

Los compromisos de descarbonización adquiridos por España están llevando a las diferentes entidades públicas a evaluar la huella de carbono de sus propias actividades. Para ello, existe un cuerpo normativo sólido que obliga a estas entidades a hacer un análisis de emisiones en tres niveles o alcances:

- Alcance 1: conjunto de emisiones directas que son producidas por fuentes propias o controladas, por ejemplo, las emisiones de los vehículos propios.
- Alcance 2: conjunto de emisiones indirectas derivadas del consumo de energía, principalmente eléctrico.
- Alcance 3: el resto de las emisiones indirectas que son consecuencia de la actividad. Por ejemplo, servicios subcontratados.

En el caso de Puertos del Estado, las respectivas Autoridades Portuarias o de cualquier otra entidad pública licitante de obra, este análisis deriva en una conclusión clara y es que el mayor volumen de emisiones de GEI reside en el alcance 3 y proviene, en este caso, de los servicios subcontratados, es decir, de la licitación y construcción de las infraestructuras portuarias. Por lo tanto, para este tipo de entidades, el cumplimiento de sus respectivos compromisos de descarbonización pasa necesariamente por la reducción de la huella de carbono asociada a la construcción, por lo que la inclusión de este criterio en los pliegos de licitación y contratación se ha convertido en una prioridad.

3. LA HUELLA DE CARBONO DE LAS OBRAS PORTUARIAS

Las obras portuarias son, en sí mismas, obras de una gran magnitud, con unas dimensiones relevantes y un uso masivo de materiales y, por lo tanto, con una huella de carbono asociada significativa.

Ahora bien, una obra portuaria no puede considerarse como un todo homogéneo, puesto que cada unidad de obra es diferente y sus materiales integrantes también lo son. Los cajones de hormigón armado son distintos de los bloques de hormigón en masa o de los pavimentos portuarios, por su diferente funcionalidad, por supuesto, pero también por sus diferentes clases de exposición ambiental o por su vida útil de diseño.

Por lo tanto, antes de incluir cualquier criterio de contratación relacionado con la huella de carbono de una obra portuaria, es necesario realizar un análisis más exhaustivo que considere las diferentes unidades de obra y que proponga medidas específicas de reducción de huella de carbono para cada una de ellas, teniendo en cuenta los materiales prescritos y las posibilidades de reducción de emisiones sin comprometer sus prestaciones mecánicas y de durabilidad.

Como conclusión, hay dos criterios básicos que se deben considerar antes de proponer cualquier medida o criterio de reducción de la huella de carbono en una obra portuaria:

- No existe una medida de reducción de huella de carbono que pueda plantearse de forma general independientemente de la unidad de obra, sino que

cada unidad de obra exige un análisis independiente.

- No existe una definición universal de materiales bajos en carbono, puesto que sus prestaciones técnicas y de durabilidad son diferentes.

4. ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO DE UNIDADES DE OBRA

Como criterio general, en prácticamente cualquier obra pública, las emisiones procedentes de los procesos de construcción son poco relevantes en comparación con las emisiones asociadas a los materiales que integran la propia obra. Además, en el caso concreto de obras portuarias, dado el volumen masivo de materiales que utilizan, este efecto se acentúa, por lo que cualquier medida que tenga como objetivo reducir la huella de carbono de la obra portuaria debe pasar necesariamente por la reducción de la huella de carbono de los materiales, en concreto, de los materiales pétreos/granulares, el hormigón y el acero, que son los tres materiales básicos de un puerto.

De estos tres materiales principales, el hormigón y el acero son los que presentan una mayor huella de carbono, muy por encima de los materiales pétreos/granulares, más aún si estos últimos proceden de la propia obra portuaria y no están sujetos a impactos de transporte. Ahora bien, el impacto de estos materiales no es el mismo para las diferentes unidades de obra.

Centrándonos en el hormigón, su impacto en estructuras armadas en puertos representa aproximadamente el 50% del total, correspondiendo el otro 50% al acero corrugado. Sin embargo, en el caso de estructuras pretensadas, el impacto del hormigón asciende de media a valores comprendidos entre el 60 y el 70% del total. Y en estructuras de hormigón en masa, bloques o pavimentos, ante la ausencia de acero, su impacto es del 100%.

Por otro lado, aunque como criterio general se puede afirmar que la mayor parte de la huella de carbono del hormigón proviene del cemento, hay que distinguir nuevamente en función del tipo de hormigón que estemos considerando. En estructuras pretensadas, efectivamente, aproximadamente el 90% de la huella de carbono del hormigón corresponde al cemento. Sin embargo, en estructuras armadas para puertos, esta huella de carbono puede reducirse hasta el 80%, puesto que estos hormi-

gonos utilizan cementos altamente adicionados con una baja huella de carbono. Por último, hay que destacar que los hormigones en masa en obras portuarias son hormigones con una huella de carbono muy baja en comparación con los hormigones utilizados en obras lineales o en edificios.

Como se puede ver, la casuística es muy amplia y las medidas que se propongan deben analizar cada caso y establecer criterios específicos no extrapolables a nivel general.

5. CÓMO INCLUIR CRITERIOS DE DESCARBONIZACIÓN EN LOS PROCESOS DE CONTRATACIÓN

Como se ha podido deducir de los puntos previos, la inclusión en pliegos de criterios de selección basados en la huella de carbono de las obras portuarias no es fácil y deben seguirse, al menos, los siguientes pasos:

1. Análisis específico de cada unidad de obra que permita definir prestacional y ambientalmente sus materiales.
2. Estudiar el mercado de materiales cercanos a la obra y prescribir, entre los materiales disponibles a nivel local, aquellos con una menor huella de carbono.
3. A partir de una referencia objetiva, por ejemplo, una base de datos ambientales pública, definir un límite máximo de huella de carbono para los materiales que cumplan los criterios prestacionales previamente prescritos. Este límite puede ser de exclusión, no admitiendo materiales que no cumplan este requisito, o de bonificación, puntuando favorablemente las ofertas que incluyan este tipo de materiales.
4. Tras la adjudicación de la obra, es necesario establecer un sistema de garantías para asegurar que la ejecución se ajusta a la oferta técnica realizada, para lo que se debe verificar la huella de carbono de los materiales que se utilizan en obra mediante certificaciones por terceras partes:
 - a. Declaraciones ambientales de producto verificadas por tercera parte.
 - b. Marcas de sostenibilidad voluntarias certificadas por tercera parte.

6. PROPUESTA DE INCLUSIÓN DE CRITERIOS DE DESCARBONIZACIÓN DE HORMIGONES EN LOS PROCESOS DE CONTRATACIÓN

6.1. Objeto de la propuesta

El objeto de la propuesta que a continuación se describe es proporcionar un sistema robusto, pero a la vez sencillo, para incorporar criterios relativos a la huella de carbono de los hormigones de una obra portuaria en los procedimientos de adjudicación de la ejecución de la obra y que dichos criterios también se valoren económicamente.

Como criterio general, se toman como condiciones necesarias los siguientes requisitos:

- Cualquier exigencia incluida en la propuesta debe poder ser satisfecha por los proveedores locales de cemento, áridos, aditivos y hormigón. Carece de sentido proponer materiales de menor huella de carbono que impliquen distancias de transporte mucho mayores por su falta de disponibilidad local.
- Los hormigones de menor huella de carbono deben satisfacer todas las exigencias técnicas del Código Estructural en función de su aplicación, clase resistente y clase de exposición ambiental para la unidad de obra concreta para la que se han prescrito.
- Las propuestas técnicas se basarán en tecnologías comerciales, que no requieren desarrollo tecnológico alguno, puesto que se trata de una propuesta de compra pública verde, no de compra pública innovadora.

6.2. Evaluación de la huella de carbono de los hormigones

Una de las bases que se debe cumplir en cualquier procedimiento de licitación es garantizar la máxima objetividad posible para todos los criterios de evaluación y entidades concursantes.

En el caso del hormigón, los criterios mecánicos y de durabilidad se pueden verificar mediante ensayos, ya sean mecánicos a compresión o químicos de velocidad de carbonatación, difusión de cloruros, etc.

Ahora bien, la huella de carbono de un material no se puede determinar a través de ensayos, sino que se evalúa a partir de una metodología que, si bien está normalizada a nivel europeo, está sujeta a hipótesis y simplificaciones, por lo que es imprescindible que dichas hipótesis y simplificaciones estén recogidas a priori para que todas las entidades licitantes presenten ofertas perfectamente comparables.

Así pues, en el caso concreto que nos ocupa, el alcance de este análisis se limitará a los hormigones in situ y prefabricados que sean de utilización común en obras portuarias.

Además, el estudio se limitará a las fases A1-A3 del ciclo de vida de los hormigones de acuerdo con la norma UNE EN-15804, el denominado de cuna a puerta. Los motivos de limitar el análisis a estas fases son los siguientes:

- La fase A4, transporte del hormigón a obra, y la fase A5, puesta en obra, no se incluyen porque se trata de fases equivalentes independientemente del tipo de hormigón que se utilice.
- Las fases B y C del ciclo de vida no se incluyen porque la incertidumbre en su cálculo es muy elevada, por lo que se perderían los criterios de objetividad y comparabilidad. Además, estas fases no deberían resultar en huellas de carbono significativamente diferentes para los distintos tipos de hormigón que se utilicen, siempre y cuando cumplan con las exigencias del Código Estructural.

6.3. Propuesta de esquema de licitación

Como se ha comentado previamente, no existe una definición común de hormigón bajo en carbono o de cemento bajo en carbono, por lo que no es posible recoger estos conceptos en los pliegos de licitación. Por este motivo, a continuación, se describe un procedimiento que permite

incluir estos criterios en el proceso de contratación de manera objetiva y comparable.

6.3.1. Paso 1: identificación de los hormigones de proyecto y definición de hormigones de referencia

En una primera etapa, se identifican los hormigones más relevantes de la obra y para su especificación concreta, es necesario calcular una huella de carbono media para dicho hormigón que sirva de referencia para las entidades licitantes.

A modo de ejemplo, se proponen los siguientes tipos de hormigón de uso común en obras portuarias (Tabla 1).

Para cada uno de estos hormigones, el proyectista debe definir una dosificación tipo que cumpla con las prescripciones técnicas exigidas por el Código Estructural y, a partir de dicha dosificación, calcular la huella de carbono de referencia para cada tipo de hormigón, información que se incluirá en el proyecto. Para calcular la huella de carbono de los hormigones, existen herramientas verificadas en el mercado que están disponibles para los usuarios.

Es importante destacar que, a priori, no es posible determinar un valor de referencia, porque, como se ha explicado previamente, no hay un valor absoluto que permita definir un hormigón bajo en carbono. Para cada proyecto, es necesario identificar los hormigones de la obra y realizar el ejercicio de determinar una dosificación tipo y su huella de carbono de referencia.

6.3.2 Paso 2: bonificación de la oferta económica

Una vez realizado el trabajo a nivel de proyecto de definir las dosificaciones de referencia y su huella de car-

Tipificación del hormigón	Unidad de obra	Huella de carbono de referencia (A1-A3) kg/m ³
HM-30/F/X0+XA2	Bloques del dique	Por determinar para su incorporación al proyecto
HM-30/F/X0+XA2	Espaldones	
HF-4,5/P/X0+XA2	Pavimento	
HA-30/F/X0+XA2+XS3i	Viga cantil	
HA-35/F/X0+XA2+XS3	Cajones	

Tabla 1. Ejemplos de hormigones utilizables en obras portuarias.

bono, a continuación, es necesario establecer un procedimiento de licitación en el que, a partir de esta información de proyecto, se premie a aquellos licitantes que propongan la utilización de hormigones con una reducción significativa de la huella de carbono con respecto a la huella de carbono de referencia especificada en proyecto.

Estos criterios de bonificación se pueden incluir en la oferta técnica con una mejor puntuación, pero este procedimiento tiene un gran inconveniente como se explica a continuación.

La utilización de hormigones con una menor huella de carbono que los hormigones convencionales implica un mayor coste económico, puesto que la reducción de la huella de carbono de los materiales implica necesariamente inversiones en materia de eficiencia energética o de mejora de los procesos de producción que es necesario amortizar.

Una mejora de la puntuación técnica de la oferta supone un beneficio para el licitante, pero muy limitado, ya que el mayor peso de la puntuación recae siempre sobre la oferta económica. Teniendo en cuenta que la utilización de hormigones con una menor huella de carbono supone un encarecimiento de la oferta económica, la mejora de la puntuación en la parte técnica nunca compensará la penalización de la parte económica y conducirá, irremediablemente, a la exclusión a efectos prácticos de aquellos licitantes que apuesten por reducir la huella de carbono de los hormigones.

Para solucionar esta problemática, se propone el modelo que han seguido en Países Bajos. Este modelo incluye los siguientes pasos:

1. Calcular la huella de carbono total que aportan los hormigones a la obra, cálculo que es sencillo a partir de las mediciones de cada tipo de hormigón y de la huella de carbono de referencia que se ha calculado en proyecto.
2. Establecer escalones de reducción con respecto a esta huella de carbono total, por ejemplo, del 5, 10 o 15%.
3. Para cada uno de estos escalones, se debe calcular el extracoste que supondría utilizar estos hormigones de menor huella de carbono con respecto a un hormigón convencional. Para ello, basta con solicitar información a los proveedores de hormigón locales.
4. Este extracoste se bonificaría en la oferta económica del licitante que apueste por incluir en su oferta hormigones bajos en carbono, de manera que la oferta económica de dicho licitante sería su oferta económica real más el extracoste calculado.

Esta oferta económica bonificada con el extracoste se utilizaría únicamente en el proceso de adjudicación, para comparar la oferta económica de este licitante con la oferta económica del resto y adjudicar la obra.

Ahora bien, el adjudicatario deberá ejecutar la obra por el importe económico que realmente licitó, no por el importe bonificado, puesto que esta bonificación únicamente se utiliza a efectos comparativos para la adjudicación, no para la ejecución real de la obra.

6.3.3. Paso 3: etapa de construcción

Una vez se haya adjudicado el proyecto y se llegue a la etapa de ejecución material, es necesario garantizar que

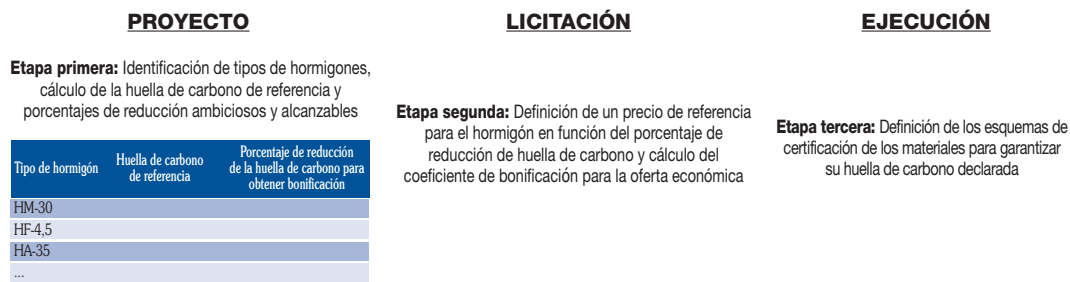


Fig. 1. Resumen de los pasos técnicos necesarios para la consideración de criterios de huella de carbono en los procesos de adjudicación y ejecución de obras portuarias.

la entidad adjudicataria satisface los compromisos medioambientales adquiridos en la oferta.

En este sentido, como no es posible determinar la huella de carbono de los materiales mediante ensayos, es necesario garantizar que la huella de carbono declarada por los proveedores se ajusta a la realidad y que satisface los compromisos adquiridos en la oferta. Con tal fin, es necesario que la declaración de la huella de carbono por parte de los proveedores esté certificada por una tercera parte.

Para ello, será necesaria una doble verificación:

- La verificación de la herramienta de cálculo de la huella de carbono que utiliza el proveedor. Es decir, la herramienta debe estar verificada por una entidad certificadora independiente.
- La verificación de los datos ambientales concretos que se utilizan para el cálculo de la huella de carbono (materiales componentes, consumos eléctricos, etc.), para lo que será necesario que la entidad certificadora realice una auditoría del proveedor en la que se verifiquen todos esos datos de entrada.

Por último, indicar que sería responsabilidad de la dirección facultativa exigir la certificación correspondiente y

garantizar que la huella de carbono de los materiales satisface los compromisos adquiridos en la presentación de la oferta.

7. CONCLUSIONES

En este informe se incluye un procedimiento sencillo y robusto para incentivar que las entidades que participen en el proceso de licitación para la ejecución de obras portuarias utilicen hormigones de una menor huella de carbono y, así, contribuir al cumplimiento de los objetivos de Puertos del Estado en materia de descarbonización.

Podrían considerarse metodologías alternativas, si bien, es probable que su complejidad fuera mayor a la propuesta en este informe y probablemente dificultaría la consecución última del objetivo manifestado por la propiedad, que es la reducción de manera fehaciente y eficaz de la huella de carbono del citado proyecto.

8. REFERENCIAS

Compra pública sostenible en el sector de la construcción: del concepto a la acción, Abril 2021, Roland Berger.

Transición energética del ecosistema de puertos y marinas de Catalunya: Metodología para la definición de las Estrategias

Jordi Garriga

Project Manager Electrical Systems and Sustainability, SENER, jordi.garriga@sener.es

Xavier Pascual

Director Consultancy Services & Innovative Solutions, SENER, xavier.pascual@sener.es

1. INTRODUCCIÓN

El sistema portuario catalán gestionado por Ports de la Generalitat cuenta con 45 puertos que desarrollan actividades recreativas en marinas y clubs náuticos, así como actividades comerciales y de cruceros. Además, cuenta con una red de cofradías de pescadores repartidas por todo el litoral catalán.

Según el Pla de Ports 2030, los objetivos de transición energética y descarbonización que deben abordar los puertos gestionados por la Generalitat de Catalunya son: la mejora de la eficiencia energética de las instalaciones y usos portuarios y reducir las emisiones de GEI; la promoción de la diversificación energética y la producción y uso de energías renovables; la minimización del impacto sobre la calidad del aire derivada de los usos y actividades en los puertos y la minimización de las afectaciones en la población y en los espacios naturales cercanos derivados de la contaminación acústica y luminosa.

Para acometer dichos objetivos y cumplir con las normativas medioambientales europeas, españolas y catalanas, se define una Estrategia que permitirá caracterizar qué acciones hay que priorizar para descarbonizar el sector portuario catalán, y que posteriormente puedan ser ejecutadas mediante un Plan de Actuación. Sener ha sido adjudicatario del contrato para la redacción de la “Estrategia de impulso de las energías renovables y de bajo impacto ambiental y la electrificación progresiva de los puertos”.

En esta ponencia, se detalla la metodología que se ha seguido para la definición de la Estrategia, que puede ser de aplicación para cualquier otro ecosistema portuario.

2. METODOLOGÍA

En la figura 1 se muestra el proceso seguido para llegar a la propuesta de líneas estratégicas y actuaciones, y se detalla en los siguientes apartados.

2.1. Selección de puertos representativos y entrevistas

Se visitan quince puertos para obtener información relevante para plantear las líneas estratégicas y ver las tendencias actuales y las limitaciones destacadas del sistema portuario catalán. Se realiza un breve análisis de las medidas programadas o ya implantadas que ayuden a la descarbonización, continuando por una visión futura del puerto en 10 y 20 años. Por último, se pregunta por datos técnicos relacionados con la demanda energética y la instalación eléctrica existente. Los quince puertos seleccionados representan todos los tamaños y tipologías: marinas deportivas, clubs náuticos, varaderos, cofradías de pescadores, e incluso puertos comerciales y de cruceros. Esta selección es una muestra significativa del total, de modo que los datos obtenidos podrán ser extrapolados para el resto de puertos.

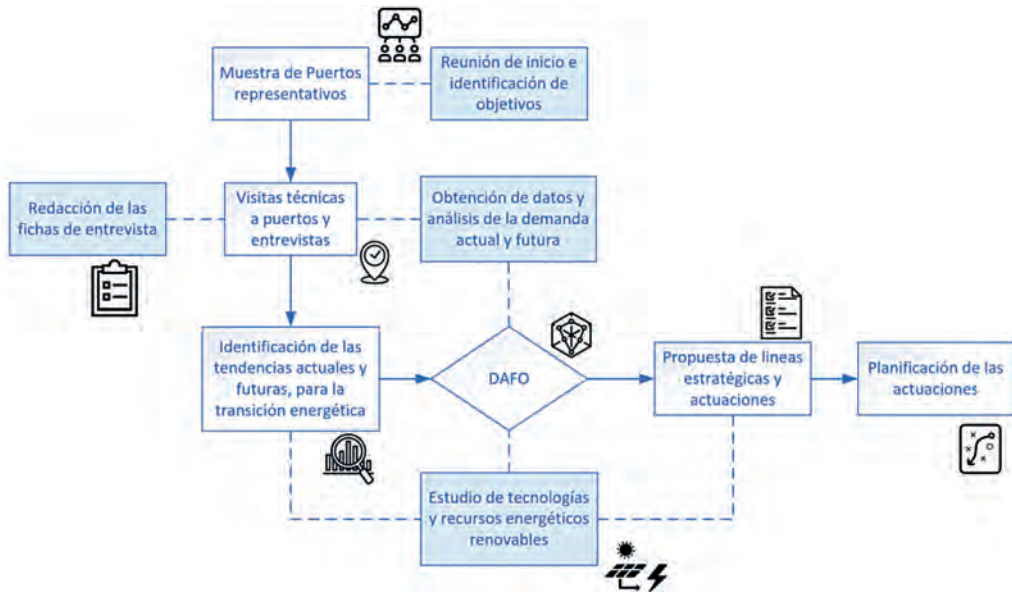


Fig. 1. Metodología Usada.
Fuente: Sener.

El objetivo perseguido por estas visitas y entrevistas es conocer de primera mano las dificultades, preocupaciones, expectativas e iniciativas existentes en los puertos, para conocer el estado actual del ecosistema portuario, y que constituya un punto de partida para la definición de las estrategias.

2.2. Identificación de tendencias y limitaciones

A partir de las visitas y entrevistas realizadas en los puertos seleccionados, se recogen las principales tendencias que se han ido repitiendo, relativas a la descarbonización y uso de energías renovables. Estas tendencias permiten informar sobre las preocupaciones, limitaciones y problemáticas del día a día del entorno portuario. Al mismo tiempo, dan información muy valiosa de los caminos que actualmente se están adoptando para hacer frente al cambio de paradigma energético.

Las principales tendencias detectadas son la voluntad de creación de comunidades de energía renovable o el uso de tecnología fotovoltaica (autoconsumo) tanto en marquesinas como en las cubiertas de los edificios del puerto.

También se está incentivando la movilidad eléctrica terrestre (plazas de aparcamiento con cargadores eléctricos y el uso de patinetes eléctricos para el personal del puerto). El uso de la movilidad eléctrica marítima es aún muy embrionario. En cuanto a la reducción de consumos, se está implantando el pago por uso de los servicios de agua y electricidad de las torretas inteligentes, así como la sensorización y contadores distribuidos de las redes de suministro eléctrico y agua.

Por otro lado, existen ciertos condicionantes que pueden retrasar la puesta en marcha de inversiones en descarbonización tales como: limitaciones administrativas (concesiones, relación con el entorno del puerto), falta de sensibilidad por la sostenibilidad de los usuarios, o la difícil situación financiera de parte del ámbito pesquero.

Finalmente, se detecta que la robustez de las acometidas eléctricas que alimentan los puertos es clave para permitir la progresiva electrificación de los puertos.

A modo resumen del estado actual de los puertos en materia de sostenibilidad, se crea una tabla donde se recoge, para cada puerto, los siguientes datos (si existentes):



Fig. 2. Cargador eléctrico de embarcaciones y torreta inteligente.
Fuente: Sener.



- Potencia demandada (kW)
- Instalación fotovoltaica y potencia instalada (kWp)
- Cargadores eléctricos para vehículos
- Torretas (agua, electricidad) inteligentes
- Desaladora
- Transporte eléctrico (marinería, suministros, varadero)
- Año de finalización de la concesión

2.3. Demanda energética y huella de carbono

En base a los datos obtenidos en las visitas a puertos y gracias a los datos de consumos agregados proporcionados por Ports de la Generalitat, se estima el reparto actual del consumo de recursos energéticos hasta el año 2021 para el conjunto del sistema portuario catalán. El 97% de las emisiones provienen del uso de gasolina y gasoil, el 2,5% proviene del mix eléctrico y el resto del gas natural usado sobre todo en edificios comerciales (restaurantes). Los factores de emisión considerados para calcular la huella de carbono de ám-

bito I (combustibles) y ámbito II (mix eléctrico) provienen de la “Guía de càlcul d'emissions de gasos amb efecte d'hivernacle (GEH). Generalitat de Catalunya (2021). Hay que tener en cuenta que las emisiones y huella de carbono de ámbito I ligado a los combustibles fósiles de la movilidad marítima (embarcaciones recreativas, pesca) no se contabilizan como huella de carbono de Ports de la Generalitat, puesto que las embarcaciones y sus consumos no forman parte de sus activos. Así pues, en el caso concreto de Ports de la Generalitat, el 85% de sus emisiones provienen de su consumo eléctrico, y únicamente el 9% proviene del uso de combustibles fósiles.

En definitiva, el mayor impacto en la descarbonización será mediante la reducción de consumo de combustibles fósiles y su reemplazo por la electrificación y la generación renovable. El consumo de gasoil y gasolina abastece principalmente la flota náutica y embarcaciones pesqueras. Además, buena parte de la maquinaria usada en los varaderos es de tracción fósil.

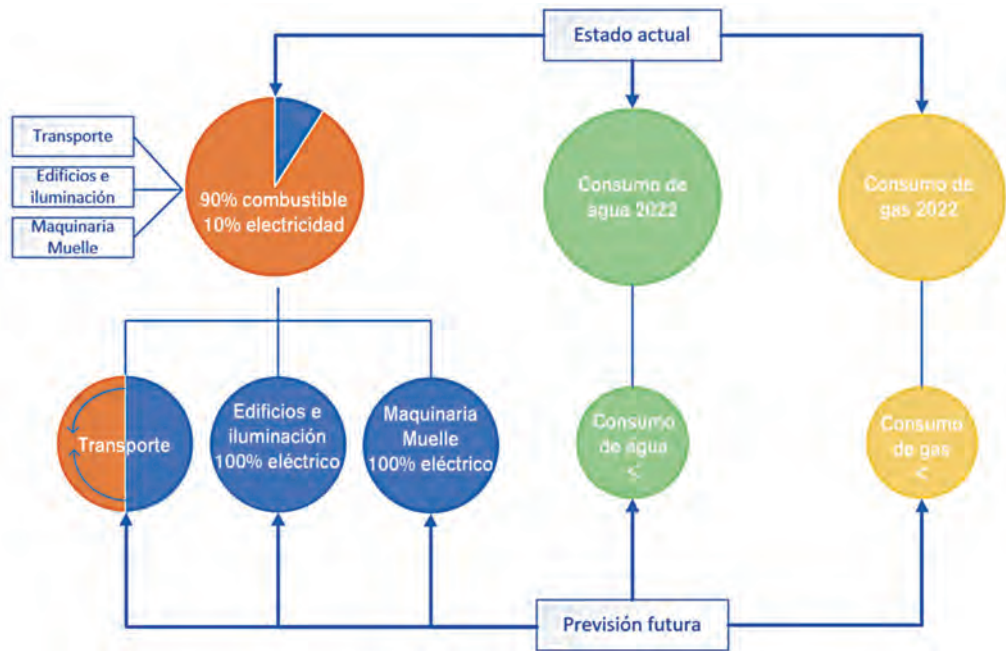


Fig. 3. Estado actual y previsión futuro de consumos del ecosistema portuario.
Fuente: Senec.

Con las tendencias de impulsar la movilidad marítima y terrestre eléctrica, el aumento de la capacidad de las acometidas eléctricas y la electrificación de varaderos y astilleros, se puede prever una tendencia a la baja respecto al consumo de combustibles tradicionales. Las nuevas tecnologías y sistemas como el pay per use en torretas eléctricas auguran una optimización del consumo eléctrico por parte de los usuarios. No obstante, el grado de madurez de las diferentes tecnologías no es el mismo, por lo que resulta relevante priorizar las inversiones acometer y en qué plazos.

Relativo a la flota pesquera, actualmente no es viable substituir la tracción fósil de las embarcaciones por energía eléctrica. La reducción de las emisiones ligada al ámbito pesquero deberá considerar otros aspectos, tales como el uso de materiales de baja huella de carbono, la reducción del consumo de agua y electricidad cuando las embarcaciones están amarradas, o la sostenibilidad de las lonjas y sus cámaras de refrigeración.

2.4. Tecnologías y recursos energéticos renovables

Se realiza un “benchmark” o estudio de factibilidad de las tecnologías y/o recursos renovables que podrían ser de aplicación para dar respuesta a las líneas estratégicas que se definen al final de esta metodología. Se analiza, entre otras, las siguientes: energía fotovoltaica y eólica, geotermia, vehículos eléctricos terrestres y marítimos, acumuladores de energía, pilas de hidrógeno, desaladoras, o materiales de baja huella de carbono. Se analizan también los sistemas inteligentes de gestión y sensorica asociada, así como la aplicabilidad de comunidades energéticas dentro del ámbito portuario.

Respecto la energía fotovoltaica, los puertos son generalmente instalaciones con una muy buena exposición solar, con buena ventilación y en muchos casos con superficies disponibles en las cubiertas de edificios, talleres o marquesinas. Además, el periodo de retorno es relativamente bajo, por lo que se observa que la implantación de fotovoltaica forma parte de las inversio-

nes ya acometidas o previstas en varios de los puertos visitados.

El objetivo perseguido mediante este análisis como parte de la metodología definida es el de instruir y dar información al Cliente del estado del arte y características principales de las tecnologías y vectores de descarbonización para que sirva como base para poder contextualizar las diferentes estrategias que se definen al final de la metodología.

2.5. Análisis DAFO del ecosistema portuario

El análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) es un instrumento que permite estudiar la situación del ecosistema portuario analizando sus características internas, así como externas en relación a la descarbonización y uso de energías renovables. Este análisis se ha realizado a partir de los datos recopilados y analizados gracias a las visitas y tendencias detectadas, junto con el examen de las tecnologías actuales para la transición energética hacia la descarbonización.

Es relevante la colaboración con el Cliente en esta etapa del estudio, para asegurar que la lectura realizada está alineada con la visión general del ecosistema portuario que tiene el Cliente.

El análisis DAFO es un paso previo imprescindible para determinar las líneas estratégicas. Estas se van a definir, una vez realizado el DAFO, para explotar y favorecer las fortalezas y oportunidades detectadas, así como para mitigar las amenazas y debilidades identificadas.

3. PROPUESTA DE LÍNEAS ESTRATÉGICAS Y ACTUACIONES

El siguiente paso de la metodología consiste en proponer las líneas estratégicas para acometer los objetivos definidos, en base a los condicionantes y análisis previos descritos.

Se han propuesto doce líneas estratégicas, que se enmarcan en las siguientes categorías:

- La electrificación y uso de energías renovables
- Sostenibilidad del ámbito pesquero
- La movilidad sostenible
- La legislación y ámbito administrativo
- La economía circular

Además, es necesario definir el ámbito dentro del sector portuario en el que aplican las distintas estrategias y actuaciones previstas. Esto permitirá al Cliente focalizar y particularizar las actuaciones a realizar según la tipología de servicio e instalaciones. Se definen los siguientes ámbitos:

- Conjunto del sistema portuario
- Náutica popular y recreativa
- Ámbito pesquero
- Muelles comerciales
- Varaderos y talleres

3.1. Actuaciones e indicadores

A cada línea estratégica se le asocian una serie de actuaciones o acciones que deben permitir ejecutarla. Dichas actuaciones son aspectos concretos a los que se les puntúa en base a unos indicadores. Los indicadores se definen para poder priorizar inversiones y entender el grado de madurez o aplicabilidad de las medidas planteadas. A su vez, permiten categorizar las actuaciones y medidas de cada línea estratégica en los términos de “prioridad”, “complejidad” y “plazo”.

El concepto de prioridad se refiere al peso relativo e impacto que la medida puede tener sobre los objetivos finales definidos por la estrategia. De este modo, se categoriza como prioridad “alta” a aquellas medidas que tienen un alto impacto en la descarbonización, y que por tanto deberían potenciarse de manera preferente.

El grado de complejidad de la medida se refiere a las dificultades tanto técnicas como administrativas o normativas que implica llevarla a cabo. Una complejidad baja implica que el grado de implantación de la medida en otros puertos o instalaciones similares es alto, y que las tecnologías involucradas están extendidas y existen distintos proveedores/instaladores que permiten una ejecución eficiente. Por el contrario, un alto grado de complejidad puede indicar

una dificultad técnica elevada y que las tecnologías involucradas en la medida no están tan implantadas en instalaciones similares, o que el mercado no está suficientemente maduro. También puede referirse a limitaciones normativas actuales que dificultan su ejecución, o grandes interfaces entre administraciones y/u organismos públicos.

Los grados de complejidad se definen mediante el siguiente código de colores:

- Grado de complejidad bajo.
- Grado de complejidad medio.
- Grado de complejidad alto.

El plazo indica la ventana temporal en la que se prevé que una medida sea de aplicación, con las máximas garantías de éxito. Este parámetro es orientativo, y va ligado a la "prioridad" y "complejidad" definidos arriba. Aquellas medidas que tienen una prioridad alta y una complejidad baja, deberían potenciarse de forma que se lleven a cabo cuanto antes (a corto plazo). Sin embargo, las medidas que dependen de factores externos tales como el grado de madurez de una tecnología o la reglamentación administrativa, y que hoy en día no serían de fácil aplicación, se categorizan como medidas a aplicar a medio o largo plazo. En la Tabla 1 se muestra la relación entre las variables utilizadas para categorizar las medidas definidas:

		Complejidad		
		●	●	●
Prioridad	■■■■■■■	Corto/Medio	Medio	Largo
	■■■■■■■	Corto	Corto/Medio	Largo
	■■■■■■■	Corto	Corto/Medio	Medio /Largo

Tabla 1. Tabla de categorización de estrategias.
Fuente: Sener

En la Tabla 2 se muestra la plantilla usada para enunciar las línea estratégicas:

3.2. Planificación de las acciones y seguimiento

Finalmente se define un marco temporal de aplicación de cada estrategia presentada, teniendo en cuenta los indicadores evaluados, y con el objetivo de cumplir con los objetivos de sostenibilidad y descarbonización previstos. El marco temporal de aplicación prevé los períodos de: 2025, 2030 y 2040, y para cada estrategia definida se define un plazo orientativo para su aplicación.

Notar que los clubs náuticos, marinas deportivas y varaderos son concesiones de Ports de la Generalitat. En consecuencia, hay que tener en cuenta en qué fase del periodo de concesión se encuentra cada concesionario para que tenga sentido abordar inversiones de calado en sostenibilidad. Este aspecto puede dificultar una planificación e implantación conjunta de las estrategias para que se desarrollen de manera sistemática y homogénea en todos los puertos.

4. CONCLUSIONES

El éxito de una Estrategia depende en gran medida de canalizar las preocupaciones, dificultades y tendencias existentes en actuaciones que realmente den respuesta a las problemáticas particulares y a los objetivos globales de sostenibilidad. Además, debe ser de aplicabilidad transversal y contar con la base técnica de un análisis energético y de emisiones que permita fijar el estado existente. La metodología presentada para definir las estra-

Línea estratégica		Ámbito de aplicación		
LE1	Título Línea estratégica Descripción y objetivos	Sistema portuario/marina/cofradía/varadero, etc		
	Actuación	Prioridad	Complejidad	Plazo
LE1.1	Actuación 1	■■■■■■■	●	Largo
LE1.2	Actuación 2	■■■■■■■	●	Medio
LE1.3	Actuación 3	■■■■■■■	●	Corto

Tabla 2. Ejemplo de línea estratégica.
Fuente: Sener

tegias de sostenibilidad y descarbonización del conjunto del sector portuario catalán establece un punto de partida robusto sobre el cual se podrá definir un Plan de Actuación para acometer la transición energética.

5. AGRADECIMIENTOS

Agradecer a Direcció General de Transports i Mobilitat el seguimiento que han hecho del proyecto de redac-

ción “Estrategia de impulso de las energías renovables y de bajo impacto ambiental y la electrificación progresiva de los puertos”. En particular, la disponibilidad para acompañar a Sener a sus visitas a los distintos puertos, y por proporcionar los datos necesarios para acometer los trabajos.

Agradecer a Aaron Blanco Campos y al resto de los compañeros/as de Sener la ayuda y dedicación en la redacción del proyecto.

Protocolo certificado de acceso y salida de buques. Puerto exterior de A Coruña

José Ramón Iribarren

Director General, Siport21, jose.r.iribarren@siport21.es

Raúl Atienza

Director Técnico, Innovación y Calidad, Siport21, raul.atienza@siport21.es

Carlos B. Cal

Director del Área de Entrenamiento y Asesor Náutico. Siport21, carlos.cal@siport21.es

Andrés Guerra

Jefe Departamento de Sostenibilidad, Autoridad Portuaria A Coruña, aguerra@puertocoruna.com

Juan Diego Pérez Freire

Director, Autoridad Portuaria A Coruña, jdperez@puertocoruna.com

1. INTRODUCCIÓN

El Puerto Exterior de A Coruña ofrece unas enormes posibilidades de explotación, como demuestra el notable crecimiento de sus tráficos desde la entrada en servicio. A la vez, se localiza en una zona de la costa sometida a un clima marítimo muy exigente (fuerte carrera de marea, vientos intensos y temporales de oleaje especialmente duros en invierno).

Su definición, planificación, diseño, desarrollo, construcción y puesta en servicio requirió la ejecución de infinidad de estudios de ingeniería durante un largo periodo. Los trabajos se iniciaron en 1990, hasta la terminación de obras en 2011 (primera fase). Entre ellos, desde el año 2000 se llevaron a cabo numerosos estudios náuticos, simulaciones de maniobra y amarre, evaluaciones de calado y dragados, análisis de operatividad y riesgos, que permitieron optimizar la configuración final de las instalaciones portuarias.

En este trabajo se describe cómo toda esta información se emplea para definir con precisión las condiciones de acceso y salida de los buques (de 20.000 a 200.000 TPM), considerando en detalle su tipología y dimensiones en relación a la configuración portuaria y las condiciones ambientales. El resultado se plasma en un completo protocolo de acceso, procedimiento que se ha aplicado previamente en otros puertos nacionales e internacionales.

Pero en este caso se da un paso más, que supone una notable innovación en el sector: el protocolo de actuación se ha sometido a un proceso de certificación por una sociedad de clasificación de ámbito mundial como Det Norske Veritas (DNV). Ello supone un plus de fiabilidad al validar la solidez y coherencia de todo el proceso de análisis. Este protocolo certificado pasará a formar parte esencial del proceso de toma de decisiones en el acceso y salida de buques bajo diferentes condiciones de clima marítimo, siempre con el objetivo de garantizar la seguridad marítima, dentro de la máxima operatividad.

2. EL PUERTO EXTERIOR

La dársena exterior de Punta Langosteira del puerto de A Coruña (en adelante puerto exterior) es una instalación portuaria ubicada en el municipio de Arteixo de la provincia de A Coruña, España, en coordenadas 43° 21' N, 8° 31' W. Gestionada por la Autoridad Portuaria de A Coruña (APAC), pertenece al sistema portuario de interés general español.

Su dique de abrigo, una de las mayores obras marítimas de nuestro país, se extiende en 3.360 m de longitud sobre la cota -40 m, con un martillo perpendicular de 440 m. El contradique tiene 1.030 m de largo. La línea de atraque principal es de 1.560 m y se completará con otra línea de atraque de ribera de 1.420 m. El calado en la línea de atraque alcanza los 22 m. A destacar además el pantalán

de Repsol, diseñado para el atraque de buques de hasta 200.000 TPM y unido a la refinería a través de un poliducto de 3,8 kilómetros. Es parte del proyecto de traslado de la actividad portuaria al Puerto Exterior.

El canal de acceso tiene una profundidad de 22,48 m y una anchura en bocana de 650 m.

3. CLIMA MARÍTIMO

El viento reinante en la zona es del NE y el dominante del SW con una velocidad máxima registrada de 93.6 km/h. El oleaje reinante es del cuarto cuadrante, siendo la máxima altura de ola significativa registrada en la boya de Punta Langosteira I de 12,37 m. La carrera máxima de marea es de 4,77 m, con un nivel medio de 2,16 m. El puerto se localiza, por tanto, en una zona de la costa sometida a un clima marítimo muy exigente (fuerte carrera de marea, vientos intensos y temporales de oleaje especialmente duros en invierno).

Para la descripción del oleaje se ha utilizado la información obtenida de la boya direccional de Punta Langosteira (REDCOS de Puertos del Estado). El oleaje de mayor frecuencia es el NW (43.6%), centrándose en los estudios normalmente entre 3-5 m de altura significativa de ola y 16 s de periodo de pico. Otros oleajes de menor

frecuencia son los del WNW (8.7%), con mayor capacidad de penetración en la dársena y, por tanto, agitación en el interior.

4. TRÁFICOS PRINCIPALES

Los principales tráficos de esta dársena son graneles líquidos (nueva terminal de Repsol), graneles sólidos y cargas de proyecto. Los buques que constituyen su flota característica cubren el rango 20.000-200.000 TPM.

5. OBJETIVO DEL PROTOCOLO

Teniendo en cuenta el clima marítimo de la zona, los tráficos del puerto y las características del canal de navegación, se consideró oportuno establecer criterios fiables para la autorización o denegación de autorización del acceso y salida de buques, siempre bajo el prisma de la seguridad marítima.

En consecuencia, se elaboró un protocolo implementado en la Autoridad Portuaria de A Coruña para la autorización del acceso y salida de buques de 20.000 hasta 200.000 TPM en la dársena exterior del puerto de A Coruña por condiciones meteorológicas y de mar adversas. Este protocolo, basado en criterios técnicos bien funda-

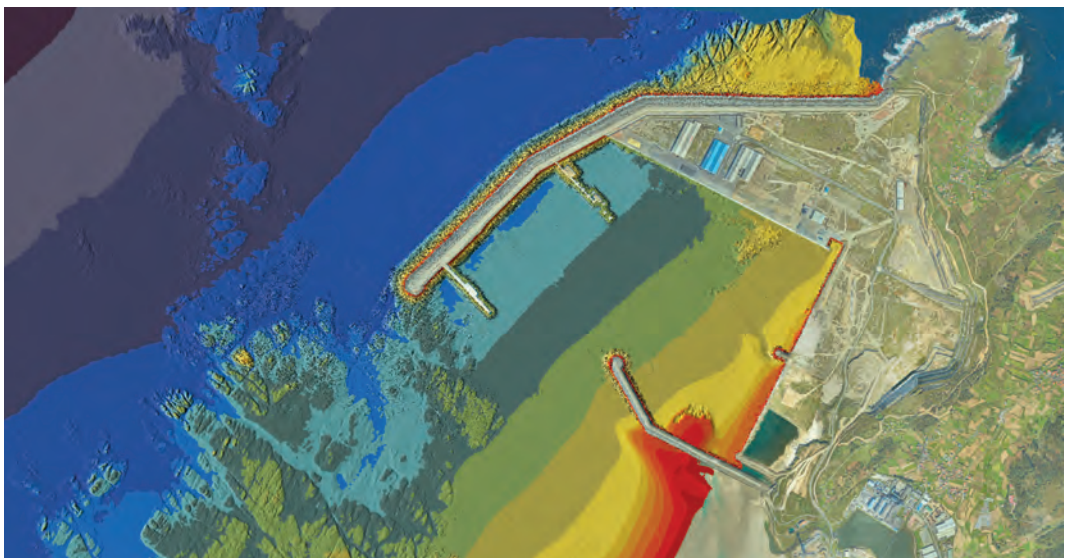


Fig. 1. Ortofoto y batimetría. Fuente: APAC (2024).

Rosa de Altura Significante (m) para Oleaje - Punto SIMAR 1046074

Periodo: 1958 - 2022 - Eficacia: 99.59%

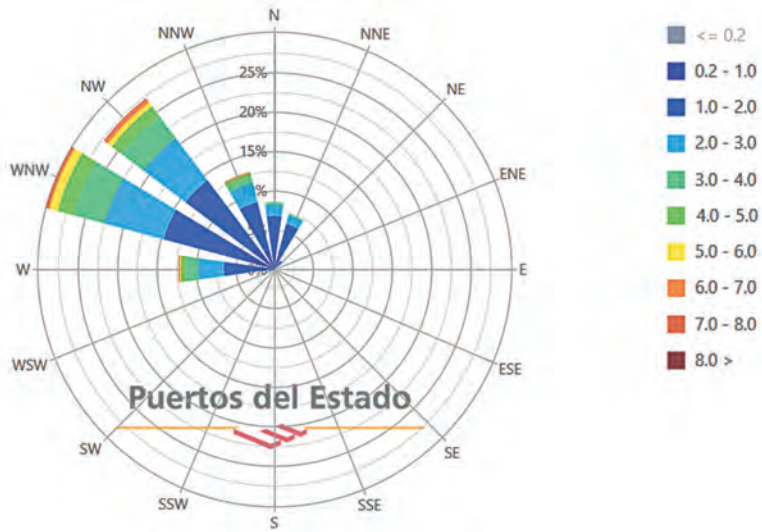


Fig. 2. Rosa de oleaje (Hs) (SIMAR 146074).
Fuente: Puertos del Estado.

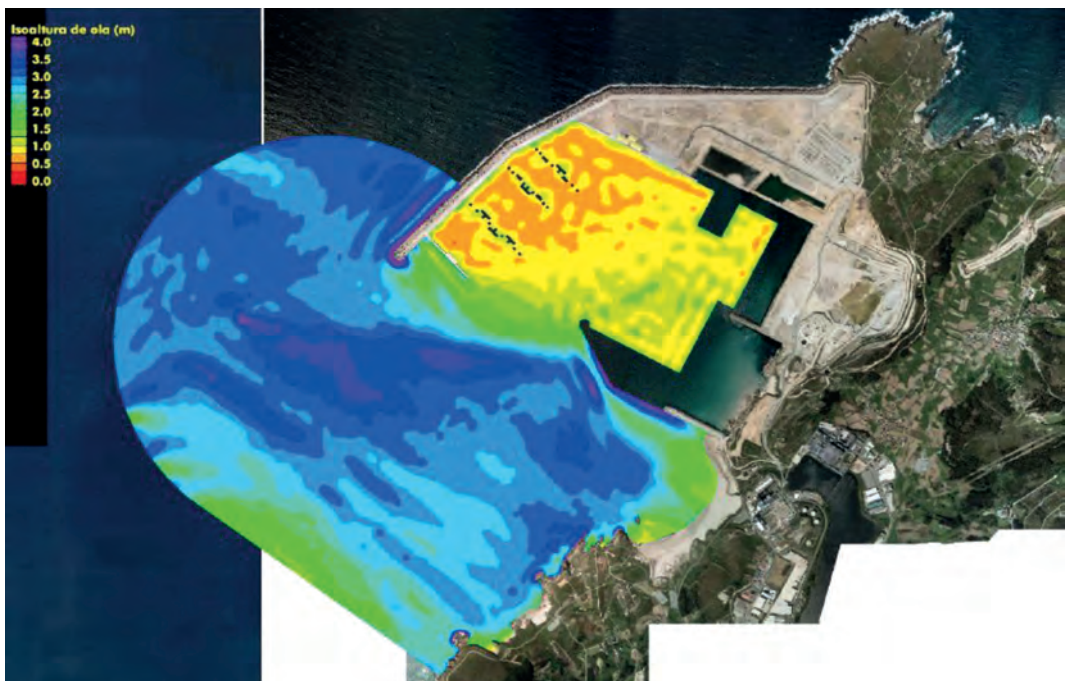


Fig. 3. Propagación de oleaje NW en el canal y dársena.
Fuente: APAC.

mentados, constituye un conjunto de recomendaciones de apoyo a la toma de decisiones a adoptar desde la llegada del buque al punto de embarque de prácticos hasta su destino en zona portuaria, y viceversa, desde la zona portuaria hasta que el práctico abandona el buque en las operaciones de salida.

6. PROCEDIMIENTO

La estructura del protocolo de acceso está basada en la metodología de cinco pasos de la Evaluación Formal de la Seguridad ("Formal Safety Assessment", FSA) descrita en las "Revised guidelines for formal safety assessment for use in the IMO rule making process" (MSC-MEPC.2/Circ. 2 de 9 de abril de 2018).

Se trata de un riguroso procedimiento con un enfoque basado en evaluación de riesgos, lo que facilita su posterior certificación DNV. Considera los riesgos asociados a los modos de fallo "salirse de la vía navegable" (en planta) y "tocar con el fondo" (en alzado) en las operaciones náuticas de entrada y salida de puerto.

En su elaboración se han considerado guías, normas y recomendaciones de organizaciones nacionales e internacionales de prestigio en la gestión de riesgos generales y de riesgos de seguridad marítima: PIANC, ROM, ISO 31000, FSA de IMO.

Las recomendaciones del protocolo se sustentan en los numerosos estudios de ingeniería y simulaciones reali-

zados a lo largo del proceso de diseño, construcción y entrada en operación del puerto exterior, desde 1990 hasta fechas muy recientes. En particular, desde el año 2000 se llevaron a cabo numerosos estudios náuticos, simulaciones de maniobra y amarre, evaluaciones de calado y dragados, análisis de operatividad y riesgos, que permitieron optimizar la configuración final de las instalaciones portuarias.

En los estudios náuticos se utilizaron herramientas de precisión como el simulador de maniobras en tiempo real de Siport21, certificado por DNV para la ejecución de estudios técnicos de maniobra así como para la formación y entrenamiento de Prácticos, Capitanes y Oficiales (DNV ST-033), estando a la vez el Centro de Simulación de Maniobra certificado como Centro de Formación Marítima (DNV ST-0029). Se realizaron numerosas sesiones de simulación con la participación esencial de los Prácticos, asistencia de representantes de la Autoridad Portuaria y Capitanía Marítima, navieras, remolcadores y otras entidades involucradas.

Se ejecutaron además profundos análisis de seguridad ante la varada, evaluando el resguardo bajo quilla con un enfoque probabilista, al combinar la marea con las condiciones de oleaje para diferentes condiciones de carga de todos los buques. Para ello se realizaron cálculos estadísticos basados en el Método de Integración en combinación con el Método de Monte Carlo, cubriendo una amplio rango de tamaños de buques en diversas condiciones de calado.



Fig. 4. Simulador "Full Mission" de Siport21 (DNV ST-033). Fuente: Siport21 (2021).

6.1. Metodología FSA

La metodología de la Evaluación Formal de la Seguridad ("Formal Safety Assessment", FSA) de la OMI cubre las siguientes etapas:

1. Identificación de los peligros (fallos) a evaluar en la operación de la entrada y salida de buques en el puerto exterior.
2. Evaluación del riesgo de materialización de estos peligros.
3. Establecimiento de las opciones de control de estos riesgos.
4. Análisis coste-beneficio.
5. Recomendación de criterios para la toma de decisiones.

Los peligros generales a considerar son:

- Colisión.
- Contacto (puede incluir una subcategoría de contacto de atraque).
- Varada.
- Pérdida de integridad del casco.
- Incendio/explosión.
- Avería del equipo (a menudo causa de otros accidentes).
- Daños personales.

En este caso particular se consideraron dos riesgos principales:

- Salirse de la vía navegable.
 - Dimensiones horizontales – Maniobrabilidad.
- Contacto con el fondo (varada).
 - Dimensiones verticales – Marea-Oleaje.

6.2. Criterio de Riesgo Máximo Admisible y Vida Útil

El riesgo máximo admisible de fallo, entendido como la probabilidad de que se produzca al menos un fallo de salirse de la vía navegable o de contacto con el fondo de, al menos, un buque durante la vida útil de la obra se establece de acuerdo con los criterios establecidos por la ROM 0.2-90.

Por otra parte, el riesgo admisible en cada uno de los accesos de forma individual considera una distribución de flota (% de petroleros y graneleros) y un número total de escalas anuales. Se parte del tráfico previsto y la cifra se actualiza de acuerdo a la evolución real del tráfico (número de buques y tipología).

6.3. Criterio de Operatividad

Se contemplan igualmente los tiempos medios de cierre recomendados en la ROM 3.1-99, para las condiciones límites de operación de los buques de proyecto, ya sean producidos por variables climáticas de presentación aleatoria no predecible con anticipación (vientos, oleajes, corrientes, mareas meteorológicas, falta de visibilidad, etc.), como por otras variables predecibles con anticipación (marea astronómica, etc.). El puerto exterior se corresponde a unas áreas de buques en tránsito (acceso, vías de navegación, canales, bocanas, áreas de maniobra, etc.), y a un puerto de interés general con áreas abiertas a todo tipo de barcos.

6.4. Evaluación del Riesgo

El Comité de Seguridad Marítima de la OMI define tres niveles de riesgo:

- Intolerable: riesgo no admisible
- Insignificante: riesgo tan bajo que no requiere medidas de mitigación
- ALARP, nivel situado entre los dos anteriores: el criterio de aceptabilidad del riesgo de acceso marítimo al puerto exterior, principalmente por condiciones meteorológicas adversas, es que sea tan bajo como sea razonablemente viable ("As Low As Reasonably Practicable").

En el tercer escenario, se definen medidas de mitigación del riesgo, que deben ser valoradas con criterios coste-beneficio.

Para la instalación estudiada, una probabilidad de ocurrencia de los peligros considerados de uno de cada 10.000 tránsitos por el canal ($p_{ij} = 10^{-4}$), para condiciones océano meteorológicas medias, permite ofrecer unas prestaciones que satisfacen las expectativas comerciales del puerto sin exponer su funcionalidad, su operatividad y seguridad.



Fig. 5. Área ocupada con probabilidad 10^{-4} (según volumen de tráfico).
Fuente: Siport21 (2021).

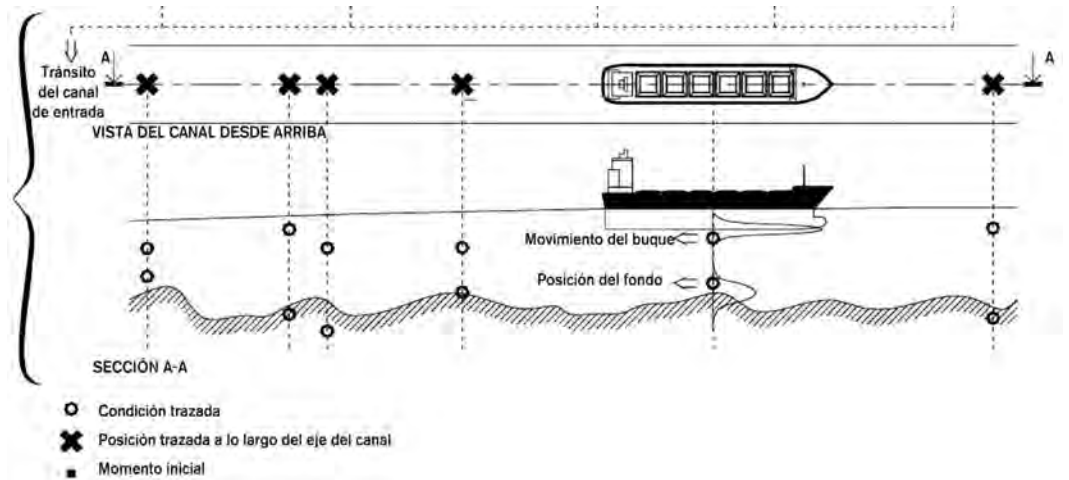


Fig. 6. Variables a considerar en el cálculo de la probabilidad de varada.
Fuente: Siport21 (2021).

6.5. Medidas de Control del Riesgo

El análisis realizado conduce a la definición de medidas de control de los riesgos considerados, a partir de la evaluación tanto de maniobras normales como de emergencia (fallos de propulsión, gobierno, remolque). En síntesis:

- Establecimiento de condiciones climáticas límite de entrada y salida (específicas según TPM del buque, dirección de viento y oleaje).
- Control operativo de la autorización de acceso o salida.
- Ajuste de la derrota del buque al canal previsto mediante los sistemas de ayuda a la navegación.

- Exigencia de un servicio de practica y sus zonas de operación.
- Exigencia de un servicio de remolque (número de unidades, tipología, potencia).
- Definición de ventanas de marea de acceso de acuerdo con la duración de la maniobra y los márgenes de seguridad.
- Criterios de pleamar mínima requerida según Hs-Tp del oleaje, para cada tamaño de buque (TPM) y su calado de entrada/salida.

7. ALGORITMO DE ACCESO Y SALIDA DE BUQUES

La estimación del nivel de agua necesario para el acceso seguro del buque al puerto exterior de A Coruña se efectúa mediante un algoritmo materializado en tablas de doble entrada:

- Buque: TPM y calado.
- Oleaje: altura significativa Hs, dirección D y periodo de pico Tp

que establece el nivel de marea mínimo según la predicción del oleaje en el ETA del buque.

Como se ha indicado, la aplicación del protocolo requiere disponer de predicciones a 72 horas de:

- niveles de marea
- viento (dirección, velocidad)
- oleaje (dirección, periodo, altura)

8. INTEGRACIÓN DEL PROTOCOLO DE ACCESO DE BUQUES

El denominado “PROTOCOLO DE AUTORIZACIÓN DE ACCESO Y SALIDA DE BUQUES POR CONDICIONES DE MAR. PUERTO EXTERIOR DE A CORUÑA” pasa a formar parte del sistema integrado de ayuda a la gestión global e inteligente del puerto y a la toma de decisiones, y por tanto su aplicación en el día a día. Este sistema está basado en la automatización e integración de todos los procesos que se desarrollan en el puerto en una misma red que conecta a la Autoridad Portuaria, a los agentes de servicios, clientes y operadores del puerto, así como otras administraciones relacionadas con la actividad portuaria, a través de la plataforma “Smartport”, mejorando la competitividad de las empresas y los operadores, así como la seguridad.

Tras la introducción por parte del consignatario del buque en el Documento Único de Escala del ETA o ETD del buque, y en su Ficha Técnica del TPM y calado máximo, el sistema comprueba para los siguientes tres días la viabilidad del acceso o salida mediante la aplicación del algoritmo descrito, informando a los agentes involucrados.

9. CONCLUSIONES

La Autoridad Portuaria de A Coruña, con la asistencia de Siport21, ha elaborado un detallado protocolo para la autorización del acceso y salida de buques en el rango 20.000-200.000 TPM en la dársena exterior, conside-

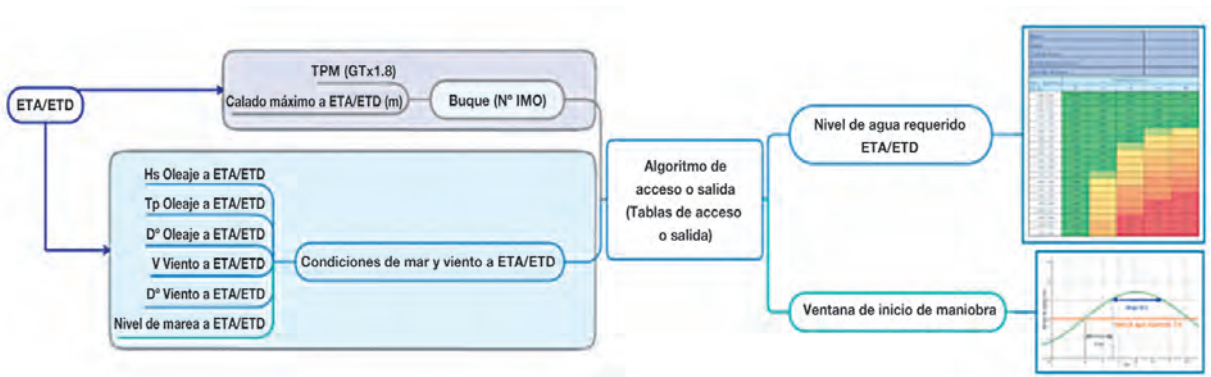


Fig. 7. Algoritmo de acceso y salida de buques.
Fuente: Siport21-APAC (2024)

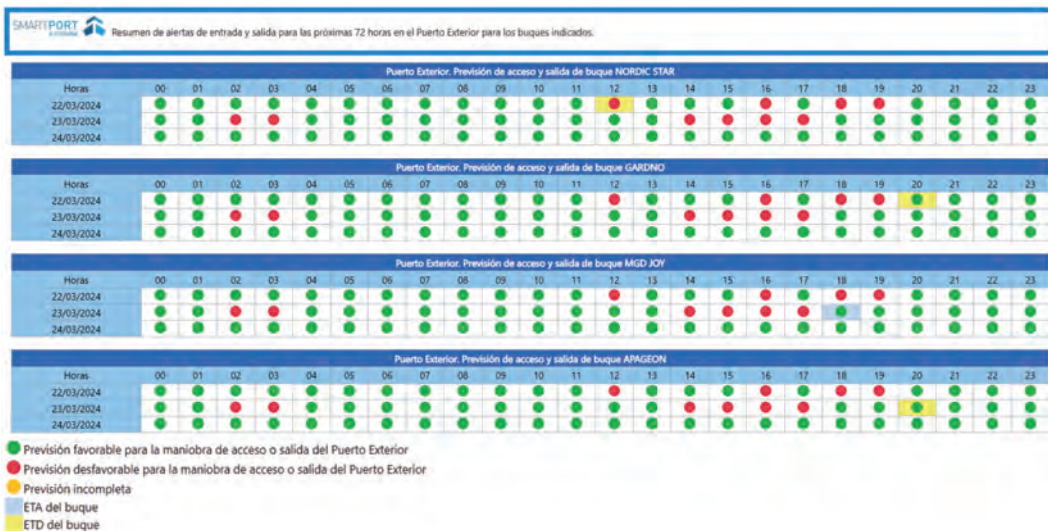


Fig. 8. Informe de Acceso favorable (O) o desfavorable (O) para diversos buques. Fuente: APAC (2024)

rando condiciones meteorológicas y de mar adversas. Este protocolo se basa en criterios técnicos bien fundamentados, apoyados en los numerosos estudios náuticos de operatividad y seguridad, así como en la metodología de Evaluación Formal de la Seguridad ("Formal Safety Assessment", FSA) de la OMI. 0029). En todo el proceso ha sido esencial la participación de los Prácticos, representantes de la Autoridad Portuaria y Capitanía Marítima, navieras, remolcadores y otras entidades involucradas.

El protocolo de actuación se ha sometido a un proceso de certificación por una sociedad de clasificación de ámbito mundial como Det Norske Veritas (DNV). Ello supone un plus de fiabilidad al validar la solidez y coherencia de todo el proceso de análisis. La conclusión de DNV es:

"The document describes in-depth the technical and scientific bases applied to establish the procedure used to support the decision-making process of the port captain to decide on authorizing the approach or departure manoeuvres of each individual ship (20,000 to 200,000 DWT).

The methodology used to determine the decision-making criteria is plausible"

Todo este proceso supone una importante innovación orientada a conseguir y mantener la máxima operati-

dad y seguridad portuaria. Demuestra la continuada iniciativa de la APAC en este sentido y se constituye en una referencia para otros puertos en España y a nivel internacional.

10. REFERENCIAS

PIANC (2014). Harbour Approach Channels Design Guidelines. Report No. 121

Puertos del Estado (1990). ROM 0.2-90. Recomendaciones de Obras Marítimas: Acciones en el Proyecto de Obras Marítimas y Portuarias

Puertos del Estado (1999). ROM 3.1-99. Recomendaciones de Obras Marítimas: Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación

Puertos del Estado (2001). ROM 0.0-01. Procedimiento general y bases de cálculo en el proyecto de obras marítimas y portuarias

ISO 31000:2018. Gestión del Riesgo. Directrices

IMO (2018). Revised guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process (MSC-MEPC.2/Circ.12)

- ALATEC (2007) Reglamento de Explotación del Puerto Exterior de A Coruña
- Senyer (2009) Asistencia Técnica para la Redacción de los Proyectos de Ampliación de las Nuevas Instalaciones Portuarias de Punta Langosteira. Estudio de Maniobrabilidad
- Siport21 (2010). Estudio de Riesgos Náuticos para los Proyectos de Ampliación de las Nuevas Instalaciones Portuarias de Punta Langosteira (Puerto de A Coruña)
- Siport21 (20106). Simulación de Maniobras para Validación del Canal y Enfilación en las Nuevas Instalaciones Portuarias de Punta Langosteira (Puerto de A Coruña)
- Siport21 (2017). Simulación de Maniobras para Definir el Espacio Navegable Seguro de un Buque de 300.000 TPM en el Puerto Exterior de A Coruña
- Siport21 (2017). Análisis de las Condiciones de Acceso al Puerto Exterior de A Coruña
- Siport21 (2017). Tablas de accesibilidad en alzado para el programa SmartPort del Puerto de A Coruña

Optimización del binomio seguridad-operatividad en el Puerto Exterior de Punta Langosteira mediante Inteligencia Artificial

Andrés Figuero, Humberto Carro, José Sande, Enrique Peña, Raquel Costas, Alberto Alvarellos, Juan Rabuñal

Universidade da Coruña, Centro de Innovación Tecnolóxica en Edificación e Enxeñaría Civil (CITEEC), andres.figuero@udc.es, humberto.fidalgo@udc.es, jose.sande@udc.es, enrique.penag@udc.es, alberto.alvarellos@udc.es, juan.rabunala@udc.es

Andrés Guerra, Juan Diego Pérez

Autoridad Portuaria de A Coruña, aguerra@puertocoruna.com, jdperez@puertocoruna.com

1. INTRODUCCIÓN

La industria del transporte marítimo es un pilar fundamental de la economía mundial y un medio necesario para que la cadena de suministro global funcione, ya que representa el 80% de las importaciones y exportaciones de mercancías. Su competitividad y eficiencia son, por tanto, esenciales para el crecimiento económico de las regiones y la sostenibilidad medioambiental. Los puertos juegan un papel fundamental al actuar como polos de intercambio y origen-destino de las rutas. Al tratarse de un eslabón clave del transporte, todas las actuaciones orientadas a mejorar las capacidades de gestión operativa y utilización de recursos tendrán un impacto directo en el resto de la cadena de suministro. Por ello, ajustar la logística portuaria del lado mar a la filosofía Just-In-Time (JIT), supondría un mecanismo de optimización de las escalas, con la identificación de las mejores ventanas operativas. Esto implicaría un beneficio cuantificable, no solo en términos económicos y de seguridad de las operaciones, sino también medioambiental, al permitir la optimización de la velocidad de navegación de los buques en su viaje hacia puerto o la reducción de los tiempos de fondeo, con la consecuente disminución de consumo energético y emisiones asociadas.

Avanzar hacia una concepción de puerto eficiente, sostenible y seguro debe incluir, además de las operaciones relacionadas con los buques, aquellas implicaciones de seguridad derivadas de la interacción ola-estructura. En este sentido, y en especial en aquellos puertos con zonas

de servicio integradas en el propio dique de abrigo, cobra especial relevancia el fenómeno de rebase. Aunque el dique haya sido diseñado como rebasable, y la ocurrencia de eventos no suponga un problema estructural, la presencia de personal en las zonas de trabajo en dichas situaciones sí que deriva en un riesgo que es necesario contemplar. Es por ello que, disponer de sistemas de predicción del fenómeno adaptados a las condiciones reales de cada puerto, contribuiría positivamente como herramienta de ayuda en la gestión, minimizando riesgos.

En este sentido, la Autoridad Portuaria de A Coruña lleva años apostando por el desarrollo y mejora de sistemas de ayuda a la toma de decisiones mediante la aplicación de técnicas de inteligencia artificial. En la actualidad el puerto dispone de herramientas de predicción del riesgo operativo en el muelle transversal y de la ocurrencia de rebase sobre el dique (Costas 2023, Alvarellos 2024). La reciente puesta en funcionamiento de la nueva terminal petrolera en el Puerto Exterior, ha generado una nueva zona de atraque con condicionantes operativos y de seguridad diferentes, que requieren un estudio detallado y optimizado del binomio seguridad-operatividad. Para ello, se han iniciado nuevos procedimientos para la adaptación de las herramientas a la nueva área operativa de interés.

2. METODOLOGÍA

El principal objetivo del trabajo consiste en desarrollar un conjunto de modelos predictivos que faciliten la toma

de decisiones, optimizando tanto la operatividad como la seguridad en las distintas zonas de atraque y servicio del Puerto Exterior de A Coruña. El paquete de herramientas presentado incluye, por un lado, la creación de un modelo multidimensional de predicción del riesgo de permanencia en el atraque, que combina el desarrollo de una predicción operativa de oleaje infragravitatorio, con la información histórica de datos climáticos e incidencias de buques. Por otro lado, una herramienta de predicción del fenómeno de rebase sobre el dique principal, capaz de discretizar zonas de aparición del fenómeno para permitir un cierre parcial de la zona de servicio del mismo.

Ambas herramientas partían de un planteamiento común, el diseño de modelos predictivos adaptados a las características de cada fenómeno analizado mediante la aplicación de técnicas Machine Learning a bases de datos reales.

2.1. Información para la creación de los modelos

Una de las particularidades de las herramientas antes mencionadas es que han sido desarrolladas utilizando bases de datos generadas mediante la monitorización in-situ, tanto de las operaciones de los buques en puerto y de los eventos de rebase producidos sobre el dique prin-

cipal, como de los agentes océano-meteorológicos concomitantes con los anteriores. El punto de partida para la generación de esta información han sido las campañas de campo periódicas que desde el año 2016 se realizan en las instalaciones del Puerto Exterior de A Coruña.

2.1.1. Incidencias en el atraque

Durante las distintas campañas de monitorización realizadas en puerto hasta la fecha, además del registro de los movimientos del buque durante su operación, se realizó un trabajo de identificación temporal de las posibles incidencias producidas en la misma que afecten a la seguridad en el atraque, como son la rotura de amarres (más de dos en un estado de mar), las paradas operativas y el abandono prematuro del atraque. Para generar el histórico de incidencias con el que construir el modelo de riesgo de permanencia en el atraque, además de las registradas durante la propia monitorización de los buques seleccionados, se contó con la colaboración de los distintos operadores portuarios que contribuyeron en la identificación de las mismas en sus operaciones.

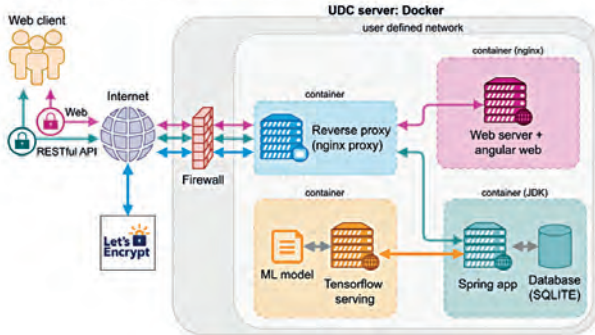
De esta forma se cuenta con información de 30 operaciones a lo largo de 117 estados de mar (1 hora de duración).



Fig. 1. Primera escala en el pantalán de Repsol del Puerto Exterior de A Coruña. Localización de la cámara nocturna de monitorización del rebase



System architecture: AI-based decision-making tools



Project methodology

1st. Data collection: Field campaigns



2nd. DB generation



3rd. Models development

AI-based predictive tools: ML models



Fig. 2. Puerto Exterior de A Coruña. Esquema metodológico del proyecto.

2.1.2. Eventos de rebase

La identificación de los eventos de rebase producidos sobre el dique principal del Puerto Exterior, se realizó mediante la instalación de cinco sistemas de cámaras CCTV que graban en continuo cada una de las tres alineaciones que lo componen. A través del análisis de los videos registrados por las cámaras, se identificaron los eventos producidos durante las diferentes campañas. Éstos se clasificaron atendiendo a su magnitud, el número de eventos por estado de mar, así como la localización de cada evento, para crear un modelo capaz de determinar la zona de aparición del fenómeno. La entrada en funcionamiento de la terminal petrolera del puerto (Fig. 1), ha permitido la instalación de una cámara con visión nocturna para obtener información las 24h del día sobre los posibles eventos que tuvieran lugar en una de las zonas del dique que da servicio al pantalán. Con ello, se está consiguiendo un incremento relevante del número de eventos registrados, contribuyendo a mejorar la capacidad predictiva y de discretización zonal del modelo predictivo de rebase.

Hasta la fecha se han identificado un total de 4276 eventos de rebase agrupados en 470 estados de mar de 1h de duración.

2.1.3. Agentes océano-meteorológicos

Una vez identificados los estados de mar con incidencias en el atraque y eventos de rebase, cada uno de ellos se correlacionó temporalmente con las principales variables océano-meteorológicas, cuyos valores concomitantes se obtuvieron a partir de los equipos de monitorización del medio físico disponibles en las instalaciones (boya de oleaje, mareógrafos y estaciones meteorológicas; Fig. 3). Puesto que dichos parámetros constituirían las entradas de los modelos, las variables seleccionadas deberían ser proporcionadas por los sistemas de predicción meteorológica del Puerto, de manera que pudieran alimentar las futuras herramientas para obtener predicciones en un determinado horizonte temporal.

Tanto el modelo predictivo de rebase como el de riesgo de permanencia en el atraque, utilizan como variables de entrada comunes los parámetros del clima marítimo en el exterior del puerto (altura de ola significativa H_s , periodo pico T_p y dirección media del oleaje Dir), el nivel del mar y el viento (velocidad V_v y dirección media Dir_V), a las que se incorpora el valor de la agitación en el atraque en el segundo de ellos (H_s_{ag}).

Adicionalmente, para que el modelo de predicción del riesgo de permanencia en el atraque contemplase los

principales inductores de problemas en los buques amarrados, se pretendía incorporar información sobre la onda larga en el atraque (Hs_{OL}) entre las variables de entrada, abarcando así el espectro completo del oleaje.

Para ello, fue necesario realizar una campaña de campo entre diciembre de 2021 y abril de 2022 en la que se instalaron 6 sensores de presión en el interior del puerto (Fig. 3). Los registros obtenidos fueron procesados para estimar las alturas de ola significativa en cada estado de mar asociada a los siguientes rangos de periodos: 30-70s, 70-150s y 150-300s. Generando así una base de datos con valores concomitantes de Hs , Tp y Dir en el exterior del puerto, nivel del mar, velocidad y dirección del viento y valores de altura de ola de onda larga, a partir de la cual desarrollar un modelo de predicción de ondas infragravitatorias. Una vez validado, se realizó un hindcast para completar la información de forzadores climáticos necesaria para desarrollar la herramienta final de predicción de riesgo de permanencia en el atraque.

2.2. Técnicas de Inteligencia Artificial

El proyecto planteado conlleva enfrentarse a los tipos de problemas:

- Problema de Regresión: donde el modelo debe predecir el valor numérico de la variable objetivo (altura de ola de onda larga).

- Problema de Clasificación: donde el modelo debe predecir la ocurrencia de eventos (sí/no), como la ocurrencia de riesgo de permanencia en el atraque o de rebase sobre el dique principal.

Para resolver estos problemas, se utilizaron dos técnicas de aprendizaje combinado incluidas dentro de la rama del Machine Learning, como son el Gradient Boosting Machine (GBM) y el Random Forest (RF).

Aunque ambas técnicas pueden ser aplicadas indistintamente para la resolución de problemas de regresión o clasificación, dadas las características de las bases de datos y los fenómenos analizados, cada modelo se construyó con la siguiente técnica:

- Modelo de predicción de la onda larga (regresión): GBM.
- Modelo de predicción del riesgo de permanencia en el atraque (clasificación): GBM.
- Modelo de predicción del fenómeno de rebase (clasificación): RF.

Cualquier modelo creado usando Machine Learning tendrá una serie de parámetros, intrínsecos al modelo, que son los que determinan su funcionamiento y otros externos o hiperparámetros que es necesario obtener y optimizar. Estos se determinan durante la fase de entrenamiento, en donde se usa un conjunto de datos reales (seleccionados previamente en la base de datos), para buscar los

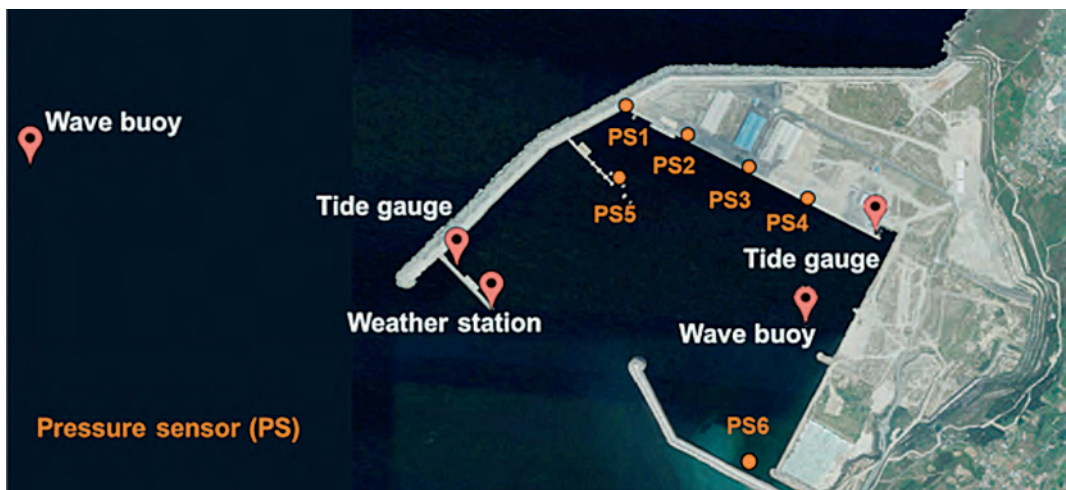


Fig. 3. Localización de los equipos de monitorización océano-meteorológica.

parámetros que proporcionan una predicción con el menor error posible. Para encontrar la combinación más apropiada, se realiza un proceso iterativo de entrenamiento y validación. Una vez obtenido el modelo final, se evalúa su funcionamiento con datos nuevos no usados durante el entrenamiento. El error de los modelos en el conjunto de test proporciona una medida del funcionamiento en el entorno real.

3. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de cada uno de los modelos desarrollados.

3.1. Predicción operativa del oleaje infragravitatorio en el atraque

El primer paso para la creación de una herramienta de predicción del riesgo de permanencia en el atraque que abarcara el espectro completo del oleaje era desarrollar un modelo predictivo del oleaje infragravitatorio que permitiera su incorporación como variable de entrada de la futura herramienta.

La combinación de medidas in-situ obtenidas por los diferentes sensores de presión instalados en el Puerto (Fig. 3) junto con la aplicación de la metodología descrita, permitió generar un modelo GBM de predicción de ondas in-

fragravitatorias en distintas localizaciones de atraque, mostrando un comportamiento prometedor en términos de error y ajuste (Tabla 1).

	Gradient Boosting Machine	
	R ²	RMSE (m)
Hs_OL 30-70s	0.94	0.009
Hs_OL 70-150s	0.91	0.018
Hs_OL 150-300s	0.86	0.009

Tabla 1. Valores del RMSE y R² del modelo de predicción de onda larga en la posición del sensor PS3 para cada rango de periodos definido.

Observando la Fig. 4 puede verse como el modelo generado es capaz de captar no solo la tendencia general de los registros de onda larga medidos, sino también de seguir las pequeñas variaciones locales. El buen desempeño mostrado en cada una de las localizaciones permitió su incorporación como variable de entrada en la herramienta final de predicción del riesgo de permanencia en el atraque.

3.2. Modelo de predicción del riesgo de permanencia en el atraque

Para el desarrollo del modelo mediante la aplicación de la técnica Gradient Boosting Machine (GBM), los 117 es-

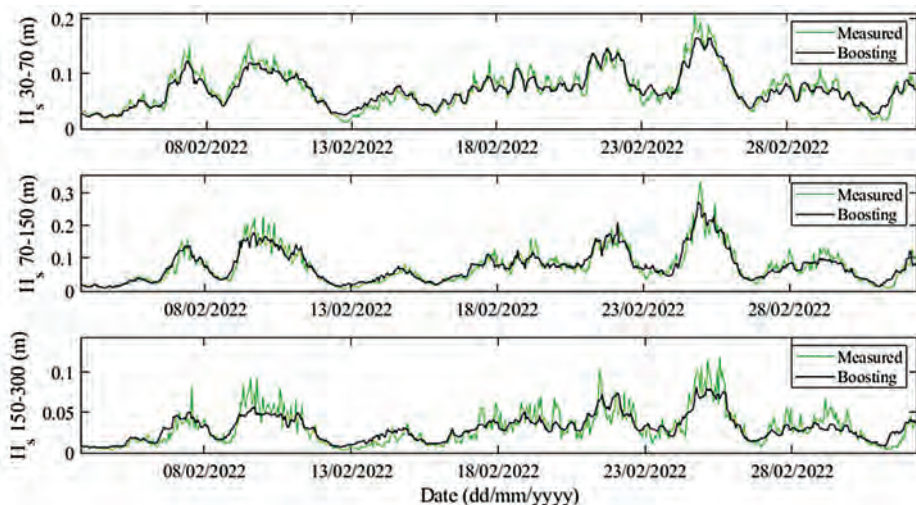


Fig. 4. Valores registrados vs. predichos en la posición del sensor PS3.

tados de mar identificados con incidencias operativas fueron ampliados con 11228 estados de mar adicionales sin incidencias en las operaciones de los buques. Puesto que se perseguía que la herramienta “aprendiera” a diferenciar con precisión la presencia de problemas en el atraque, estos estados de mar fueron seleccionados de manera que presentaran una distribución de características similares a aquellos que registraron incidencias. De esta forma, se disponía de un dataset con información de 11345 estados de mar de 1h (Hs, Tp, Dir, Marea, Vv, DirV, Hs_ag y Hs_OL) y la existencia o no de problemas en el mismo.

Umbral seleccionado	Datos registrados		
	Incidencia	No incidencia	
Predicción	Incidencia	109	34
	No incidencia	8	11194

Tabla 2. Matriz de confusión para el umbral propuesto (entrenamiento).

Como en todo modelo de clasificación, la salida final del mismo es una variable numérica comprendida entre 0 y 1, por lo que es necesario definir un umbral óptimo de

clasificación a partir del cual el modelo considera que puede producirse una incidencia. Para ello, se estudió su capacidad predictiva ante variaciones del citado umbral a través de la matriz de confusión (matriz que muestra tanto el nivel de acierto del modelo (1ª diagonal) como los falsos negativos y positivos producidos (2ª diagonal)). La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos con el umbral propuesto.

Como puede verse, el modelo mostró una capacidad de identificación de los estados de mar con incidencias superior al 93%.

La herramienta desarrollada ha sido testada durante el invierno 2023-2024, mostrando un mejor desempeño que el actual criterio de permanencia en el atraque, siendo capaz de identificar la aparición de problemas, evitando así el falso negativo que arrojó el criterio de alerta actual ante la única situación de interrupción de la operación del invierno.

3.3. Herramienta de predicción del rebase

El desarrollo del modelo predictivo del fenómeno de rebase se llevó a cabo mediante la aplicación de la téc-



Fig. 5. Previsión del criterio actual (arriba) vs. Nueva herramienta (abajo) durante el periodo 02/11/2023 - 04/11/2023 (en amarillo estados de mar con riesgo operativo).

Modelo	Realidad					
	Dique completo		1ª y 2ª alineación		3ª alineación	
	Rebase	No Rebase	Rebase	No Rebase	Rebase	No Rebase
Rebase	75	177	16	99	59	78
No Rebase	4	9231	1	4625	3	4606

Tabla 3. Matriz de confusión para el umbral propuesto (test).

nica Random Forest (RF) a una base de datos de 23876 estados de mar de 1h de duración con información de Hs, Tp, Dir, Marea, Vv y DirV, la existencia o no de rebase (425 estados de mar con rebase y 23451 sin rebase) y, en caso de existir, la alineación sobre la que se produce.

Las primeras pruebas realizadas ofrecían una serie de resultados que, aunque buenos, presentaban errores en algunas situaciones que se consideraban demasiado importantes como para no predecirlas correctamente. Por este motivo, se decidió reentrenar los modelos incorporando pesos a la base de datos. Los pesos dotan de más o menos importancia a ciertas características. En este caso, resultó importante priorizar la magnitud de los rebases, la frecuencia de los mismos y la zonificación, potenciando de este modo los rebases importantes con alturas de ola pequeñas dentro las generadoras de rebases, y aquellos que ocurren en la segunda alineación (acceso a la terminal petrolera del puerto).

Al tratarse de un modelo de clasificación (Rebase Si/Rebase No), de nuevo fue necesario realizar un proceso iterativo para la identificación del umbral de clasificación óptimo. En este caso, su definición se realizó tratando de

minimizar al máximo los falsos negativos (seguridad frente a operatividad) al tratarse de un modelo que servirá como sistema de alerta temprana.

Los resultados del modelo muestran un nivel de acierto en la clasificación de los rebases superior al 94% en cualquiera de las alineaciones del dique. Cabe destacar que todos los falsos negativos registrados corresponden a eventos clasificados como no peligrosos para los usuarios (Fig. 6).

4. CONCLUSIONES

Los modelos desarrollados han mostrado una alta capacidad predictiva tanto de las incidencias operativas en el atraque como de los eventos de rebase en las distintas alineaciones del dique. Sus resultados han mejorado el desempeño de las anteriores versiones, contribuyendo así a la optimización de la planificación de escalas y facilitando la toma de decisiones en materia de seguridad.

Estas herramientas no constituyen un paquete cerrado, pudiendo ser actualizadas periódicamente tras la incor-



Fig. 6. Evento clasificado como no peligroso asociado a un falso negativo registrado en la 3ª alineación del dique.

poración de nueva información. Los modernos sistemas de ayuda al atraque con los que cuenta la nueva terminal petrolera (registro en continuo de variables océano-meteorológicas a pie de pantalán, movimientos del buque y tensiones de amarre) junto con la instalación de una nueva boya colocada en la zona abrigada para tener espectros direccionales, permitirá mejorar el sistema predictivo integral de toma de decisiones mediante la incorporación de nuevos estimadores adaptados a cada zona de operación el Puerto Exterior de A Coruña.

5. REFERENCIAS

- Costas, R.; Carro, H.; Figuero, A.; Peña, E.; Sande, J. A Decision-Making Tool for Port Operations Based on Downtime Risk and Met-Ocean Conditions including Infragravity Wave Forecast. *J. Mar. Sci. Eng.* 2023, 11, 536. <https://doi.org/10.3390/jmse11030536>
- Alvarellos, A.; Figuero, A.; Rodríguez-Yáñez, S.; Sande, J.; Peña, E.; Rosa-Santos, P.; Rabuñal, J. Deep Learning-Based Wave Overtopping Prediction. *Appl. Sci.* 2024, 14, 2611. <https://doi.org/10.3390/app14062611>

Recomendaciones de seguridad marítima para las Instalaciones Renovables Marinas

Juan Marcos Gómez Menchón

Coordinador de programa Técnico Científico, CEDEX-CEPYC, jmgomez@cedex.es

Federico Navarro Cabrera

Coordinador de Sostenibilidad y Contaminación, Dirección General de Marina Mercante, fncabrera@transportes.gob.es

INTRODUCCIÓN

La Dirección General de la Marina Mercante (DGMM), como organismo responsable de ejercer las competencias de seguridad marítima, seguridad de la navegación, seguridad de la vida humana en el mar y la prevención y lucha contra la contaminación de medio marino, está trabajando en la regulación de la introducción de las instalaciones de generación de energía renovable en el medio marino.

En este sentido, la DGMM encargó al Centro de Estudios de Puertos y Costas del CEDEX, la elaboración de una serie de recomendaciones de seguridad marítima para los parques eólicos marinos y otras instalaciones de energías renovables mar adentro.

El CEDEX, un organismo público de vanguardia en el ámbito de las obras públicas, la movilidad, las aguas continentales y marinas, el medioambiente y el cambio climático.

Está adscrito orgánicamente al Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible y depende funcionalmente de este ministerio y del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

El CEDEX está compuesto por ocho unidades técnicas especializadas denominadas Centros y Laboratorios, desde los que se proporciona asistencia técnica de alto nivel, investigación aplicada y desarrollo tecnológico en el marco de la ingeniería civil y el medioambiente.

Uno de estos Centros es el Centro de Estudios de Puertos y Costas (CEPYC).

El CEPYC lleva a cabo estudios e investigaciones relativas a:

- Diseño y explotación de la zona marítima de los puertos.
- Estabilidad y funcionalidad de estructuras marinas ya sean portuarias, costeras u offshore.
- Monitorización de la costa.
- Los efectos y el seguimiento de proyectos y actividades con efectos ambientales en el medio marino.
- Estrategias de protección de la costa mediante el estudio de actuaciones de defensa y restauración del litoral.

En la Unidad de Maniobra de Buques del CEPYC es donde se llevan a cabo los estudios de seguridad marítima, colaborando con Puertos del estado y las Autoridades portuarias, la Comisión de investigación de accidentes e incidentes marítimos, la Dirección general de la marina mercante y diversos organismos públicos y privados.

Los tipos de estudios que realizamos son:

- Simulaciones de maniobras de buques, mediante un avanzado sistema de simulación en tiempo real donde

también se pueden simular el remolque de estructuras offshore por ejemplo.

- Estudios I+D+I: como la modificación de las recomendaciones de obras marítimas (ROM) en base a estudios de simulación.
- Estudios de seguridad de la navegación y prevención de la contaminación, como estudios para el cálculo de las emisiones de los buques según datos AIS.

2. OBJETO

El objetivo del informe que se ha entregado a la DGMM es crear una base técnica que ayude a evaluar el riesgo que supone una nueva Instalación de energías Renovables Marinas (IRM) para la seguridad de la navegación, la protección del medio ambiente marino y el salvamento marítimo.

Con la base de un esquema facilitado por la DGMM, se han analizado las recomendaciones emitidas por organismos internacionales como OMI, PIANC o IALA y las reglamentaciones existentes en otros países con experiencia en eólica marina, especialmente en UE, Reino Unido y EE.UU.

3. ESTRUCTURA DEL INFORME

El informe entregado a la DGMM se compone de los siguientes documentos:

- Una memoria del informe que contiene una descripción de la metodología empleada y las referencias normativas o técnicas de cada uno de los apartados del anexo 1 (recomendaciones) y de los demás anexos.
- Anexo 1: donde se han incluido las recomendaciones generales sobre seguridad marítima y la prevención de la contaminación del medio marino para las IRM. Estas recomendaciones abarcan toda la vida del proyecto desde su planificación, construcción y puesta en funcionamiento hasta su desmantelamiento
- Anexo 2: contiene una lista de comprobación pensada tanto para el promotor como para la Admi-

nistración. Esta lista incluye los aspectos generales que se deben revisar en la documentación de Seguridad Marítima sobre una IRM y en su Evaluación de Riesgos para la seguridad de la navegación.

- Anexo 3: describe la metodología para realizar la Evaluación de Riesgos para la Seguridad de la Navegación (ERSN) de una Instalación Renovable Marina. Se dan orientaciones para identificar los peligros, controlar el riesgo y seleccionar las herramientas adecuadas para la evaluación
- Anexo 4: se incluyen orientaciones sobre los efectos de las IRM en las operaciones de Salvamento Marítimo de búsqueda y rescate y de lucha contra la contaminación. Entre estas orientaciones hay una lista de control SAR y una guía para la elaboración de los planes de autoprotección.
- Anexo 5: contiene indicaciones de seguridad para las embarcaciones que transiten o realicen operaciones dentro o cerca de una IRM y orienta sobre la información que debe comunicarse a los navegantes en relación con los parques eólicos o los de energía undimotriz o mareomotriz

4. EVALUACIONES DE RIESGO PARA LA SEGURIDAD DE LA NAVEGACIÓN

El desarrollo de una IRM puede afectar físicamente a la navegación comercial, la pesca, la navegación recreativa y a otros usos tradicionales de las vías navegables. Además, las IRM pueden afectar al funcionamiento de los sistemas electrónicos de navegación utilizados en el entorno marítimo, incluidos los radares y los sistemas de comunicación. Por todo ello, los promotores deberán realizar una Evaluación de Riesgos para la Seguridad de la Navegación (ERSN), donde deben evaluarse los riesgos asociados a las estructuras propuestas y desarrollarse y evaluarse estrategias adecuadas de mitigación de riesgos.

El objetivo de estos estudios es el de identificar todos los peligros para la navegación que supone una nueva Instalación de energía Renovable Marina, evaluar cada riesgo según sus consecuencias y su probabilidad de ocurrencia, y proponer medidas de control de dichos riesgos para que se reduzcan al nivel más bajo que sea razonablemente posible (ALARP).

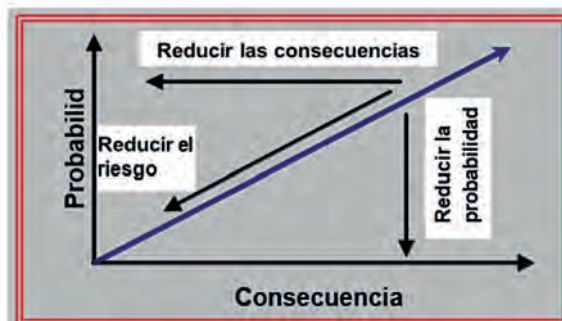
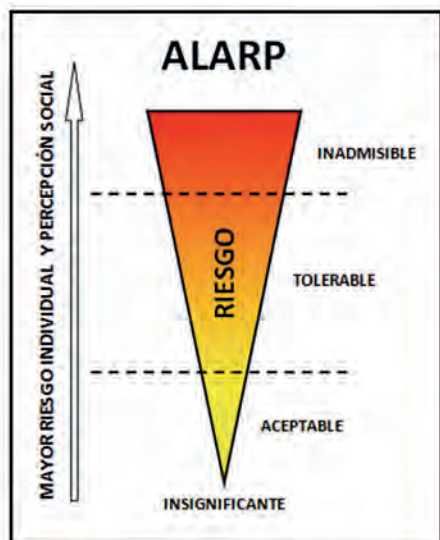


Fig. 1. ALARP y definición clásica del riesgo.

La recopilación de datos y pruebas de la ERSN permitirá comprender las densidades y tipos de tráfico del caso base (situación actual) y estimar el nivel de riesgos de referencia sin la implantación de la IRM y los riesgos inherentes asociados a la introducción de la IRM. Se deberá elaborar un registro de peligros en el que se enumeren los peligros causados o modificados por la IRM y su contorno y los riesgos inherentes asociados a cada peligro.

En su parte final, la ERSN incluirá un registro de peligros indicándose:

- Riesgo asociado a cada peligro.
- Controles y medidas preventivas para cada riesgo.
- Tolerabilidad del riesgo residual una vez aplicadas las medidas de control.

Los estudios de tráfico marítimo no podrán realizarse solo con los datos del Sistema de Identificación Automática de los buques (AIS), estos datos deberán complementarse con observaciones visuales y de radar y consultas a partes interesadas, ya que un gran número de embarcacio-

nes, especialmente las recreativas y de pesca pequeñas, no llevan AIS.

El Estudio de Tráfico Marítimo deberá determinar:

- Las densidades y tipos de tráfico actuales.
- Las densidades y tipos de tráfico previstos en el futuro.
- El efecto de la IRM en las densidades y tipos de tráfico actuales.
- El efecto de la IRM en las densidades y tipos de tráfico futuros.

La evaluación de riesgos para la seguridad de la navegación será necesaria para elaborar algunos de los planes operativos del promotor como el Plan de Autoprotección, el Plan de actuación ante emergencias, el Plan Interior Marítimo, etc. Estos planes junto con otros, como el plan de formación o el plan de mantenimiento de las instalaciones, formarán parte de un Sistema de Gestión de la Seguridad (SGS) integral del promotor. Este sistema se mejorará y adaptará para responder a las necesidades específicas de cada fase del proyecto e incluirá todas las políticas de seguridad de la compañía.

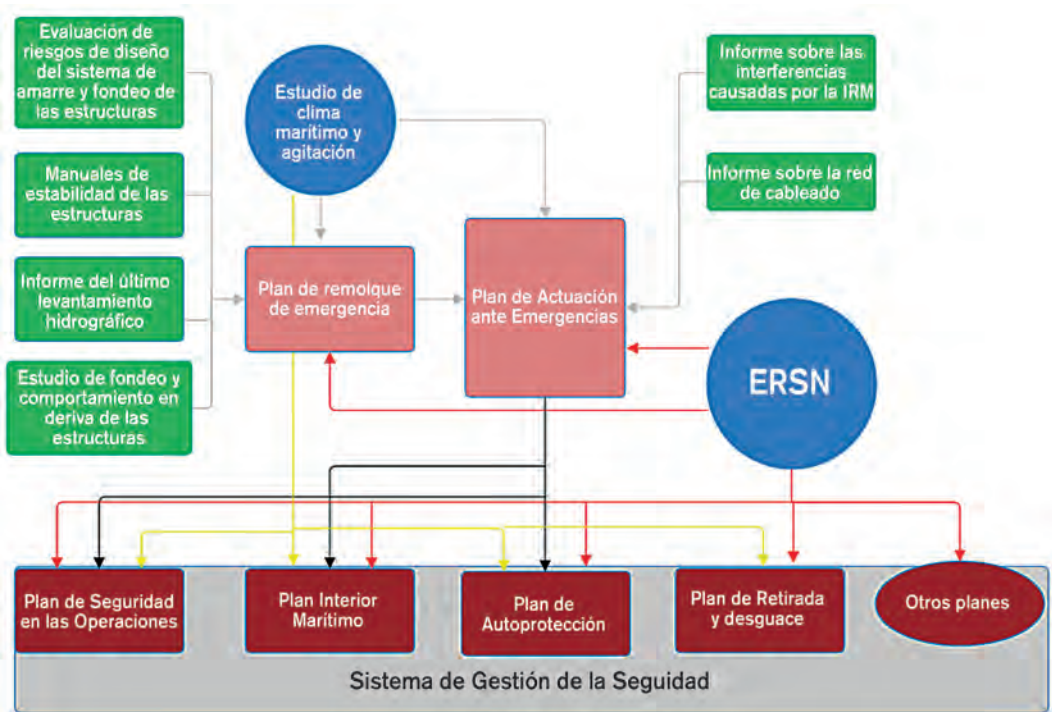


Fig. 2. Elaboración de los planes del Sistema de Gestión de la Seguridad.

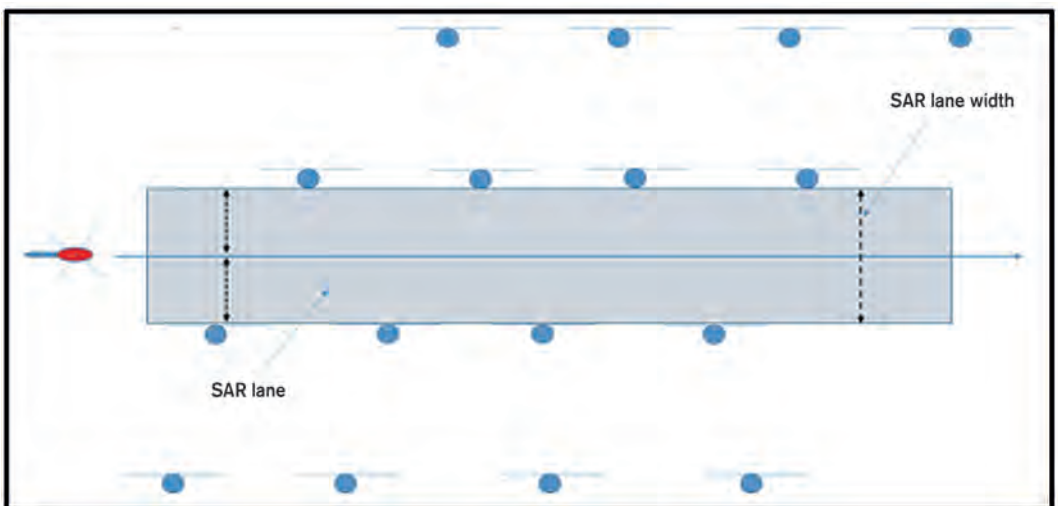


Fig. 3. Vía de circulación SAR en una IRM.

5. RECOMENDACIONES DE SEGURIDAD MARÍTIMAS PARA INSTALACIONES DE ENERGÍA RENOVABLE MARINA

Las recomendaciones deben utilizarse para evaluar todas las situaciones, razonablemente previsibles, por las que el emplazamiento, la construcción, la ampliación, el funcionamiento y el desmantelamiento de un parque eólico marino (u otra IRM) podrían causar o contribuir a una obstrucción o peligro para la navegación, el salvamento marítimo o la lucha contra la contaminación. También deben utilizarse para evaluar los posibles cambios en los patrones de tráfico y las opciones más favorables que deben adoptarse, incluidas las de vigilancia operativa del emplazamiento.

5.1. Diseño del trazado

El diseño del trazado de los proyectos de energías renovables marinas con dispositivos y estructuras flotantes o fijas debe permitir el tránsito seguro a través de las IRM de los helicópteros SAR que operan a baja altura con mal tiempo, y de aquellos buques (incluidas las embarcaciones de rescate) que Salvamento Marítimo determine que deben transitar por ellas, además de los buques y embarcaciones que estén autorizados a hacer operaciones dentro del parque.

5.2. Sistema de anclaje, flotabilidad y estabilidad de los dispositivos

El Sistema de anclaje deberá estar certificado según los estándares de una sociedad de clasificación. Se acreditarán los niveles de flotabilidad y estabilidad intacta y en avería de cada dispositivo mediante un *manual de estabilidad*.

Deberán existir medidas para monitorizar los dispositivos y para actuar en caso de suelta y entrada en deriva de una estructura. Algunas de estas medidas serán:

- Medios de vigilancia de la posición de cada dispositivo (GPS, AIS u otros sistemas de posicionamiento de mayor precisión).
- Servicio de remolque de emergencia con potencia y tiro suficiente, como para poder rescatar un dispositivo que haya perdido su posición.

5.3. Prevención de la colisión con las estructuras

Los dispositivos deberán diseñarse e instalarse teniendo en cuenta unos criterios mínimos para la prevención de la colisión con sus elementos aéreos como las aspas, suponiéndose 6 grados de libertad para instalaciones flotantes. También se estudiará la prevención de la colisión con los elementos sumergidos de la IRM, como el cableado, el sistema de anclaje o los propios dispositivos unidimétricos o mareomotrices que se instalarán sumergidos.

5.4. Marcado y señalización

Deberá determinarse como se señalizará el emplazamiento en su conjunto, de día y de noche, durante las fases de construcción, explotación y desmantelamiento. Las estructuras deberán marcarse y señalizarse para garantizar la seguridad de la navegación y cumplir con los requisitos nacionales e internacionales de señalización y marcado.

5.5. Interferencias y obstaculizaciones en las ayudas a la navegación

Las Instalaciones podrán causar interferencias en las ayudas a la navegación y obstaculizaciones a la navegación visual.

Se deberá hacer un informe basado en estudios para determinar posibles interferencias en:

- Los dispositivos de comunicaciones (como los del Sistema Mundial de Socorro y Seguridad Marítima).
- Los sistemas de posicionamiento (GPS).
- Los sistemas identificación de otros buques (como los radares o el sistema AIS).
- Los sonar o los equipos de navegación.

Se realizarán sobre el terreno los siguientes estudios:

- Un estudio de recepción radioeléctrica.
- Un estudio de zonas de sombra y sectores ciegos para los radares marítimos.

Los promotores deberán instalar los equipos necesarios para eliminar cualquier efecto adverso sobre las ayudas a la navegación y para los servicios de tráfico marítimo.

5.6. Efectos en la hidrografía

Serán necesarios estudios hidrográficos preliminares para el emplazamiento de la IRM con el fin de establecer las características del fondo marino para el anclaje y amarre de los dispositivos, confirmar la profundidad navegable segura, controlar la movilidad del lecho marino e identificar peligros submarinos.

Los estudios hidrográficos también serán necesarios después de la construcción y después del desmantelamiento, ya sea total o parcial.

5.7. Red de cableado

Se deberá evaluar la profundidad de enterramiento de los cables de la IRM y su disposición, para que no afecte a la seguridad de la navegación.

Para ello se podrá realizar una Evaluación de Riesgos de Enterramiento de Cables Submarinos.

Por lo general, las actividades que generen erosión del fondo (como el fondeo, dragado, pesca de arrastre, etc.) no deberían permitirse en la zona de enterramiento del cable.

5.8. Navegación interna

La navegación por el interior del parque para cualquier tipo de buque puede representar un peligro, en las recomendaciones se orienta sobre como determinar zonas de exclusión a la navegación en el contorno del parque.

En todo caso podrán navegar por el interior del parque las embarcaciones del promotor y las de Salvamento Marítimo.

5.9. Efectos sobre el tráfico marítimo

Teniendo en cuenta que la IRM podrá desplazar el tráfico marítimo existente o futuro y podría interferir en otros

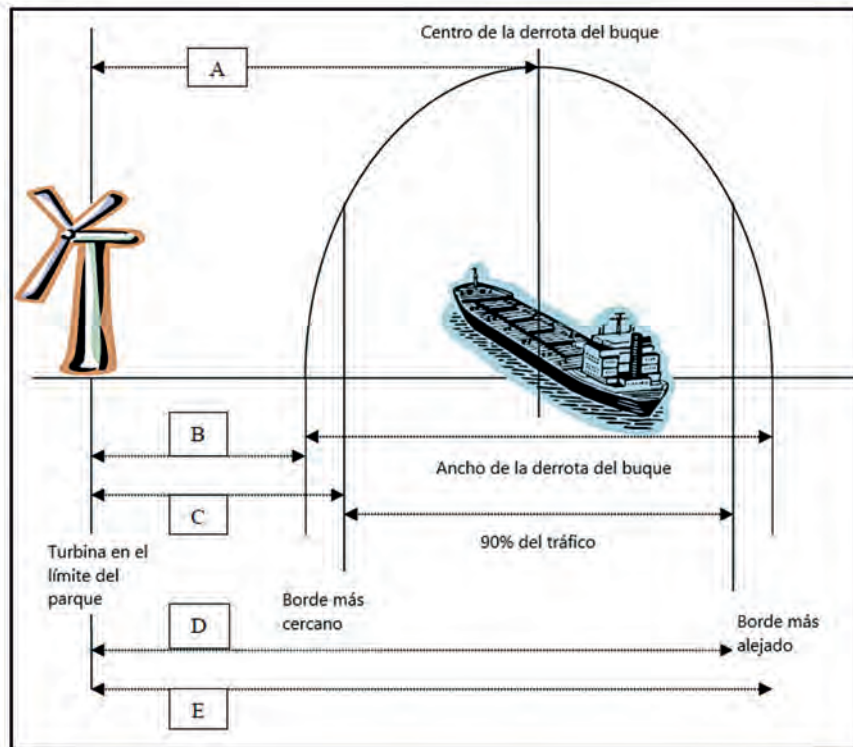


Fig. 4. Límites para la zona de exclusión de una IRM.

usos distintos de la navegación, como la pesca, en La ERSN se deberán cuantificar los riesgos de abordaje, varada o colisión e incluir medidas para mitigarlos.

Para ello se evaluarán los comportamientos de los buques ante el Reglamento Internacional para Prevenir Abordajes en el mar, incluyendo errores humanos e incumplimientos deliberados.

5.10. Condiciones meteorológicas adversas

Para determinar los Efectos de las condiciones meteorológicas adversas en la IRM, deberá llevarse a cabo un estudio del clima marítimo y agitación donde se analicen las condiciones meteorológicas y oceanográficas del emplazamiento que puedan afectar a la seguridad de la navegación.

Estos estudios serán tenidos en cuenta para la elaboración de la ERSN e incluirán, entre otros aspectos:

- Datos sobre las corrientes de marea, su influjo en el tráfico y posibles efectos de la IRM sobre estas.
- Análisis de las condiciones meteorológicas predominantes especialmente las que producen visibilidad restringida, determinándose los vientos y oleajes dominantes.
- Estudio de agitación de oleaje en la IRM para analizar posibles reflexiones o difracciones que afectaran a la navegación.
- Posibles efectos de las estructuras en el viento que podría afectar a la navegación a vela, como enmascaramiento, turbulencias, etc.

5.11. Operaciones SAR y de lucha contra la contaminación

Un nuevo desarrollo de IRM puede presentar riesgos para la seguridad marítima que generen la necesidad de operaciones de búsqueda y salvamento y también puede dificultar operaciones de búsqueda y salvamento no relacionadas con el propio desarrollo. Para garantizar que todas las operaciones SAR, de lucha contra la contaminación y de respuesta a emergencias puedan llevarse a cabo de forma segura y eficaz, los promotores y operadores deben llevarse a cabo una evaluación preliminar

del riesgo que determine los impactos potenciales para estas operaciones que supone la introducción de la nueva IRM en la zona.

5.12. Prevención de la contaminación del medio marino

Las medidas de Prevención de la contaminación del medio marino para la IRM, abarcarán cualquier sustancia peligrosa o contaminante, que provenga de la IRM o que venga del exterior y le afecte.

El promotor deberá elaborar un Plan Interior Marítimo (PIM) según el Sistema Nacional de Respuesta ante la contaminación marina (SNR), que estará en consonancia con el Plan Marítimo Nacional de respuesta ante la contaminación del medio marino.

Se dará una relación de todas las sustancias potencialmente nocivas para el medio marino que podría emitir la IRM, así como los medios de control y monitorización de todas ellas.

Los materiales y pinturas deberán cumplir el convenio AFS de la OMI.

5.13. Autoprotección marítima

Para la Autoprotección de las instalaciones, tendrá que elaborarse un Plan de Autoprotección. Se entiende como autoprotección al sistema de acciones y medidas encaminadas a prevenir y controlar los riesgos sobre las personas y los bienes y a dar respuesta adecuada a las posibles situaciones de emergencia. En este plan se incluirá un Plan de Actuación ante Emergencias que abarcará también la fase de construcción.

El PAU incluirá aspectos tales como la formación del personal, los simulacros de emergencias o el control de la eficacia del propio plan y sus revisiones.

5.14. Medidas de seguridad y control remoto de los dispositivos

El promotor dispondrá de un centro de control de operaciones atendido 24 horas al día y 365 días al año, donde se monitorizará la posición de las estructuras y su integridad y funcionamiento, así como de su sistema de amarre.

En el centro de control de operaciones del promotor se mantendrá escucha activa en el canal 16 de VHF y se dispondrán de medios para monitorizar y registrar los accesos a las zonas de exclusión y seguridad de la IRM.

El centro de control será el responsable de aplicar el Plan de Autoprotección en caso de una emergencia y podrá detener y orientar los generadores en una emergencia, según determine Salvamento Marítimo.

6. COMPETENCIAS, PROCEDIMIENTOS DE APROBACIÓN Y VIGILANCIA DEL CUMPLIMIENTO

La DGMM será la responsable del cumplimiento sobre los aspectos de las IRM que afecten a la seguridad marítima, la seguridad de la navegación, la seguridad de la vida hu-

mana en el mar y la prevención y lucha contra la contaminación de medio marino.

La Administración Marítima publicará estas recomendaciones para los promotores, con el objetivo de proporcionarles un marco claro y predecible que abarque la evaluación de los riesgos, las medidas que se han de adoptar para mitigarlos y el seguimiento y vigilancia del cumplimiento.

Aún quedan por definir los procedimientos de aprobación y los plazos correspondientes para la presentación de los informes requeridos por la Administración, en todo caso, la DGMM tendrá la responsabilidad de la vigilancia del cumplimiento por parte de los desarrolladores, promotores y explotadores, ya sea directamente o a través de la verificación por organizaciones reconocidas.

Monitorización del ruido submarino en la Bahía de Algeciras para el seguimiento y protección de cetáceos

Fidel Ruiz Torres

Jefe del Departamento de Sostenibilidad, Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, fruiz@apba.es

1. INTRODUCCIÓN

En el Estrecho de Gibraltar se pueden observar comúnmente siete especies de cetáceos, cuatro de ellas durante todo el año (delfín listado –*Stenella coeruleoalba*–, común –*Delphinus delphis*– y mular –*Tursiops truncatus*– y calderón común –*Globicephala melas*–) y tres durante algunas épocas (orca –*Orcinus orca*–, cachalote –*Physeter macrocephalus*– y rorcual común –*Balaenoptera physalus*–), también se han avistado algunas otras especies de forma casual (rorcual aliblanco –*Balaenoptera acutorostrata*– y azul –*Balaenoptera musculus*–) probablemente por procesos de desorientación (Rodríguez, 2007). De todas las especies

observadas habitualmente, el rorcual común es la única que transita el Estrecho sin quedarse a alimentarse (De Stephanis et al, 2007; Rodríguez, 2007). En la Bahía de Algeciras se encuentran las tres especies de delfines anteriormente indicadas: el mular, el listado y el común, estas dos últimas residentes o semiresidentes (Olaya-Ponzone, 2023). El rorcual común se avista, de paso, entre abril y octubre, y, esporádicamente, orcas y cachalotes (estos últimos en la zona más profunda y exterior de la bahía).

Esta abundancia de cetáceos en la zona ha provocado la existencia de una importante industria turística para su avistamiento (Gauffier, 2023). (ver Fig. 1).

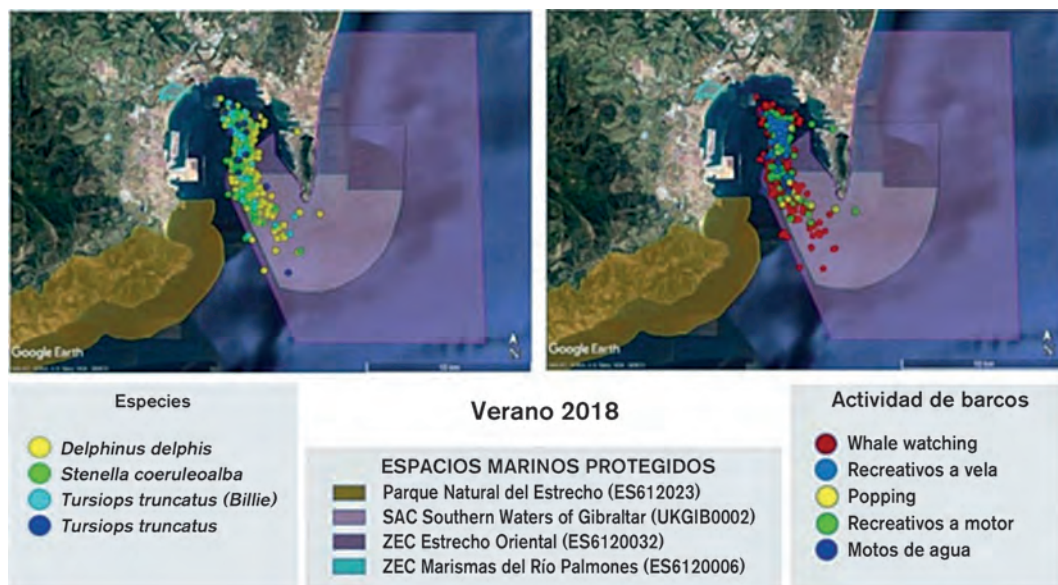


Fig. 1. Representación de las localizaciones de los avistamientos de delfines (*D. delphis*, *S. coeruleoalba*, *T. truncatus*) y embarcaciones en la Bahía de Algeciras en verano. Fuente: Olaya et al., 2023.

Por otra parte, el Estrecho de Gibraltar es una de las zonas con mayor tráfico de buques en el mundo (más de 100.000 buques al año), y el puerto de Algeciras es el cuarto puerto de Europa y primero de España en volumen de mercancías. Tanto el tráfico marítimo, como el avistamiento de cetáceos y la pesca deportiva, tienen un impacto en el comportamiento de los cetáceos, aunque se conoce poco sobre sus efectos en su demografía y dinámica de poblaciones (Verborgh et al., 2009; Tenan et al., 2020; Olaya-Ponzone et al., 2023). Esta confluencia de actividades en un mismo entorno plantea un importante reto de conservación de la naturaleza, y, en particular, de las comunidades de cetáceos presentes en el Estrecho de Gibraltar y la Bahía de Algeciras.

El marco legal en lo que respecta a la conservación del medio natural y protección de los cetáceos viene básicamente fijado por la Ley 42/2007, de 13 de diciembre de Patrimonio Natural y la Biodiversidad, el Real Decreto 1727/2007, de 21 de diciembre, por el que se establecen las medidas de protección de los cetáceos y el Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo del Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y del Catálogo Español de Especies Amenazadas. Adicionalmente, la Secretaría de Estado de Medio Ambiente (SEMA) impone a los puertos una serie de requerimientos para el control y seguimiento de los efectos de su actividad en el medio, en forma de planes de vigilancia de obras y de seguimiento periódico durante el desarrollo de la actividad portuaria, que suponen un conjunto de tareas de vigilancia y control ambiental a desarrollar por parte de las autoridades portuarias.

Consciente de esta situación, y en línea con su compromiso para minimizar sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la sociedad, la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (en adelante, APBA), en el marco de su propuesta periódica de retos para la innovación y la sostenibilidad de las actividades portuarias, lanzó un reto titulado “Preservar el ecosistema y biodiversidad marina garantizando la compatibilidad de la actividad portuaria del Puerto Bahía de Algeciras (PBA)” con el objetivo de identificar e implementar soluciones innovadoras para la conservación y protección de la biodiversidad.

Entre las propuestas recibidas para el citado reto, la APBA seleccionó para invertir en él, el proyecto piloto “Sistema de monitorización del ruido submarino y seguimiento de cetáceos”, consistente en el desarrollo de una plataforma

digital de monitorización del ruido submarino y la presencia de cetáceos.

2. HERRAMIENTA DESARROLLADA

El proyecto ha sido desarrollado por la start-up Sinay, compañía francesa especializada en el diseño de soluciones digitales de inteligencia artificial para el análisis, monitorización y predicción de datos marítimos complejos en los campos de la sostenibilidad y el transporte marítimo. En este caso, la empresa pone su conocimiento al servicio del desarrollo de una herramienta de simulación de ruido submarino y de estimación del consiguiente impacto de este sobre los cetáceos.

A través de este proyecto se ha procedido a la instalación, configuración y puesta en marcha de la plataforma Sinay HUB en las instalaciones del Puerto Bahía de Algeciras, así como en aguas del Estrecho de Gibraltar, cuya implementación ha posibilitado lo siguiente:

1. La monitorización y evaluación continua del ruido submarino generado por buques y trabajos desarrollados en el recinto portuario. Para ello, la plataforma combina dos tipos de datos. Para la estimación del ruido provocado por los buques, en primer lugar, el sistema dispone de un perfil sonoro de cada buque, y, teniendo en cuenta los datos del sistema AIS en cuanto a posición, velocidad, motores que emplea etc. simula el ruido generado por cada uno, y el total generado por todos los buques presentes en la zona. Para la simulación del ruido generado por las obras marítimas, en función de las tareas que se están acometiendo en las distintas fases, a partir de la información facilitada por la APBA, se simula el ruido provocado por las mismas y se agrega al de los buques, obteniendo de esta manera la simulación conjunta y completa del ruido provocado por las obras marítimas y la navegación.
2. El seguimiento de forma continua de la distribución de las poblaciones de cetáceos en el entorno de las aguas de la Bahía y el Estrecho. Para ello, el sistema incorpora datos de observaciones facilitados por empresas y asociaciones de avistamiento, datos de hidrófonos desplegados en la zona, así como datos disponibles en plataformas existentes como la base de datos OBIS (Ocean Biodiversity Information System, <https://obis.org/>) que es una base de datos global de

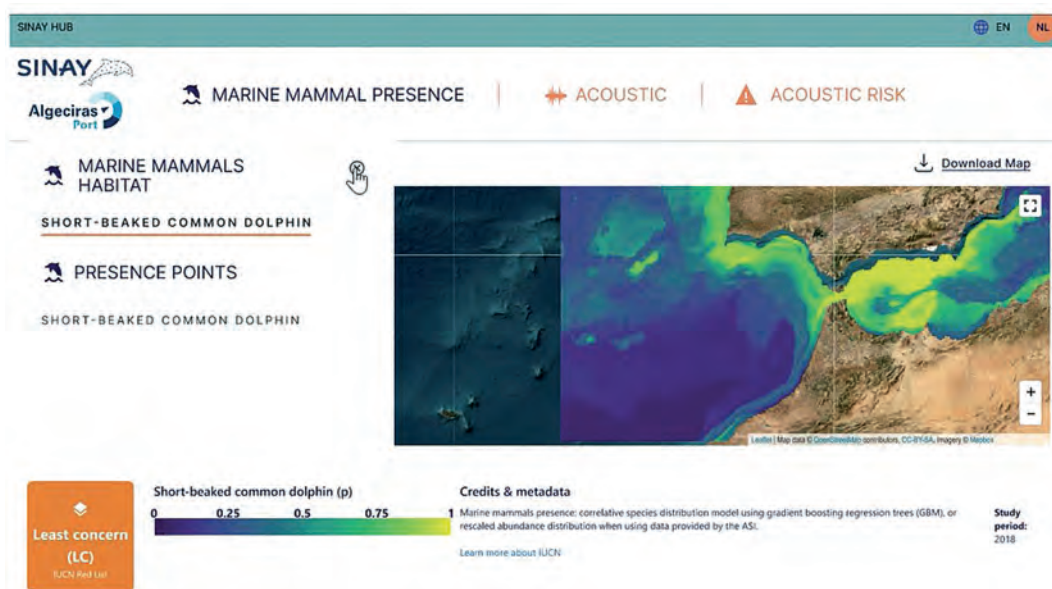


Fig. 2. Interfaz de la plataforma SINAY en el Estrecho. Probabilidad de presencia de delfín común.
Fuente: elaboración propia.

acceso libre, con información sobre biodiversidad marina para la ciencia de conservación y el desarrollo sostenible, combinando todo ello con el uso de modelos de hábitat que, a partir de características del medio como la profundidad, la pendiente y el tipo de fondo permiten estimar probabilidades de presencia de los cetáceos en el medio.

- la obtención de mapas de riesgo acústico con indicadores y métricas del impacto de la actividad portuaria sobre la biodiversidad marina. Combinando los mapas de ruido elaborados a partir de la información de navegación de buques y obras marítimas, y la estimación de probabilidad de presencia de cetáceos obtenida a partir de los datos de distribución de poblaciones y modelos de hábitats, se elaboran los mapas de riesgo acústico, que reflejan la distinta probabilidad e intensidad de daños a cetáceos por alteración acústica del medio.

La herramienta dispone de una interfaz visual, en la que se representa la información generada mediante mapas, pudiendo visualizarse, por un lado, la presencia de especies de mamíferos (tanto en función del hábitat, como en forma de puntos en los que han sido

avistados o detectados mediante hidrófonos), por otro, el mapa acústico del Estrecho, con un mapa de calor según la intensidad del ruido generada, y finalmente el mapa de riesgo acústico para las distintas especies, en función del ruido generado, la distribución de cada especie, y su sensibilidad al ruido. En la Fig. 2 se muestra la pantalla inicial de la aplicación, en la que se puede apreciar la probabilidad de presencia de delfín común, con base en el hábitat, en toda el área del Estrecho. En la Fig. 3 se muestran los avistamientos registrados de delfín común en la zona. Los datos de avistamiento de las distintas especies se toman de base, junto con los datos arrojados por los modelos de hábitat, para determinar la presencia de las distintas especies de cetáceos en la zona, y, a partir de ella, el riesgo para ellos.

A partir de los resultados de avistamientos (Fig. 3) y de las características de tipo de fondo y modelos de hábitat se elaboran los mapas de probabilidad de presencia de cetáceos, como el de la Fig. 4.

En la Fig. 5 se muestra la visualización del mapa de ruido en el Estrecho para el mes de diciembre de 2023, que se representa como ruido mediano en decibelios. Es desta-

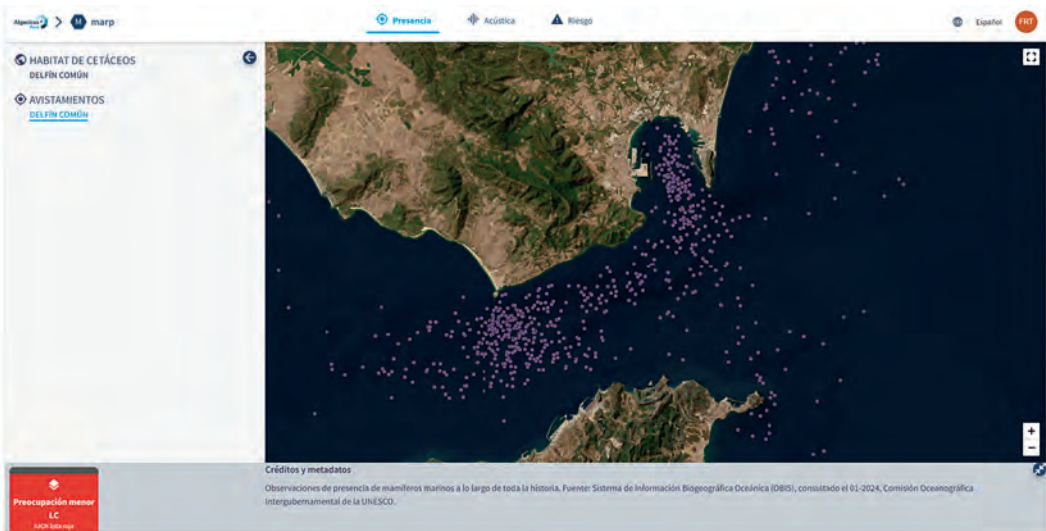


Fig. 3. Avistamientos de delfín común. Fuente: elaboración propia.

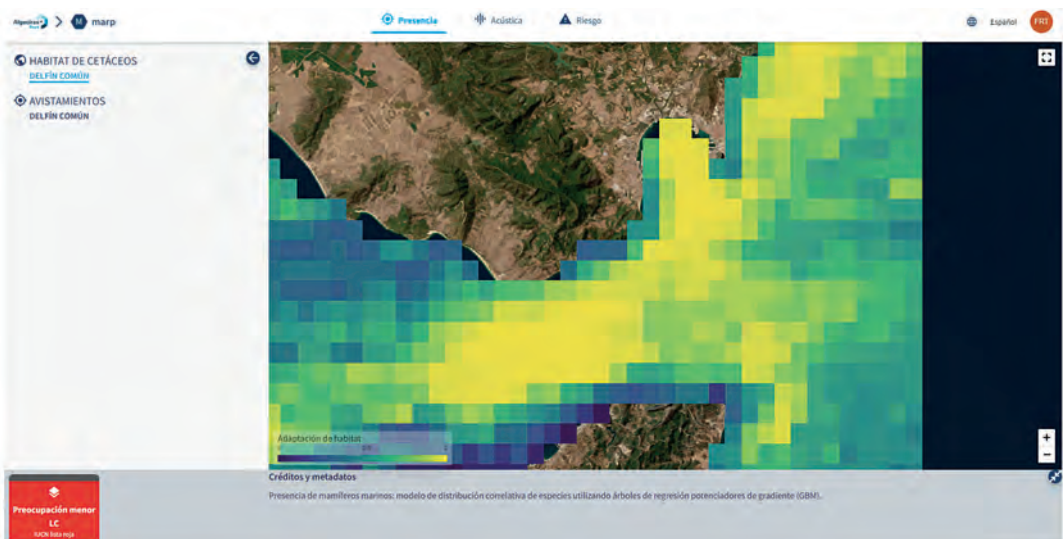


Fig. 4. Vista del mapa de hábitat del delfín común cerca de la Bahía de Algeciras.

cable que el ruido es mayor en el Estrecho en sí que en la Bahía de Algeciras, algo normal dado el gran tráfico existente en la zona, y que, en el interior de la Bahía, y dentro de las aguas portuarias los buques reducen su velocidad, por lo que su emisión de ruido es menor, indicando que la actividad portuaria en sí representa una

menor alteración acústica del medio de la que representa la navegación en esta zona.

La herramienta permite también la generación automática de informes con los datos requeridos por las autoridades competentes en materia ambiental, lo cual facilita a la

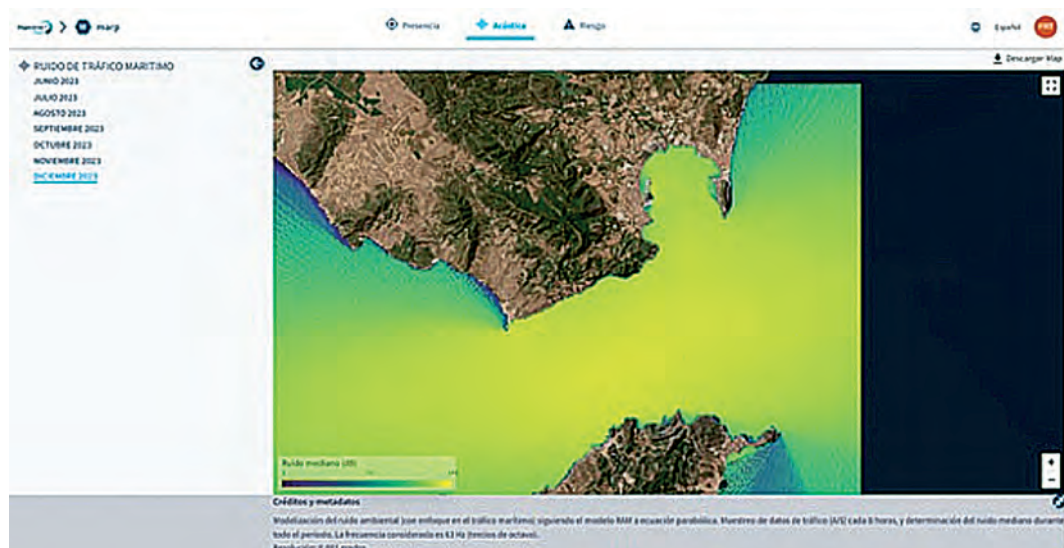


Fig. 5. Representación del ruido submarino en diciembre de 2023. Fuente: elaboración propia.

APBA el cumplimiento de los requerimientos ambientales a los que tiene que hacer frente y un mejor conocimiento del ruido en la zona de servicio portuario de la Bahía de Algeciras.

3. BENEFICIOS ESPERADOS

La implementación de este proyecto tendrá los siguientes beneficios:

- Desarrollar una herramienta digital de monitorización activa del ruido submarino y las poblaciones de cetáceos para una monitorización y gestión más eficiente de ambos aspectos. La combinación de datos del ruido generado por los buques con los datos de distribución y abundancia de los cetáceos permitirá profundizar en el conocimiento de los efectos que el ruido generado por el transporte marítimo y la actividad portuaria tienen sobre la demografía, así como la dinámica de las poblaciones de cetáceos.
- Mejorar la conservación de la biodiversidad marina de las aguas de la Bahía de Algeciras. Un mayor conocimiento del comportamiento de los cetáceos permitirá establecer y definir estrategias, así como medidas de gestión más eficaces para su conservación.

- Reducir el impacto de la actividad portuaria y marítima en el medio marino. La identificación de las actividades o tráficos más impactantes permitirá adoptar medidas específicas de minimización de estos impactos, reduciendo así el impacto general que provoca la actividad portuaria y el transporte marítimo sobre los cetáceos.

4. SIGUIENTES PASOS

La demostración de la aplicabilidad de esta herramienta y su puesta en funcionamiento permitirá sentar las bases para profundizar en el desarrollo de sus utilidades, particularmente:

- Conocer mejor la extensión, intensidad y alcance de los impactos acústicos generados por el tráfico marítimo y las actividades portuarias, calibrando mejor los modelos de generación de ruido.
- Establecer protocolos de colaboración con distintas empresas de avistamiento de cetáceos en la zona para incorporar de forma ágil sus datos y poder así calibrar mejor los modelos de hábitats y los de estimación de riesgo. De esta manera, se dispondrá de un conocimiento más profundo de la distribución, densidad y há-

bitos de las especies de cetáceos presentes en la Bahía de Algeciras.

- El objeto del proyecto no es únicamente desarrollar una herramienta que permita estimar y evaluar el riesgo de impacto sonoro sobre los cetáceos, sino, a partir de los conocimientos obtenidos mediante el desarrollo y aplicación de dicha herramienta, estar en disposición de diseñar y proponer medidas más eficaces y eficientes de protección de las especies de cetáceos presentes en la Bahía de Algeciras.
- Integrar la plataforma en el conjunto de datos y herramientas de gestión y control ambiental de que dispone de la APBA, para, mediante el análisis conjunto de los datos recopilados, disponer de una visión más global de los factores que pueden afectar a los cetáceos, más allá del impacto sonoro.

5. AGRADECIMIENTOS

Se quiere agradecer el trabajo y esfuerzo de la empresa SINAY, sin los cuales no habría sido posible el éxito de este proyecto piloto, así como a la empresa de avistamiento de cetáceos Estrecho Natura, por facilitar los datos correspondientes a los avistamientos en la Bahía de Algeciras.

6. REFERENCIAS

De Stephanis, R; Verborgh, R/P; Perez, S; Sánchez, A.; Guinet, C.; Mate, B. (2007). "Distribución temporal de cetáceos en el Estrecho de Gibraltar. ¿Es realmente un canal de migración para cetáceos el estrecho?" Almoraima, 35.

Gauffier, P; Esteban, R.; De Stephanis, R. (2023). "The non-consumptive economic value of wildlife: the case of three cetacean species". *Scientia marina*. 87(4): e077.

Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad.

Olaya-Ponzzone, L; Espada, R.; Martín, E.; Patón, D.; García-Gómez, J.C. (2023). "Delfines de la bahía de Algeciras, pautas metodológicas de foto-identificación y tipología de lesiones antropogénicas" *Almoraima*. 58. Abril 2023: 219-231.

Olaya-Ponzzone, L., Espada, R., Patón, D. Martín, E., Cárdenas, I., Serradilla, J., García-Gómez, J.C. 2023. "Sport fishing and vessel pressure on the endangered cetacean *Delphinus delphis*. Towards an international agreement of micro-sanctuary for its conservation". *Journal of Environmental Management* 325. 116546. 18 pgs.

Ouled-Cheikh, Jazel; Giménez, Joan; Verborgh, Philippe; Jiménez-Torres, Carolina;xx

Real Decreto 1727/2007, de 21 de diciembre, por el que se establecen medidas de protección de los cetáceos.

Real Decreto 139/2011, de 4 de febrero, para el desarrollo del Listado de Especies Silvestres en Régimen de Protección Especial y del Catálogo Español de Especies Amenazadas.

Rodríguez, N. (2007). "Cetáceos en el Estrecho de Gibraltar". *Biol. Aljaranda* 64 29-30.

Tenan, S.; Hernández, N.; Fearnbach, H.; Stephanis, R.; Verborgh, P; Oro, D. (2020). "Impact of maritime traffic and whale-watching on apparent survival of bottlenose dolphins in the Strait of Gibraltar". *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 30.

Verborgh, P; Stephanis, R.; Pérez-Jorge, S.; JAGET, Y.; Guinet, C. (2009). "Survival rate, abundance, and residency of long-finned pilot whales in the Strait of Gibraltar". *Marine Mammal Science*. 25. 523-536.

Nuevos desarrollos en la caracterización de la energía undimotriz en puertos

Antonio Tomás

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
antonio.tomas@unican.es

Cristina Casal

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
cristina.casal@unican.es

Eva Romano-Moreno

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
eva.romano@unican.es

Álvaro Rodríguez Luis

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
alvaro.rodriguezluis@unican.es

Gabriel Díaz-Hernández

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
gabriel.diaz@unican.es

Alejandro González Valle

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
alejandro.gonzalezv@unican.es

Raúl Guanchez

Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria (IHCantabria).
raul.guanche@unican.es

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años las energías marinas han evidenciado un desarrollo muy significativo, pasando de ser un sector emergente a ser un sector plenamente industrial gracias al empuje que éstas han recibido para el desarrollo de una economía baja en carbono y cumplir con los objetivos de París.

No obstante, la evolución tecnológica de las distintas energías marinas ha sido dispar. Mientras las tecnologías eólicas marinas son plenamente comerciales y estando en disposición de dar el salto al entorno de las grandes profundidades mediante parques eólicos flotantes y acceder de este modo a un recurso hasta ahora inexplorado, en el ámbito de la energía undimotriz todavía se está en una fase de validación tecnológica o precomercial.

Para superar esta fase y facilitar el acceso a niveles de confianza superiores, es fundamental el desarrollo de metodologías contrastadas, validadas mediante ensayos en laboratorio o campo, que contribuyan a la reducción de riesgos tecnológicos. Todo ello bajo una óptica científico-tecnológica y con una clara orientación a mercado. El desarrollo de estas metodologías contribuirá también al desarrollo de los estándares y especificaciones técnicas que, a su vez, guían y apoyan ese viaje hacia la madurez tecnológica.

En este contexto, desde hace más de 10 años IHCantabria y BiMEP (Biscay Marine Energy Platform) vienen generando una oferta de servicios científico-técnicos en el marco de las energías marinas con el fin de promover la gestión del área de ensayos de BiMEP, integrando diferentes escalas de trabajo, laboratorio y campo. Ejemplo

de ello son los resultados de proyectos como TRL+, EuroWave o TurboWave.

Recientemente se incorporó a BiMEP la planta del puerto de Mutriku (BiMEP-Mutriku). La planta undimotriz de Mutriku, basada en tecnología de columna de agua oscilante (OWC-Oscilating Water Column), se inauguró hace más de 10 años, y lleva generando electricidad ininterrumpidamente desde marzo de 2012. Sin perder su condición de planta de generación de electricidad en un entorno portuario, ofrece grandes posibilidades para acoger ensayos de nuevos desarrollos de sistemas de extracción de potencia (turbinas de aire) para columna de agua oscilante.

A su vez, IHCantabria, bajo el marco de proyectos como SAMOA, SAFEPORT o PROAS ha desarrollado e integrado novedosos avances científico-técnicos en la caracterización multidireccional y obtención del espectro completo en zona intra-portuaria o de agitación (Romano-Moreno *et al.*, 2022, 2023). Esta novedosa metodología permite la obtención del recurso undimotriz de una manera multidireccional, tanto en el interior de las instalaciones portuarias, en sus distintas dársenas y muelles, como en el exterior del puerto y en las zonas anexas a las obras de abrigo del mismo (como puede ser el dique del puerto de Mutriku), lo cual es de gran interés en el ámbito undimotriz porque permite distinguir el recurso aprovechable del recurso potencial, aspecto clave para determinar la viabilidad técnico-económica de una planta.

2. CASOS DE ÉXITO

Gracias a la sinergia de las distintas experiencias y avances científico-técnicos anteriormente descritas, se han producido una serie de nuevos desarrollos en la caracterización de la energía undimotriz en puertos. La explotación de los mismos permitirá el diseño y optimización de sistemas de generación y captación de energía undimotriz, como ayuda al proceso de descarbonización de los puertos.

Cabe señalar, que algunos de los desarrollos que a continuación se exponen, han sido elaborados en el marco de proyectos como MAR+ (Desarrollo y puesta en marcha de un sistema para el apoyo y la aceleración de las energías renovables marinas mediante metodologías de ensayo certificadas en centros de prueba y ensayo acreditados; BiMEP-IHCantabria), dentro de las tareas

para desarrollar un laboratorio certificado o acreditado para el ensayo de turbinas para columna de agua oscilante; o el proyecto ECCLIPSE (Evaluación del Cambio Climático en Puertos del Sudoeste de Europa; Valencia-Port-IHCantabria) a través de la licitación titulada “Desarrollo de módulo de predicción de agitación en el interior de los puertos de la Autoridad Portuaria de Valencia”.

2.1 Desarrollo de la metodología para el modelado histórico y la predicción a corto plazo del recurso undimotriz

2.1.1. Metodología

La metodología desarrollada consta de los siguientes seis pasos:

1. *Caracterización del clima histórico de oleaje espectral en aguas abiertas*, a partir de series históricas de los espectros direccionales de oleaje en aguas abiertas, haciendo uso del modelo numérico SWAN (Booij *et al.*, 1999).
2. *Regionalización del oleaje en la zona costera y portuaria*, mediante una estrategia de modelado avanzada que considera los procesos físicos más relevantes asociados a la propagación del oleaje, desde la zona de aguas abiertas hasta pie de las instalaciones. Esta estrategia adopta un enfoque de downscaling híbrido (autoselección de estados de mar –oleaje y nivel del mar– representativos a utilizar como forzamiento, propagación dinámica con el modelo numérico MSPv2.0 (Díaz-Hernández *et al.*, 2021; IHCantabria) y reconstrucción histórica estadística) que permite la confección de la estadística climática requerida para los siguientes pasos de la metodología de forma eficiente.
3. *Caracterización avanzada del clima histórico de oleaje en la zona de interés* (a pie de las instalaciones/planta de energía), que aporta toda la información espectral completa (multidireccional) y en alta resolución, necesaria para caracterizar detalladamente el clima histórico del oleaje y el recurso undimotriz existente en la zona de estudio.
4. *Validación de los resultados numéricos con datos instrumentales* disponibles en la zona de estudio.

5. *Caracterización histórica del recurso undimotriz*, a partir del postproceso de las bases de datos de última generación obtenidas en el paso tres, que permiten la desagregación del oleaje y la caracterización de sus productos climáticos derivados en potencial de oleaje de acuerdo con la normativa de referencia (IEC 62600-101).
6. *Implementación de un sistema de predicción a corto plazo*, capaz de predecir las condiciones de oleaje y de potencial de energía en la zona de interés, a partir de las predicciones meteocean en aguas abiertas y con base en un catálogo pre-ejecutado (paso 2) de propagaciones de los estados de mar representativos de la casuística climática completa en la zona de estudio.

2.1.2. Resultados

A continuación, se presentan resultados obtenidos en los dos proyectos mencionados anteriormente (MAR+ y EC-CLIPSE).

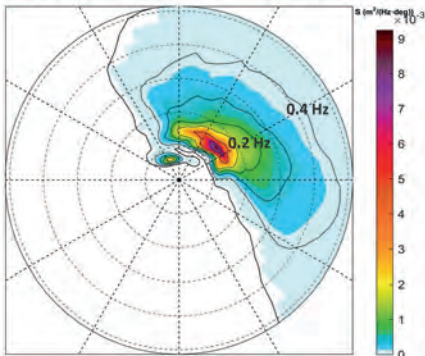
2.1.2.1. Modelado histórico del recurso undimotriz para la planta de Mutriku (MAR+)

Mediante la aplicación de la metodología descrita en el apartado 2.1, en este proyecto se han desarrollado, en primer lugar, bases de datos históricas y horarias para una caracterización avanzada y de alta resolución tanto del clima de oleaje (mapas de propagación, series temporales de espectros completos y parámetros agregados) como del recurso undimotriz (series temporales del recurso omni-direccional, direccional y parámetros agregados) en la zona de interés, desde aguas abiertas hasta pie de planta en el dique de abrigo del Puerto de Mutriku. Posteriormente, se implementa un sistema de predicción a corto plazo que aporta las predicciones de clima de oleaje y potencial de energía en los puntos de interés.

A continuación, se muestra un resumen de los resultados obtenidos (ver figuras 1 y 2), pudiendo visualizar la caracterización del clima de oleaje y recurso energético, su variabilidad espacial y temporal a distintas escalas (horaria, mensual, estacional y anual).

Forcing wave spectrum at open water

$H_{m0} = 2.6$ m; $T_p = 7.1$ s; $D_m = 38.7^\circ$; $SL = 3.52$ m



Wave propagation map - Mutriku

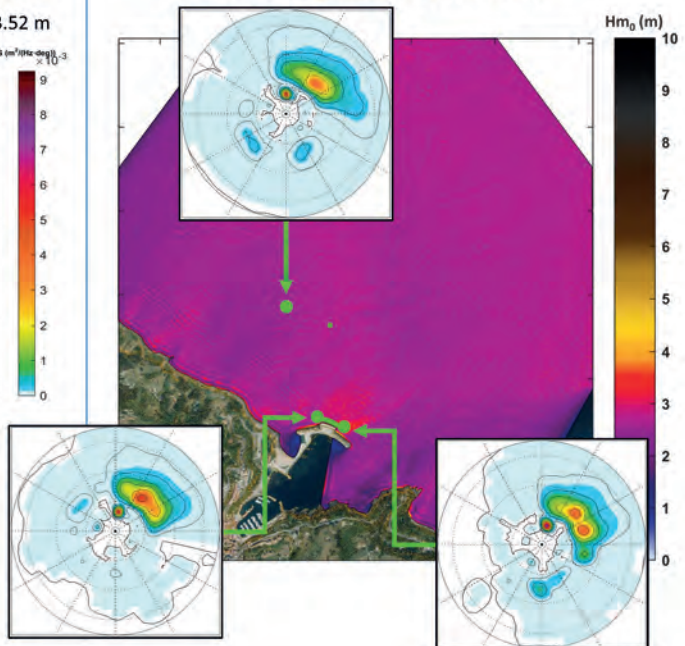
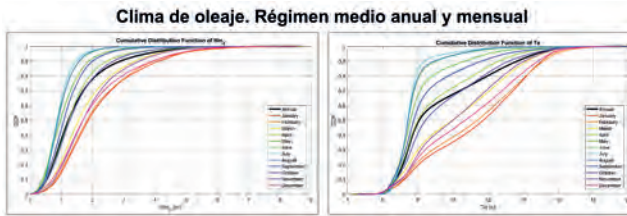
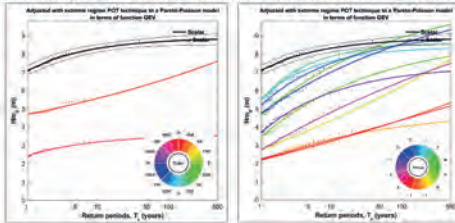


Fig. 1. Visualización de la propagación y la evolución de la energía del oleaje en la zona de estudio.



Clima de oleaje. Régimen extremal anual, mensual y direccional



Recurso energético escalar anual, mensual y direccional

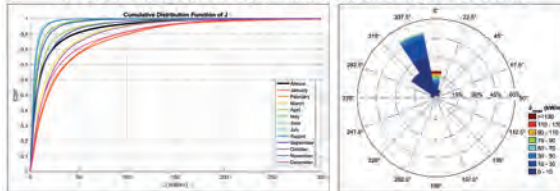


Tabla resumen. Variabilidad espacial y temporal

	Control points																
	C0	C8	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18
Annual average parameters																	
Hm (m)	1.51	1.59	1.63	1.68	1.70	1.73	1.76	1.76	1.77	1.78	1.78	1.79	1.79	1.79	1.79	1.79	1.80
Te [s]	9.3	10.9	10.9	10.9	10.8	10.8	10.8	10.7	10.7	10.6	10.5	10.5	10.6	10.6	10.6	10.6	10.7
Dir (deg)	-20.9	-22	-3.1	-2.9	11.1	1.0	3.1	2.6	2.2	2.7	3.2	4.6	5.9	7.4	8.8	8.5	8.3
J (W/m)	18.1	13.7	14.2	14.9	15.5	16.0	16.6	16.6	16.8	16.8	17.0	17.1	17.1	17.3	17.2	17.1	17.6
Janus (W/m)	15.8	12.2	12.7	13.6	14.3	15.0	15.6	15.7	15.8	15.8	16.1	16.4	16.5	16.4	16.5	16.2	16.6
Q1_max (deg)	-21.7	-2.4	-2.4	-2.3	-1.4	0.9	3.2	2.5	1.8	2.4	2.9	4.5	6.0	7.4	8.7	8.4	8.0
Seasonal average parameters – Most energetic season (Winter: December-January-February)																	
Hm (m)	2.12	2.05	2.10	2.16	2.19	2.23	2.26	2.28	2.29	2.30	2.30	2.31	2.31	2.31	2.30	2.30	2.30
Te [s]	11.1	12.5	12.5	12.4	12.4	12.4	12.3	12.3	12.2	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.2	12.3
Dir (deg)	-16.5	-0.7	-1.3	-0.4	0.4	2.6	4.7	4.6	4.6	5.2	5.7	7.2	8.6	9.9	11.2	10.8	10.4
J (W/m)	35.0	28.2	21.9	25.0	25.9	26.9	27.8	28.0	28.4	28.4	28.7	29.5	29.9	30.1	29.3	28.6	28.2
Janus (W/m)	31.1	21.1	21.8	23.1	24.3	25.4	26.4	26.6	27.0	27.3	28.0	27.6	27.8	27.5	27.1	27.5	28.2
Q1_max (deg)	-18.4	-0.5	-1.1	-0.4	0.3	2.7	4.9	4.7	4.4	5.0	5.6	7.2	8.8	10.0	11.1	10.7	10.2
Seasonal average parameters – Least energetic season (Summer: June-July-August)																	
Hm (m)	0.95	1.37	1.20	1.25	1.27	1.28	1.31	1.31	1.29	1.30	1.31	1.32	1.32	1.33	1.34	1.34	1.36
Te [s]	7.7	9.3	9.4	9.3	9.3	9.3	9.2	9.2	9.2	9.2	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1	9.2	9.2
Dir (deg)	-25.7	3.6	-4.6	-3.6	-2.7	-0.7	1.3	0.4	-0.4	-0.1	0.1	1.6	2.9	4.4	5.9	5.8	5.4
J (W/m)	5.0	6.0	6.2	6.1	6.9	7.1	7.4	7.4	7.3	7.3	7.5	7.6	7.6	7.8	7.8	7.8	8.2
Janus (W/m)	4.0	5.1	5.4	6.0	6.3	6.6	6.9	6.9	6.8	6.8	7.0	7.1	7.1	7.3	7.3	7.3	7.7
Q1_max (deg)	-27.8	-0.2	-3.3	-2.3	-1.3	1.1	1.2	0.1	-0.0	-0.6	-0.2	1.4	2.8	4.3	5.8	5.4	5.1
Monthly average parameters – Most energetic month (January)																	
Hm (m)	2.19	2.31	2.17	2.22	2.26	2.30	2.33	2.34	2.35	2.37	2.37	2.38	2.38	2.37	2.37	2.38	2.38
Te [s]	11.3	12.7	12.7	12.6	12.6	12.6	12.6	12.5	12.5	12.3	12.2	12.2	12.3	12.3	12.3	12.4	12.3
Dir (deg)	-16.3	-0.5	-1.2	-0.3	0.5	2.7	4.8	4.7	4.7	5.3	5.9	7.3	8.7	10.0	11.3	10.9	10.5
J (W/m)	37.1	24.4	25.2	26.3	27.3	28.4	29.3	29.3	30.0	30.0	30.3	30.9	30.5	30.7	30.5	30.2	30.8
Janus (W/m)	33.0	23.3	23.0	24.4	25.6	26.5	27.6	28.1	28.5	28.4	28.9	29.5	29.2	29.3	29.0	28.6	29.0
Q1_max (deg)	-15.9	-0.4	-1.1	-0.3	0.6	2.8	5.0	4.8	4.6	5.2	5.8	7.4	8.9	10.3	11.2	10.8	10.3
Monthly average parameters – Least energetic month (July)																	
Hm (m)	0.93	1.35	1.19	1.24	1.25	1.26	1.29	1.29	1.28	1.28	1.30	1.30	1.31	1.32	1.32	1.32	1.35
Te [s]	7.6	9.2	9.3	9.2	9.2	9.2	9.1	9.1	9.1	9.1	9.0	9.0	9.1	9.1	9.1	9.1	9.1
Dir (deg)	-26.2	-1.8	-4.8	-3.8	-3.0	-0.9	1.1	0.1	-0.8	-0.4	-0.1	1.2	2.5	4.0	5.5	5.4	5.2
J (W/m)	4.6	5.8	6.0	6.5	6.7	6.9	7.2	7.1	7.0	7.0	7.2	7.4	7.4	7.5	7.6	7.6	8.0
Janus (W/m)	3.7	4.9	5.2	5.8	6.1	6.3	6.7	6.6	6.5	6.6	6.7	6.9	6.9	7.0	7.1	7.1	7.5
Q1_max (deg)	-28.0	-4.2	-5.5	-4.4	-3.5	-1.5	0.9	-0.2	-1.3	-0.9	-0.6	1.0	2.4	3.9	5.4	5.2	4.9

Fig. 2. Resumen de resultados para la caracterización del clima de oleaje y del recurso undimotriz en la zona de estudio. Variabilidad espacial y temporal en distintas escalas (horaria, anual, mensual, estacional).

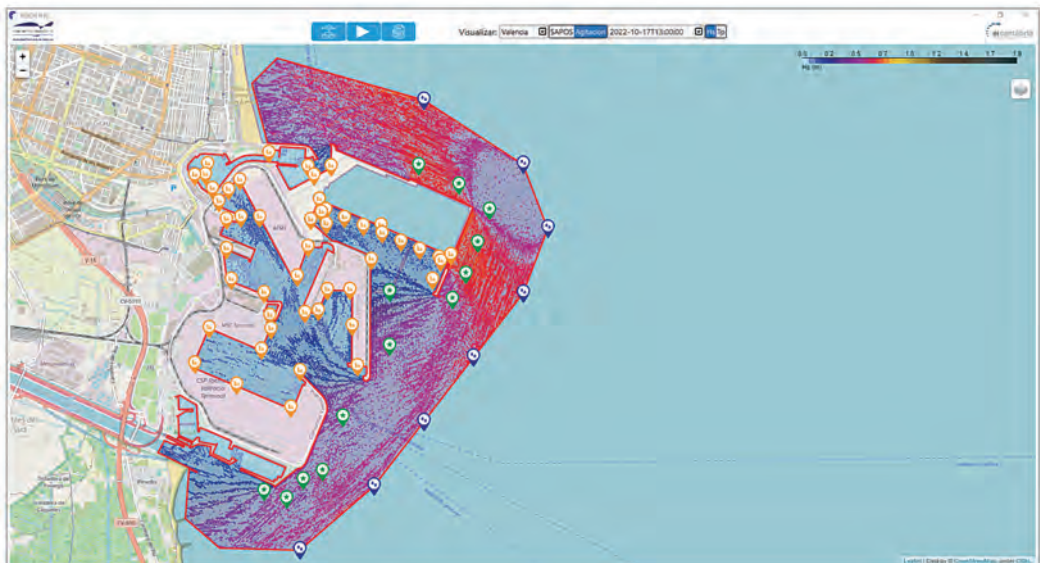


Fig. 3. Pantalla principal de la interfaz gráfica del sistema operacional para la predicción de agitación portuaria y potencial de la energía del oleaje. Visualización del dominio de predicción y todos los puntos de interés donde se obtienen predicciones. Ejemplo para el Puerto de Valencia.

2.1.2.2. Sistema operacional de predicción a corto plazo de agitación portuaria y potencial de la energía de las olas en los puertos de Sagunto, Gandía y Valencia (ECCLIPSE)

Tras la aplicación de la metodología descrita en el apartado 2.1, en este proyecto se ha desarrollado una interfaz gráfica de usuario (GUI) del sistema que permite la visualización de las predicciones horarias de agitación y potencial de energía para las próximas 72 h, tanto en forma de mapas como de series temporales en todos los puntos de interés, desagregación direccional del oleaje, obtención de informes de predicción, y generación de mapas horarios de potencial energético con un periodo mínimo de un año. Todo ello para los tres puertos (Sagunto, Gandía y Valencia, ver figuras 3 y 4).

2.2. Desarrollo de un gemelo digital de captador de energía undimotriz

La complejidad de los procesos asociados a la transformación de la energía hidromecánica a energía eléctrica en tecnologías de OWC derivan en que la modelización de las plantas undimotrices requiera de modelos de última generación capaces de resolver la hidrodinámica de

la columna de agua oscilante, así como el problema aerodinámico ligado a la cámara de aire a la que va ligado la columna. IHCantabria, bajo el marco del proyecto Mermaid (FP7-28871) y TRL+ (RTC-2015-3836-3) desarrolló distintos modelos numéricos capaces de reproducir la dinámica de OWC fijas y flotantes. Los modelos desarrollados emplean una aproximación numérica doble, por un lado, para la caracterización del régimen operativo de planta se procede al desarrollo de un modelo numérico basado en teoría potencial y débilmente no-linealizado basado en el dominio de la frecuencia que posteriormente se integra en un modelo multifásico en el dominio del tiempo capaz de resolver el problema no lineal del acoplamiento hidro-aerodinámico de la OWC, así como el acoplamiento entre cámaras (Iturrioz *et al* 2014, Iturrioz *et al* 2015, Sarmiento *et al* 2019,). Por otro lado, para resolver el problema fuertemente no lineal cuando se trata de estudiar los eventos extremos y dinámicas no lineales en una cámara durante eventos singulares y de temporal, la metodología se complementa con modelos del tipo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) capaces de resolver el problema hidrodinámico con un nivel superior resolución del problema hidro-aerodinámico gracias a que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes incluyendo la turbulencia de los procesos asociados a los fenómenos de interacción fluido estructura (Iturrioz *et al* 2015).

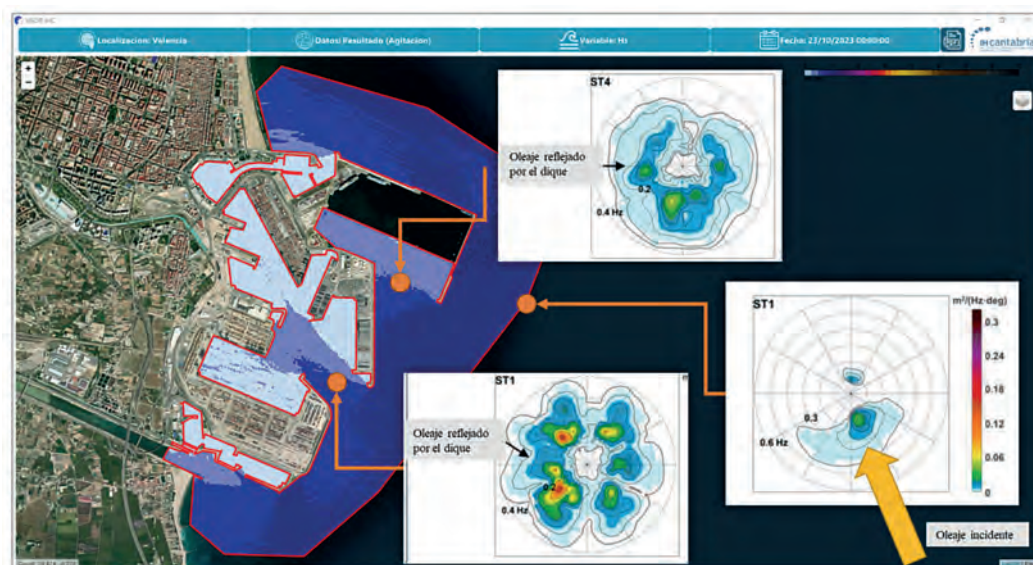


Fig. 4. Evolución de los espectros de oleaje y agitación interior desde el exterior del puerto de Valencia. Imagen sobre la interfaz gráfica del sistema operacional.

2.2.1. Metodología

Dentro del marco de proyecto MAR+ se está desarrollando un gemelo digital de la planta de Mutriku que permita simular correctamente el funcionamiento completo de una cámara y la interacción entre cámaras, así como la obtención de un sistema de ayuda a la gestión de la planta y para la optimización de nuevas tecnologías OWC.

Una columna de agua oscilante (OWC), al igual que casi cualquier captador de energía undimotriz, es un sistema

muy dependiente de la distribución frecuencial de la energía incidente, así como de la cinemática de las ondas de las que se pretende extraer energía. BiMEP-Mutriku dispone de 16 columnas de agua oscilante dispuestas en el lado de barlomar de un dique vertical de abrigo (ver figura 5), lo cual le permite captar la energía incidente de los oleajes predominantes en la zona. En el marco del proyecto MAR+ está desarrollando un gemelo digital de planta basado en modelos capaces de resolver la hidrodinámica de la planta, así como el problema aerodinámico ligado a la cámara de aire a la que va ligado la columna.

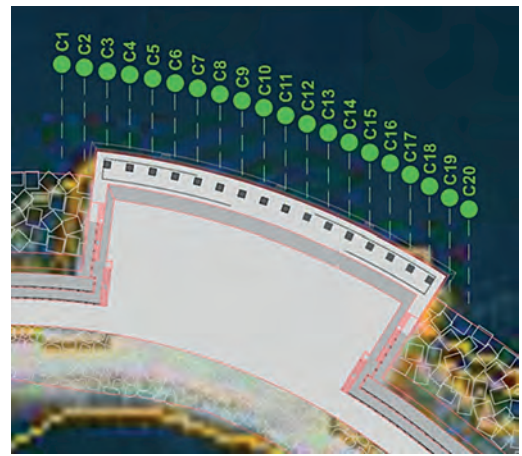


Fig. 5. Dique de abrigo de Mutriku y posición de las cámaras y puntos analizados.

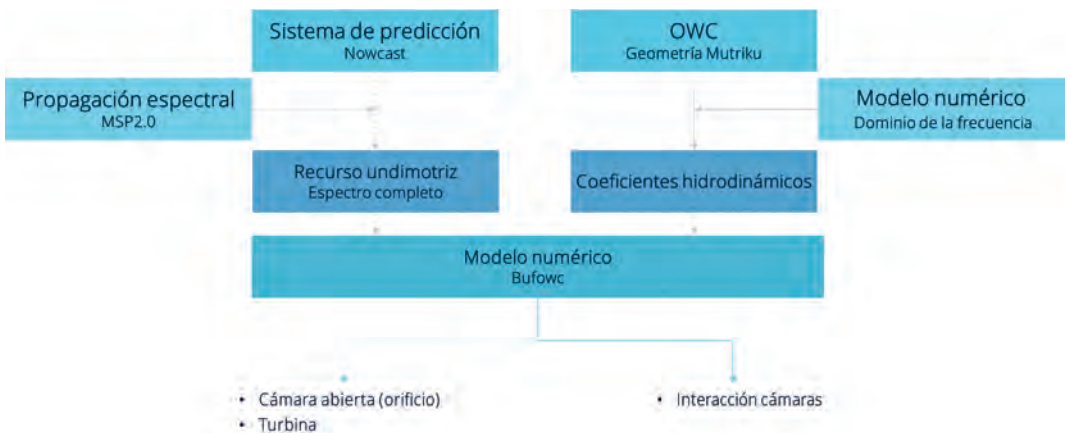


Fig. 6. Esquema general simplificado del gemelo digital.

Para el desarrollo de un gemelo digital de planta hay que tener en cuenta diversos factores que pueden afectar a su correcta implementación y que los resultados reflejen el comportamiento real en circunstancias reales, por ejemplo, el input de las condiciones de oleaje a pie de cámara, la geometría de la cámara y todos los procesos que tienen lugar hasta la generación de la energía.

En la figura 6 se muestra el esquema de la metodología aplicada en el gemelo digital de planta de Mutriku, donde se especifican los inputs generados para el modelo numérico (*Buflowc*) que son: 1) el espectro completo del oleaje a pie de cámara (Sección 2.1.1.1) y 2) los coeficientes

hidrodinámicos, obtenidos a través de la ejecución de un modelo numérico en el dominio de la frecuencia, que se resumen a continuación.

El modelo *Buflowc*, resuelve las fuerzas existentes en la columna de agua en el dominio del tiempo. Para el desarrollo del modelo en planta, los coeficientes hidrodinámicos se obtienen utilizando un software de código abierto de tipo potencial de primer orden para resolver los problemas de radiación y difracción utilizando el método BEM. Para la resolución en el dominio de la frecuencia se considera la geometría actual de la planta de Mutriku (ver figura 7).

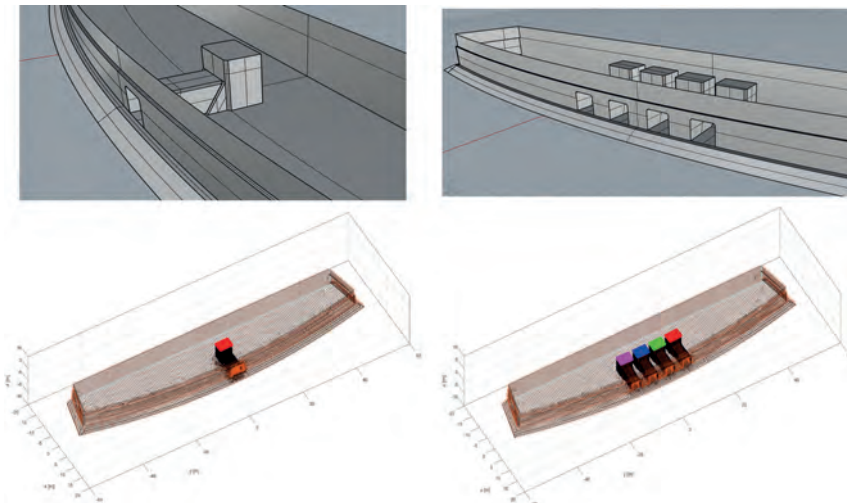


Fig. 7. Geometría de la planta de Mutriku introducida en el modelo (una cámara y multicámara).

Los coeficientes de masa añadida, los coeficientes de amortiguamiento hidrodinámico y las fuerzas de excitación se utilizan para la resolución de la ecuación de Cummins

(1962), que expresa el movimiento en el dominio del tiempo de un cuerpo flotante restringido a oscilar en heave (OWC).

$$(m + A_{\infty}\ddot{z}(t) = \int_0^t k_r(t - \tau) \dot{z}(\tau) d\tau + F_{exc}(t) + F_{hydrost}(t) - F_{frict}(t) - F_{air}(t)$$

El modelado en el dominio del tiempo supone la alternativa para considerar las no linealidades, como las originadas por oleaje extremo o por el sistema de extracción de energía (PTO). El modelo numérico desarrollado para este proyecto consta a su vez de varios submodelos acoplados entre sí: el modelo del oleaje, el modelo hidrodinámico, el modelo de la turbina y el modelo de la columna de agua oscilante. La figura 8 resume de forma esquemática cómo funciona y está estructurado *buflowc*.

1. El modelo del oleaje procesa los parámetros del estado de mar y genera el oleaje incidente o permite directamente cargar un archivo de oleaje tanto en el dominio de la frecuencia como en el dominio del tiempo.
2. El modelo de la cámara resuelve el problema aerodinámico dentro de la cámara, suponiendo que el aire se comporta como un gas ideal, y que el proceso de

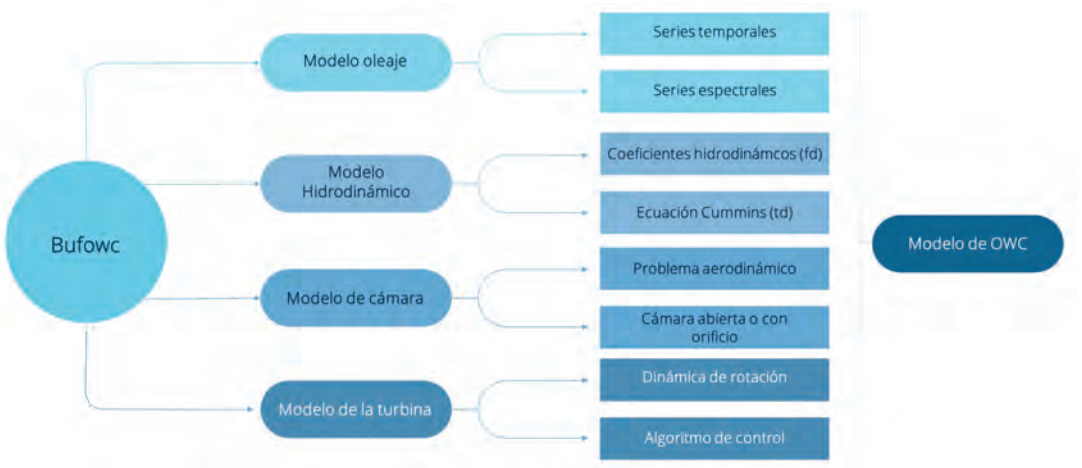


Fig. 8. Esquema de la estructura del modelo Bufowc.

- compresión/expansión dentro de la cámara puede modelarse como un proceso isentrópico.
- 3. El modelo hidrodinámico resuelve las ecuaciones de radiación y excitación en el dominio del tiempo, así como la fricción derivada de los efectos viscosos.
- 4. El modelo de la turbina resuelve la dinámica de rotación de esta, considerando sus propiedades inerciales, sus curvas de Buckingham y su algoritmo de control.
- 5. Por último, el modelo de columna de agua (OWC) oscilante combina las fuerzas actuantes de todos los submodelos.

2.2.2. Resultados

Los resultados que se obtienen de la resolución de las fuerzas actuantes en la columna de agua representan la hidrodinámica de producción de energía asociada a la OWC de Mutriku. En la figura 9 se muestran un ejemplo

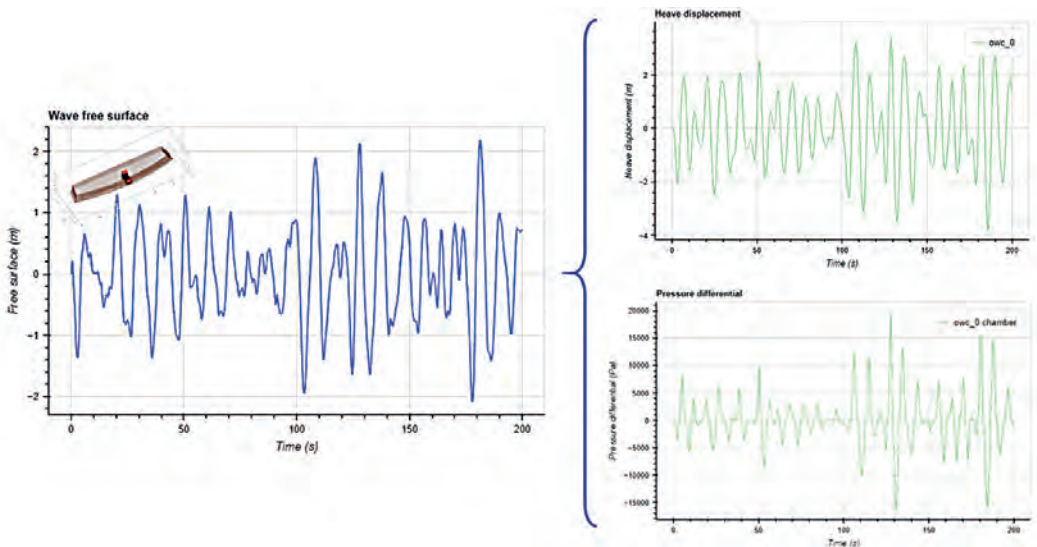


Fig. 9. Simulación numérica de la columna de agua oscilante de la planta undimotriz de Mutriku: Superficie libre exterior oleaje irregular sin-tético (izq), superficie libre interior (dch-arriba), presión dentro de la cámara.

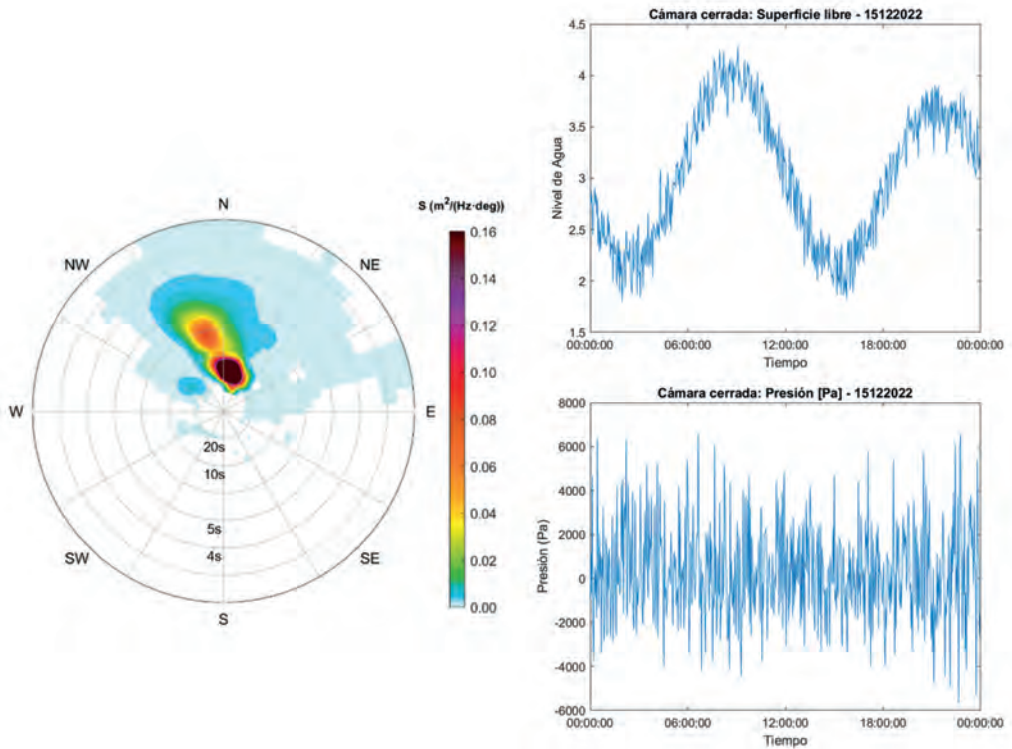


Fig. 10. Izquierda: input de oleaje horario del modelo, Derecha: registros diarios en campaña con la cámara cerrada.

de resultados de superficie libre y de presión dentro de la cámara asociados como un oleaje irregular sintético durante un determinado periodo.

El modelo final se encuentra en fase de calibración con datos de campo para una cámara cerrada y con distintos tamaños de apertura, posteriormente se calibrará el modelo incluyendo el controlador para los datos de campo en operacional. Por último, se utilizarán los resultados obtenidos de la campaña de laboratorio, en el caso de una cámara, y con campañas de campo para el modelo multicámara. En la figura 10 se muestra un ejemplo de datos disponibles de campañas con cámara cerrada que se contrastaran con los resultados obtenidos con el modelo introduciendo los inputs correspondientes asociados al oleaje incidente en cada hora.

3. CONCLUSIONES

En los últimos años, las energías marinas han adquirido una importancia considerable en el marco del desarrollo de una

economía baja en carbono y cumplir con los objetivos de París. Para el correcto diseño y optimización de la eficiencia de los nuevos dispositivos de captación de la energía de las olas, así como para identificar las zonas más apropiadas para su instalación, es crucial conocer el potencial energético de las olas, el cual depende directamente de las condiciones del clima de oleaje en la zona de interés. Por ello, es fundamental una adecuada caracterización del clima de oleaje y del recurso existente tanto a nivel histórico como de predicción. En este trabajo se presenta una metodología avanzada para el modelado y caracterización de dichas variables, que permite generar bases de datos históricas de última generación, tanto de clima de oleaje como de recurso undimotriz, así como la posterior implementación como sistema de predicción a corto plazo.

La implementación del gemelo digital de la planta de Mutriku representa un avance significativo en la optimización de las tecnologías OWC (Oscillating Water Column). Este modelo numérico, desarrollado bajo el proyecto MAR+, permite una simulación precisa del funcionamiento de cada cámara y su interacción, mejorando así

la gestión de la planta. La metodología empleada abarca tanto modelos hidrodinámicos como aerodinámicos, integrando la resolución de la ecuación de Cummins para considerar las no linealidades del sistema. Los resultados obtenidos están en fase de calibración con datos de campo, lo que asegura su precisión y eficacia. En definitiva, el gemelo digital facilita una caracterización detallada del clima de oleaje y del potencial energético, siendo una herramienta crucial para el diseño y mejora de dispositivos undimotrices.

4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la ayuda CPP2021-009079 (MAR+ Acelerador de Tecnologías Renovables Marinas) financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN/AEI/10.13039/501100011033) y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR.

También se agradece el soporte recibido dentro del ámbito del Proyecto “ECCLIPSE (Evaluación del Cambio Climático en Puertos del Sudoeste de Europa)”, financiado por la Unión Europea a través del programa “Interreg Sudoeste”, EJE 4: Lucha contra el cambio climático, OBJETIVO 5B1: Mejora de la coordinación y eficacia de los instrumentos de prevención, de gestión de catástrofes y de rehabilitación de zonas siniestradas.

Finalmente, los autores quieren hacer una mención de especial agradecimiento a Jon Lekube, Laura Zubiate y Yago Torre-Enciso del Biscay Marine Energy Platform (BiMEP), Endika Aldaiturriaga del Ente Vasco de la Energía (EVE) y Raúl Cascajo Jiménez de ValenciaPort, por su apoyo y contribuciones a los desarrollos realizados.

5. REFERENCIAS

BOOIJ, N., RIS, R.C., HOLTHUIJSEN, L.H. (1999). “A third-generation wave model for coastal regions 1. Model de-

scription and validation”. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 104, 7649–7666. <https://doi.org/10.1029/98JC02622>.

DIAZ-HERNANDEZ, G., RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, B., ROMANO-MORENO, E., L. LARA, J. (2021). “An improved model for fast and reliable harbour wave agitation assessment”. *Coastal Engineering*, 170, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104011>.

ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., ARMESTO, J. A., ALVES, M. A., VIDAL, C., & LOSADA, I. J. (2014). “Time-domain modeling of a fixed detached oscillating water column towards a floating multi-chamber device”. *Ocean Engineering*, 76, 65-74.

ITURRIOZ, A., SARMIENTO, J., ARMESTO, J.A., GUANCHE, R., VIDAL, C., LOSADA, I.J. (2015). “Experimentally calibrated simplified time-domain numerical model for a multi-chamber OWC device”. *Renewable Energies Offshore*, 463.

ITURRIOZ, A., GUANCHE, R., LARA, J. L., VIDAL, C., & LOSADA, I. J. (2015). “Validation of OpenFOAM® for oscillating water column three-dimensional modeling.” *Ocean Engineering*, 107, 222-236.

ROMANO-MORENO, E., DIAZ-HERNANDEZ, G., LARA, J.L., TOMÁS, A., JAIME, F.F. (2022). “Wave downscaling strategies for practical wave agitation studies in harbours”. *Coastal Engineering*, 175, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104140>.

ROMANO-MORENO, E., DIAZ-HERNANDEZ, G., L. LARA, J., TOMÁS, A. (2023). “Multimodal harbour climate characterization based on wave agitation spectral-types”. *Coastal Engineering*, 180, 104271, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104271>.

SARMIENTO, J., ITURRIOZ, A., AYLLÓN, V., GUANCHE, R., & LOSADA, I. J. (2019). “Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting”. *Ocean Engineering*, 173, 761-773.

Diseño y modelización de dispositivos de energía undimotriz instalados en diques: prototipo en el Puerto de Valencia

Carlos Quijada

Responsable modelización CFD, TYPsa, cqujada@typsa.es

Diego Simón

Jefe de proyecto, TYPsa, dsimon@typsa.es

José Landete

Jefe de proyecto, TYPsa, jlandete@typsa.es

Javier Abanades

Director Área Offshore, TYPsa, jabanades@typsa.es

INTRODUCCIÓN

Una de las prioridades clave de la Política Portuaria Europea es fomentar el perfil medioambiental de los puertos europeos y promover la excelencia en la gestión y los resultados medioambientales de los puertos (Puertos del Estado, 2014). Para ello se utiliza el concepto de puerto verde, que se basa principalmente en los principios del crecimiento sostenible. Entre otros, uno de los pilares clave de este éxito está relacionado con la integración de las energías renovables, aprovechando los abundantes y numerosos recursos que están presentes en los puertos.

En este sentido, este artículo introduce el proyecto piloto en el Puerto de Valencia que tiene como objetivo el aprovechamiento de la energía del oleaje bajo el marco del proyecto Europeo Match-Up en el que se promueven iniciativas de innovación para la mejora energética. La patente del dispositivo instalado pertenece a la empresa Rotary Wave. El grupo TYPsa ha colaborado con Rotary Wave en el diseño estructural de los elementos de sujeción al dique, así como en la modelización de las cargas.



Fig. 1. Esquema del dispositivo instalado en el puerto (izquierda) e imagen del flotador antes de su instalación en el puerto de Valencia. Fuente: Rotary Wave (2023).

3. DESCRIPCIÓN DEL ENTORNO DE INSTALACIÓN

El dispositivo se instala en el lado norte de la Marina de Valencia, señalado en rojo en la Fig. 4. Esta localización se selecciona como idónea por encontrarse ortogonal a la dirección predominante de incidencia del oleaje. Así, se aprovecha al máximo el efecto de reflexión producido por

la interacción de las olas incidentes con el dique situado detrás del convertidor.

Se consideran las características del oleaje en base a la información disponible públicamente (Puertos del Estado, 2024). De esto se obtiene la Tabla 1, que muestra los estados de mar a esperar en el Puerto de Valencia.

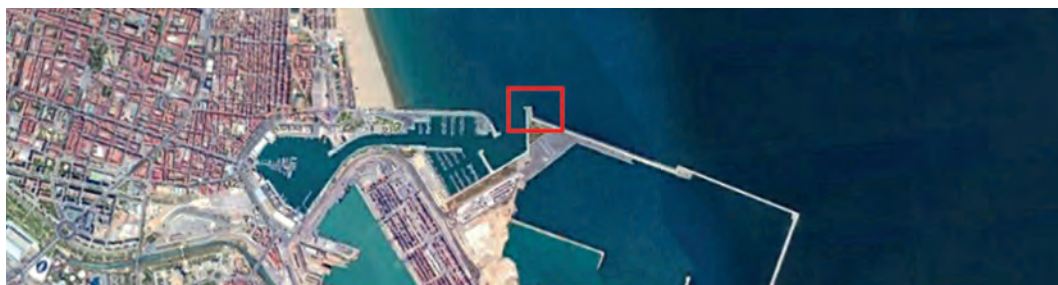


Fig. 4. Localización del dispositivo en el Puerto de Valencia. Fuente: Google Earth.

Hs/Tp-P	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
0.25	0.86%	2.45%	1.95%	1.62%	0.78%	0.21%	0.04%	0.03%	0.00%	7.96%
0.5	8.75%	10.59%	9.66%	7.53%	4.46%	1.48%	0.15%	0.06%	0.00%	42.67%
0.75	5.10%	6.01%	6.16%	3.50%	2.28%	1.56%	0.25%	0.04%	0.00%	24.89%
1	0.42%	3.35%	5.22%	2.84%	1.78%	1.69%	0.40%	0.10%	0.00%	15.80%
1.5	0.00%	0.34%	1.69%	1.85%	1.29%	0.12%	0.47%	0.27%	0.01%	6.04%
2	0.00%	0.00%	0.08%	0.39%	0.48%	0.43%	0.18%	0.20%	0.02%	1.78%
2.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.15%	0.19%	0.09%	0.07%	0.01%	0.54%
3	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.10%	0.03%	0.03%	0.00%	0.19%
3.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.06%	0.02%	0.01%	0.00%	0.09%
4	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.03%
4.5	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Total	15.13%	22.73%	24.76%	17.78%	11.26%	5.85%	1.62%	0.82%	0.05%	

Tabla 1. Probabilidad de combinaciones de altura y periodo de ola en base a datos obtenidos para el Puerto de Valencia.

Fuente: Elaboración propia con datos de Puertos del Estado.

4. ENSAYO EXPERIMENTAL

Como parte del proceso de diseño, se realizó una campaña de ensayos experimentales en el canal de olas del IH Cantabria. Este canal, de 68 m de largo y 2 m de ancho,

permite generar trenes de olas con una altura de hasta 0.6 m y periodos de hasta 3 s, y cuenta con un sistema de absorción activa en pala que evita la aparición de olas estacionarias no deseadas. La profundidad del agua en los ensayos es de 0.7 m.

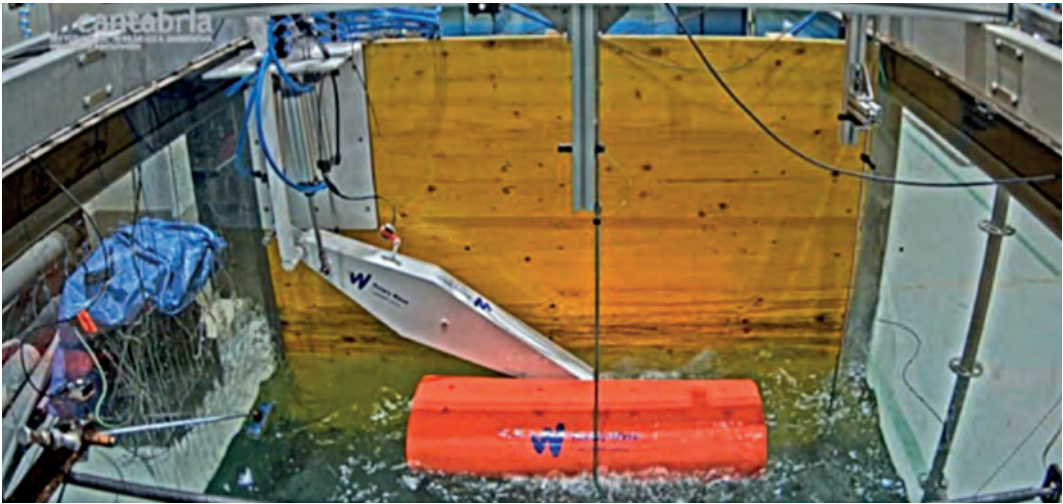


Fig. 5. Modelo a escala instalado en el canal de olas del IH Cantabria. Fuente: Rotary Waves (2021).

Para los ensayos se ha construido un modelo a escala 1:5. Esta maqueta cuenta con un sistema de hidráulico similar al del modelo a escala real, aunque no incluye un sistema de control. Además, la maqueta cuenta con una placa de medición de fuerzas en 6 grados de libertad.

Para estimar el comportamiento del modelo real, se mide el trabajo realizado por la maqueta bajo diferentes condiciones de oleaje, tanto regular como irregular. A partir de esto es posible estimar la potencia máxima que se puede extraer del trabajo realizado por las olas, con la consideración de varias limitaciones:

- No se tiene en cuenta el control del sistema de extracción de energía, dado que el trabajo medido es el de la maqueta.
- La profundidad máxima que puede representar el canal de olas (0.7 m) se corresponde a una profundidad (3.5 m) mucho menor a la real (~ 20 m).

Debido a esto, al escalar los resultados de la maqueta al tamaño real, es esperable obtener valores de energía más altos que los que se obtendrían en la realidad. Es por tanto necesario realizar ensayos y modelos que incluyan el control del sistema y modelen correctamente la profundidad, obteniendo potencias realistas para el dispositivo.

5. MODELO CFD

5.1. Descripción del modelo

Con el objetivo de contrastar los resultados de los ensayos experimentales y de obtener un modelo capaz de predecir el comportamiento del convertidor con un sistema de control, se ha desarrollado un modelo CFD en el software Flow 3D Hydro.

El modelo CFD cuenta con las siguientes características:

- Resolución del flujo turbulento aire-agua y de la interacción fluido-estructura con el convertidor mediante el método Volume of Fluid.
- Cálculo de las fuerzas ejercidas por el sistema hidráulico mediante código propio desarrollado en Fortran.
- Integración del código propio en el solver de Flow 3D Hydro.

5.2. Datos de entrada

Se han considerado un total de 6 estados de mar diferentes que representan las condiciones de trabajo en el Puerto de Valencia. Para cada uno se consideran 6 configuraciones del sistema de extracción de energía. Cada

simulación (15-25 s) se hace con una condición de contorno de ola regular tipo Stokes de quinto orden, con altura y periodo representativos de cada estado de mar.

Se considera un control de tipo “De-Clutching” (Hansen, 2013), que presuriza el pistón durante una parte de la subida y/o la bajada del dispositivo. Este tiempo de activación se ha definido como un 40% del semi-periodo de

la ola incidente. El sistema de extracción de energía funciona presurizando el sistema hidráulico de manera que la fuerza resultante del mismo se opone a la dirección de la velocidad del pistón.

Las 36 condiciones se obtienen de combinar los casos de condiciones meteoceánicas (1-6) con los casos de fuerza del sistema hidráulico (A-F).

Caso	H (m)	T (s)	τ (s)	Caso	Fuerza (N)	Pistón	P (bar)
1	0.3	5	1	A	60000	2	50
2	0.6	5	1	B	120000	2	100
3	0.6	7	1.4	C	180000	2	150
4	0.9	6	1.2	D	240000	1	120
5	1.2	7.5	1.5	E	300000	1	150
6	2	7.5	1.5	F	360000	1	180

Tabla 2. Condiciones meteoceánicas consideradas y condiciones de fuerza en el sistema hidráulico.

Fuente: Elaboración propia.

5.3. Resultados del modelo CFD

Se simulan los 36 casos de carga, además de 6 casos sin extracción de energía. La Fig. 6 muestra un ejemplo

visual de los resultados del modelo para condiciones extremas. Para cada estado de mar se busca determinar qué fuerza hidráulica obtiene la mayor energía. Tomando como ejemplo el caso 5, el impacto del sistema de control

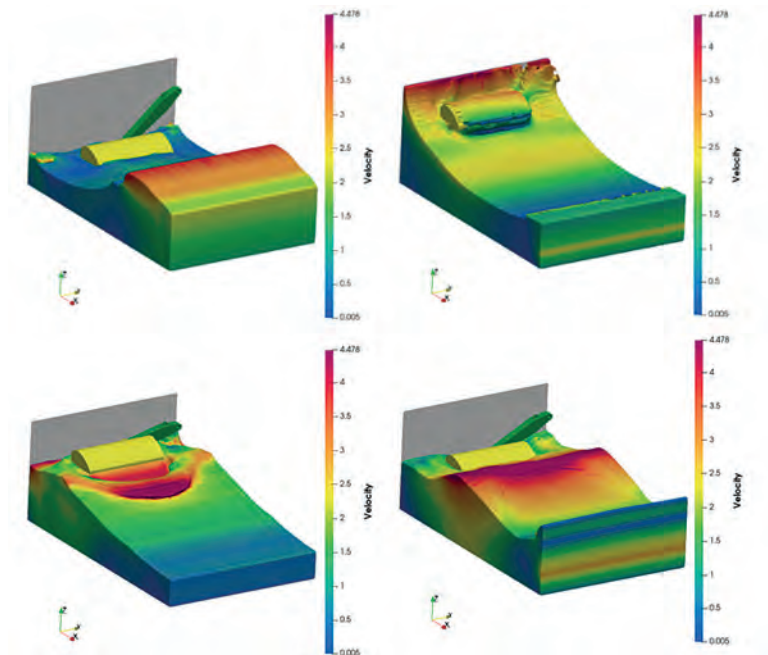


Fig. 6. Ejemplo del comportamiento del modelo CFD. Fuente: Elaboración propia.

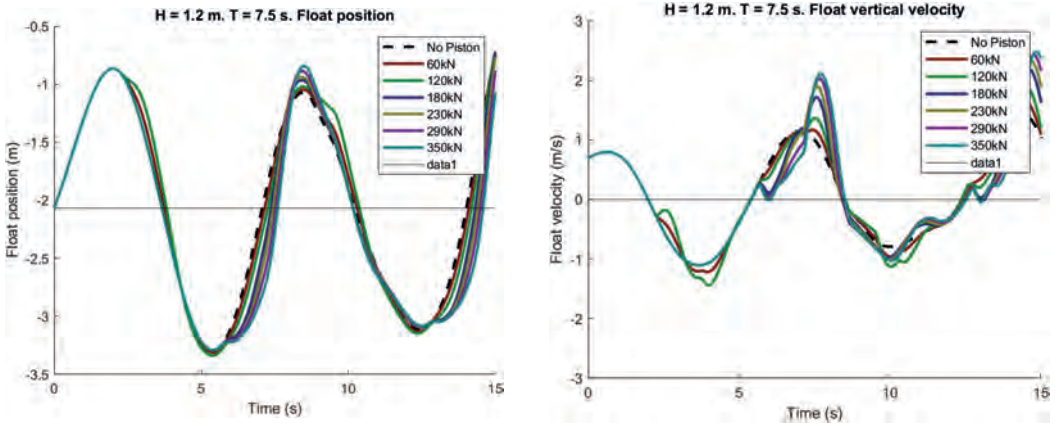


Fig. 7. Modelo CFD con olas de 1.2 m de altura y distintas fuerzas de sistema hidráulico. Izquierda: Posición. Derecha: Velocidad. Fuente: elaboración propia.

se puede ver claramente en la posición y velocidad del flotador, mostradas en la Fig. 7. Una fuerza mayor retrasa la subida del flotador y obtiene mayores velocidades. Sin embargo, una fuerza excesiva corre el riesgo de invertir la dirección de movimiento del el flotador y desestabilizar el sistema de control.

La potencia media que se obtiene del convertidor puede ser calculada a través de la integral de la potencia instantánea durante una serie de periodos, dividida

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P_i \quad \text{con} \quad P_{i,pistón} = F_{pistón} \cdot u_{pistón} \quad , \quad P_{i,sistema} = Q_{out} \cdot P_{trabajo}$$

por el tiempo transcurrido (Reabroy et. Al, 2019). Esta potencia instantánea se calcula a través del funcionamiento del sistema hidráulico. Una primera aproximación, en la que sólo se considera el pistón en sí, es multiplicar la fuerza ejercida por la velocidad de la cabeza del pistón. Sin embargo, este método obvia el sistema de válvulas que controlan el sistema hidráulico. Por tanto, se considera la potencia como el caudal saliente del pistón hacia el motor, multiplicado por la presión de trabajo.

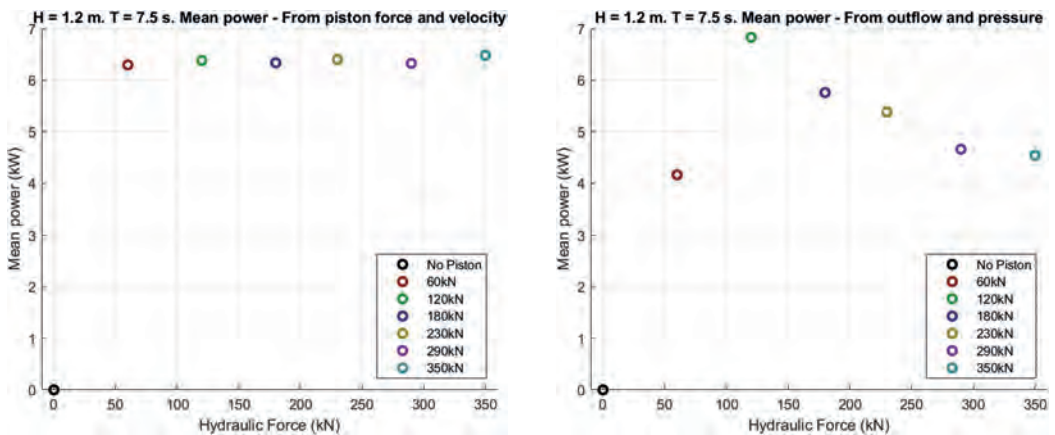


Fig. 8. Potencia media obtenida por el modelo CFD mediante dos métodos de cálculo. Izquierda: Cálculo mediante velocidad del pistón y fuerza. Derecha: Cálculo mediante caudal de salida y presión. Fuente: Elaboración propia.

Parece intuitivo que a mayor fuerza ejercida por el sistema, mayor energía extraída, puesto que la amplitud del movimiento de flotador aumenta (Fig. 7). Sin embargo, la Fig. 8 izquierda muestra que el resultado es muy similar para las diferentes fuerzas consideradas para el sistema hidráulico. Una vez se tiene en cuenta el efecto que tiene el control en el caudal que sale hacia el motor, el resultado presenta un máximo para una fuerza de 120 kN. Esto puede verse en la segunda imagen de la figura.

Sin tener en cuenta la eficiencia del motor hidráulico, los resultados anteriores pueden ser usados para estimar la producción anual de energía del dispositivo. Además, es posible calcular la eficiencia de conversión de potencia

(CWR o Capture Width Ratio) del sistema a través del cálculo del flujo de energía por unidad de longitud de cresta de la ola, en función de la potencia media extraída, y la longitud del convertidor (5 m) (Reabroy, 2019). Este flujo de energía se calcula para las olas regulares simuladas.

$$P_w = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad CWR = \frac{\bar{P}}{P_w L}$$

Teniendo en cuenta las máximas potencias medias obtenidas, y obviando aquellas donde se invierte la velocidad del flotador debido a la fuerza hidráulica, es posible obtener la eficiencia para los trenes de olas simulados. La Tabla 3 muestra estos resultados.

CÁLCULOS ENERGÉTICOS MODELO CFD						
Altura de Ola H (m)	0.3	0.6	0.6	0.9	1.2	2.0
Periodo (s)	5.0	5.0	7.0	6.0	7.5	7.5
Potencia media (kW)	1.11	6.11	3.42	5.02	6.84	19.13
Flujo de energía (kW)	2.21	8.83	12.36	23.84	52.99	147.18
CWR (-)	0.50	0.69	0.28	0.21	0.13	0.13
H reflejada (m)	0.62	1.08	1.10	1.38	2.10	4.09
Flujo de energía con ola reflejada (kW)	9.32	28.61	41.36	56.21	161.63	615.52
CWR con reflexión (-)	0.12	0.21	0.08	0.09	0.04	0.03

Tabla 3. Eficiencia hidrodinámica del dispositivo de acuerdo con los resultados del modelo CFD.

Bajo la hipótesis conservadora de que la producción con olas regulares es equivalente a la producción en un estado de mar con altura de ola significativa igual, se puede estimar la producción de energía anual. Se considera la proporción de ocurrencia de los estados de mar representados y de aquellos sin producción de energía ($H_s < 0.25$ m), de acuerdo con la Tabla 1. Calculando las horas anuales correspondientes a cada estado, se estima la producción de energía. El resultado es de 25.27 MWh al año, con una eficiencia media del 34.5 % de la energía contenida en la ola incidente.

6. CONSTRUCCIÓN E INSTALACIÓN

Las actividades de construcción del brazo y el bastidor, y la instalación del sistema, fueron realizadas por Proemisa, empresa con base en la Comunidad Valenciana. El flotador,

por su parte, fue construido por una empresa externa con base en la Comunidad Valenciana. La Fig. 9 muestra el proceso de construcción del dispositivo, así como una imagen del flotador listo para instalar.

El dispositivo, compuesto por el flotador, el brazo, y el bastidor anclado al dique, fue instalado con éxito en enero de 2023. En la Fig. 10 se puede ver el izado del bastidor junto al brazo durante la instalación. Los medios utilizados en las operaciones de montaje consistieron en una grúa giratoria con capacidad para 120 toneladas y una grúa autocargante de 25 toneladas.

El bastidor y el flotador se instalaron en el dique vertical por medio de trabajos verticales. El bastidor fue anclado al dique por medio de barras Ø32 de acero corrugado, cumpliendo con las especificaciones técnicas y las normativas UNE 36 068 y UNE 36 065. Para su unión con el



Fig. 9. Proceso constructivo del dispositivo convertidor. Fuente: Rotary Wave, 2022.



Fig. 10. Instalación del dispositivo convertidor. Fuente: Rotary Wave, 2023.

dique, se utilizó un mortero de nivelación, de manera que se garantizase la transmisión correcta de las cargas de todo el dispositivo al hormigón.

El dispositivo ha estado funcionando durante un año de manera satisfactoria, cumpliendo el requisito exigido por la Unión Europea.

7. CONCLUSIONES Y PRÓXIMOS AVANCES

Los resultados de los modelos computacionales y a escala demuestran la importancia de una correcta definición del sistema de control del dispositivo convertidor de olas, dado que el mismo tiene un impacto significativo en la energía obtenida y las cargas experimentadas por el sis-

tema. La experiencia con el dispositivo a escala real ha servido para identificar puntos débiles y mejorar futuros diseños, así como para probar la eficacia del sistema en condiciones reales.

Rotary Wave y TYPESA continúan su colaboración con el diseño de un nuevo prototipo con una mayor capacidad de generación de energía, con una potencia de hasta 270 kW. En el diseño estructural de este dispositivo se continúan aplicando modelos CFD de cara a la obtención de cargas.

8. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Arnau Bayón Barranchina (UPV) la colaboración en el desarrollo del modelo CFD. Se agradece a Rotary Wave la confianza depositada para el desarrollo del proyecto, y a TYPESA la creación del proyecto I+D+i *FLOATYP Wave* para la investigación de dispositivos renovables flotantes.

9. REFERENCIAS

- Giannini, Gianmaria *et al.* (2022). “Wave energy converters design combining hydrodynamic performance and structural assessment” en *Energy*. Volumen 29, 123641.
- Hansen, Rico Hjerm (2013). *Design and Control of the PowerTake-Off System for a Wave Energy Converter with Multiple Absorbers*. Department of Energy Technology, Aalborg University.
- Puertos del Estado (2014). *Guía de Gestión Energética en Puertos*.
- Puertos del Estado (2024). *Oceanografía – Previsión, tiempo real y clima*.
- Reabroy, Ratthakrit *et al.* (2019). “Hydrodynamic response and power efficiency analysis of heaving wave energy converter integrated with breakwater” en *Energy Conversion and Management*. Volume 195, Pages 1174-1186.
- Rotary Wave (2021). *Instalación de un prototipo para aprovechamiento del oleaje bajo el proyecto Match-Up financiado por la unión Europea*.

Instalación de pila de hidrógeno verde en el Puerto de Palma. Proyecto *Green Hysland*

Rafael Grau Grau

Responsable de Infraestructuras, Autoridad Portuaria de Baleares,
rafaelgrau@portsdebalears.com

Cristina Alburquerque Otero

Responsable de Medio Ambiente, Autoridad Portuaria de Baleares,
cristinaalburquerque@portsdebalears.com

Jorge Martín Jiménez

Jefe de Área de Explotación y Medio Ambiente, Autoridad Portuaria de Baleares,
jmartin@portsdebalears.com

1. INTRODUCCIÓN

En el actual contexto climático global, se evidencia la necesidad de descarbonizar la economía.

Las políticas de la Unión Europea (UE) se dirigen a unos ambiciosos objetivos de reducción de emisiones, materializadas en el Pacto Verde Europeo.

En dicho pacto, el *objetivo 55*, relativo a la reducción de las emisiones del transporte, los edificios, la agricultura y los residuos, la UE se ha fijado el objetivo de alcanzar la neutralidad climática de aquí a 2050 y de reducir, de aquí a 2030, las emisiones netas de gases de efecto invernadero en al menos un 55 % en comparación con los niveles de 1990.

Respecto al transporte marítimo, la ESPO (European Sea Ports Organization), lleva reflejando en sus informes anuales de las diez prioridades medioambientales esta preocupación, siendo la calidad del aire la prioridad desde 2013, seguida por el cambio climático en 2020, posiciones intercambiadas desde el año 2022 en adelante.

El **Memorándum de la ESPO** sobre las prioridades para el periodo 2024-2029, destaca el papel de los puertos como socios cruciales en la descarbonización y reenergización de Europa, con papeles como facilitadores de energías renovables y hubs energéticos.

La Autoridad Portuaria de Baleares (APB), materializa la alineación con estas políticas con la aprobación en 2021 de su **Estrategia Ambiental**, que refleja por escrito el conjunto de acciones y proyectos encaminados a desarrollar un papel de liderazgo en medio ambiente y sostenibilidad, algunos de los cuales ya se hallan en ejecución y/o explotación, denotando una amplia visión de futuro.

Así, en 2020 se une al consorcio que presentará la propuesta para desarrollar un *Ecosistema de Hidrógeno Verde* en la isla de Mallorca, en el marco del programa Horizon 2020.



Fig. 1. Las 10 prioridades medioambientales para los puertos europeos en 2023.

2. PROYECTO GREEN HYSLAND

Green Hysland es el primer proyecto de un país mediterráneo seleccionado por el organismo de la Comisión Europea *Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking* (ahora *Clean Hydrogen Partnership*, CHP) que, con una subvención de 10 millones de euros, tiene por objetivo crear el primer ecosistema de hidrógeno verde en Islas. Este ecosistema abarca toda la cadena de valor del H₂ y convertirá a Mallorca en el primer *hub* de H₂ del suroeste europeo.

El despliegue de Green Hysland proporcionará a Europa un anteproyecto para la descarbonización de las economías insulares, y un ejemplo operativo de la contribución del H₂ para la transición energética y la consecución de objetivos cero emisiones de 2050. Está previsto el desarrollo de modelos de negocio y replicación en otras cinco islas de la UE (Madeira – PT, Tenerife – ES, Aran – IE, Islas Griegas y Ameland – NL) así como en Chile y Marruecos.

La iniciativa incluye una hoja de ruta para el desarrollo de una economía de hidrógeno verde en Mallorca.

Green Hysland producirá, generará y distribuirá 300 toneladas de hidrógeno verde generado a partir de la energía solar producida en la isla de Mallorca.

En fecha 1 de enero de 2021, una vez firmado el Grant Agreement (GA), ha dado comienzo el proyecto y su plazo de finalización es de 5 años.

Las aplicaciones de hidrógeno verde priorizarán el consumo directo: empleo como combustible en flotas de au-

tobuses, vehículos de alquiler con pila de combustible, la generación de calor y energía para edificios comerciales y públicos, como la estación marítima número 4 del puerto de Palma y la creación de una estación de abastecimiento.

Así mismo, se inyectará parte de este hidrógeno verde en la red de gasoductos de la isla, a través de un Sistema de Garantía de Origen, lo que permitirá descarbonizar el suministro de gas.

Dentro de este proyecto, la Autoridad Portuaria de Baleares instalará una pila de hidrógeno de 100 kWe, que completará la transformación de la Estación Marítima nº 4 del puerto de Palma en un edificio de consumo energético casi nulo en el que el 100% de la energía consumida será renovable (fotovoltaica e hidrógeno verde).

3. INSTALACIÓN DE PILA DE HIDRÓGENO VERDE EN EL PUERTO DE PALMA

3.1. Definición de la instalación

Se proyecta la instalación de una pila de combustible de hidrógeno verde en el puerto de Palma, con una potencia de 100 kWe, con el objetivo de reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Dicha pila de combustible proveerá de energía eléctrica a la EM4 y verterá a la red eléctrica del puerto en caso de excedente de energía.

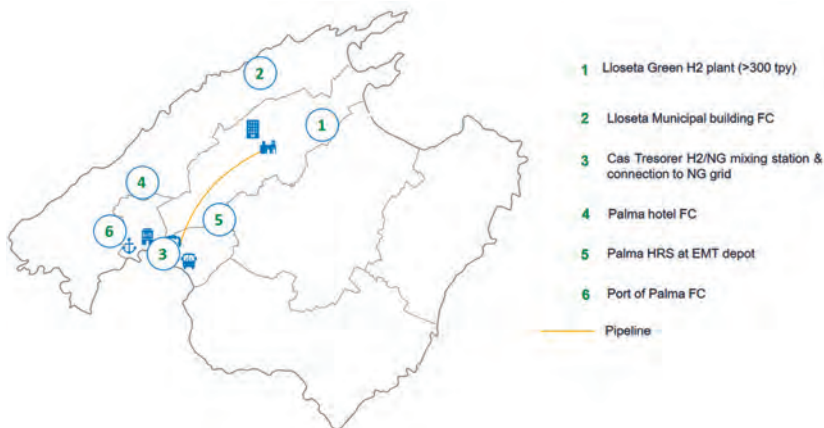


Fig. 2. Aplicaciones hidrógeno verde en la Isla de Mallorca.

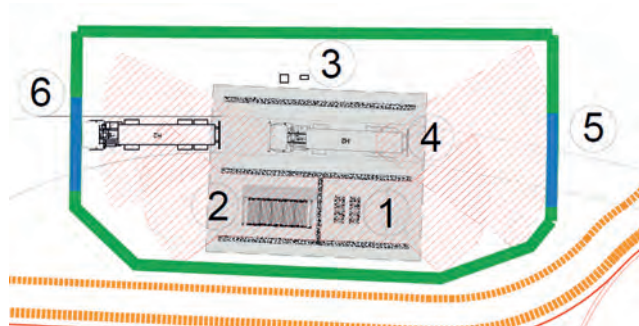


Fig. 3. Diseño del área de pila de combustible y operativa de carga de hidrógeno.

ITEM	DESCRIPTION
1	Almacenamiento H2
2	Pila de combustible H2
3	Panel de descarga (filtro y control)
4	Bahía de descarga H2
5	Entrada
6	Salidad

Se prevé consumir 40 toneladas de hidrógeno verde al año y que la pila almacene el hidrógeno necesario para un día de operatividad completa.

3.2. Características de la pila de combustible e instalación

- Un área de descarga del camión delimitada lateralmente por muros de protección. El *tube trailer* es un camión cisterna conformado con distintos tubos a presión que transportan hidrógeno a 300 bara con una longitud de aproximadamente 9 metros.
- Botellones de almacenamiento de H₂, área de almacenamiento para el suministro a la pila mediante 6 bloques de 6 botellones en cada bloque a una presión por botella de 300 bara de presión: este área estará al aire libre junto a la zona de descarga de H₂ y separada por muros de protección en forma de H. Son suministrados dentro del consorcio según el GA.
- Pila de combustible de H₂. La pila de combustible que permite la transformación de hidrógeno a presión a corriente eléctrica con una capacidad de potencia de 100 kWe. Ocupa el área contigua al almacenamiento del muro en forma de H.
- La obra civil asociada, compuesta por los muros de protección, pavimentos y canalizaciones.
- Panel de descarga de H₂ suministrado dentro del consorcio. Zona clasificada ATEX.

El suministro de hidrógeno desde la planta de producción donde se sitúa la instalación de hidrólisis, se realizará mediante camión *tube trailer*.

Se estima que la pila proporcione más de 588 MWh anuales de energía verde, por lo que se producirá un ahorro de 470 toneladas de emisiones de CO₂ eq.

La pila de combustible se controlará localmente, mediante un PLC (controlador lógico programable). Se conectará a la sala de comunicaciones de la EM4 mediante cableado ethernet y reportará datos a la planta de producción.

3.3. Selección del emplazamiento

Se han analizado varias localizaciones dentro del puerto de Palma y se ha seleccionado la zona de Pelaires y muelles de Poniente donde se ubican las estaciones marítimas n°2, n°3 y n°4.

La Estación Marítima N° 4 (EM4), en la que se prevé realizar una ampliación y la incorporación de mejoras de eficiencia energética tales como paneles fotovoltaicos en la cubierta, la pila de H₂ verterá energía suficiente (en términos medios) para cubrir la demanda y a su vez abastecer parte de la demanda de las Estaciones Marítimas adyacentes, EM1, EM2 y EM3, así como zonas exteriores (alumbrado de viales y campas).

La ubicación de la pila de hidrógeno será al este de la EM4, siendo necesario un espacio suficiente para poder ubicar el almacenamiento de H₂ y garantizar la operativa portuaria en condiciones de seguridad dadas las distancias necesarias a las estaciones marítimas 1 y 4 y viales de operaciones portuarias.

Teniendo en cuenta la necesidad de recarga diaria de hidrógeno, se ha diseñado un recorrido independiente para el camión de abastecimiento.

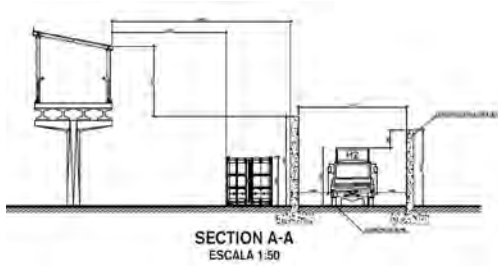


Fig. 4. Sección del área de pila de combustible y pasarela peatonal.

3.3.1. Principales retos de seguridad

El reto más importante ha sido hallar la ubicación idónea que permita abastecer la EM4, manteniendo las condiciones necesarias para la operativa portuaria de carga y descarga de mercancías y pasajeros, retirada de residuos Marpol y abastecimiento de la pila con *tube trailer*.

Dada la novedad de la tecnología, la normativa de seguridad industrial carece de regulación específica para el almacenamiento de hidrógeno a alta presión en el momento de la selección del emplazamiento y redacción del proyecto de licitación de la pila.

Se debe tomar en consideración la operativa portuaria, la normativa de seguridad y la planificación de los próximos desarrollos de la EM4, que incluyen una nueva pasarela de pasajeros.

En el momento de la elección del emplazamiento los códigos aplicables se restringen a las normas UNE-EN que tienen su redacción específica en la normativa española en el “Real Decreto 656/2017, de 23 de junio, por el que



Fig. 6. Curvas de Isoriesgo.

se aprueba el Reglamento de Almacenamiento de Productos Químicos y sus Instrucciones Técnicas Complementarias MIE APQ 0 a 10”.

Por las características del combustible, se considera la “Instrucción técnica complementaria MIE APQ-5 «Almacenamiento de gases en recipientes a presión móviles»”.

Así, para mayor seguridad y ante la gravedad de las consecuencias de un hipotético accidente, se encarga un “Análisis Cuantitativo de Riesgos” a la Ingeniería especializada en seguridad industrial, seguridad en transporte de productos peligrosos por carretera y seguridad del producto, entre otros, de amplia experiencia y participación en la elaboración de las ITE del reglamento APQ.

Con el análisis exhaustivo de los diferentes riesgos, elementos y distancias se concluye disponer muros que deben soportar una sobrepresión de 172 mbar para evi-

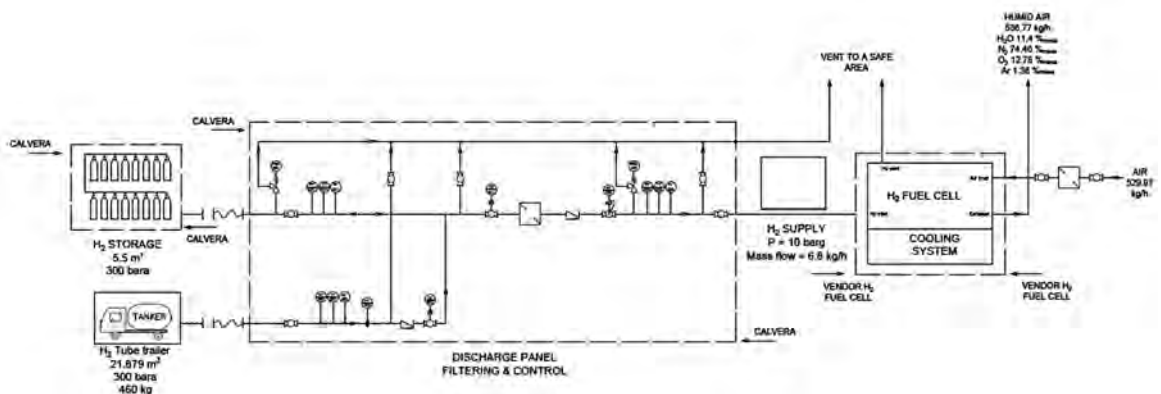


Fig. 5. Esquema del sistema de pila de combustible y camión de carga.

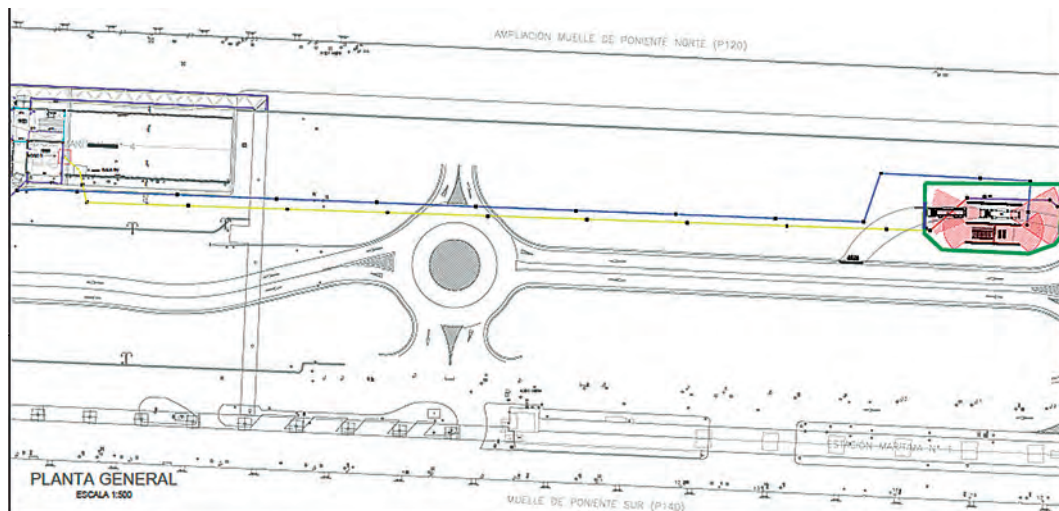


Fig. 7. Ubicación de la pila en los muelles de poniente.

tar que la sobrepresión llegue tanto al *tube trailer* y por consiguiente al elemento vulnerable como sería la pasarela de la EM4, con una altura mínima de 2 metros por encima de la válvula de seguridad para soportar en primer lugar los efectos de las radiaciones térmicas posibles en caso de siniestro.

Se decide colocar la pila al lado de la zona de almacenamiento con una separación de un muro de contención que también permita un apantallamiento de 172 mbar, de ahí el muro en H.

4. Estudios paralelos. Oportunidades

Dentro del proyecto, en el paquete de trabajo 6, se exploran diferentes posibilidades de extensión del uso del hidrógeno verde en la operativa y explotación portuaria.

Se realizan dos estudios, uno de descarbonización de terminales y otro de desarrollo de *Cold Ironing*, ambos con el empleo del hidrógeno verde producido en el marco del proyecto.

4.1. Estudio del desarrollo del *Cold Ironing* (OPS) en el puerto de Palma

La creciente implantación de sistemas de *Cold Ironing* (también conocidos como *Onshore Power Supply*, OPS)

para conectar a los buques a la red eléctrica mientras permanecen en puerto en el sistema portuario estatal, genera un aumento sostenido de la demanda de energía eléctrica.

Sólo en los puertos de la APB, ya hay uno en funcionamiento en el puerto de Palma y otros cuatro en ejecución, dos en la isla de Mallorca (Palma y Alcúdia), otro en el puerto de Maó en Menorca y uno más en el puerto de Eivissa en la isla de Ibiza.

No se puede obviar la dependencia energética en los territorios insulares, algunos de ellos totalmente aislados energéticamente del continente, lo que hace necesarias las centrales térmicas con sus emisiones, asociadas al uso de combustibles que a su vez son transportados vía marítima emitiendo de nuevo GEI.

Esta situación conlleva una dificultad añadida a la hora de proporcionar energía a los buques en puerto y se ha estudiado la posibilidad de alimentar los OPS en parte con energía proveniente de pilas de hidrógeno verde.

Se han estudiado los datos de la demanda energética de los ferris de tráfico regular en la zona del Dique del Oeste de Palma, escogida por la afluencia de ferris y cruceros, las posibilidades del espacio portuario para albergar las pilas de combustible y la configuración de la red eléctrica portuaria.

Se diseña un OPS pensado para proporcionar 2000 kW de potencia eléctrica, con la opción de complementarla

Fuel cell E output (kW)	E grid (kW)	Total load (kW)	% operation (340 days/year)	Number of hours/year /hrs/y)	total demand/year (kW/y)
374	2000	2374	1% (4 days)	24	56976
374	1626	2000	86% (292 days)	1752	3504000
374	1000	1374	13% (44 days)	264	362736
Total				2040	3923712

Tabla 1. Carga anual y demanda energética de los buques en puerto.

con energía procedente de una pila de combustible cuando sea necesario. En la mayoría de los escenarios, esta capacidad de potencia es suficiente para suministrar energía simultáneamente a al menos dos buques, teniendo en cuenta los patrones típicos de consumo de energía de dichos buques.

Para la evaluación económica, se partió de los siguientes supuestos: según el análisis de los datos del historial de navegación en el Dique del Oeste, hay 340 días de navegación en el muelle durante 6 horas cada día. Normalmente, dos buques atracan simultáneamente con una demanda total de 2000 kW durante 292 días al año. Sólo 4 días al año (1% del tiempo), la demanda puede aumentar hasta 2374 kW. El resto del tiempo, aproximadamente 44 días al año, la demanda se ha estimado en 1374 kW. Con estos supuestos, la demanda anual de electricidad se ha estimado en 3.923.712 kWh al año para 2040 horas de funcionamiento, en el primer año de operaciones.

Para la pila de combustible, que funciona en modo de carga constante, se eligió una tasa de degradación del 0,4 % por cada 1.000 horas, en consonancia con las directrices de Hydrogen Europe (Hydrogen Europe, 2020). Para el caso de estudio, implica una pérdida de producción anual del 1 % cuando funciona durante 2040 horas al año.

La diferencia entre la demanda y la producción de energía de la pila de combustible se compensará con electricidad de la red. Se supone que el sistema de pilas de combustible incluye un inversor CC/CA.

El estudio comprende una evaluación tecnoeconómica, cuyos resultados serán publicados bajo en la web del proyecto <https://greenhysland.eu/deliverables/>

A partir de los valores obtenidos, se espera una reducción significativa de las emisiones de GEI sólo por el uso de una conexión OPS, y aún mayor si una parte de la energía suministrada procede de una pila de combustible que utiliza hidrógeno verde.

La tabla 2 muestra los valores de emisiones de CO₂ eq/año para los tres escenarios considerados.

La reducción prevista de las emisiones de gases de efecto invernadero por año es de unas 1.804 toneladas de CO₂, lo que supone más de 48.000 toneladas de CO₂ no emitidas a la atmósfera hasta 2050. Esto significa una reducción de más del 58% de las emisiones de CO₂ para un OPS que utiliza una pila de combustible con un suministro total de energía de 2374 kW, 2000 kW de la red y 374 de la pila de combustible, donde la pila de combustible proporciona casi el 8% de dicha reducción.

No podemos olvidar que el esfuerzo también deber venir por la parte de las navieras para transformar los buques de modo que puedan ser conectados a los OPS.

Desde el punto de vista del buque, con las próximas regulaciones, cualquier inversión directa para reducir el importe de las penalizaciones podría ser considerada como una inversión lucrativa. Y esa será la cuestión, buscar

	Current situation - Onboard gensets	Pure cold ironing	Cold ironing with fuel cell using green hydrogen
Port of Mallorca	3,105	1,545	1,302

Tabla 2: Emisiones estimadas anuales expresadas en ton CO₂eq/año.

equipos y soluciones que puedan reducir las emisiones de GEI del buque, tanto en navegación como en amarre.

Sólo un OPS, sin utilizar una pila de combustible, aporta una reducción bastante significativa de las emisiones de GEI. Pero la pila de combustible aporta una reducción adicional de las emisiones. Y en cuanto a las posibles sanciones que habría que pagar, cualquier reducción sería bienvenida.

4.2. Estudio de descarbonización de las estaciones marítimas en los puertos de Palma, Eivissa y Maó con la integración de energías renovables y almacenamiento de energía como H₂

Se estudian alternativas combinando los costes actuales de la energía eléctrica para la APB en 2023 y la integración de plantas de generación de energía fotovoltaica con sistemas de pila de hidrógeno.

Como asunciones iniciales el sistema debe obtener al menos un 80% de autonomía energética a la vez que se obtiene la máxima reducción de emisiones posible y el menor Coste Nivelado de la Electricidad posible (LCOE por sus siglas en inglés). Se considera toda la cadena de valor de hidrógeno verde, incluyendo los costes de distribución, almacenamiento y despliegue.

El coste nivelado de la electricidad (LCOE) es un parámetro económico utilizado para comparar los costes de generación de electricidad a lo largo de la vida útil del proyecto (20 años en este caso).

En el LCOE basado en las hipótesis del estudio, el 31% de los costes corresponde a CAPEX, siendo la pila de hi-

drógeno el principal coste. Los gastos generales representan el 69% del LCOE total, siendo el H₂ el elemento de coste más elevado para todos los edificios

Se realiza el estudio para las EM2 y EM3 en el puerto de Palma, la EM de Botafoch en el puerto de Eivissa y la EM del Cos Nou de próxima construcción en el puerto de Maó.

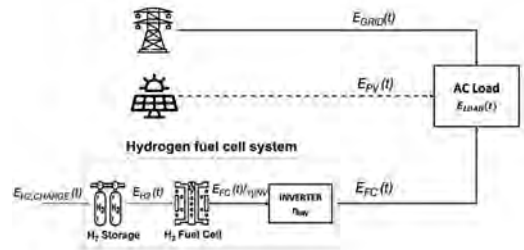


Fig. 9 Configuración genérica para Eivissa y Maó.

Se supone un precio del H₂ de 10 €/Kg actualmente a 5,5 €/Kg en 2050 (basado en investigación bibliográfica).

En el puerto de Palma se alcanza una reducción de emisiones entre 223 y 248 ton CO₂eq/año, añadiendo una pila de H₂ de 45kWe en la EM2 y EM3 que se suma a la ya contemplada en el proyecto para la EM4. Se estima un LCOE entre 671 y 927 €/MWh.

Para Maó y Eivissa se dispone una configuración genérica: Para la EM Botafoch en Eivissa, frecuencias de recarga de 1-2 días, mantienen la independencia energética de la red requerida mayor del 80% y se evitan entre 300 y 400 Ton/año de emisiones CO₂ y el coste entre 940 y 1200 €/MWh. Es la mejor opción entre las estudiadas.

Para la EM del Cos Nou en Maó, frecuencias de recarga de 1-3 días, mantienen la independencia energética de la

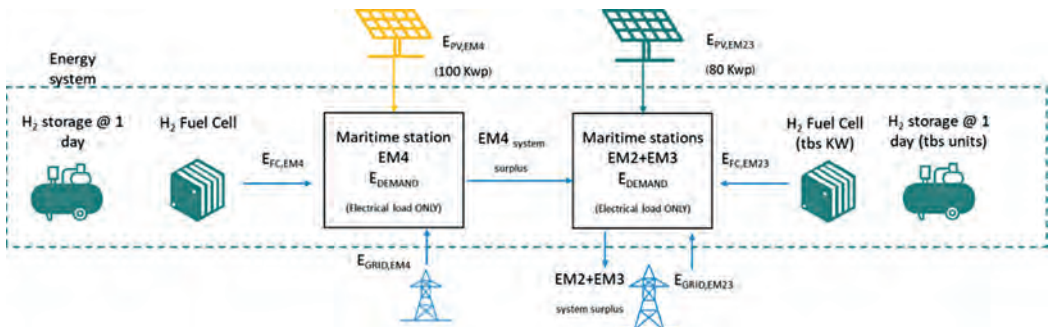


Fig. 8. Configuración seleccionada sistema integrado en EM4 + futura pila de H₂ + FV en EM2 y EM3.

red > 80% requerida, reducen entre 140 y 190 Ton/año de emisiones CO₂ y el coste entre 944 y 1100 €/MWh. La mejor opción entre las estudiadas es una frecuencia de recarga de 3 días.

Así, la demanda estimada de H₂ verde para las tres islas: 163 - 215 ton/año y la reducción estimada de emisiones de CO₂ total 3 islas: 650 - 841 ton/año.

La integración de un sistema solar fotovoltaico (FV) en el sistema energético de las terminales marítimas del puerto de Palma de Mallorca ofrece importantes ventajas económicas, especialmente en la configuración combinada seleccionada.

Las soluciones que alcanzan una autonomía energética igual o superior al 80% con costes LCOE mínimos representan opciones equilibradas basadas únicamente en estos indicadores. Se demostró que las configuraciones de sistemas con opciones de LCOE mínimo absoluto no siempre aportan las mayores reducciones de emisiones atm y emisiones de CO₂.

5. CONCLUSIONES

- La tecnología de hidrógeno es una alternativa de generación y almacenamiento de energía especialmente prometedora en territorios insulares, fuertemente dependientes energéticamente del continente.
- El hidrógeno verde permite una reducción significativa y efectiva de emisiones de GEI.
- El uso de pilas de hidrógeno verde como apoyo a los sistemas OPS es una solución al déficit de potencia para la demanda prevista.
- Con el desarrollo de la tecnología van existiendo cada vez más soluciones comerciales adaptadas a las necesidades del consumo.
- Las oportunidades se presentan en descarbonización de terminales y puertos, y continúan por las rutas marítimas con buques de última generación listos para su propulsión con hidrógeno verde.

Peiraos do Solpor

Gerardo González Álvarez

Jefe Departamento de Obras y Economía Azul, Puerto de Vigo, ggonzalez@apvigo.es

Elisa Romero González

Técnico de medio ambiente, Puerto de Vigo, elisaromero@apvigo.es

Francisco Barreiro Romano

Técnico de medio ambiente, Puerto de Vigo, franciscobarreiro@apvigo.es

1. INTRODUCCIÓN

Los puertos se enfrentan desafíos medioambientales cruciales debido al cambio climático y al desarrollo costero. Para adaptarse a estos retos, las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) presentan una oportunidad concreta para enfrentar de manera efectiva múltiples crisis de sostenibilidad, incluyendo el cambio climático, la seguridad alimentaria e hídrica, la degradación del suelo y la pérdida de biodiversidad (IUCN, 2020). Así, en los últimos años, el Puerto de Vigo ha tratado de avanzar en la búsqueda de soluciones innovadoras que permitan construir infraestructuras resilientes frente al cambio climático y que favorezcan, entre otros, la mejora de la biodiversidad marina en el entorno de las aguas de su zona de servicio. Las SbN están emergiendo globalmente como una estrategia que emplea características naturales para abordar los riesgos provocados por los impactos del cambio climático en las áreas costeras, al mismo tiempo que benefician la biodiversidad (European Commission, 2021). Las SbN son consideradas acciones sistémicas que trabajan y mejoran la naturaleza para proporcionar beneficios ambientales, sociales y económicos en el abordaje simultáneo de múltiples desafíos (E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, S. Maginnis, 2020).

El Puerto de Vigo, como parte de su estrategia Blue Growth para alcanzar la sostenibilidad ambiental, social y económica del puerto, ejecuta el proyecto Peiraos do Solpor como una actuación con doble objetivo: la mejora de la integración medioambiental y social de las infraestructuras portuarias a través del uso de SbN, con los beneficios que ello conlleva. Peiraos do Solpor tiene su origen en una estrategia formulada en 2018 con el mismo nombre planteada en torno a 3 fases.

La primera fase, el proyecto Puertalmar, ejecutado en 2019 en colaboración con la Universidad de Vigo y financiado por la Fundación Biodiversidad, incluyó la ejecución de un proyecto piloto de recuperación de hábitats costeros alterados para potenciar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos del entorno marítimo-portuario de la dársena de A Laxe. La base sobre la que se sustentaron todas las actividades fue la monitorización de estructuras biomiméticas diseñadas y fabricadas por ecólogos de la Universidad de Vigo. Durante su ejecución se identificaron más de 180 especies de organismos marinos y la evaluación de la captura de carbono mostró valores superiores a 7 kg por metro cuadrado. Los datos permitieron corroborar la idoneidad de las estructuras desarrolladas y su replicabilidad en otros entornos portuarios. Además, el proyecto incluyó la realización de una campaña de divulgación sobre la importancia de conservar estos ecosistemas para el desarrollo sostenible de las actividades socioeconómicas relacionadas con los recursos marinos. Las acciones de divulgación se completaron con talleres para escolares, mesas de trabajo, jornadas abiertas al público y visitas al puerto, que contaron con la participación de profesionales de puertos, sector pesquero, universidades, empresas consultoras y de ingeniería costera en la que participaron alrededor de 1000 personas.

La segunda fase, iniciada en 2021 y que finalizará en noviembre de 2024, es el proyecto Living Ports. Financiado por el programa europeo Horizon, y siguiendo la estela de Puertalmar, su objetivo es demostrar la eficacia de aplicar principios ecológicos y materiales innovadores a las infraestructuras portuarias. Liderado por un consorcio interdisciplinario compuesto por: Puerto de Vigo, ECONcrete®, DTU (Universidad Técnica de Dinamarca) y el astillero Cardama, este proyecto representa un despliegue a gran escala de infraestructuras portuarias que integran

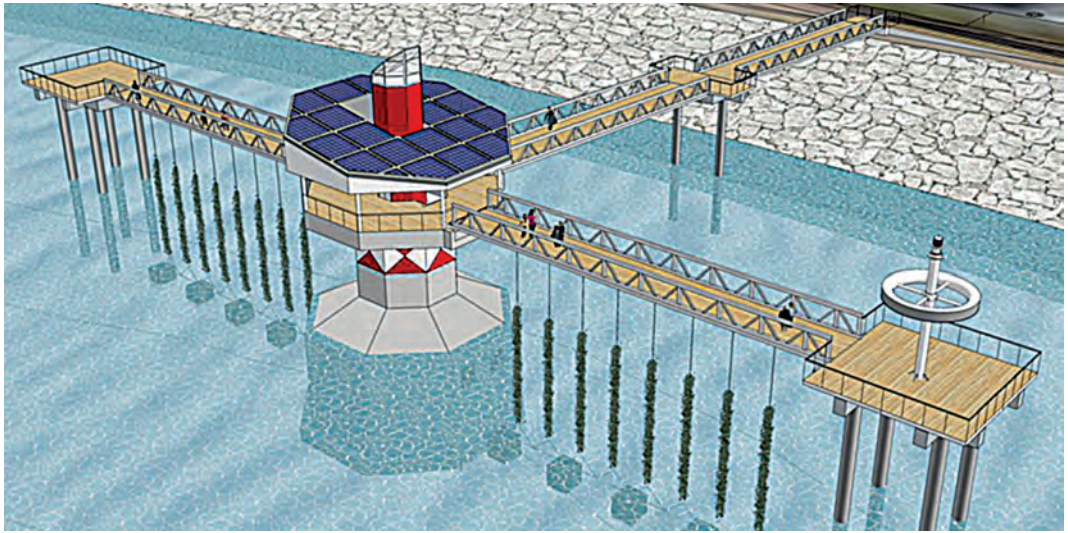


Fig. 1. Render diseño final de Infraestructura Peiraos do Solpor.
Fuente: Puerto de Vigo (2024).

la naturaleza. El proyecto incluye 2 pilotos: 1. la dársena de Portocultura, con la instalación de 330m² de paneles de muelle denominados Seawall Panels. 2: la protección costera de Bouzas, donde se instalaron 100 elementos denominados Coastalock™ en sustitución del manto exterior de la escollera, diseñados con principios ecológicos que proporcionan estabilización y crean hábitats naturales. Ambas actuaciones se ejecutaron a principios de 2023 y, desde entonces se está llevando a cabo una monitorización biológica y estructural cuyo objetivo es evaluar la influencia de la tecnología de hormigón tanto en las propiedades mecánicas y estructurales como en la contribución biológica y ecológica a la infraestructura portuaria. Mención singular dentro del proyecto merece el diseño e instalación del observatorio submarino Nautilus. Este es una estructura flotante con una habitación sumergida con ventanas a ambos lados. Diseñado con objetivos científicos y de divulgación ambiental, permite sumergirse en las aguas del puerto y ha desarrollado un programa de divulgación del medio marino que ha sido visitado por más de 45.000 personas en el último año y medio.

La fase final, el proyecto Peiraos do Solpor comenzará su construcción a finales de 2024. El conjunto de la infraestructura se plantea como un paso más en el objetivo de mejorar el estado ecológico de las aguas de la zona de servicio así como constituir un punto singular para la divulgación marina del entorno de las aguas del puerto y la

Ría de Vigo con nuevos usos recreativos y educativos que fortalezca la relación puerto-ciudad. La obra se localiza en el área de Bouzas, en el entorno del paseo marítimo que rodea a la terminal ro-ro. Suma de los resultados y lecciones aprendidas de los dos proyectos anteriores, la construcción de la infraestructura combina la ecología y la ingeniería a gran escala para conservar y restaurar los ecosistemas marinos del entorno del puerto de Vigo. El uso de SbN favorecerá el incremento de biodiversidad, de biomasa y el establecimiento de especies con capacidades de fijación de carbono, contribuyendo a la captación de las emisiones de CO₂ y por tanto de la huella de carbono del Puerto de Vigo. El espacio construido permitirá el desarrollo de un punto de disfrute y aprendizaje para la ciudadanía y el desarrollo de actividades turísticas sostenibles.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Peiraos do Solpor se articula en un paseo peatonal elevado sobre el mar conformado por una serie de tramos de pasarela de idénticas longitudes apoyadas sobre elementos estructurales. La configuración en planta presenta una forma en T cuya asta conecta con el paseo marítimo. En el extremo final del asta o trazo principal se emplaza un observatorio submarino desde el cual se podrá visualizar el entorno marino de forma superficial y submarina. De este observatorio arrancan los dos brazos de la barra en cuyos extremos se

disponen dos plataformas de observación superficial. Todos estos elementos están enlazados por pasarelas elevadas abiertas al tránsito peatonal (Fig. 1).

Se debe resaltar que, desde el punto de vista técnico, el observatorio submarino que se integra en la actuación constituye una realización singular que no tiene precedentes en España y muy pocos en el mundo. La falta de referencias ha requerido que, en el contexto del proyecto, se hayan tenido que aplicar tecnologías de cálculo avanzadas e innovadoras. La consecución del objetivo de mejora de biodiversidad se logra a través de la implantación de SbN de diferente forma, morfología y tecnología. Según su tipología y función se diferencian 3

grupos: arrecifes artificiales compuestos por bloques de hormigón de diferentes formas, estructuras colgantes bajo las pasarelas formadas por cabos y placas de hormigón con formas biomiméticas y piscinas de marea localizadas en el intermareal de la escollera de protección del paseo marítimo.

2.1. Observatorio Submarino

El observatorio submarino consiste en un prisma de doble sección octogonal con estructura de hormigón armado que se remata con una plataforma de planta similar protegida por una cubierta de acero (Fig. 2).

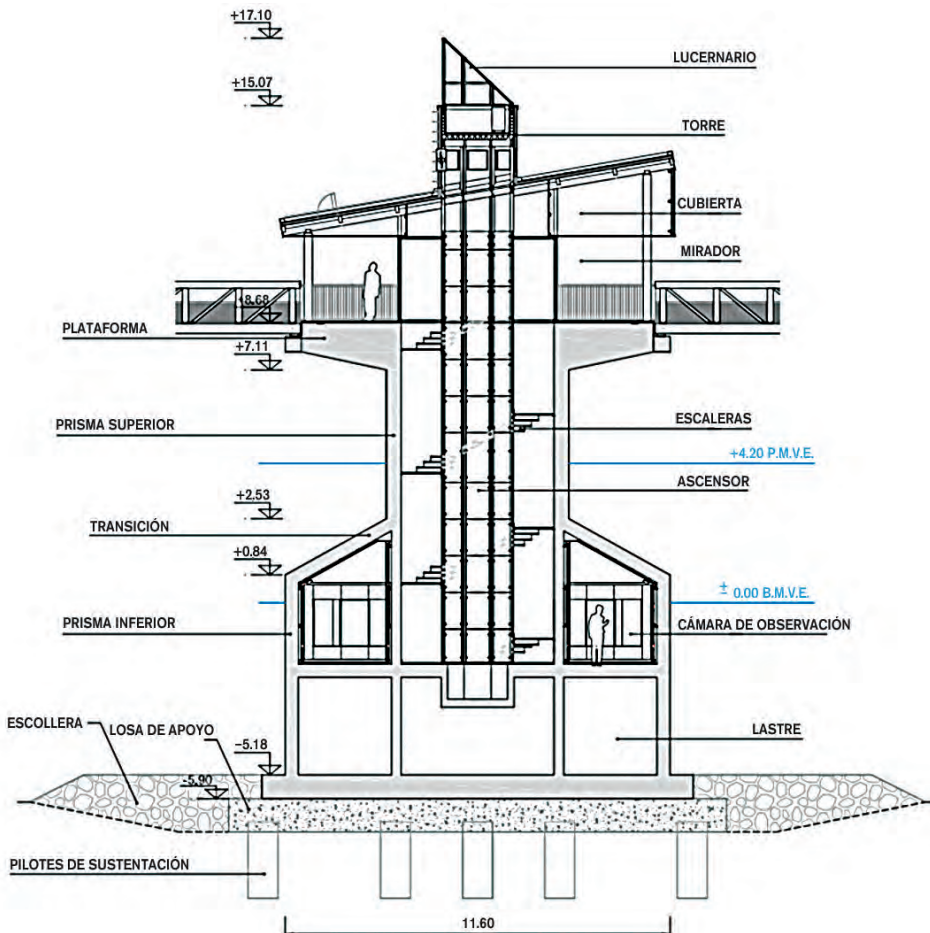


Fig. 2. Sección perpendicular de la estructura Peiraos do Solpor.
Fuente: Puerto de Vigo (2024).

El prisma octogonal inferior queda en su mayoría bajo el nivel del agua en bajamar y acoge los receptáculos de lastre y la sala de observación submarina. El prisma octogonal superior acoge, junto con el tramo de transición entre ambos prismas, la escalera y el hueco del ascensor que comunica la sala de observación con la plataforma superior.

La plataforma se abre en cáliz sobre el prisma superior hasta llegar al nivel de paseo. A uno de sus lados llega la pasarela que conecta el observatorio con el paseo marítimo y de otros dos arrancan las pasarelas que conducen a las plataformas-mirador situadas en ambos extremos del testero.

La Sala de observación submarina constituye el elemento más destacable del Peiraos do Solpor. Bajo el objetivo principal de dar cabida a actividades de divulgación ambiental sobre el medio marino del entorno, en su forma, el observatorio se distribuye de forma continua a lo largo del contorno del prisma inferior octogonal con una anchura bruta uniforme de 2,80 m. En las 5 paredes exteriores que dan hacia el paseo marítimo se disponen ventanas acristaladas de 1,50 x 1,20 m para la observación submarina, la biodiversidad que habita las aguas de la zona y los diferentes tipos o elementos SbN que se sitúen en las zonas contiguas a la sala de observación. La localización de estos elementos permitirá la creación de nuevos hábitats sobre los que se desarrollen comunidades de organismos sésiles y móviles (Fig. 3).

Por debajo de la sala de observación, la torre dispone de una serie de compartimentos que serán rellenados de agua durante las fases de flotación y de fondeo y, posteriormente, una vez fondeado, de hormigón en masa para servir de lastre estabilizador. La división de la zona de lastre en 9 compartimentos mediante paredes de hormigón tiene la función de evitar los basculamientos por desplazamientos del agua de lastre durante la fase de flotación.

2.2. Soluciones Basadas en la Naturaleza

Peiraos do solpor contempla la instalación de SbN con diversas morfologías que mejoran la provisión de los servicios ecosistémicos y la biodiversidad de la zona sobre la que se proyecta.

2.2.1. Arrecifes artificiales

En el fondo marino, junto a la base del Observatorio submarino y a cada uno de los costados de la pasarela 2, se dispondrán sendos arrecifes artificiales formados por grupos de los bloques citados anteriormente. Cada arrecife consta de un total de 38 bloques colocados de forma ordenada en 3 niveles superpuestos en forma de pirámide. Los bloques de cada nivel se colocarán dejando espacios entre ellos a fin de no alterar su capacidad captadora.



Fig. 3. Render de la vista interior de la sala de observación submarina. Fuente: Puerto de Vigo (2024).

Tanto las superficies superiores como las laterales de los bloques se construirán con formas biomiméticas incluyendo superficies con relieve y bajorrelieve que reproducirá la forma de la macroalga calcárea *Lithothamnion coralloides*.

2.2.2. Elementos colgantes

Los elementos colgantes consisten en cabos de nylon fijados al cordón inferior de las pasarelas y cuyo extremo inferior está anclado a bloques fondeados en el fondo marino en la misma dirección de la pasarela. A lo largo del tramo intermareal de estos cabos se sujetan placas con superficie similar a los bloques que conforman los arrecifes artificiales con formas biomiméticas.

2.2.3. Piscinas intermareales

Las piscinas intermareales se construirán a partir de moldes con hormigón ecológico que favorecen la fijación de la fauna brindando protección y mayor resistencia y durabilidad de la estructura. El proyecto contempla la implantación de 14 unidades de piscinas en la zona intermareal del talud de protección del paseo a cada uno de los lados de la pasarela. Previamente a la colocación de cada unidad será necesaria la retirada del manto exterior de escollera existente en su lugar para el correcto asentamiento del módulo.

3. INTEGRACIÓN PUERTO-CIUDAD

La construcción de Peiraos do Solpor persigue objetivos científicos, recreativos, educativos, y de concienciación ciudadana. Su construcción se engloba dentro de los proyectos ejecutados de la Estrategia Blue Growth Vigo para el desarrollo de la Economía Azul. Esta estrategia tiene el propósito de avanzar hacia la sostenibilidad económica, medioambiental y social de las actividades portuarias, su comunidad de interlocutores y la ciudad que lo rodea. El proyecto constituye un hito en las actividades de mejora de la integración puerto-ciudad al crear un nuevo espacio de interacción con la ciudad y sus ciudadanos. Esta singular infraestructura ofrece un punto de observación de la biodiversidad marina en tiempo real que pone en valor el patrimonio natural de las aguas del puerto para su divulgación y conservación.

El proyecto es resultado del compromiso del Puerto de Vigo con la Agenda 2030. Peiros do Solpor está alineado con los ODS 14 (Conservar océanos, mares y recursos marinos) y ODS 4 (Educación inclusiva, equitativa y de calidad) promoviendo el conocimiento, la investigación sobre SbN, biodiversidad marina y el cuidado de océanos. Además, revitalizará el área del puerto, haciéndola más atractiva para residentes y turistas, apoyando así el ODS 11 (Lograr ciudades y comunidades sostenibles). La construcción de la infraestructura dará pie al desarrollo de nuevos proyectos de investigación y colaboración con gobiernos, ONGs, instituciones académicas y el sector privado, fortaleciendo las alianzas para un desarrollo sostenible (ODS 17), así como desarrollar nuevas actividades turísticas, incorporar prácticas de construcción sostenibles, y fomentar espacios públicos.

4. AGRADECIMIENTOS

Mención especial merece la UTE que ha diseñado el proyecto, formada por HIDTMA, S.L. – BERENGUER INGENIEROS, S.L. – EUROFINS IPROMA, S.L.U.

5. REFERENCIAS

- EC (2021b). Nature-Based Solutions. European Commission. European Commission 2021. Available at: https://ec.europa.eu/info/researchand-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en.
- EC (2021b). Nature-Based Solutions | European Commission. European Commission - European Commission. 2021. Available at: https://ec.europa.eu/info/researchand-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en.
- E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, S. Maginnis (2020), Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges, IUCN, Gland, Switzerland. Available at: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>
- IUCN, Resolution 69 On Defining Nature-Based Solutions (WCC-2016-Res-069). IUCN Resolutions, Recommendations and Other Decisions 6–10 September 2016, World Conservation Congress Honolulu, Hawai'i, 2016. https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/resrecfiles/WCC_2016_RES_069_EN.pdf.

Simulación predictiva de los requerimientos de Onshore Power Supply (OPS) en Puertos

Raúl Redondo

Director Area Maniobra y Estudios Náuticos, Siport21, raul.redondo@siport21.es

Raúl Atienza

Director Técnico, Innovación y Calidad, Siport21, raul.atienza@siport21.es

José Ramón Iribarren

Director General, Siport21, jose.r.iribarren@siport21.es

Arturo Medio

Aula Siport21 - ETSIN-UPM, arturo.medio.yanez@upm.es

Luis Ulla

Aula Siport21 - ETSIN-UPM, luis.ulla@alumnos.upm.es

1. INTRODUCCIÓN

Cold Ironing u Onshore Power Supply es un nuevo desarrollo y requisito para los puertos debido a la situación actual y al marco legislativo en el transporte marítimo. El transporte marítimo se encuentra en un periodo de cambio debido a las regulaciones aplicadas por la Organización Marítima Internacional (OMI) y otras organizaciones gubernamentales relacionadas con la reducción de las emisiones de CO₂. En 2021, la Unión Europea lanzó Fit For 55, un paquete de medidas con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 55% respecto a los niveles de 1990. Una de estas normativas establece que los puertos europeos deben garantizar antes del 1 de enero de 2030, suficiente energía eléctrica en tierra para satisfacer un alto porcentaje de demanda basada en sus tráficos medios anuales de buques portacontenedores, buques de pasaje y buques de carga rodada.

El sistema OPS aporta numerosos beneficios (reducción de emisiones y de la huella de carbono, eliminación de ruidos y vibraciones, menor desgaste de los motores auxiliares, etc.). Sin embargo, existen barreras para el desarrollo de esta tecnología. Las principales razones son económicas, ya que estas instalaciones requieren una gran inversión.

Siport21 ha desarrollado una metodología para definir el dimensionamiento y la optimización de las instalaciones OPS en los puertos. Se basa en métodos estadísticos y técnicas de simulación de Montecarlo, proporcionando

una estimación de la demanda horaria de electricidad durante un año asociado a niveles de probabilidad. El modelo permite reproducir los movimientos de los buques en una terminal considerando sus características y la infraestructura portuaria. El modelo se calibra con datos AIS reales y se define la terminal portuaria en detalle. Una vez definido el modelo, se estudian diferentes escenarios para cumplir con la futura demanda de tráfico marítimo. Esta metodología ayudará a los puertos a disponer de estimaciones basadas en probabilidades y, por tanto, será esencial para la toma de decisiones, evaluando el coste-beneficio de la inversión y la potencia total a instalar.

Este trabajo muestra los resultados del análisis para un caso práctico, en el que se podrá apreciar la sensibilidad a las diferentes hipótesis y variables involucradas en el problema y, cómo un cierto crecimiento en la transformación de los buques adaptados puede afectar a la inversión de OPS en los puertos. Se utiliza como ejemplo un puerto que tiene definida su capacidad OPS a efectos de calibración y comparación de la metodología desarrollada por Siport21.

2. METODOLOGÍA

La metodología para abordar la demanda eléctrica de potencia en un puerto o terminal, se basa en un modelo de simulación del tráfico que permite comprender los movimientos de tráfico por terminal en el puerto y, por tanto, sus demandas eléctricas para la conexión a red eléctrica local.

Este estudio parte del análisis de los datos AIS, que permite una descripción cuantitativa de los movimientos de tráfico en el puerto (tipos de buques, número, tamaño y calado, ocupación, etc.). El análisis de los datos AIS permite definir la mayoría de los datos requeridos para construir con precisión el modelo de simulación del tráfico. El uso de métodos probabilísticos basados en el tiempo de atraque, la frecuencia de llegadas y los tamaños, permite un modelo de simulación predictivo para la conexión OPS.

La definición de la infraestructura portuaria es otro dato necesario para la creación del modelo. Cada terminal se asocia a un tipo de carga y tiene definida su infraestructura.

Una vez conocida toda la información se construye el modelo que representa los movimientos en la zona portuaria. Donde el área portuaria representa el elemento estático del modelo y el movimiento de buques, la parte dinámica.

Construido el modelo, se calibra con datos AIS reales para comprobar la calidad del modelo y su parecido con la realidad que pretende representar. Por último, se describen y cuantifican futuros escenarios. Estos escenarios representan la evolución del tráfico, así como, la evolución del puerto y su infraestructura, por lo que el dimensionamiento de las OPS es para futuros tráficos.

Para seguir la metodología se presenta un caso para la estimación de la potencia demandada.

2.1. Análisis de datos AIS

El sistema AIS permite la identificación y el seguimiento de los buques desde otros buques o estaciones costeras. El sistema se basa en un dispositivo instalado a bordo que transmite información de forma continua y automática, en función del estado de navegación se emiten mensajes con un periodo variable.

El sistema AIS se ha desarrollado bajo la supervisión de la OMI y su instalación y su uso está sujeto al Convenio SOLAS (Seguridad de la Vida Humana en la Mar), obligatorio desde el 31 de diciembre de 2004. Los buques obligados a incorporar estos dispositivos son:

- Todos los buques en viajes internacionales con un arqueo bruto (GT) superior o igual a 300.

- Todos los buques en viajes no internacionales con un arqueo bruto (GT) superior o igual a 500.
- Todos los buques de pasaje independientemente de su tamaño.

Una vez comprobada la calidad y fiabilidad de los datos AIS, se analizan diferentes variables para conocer el comportamiento de los buques atracados en el puerto. Estos datos se utilizarán como datos de entrada en el modelo de simulación.

- Tipo y tamaño de los buques en función de la carga.
- Niveles de ocupación en la terminal.
- Tiempo de atraque.

El resultado del análisis de los datos AIS se recoge en una serie de KPIs (Key Performance Indicators) para facilitar la toma de decisiones y la comprensión de los resultados del modelo.

Para el caso particular de la definición del sistema OPS, los datos AIS se utilizan para la introducción de los datos de entrada y las estadísticas de la parte dinámica del modelo. Donde los datos de los buques (tamaño, calado, frecuencia y tiempo de atraque) son clave para entender la demanda de potencia de cada buque individualmente y de la zona portuaria.

2.2. Potencia de los motores auxiliares

A partir de los datos AIS y el 4th IMO Greenhouse Gas Study, se obtiene una serie de valores de potencia demandada. Con esta información el modelo obtiene la potencia auxiliar demandada en función del tipo de buque, su capacidad y el modo de operación. En este caso de estudio, los buques están atracados.

Durante su estancia en el muelle, los buques utilizan sus motores auxiliares en lugar de sus motores principales. Cuando el buque se conecta a la red eléctrica local, la potencia demandada será la que esté siendo proporcionada por los motores auxiliares.

Según 4th IMO Greenhouse Gas Study, la potencia de los motores sigue un árbol de decisión basado en la potencia instalada de los motores principales:

- Cuando la potencia del motor principal está entre 0 y 150 kW, el motor auxiliar se pone a cero.

- Cuando la potencia del motor principal está entre 150 y 500 kW, el motor auxiliar se ajusta al 5% de la potencia instalada del motor principal.
- Cuando la potencia del motor principal es superior a 500 kW, los valores de potencia del motor auxiliar se recogen en tablas.

Siguiendo estas pautas y con la información obtenida de los datos AIS, se muestra en la Fig. 4 un ejemplo de la potencia demandada para un periodo de un año en una terminal.

2.3. Definición de Key Performance Indicators (KPIs)

Los KPIs sirven para el proceso de calibración del modelo y, para evaluar diferentes escenarios con el fin de facilitar la toma de decisiones. Los KPIs deben estar alineados con los objetivos y las particularidades del proyecto.

En este estudio los indicadores son los referidos al uso de los terminales relacionados con la eficiencia del puerto. Existen otros indicadores como el número de buques adaptados o la huella de carbono.

A continuación, se enumeran algunos ejemplos:

- *Relacionado con el uso de las terminales:* el tiempo que los buques permanecen atracados y el intervalo de tiempo entre llegadas son indicadores importantes. Estos KPIs, relacionados con la ocupación de los buques en el muelle, proporcionan información sobre la capacidad y la eficiencia de las terminales.
- *Relacionado con la potencia demandada.* Es un indicador muy importante para la toma de decisiones sobre las subestaciones del puerto.
- *Relacionado con los ingresos económicos:* conocida la estancia, la tarifa eléctrica y el manejo de la tecnología, se pueden estimar los ingresos económicos.
- *Relacionado con la eficiencia de la tecnología OPS:* reducción de emisiones y de la huella de carbono, eliminación de ruidos y vibraciones.

2.4. Creación del modelo

La construcción del modelo consiste en definir los elementos que intervienen en la conexión a la tecnología OPS de los buques en el puerto. El modelo consiste en distribuciones probabilísticas basadas en datos AIS para la creación de datos aleatorios cercanos a la realidad.

La lista de elementos es la siguiente:

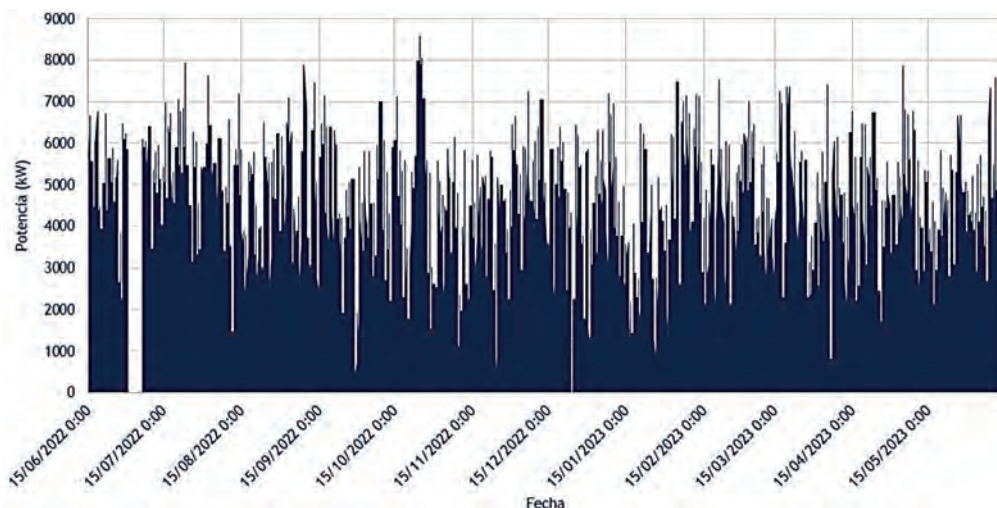


Fig. 1. Potencia Demandada por Buques Portacontenedores en un Año.
Fuente: Siport21 (2024)

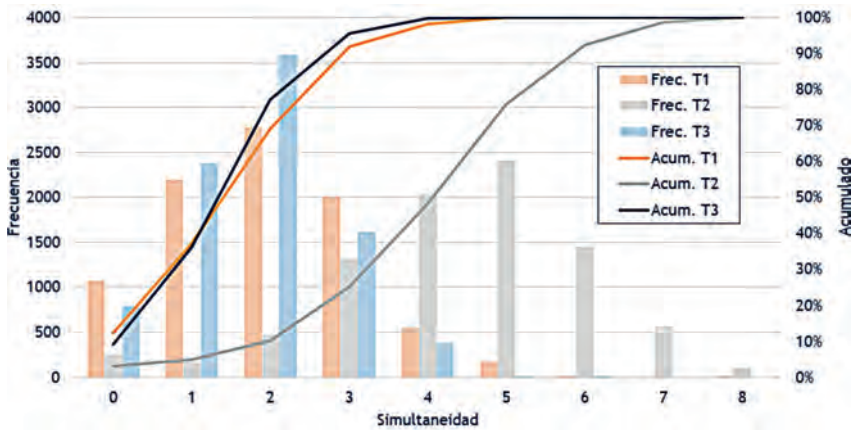


Fig. 2. Simultaneidad en las Terminales de Contenedores en un Año.
Fuente: Siport21 (2024)

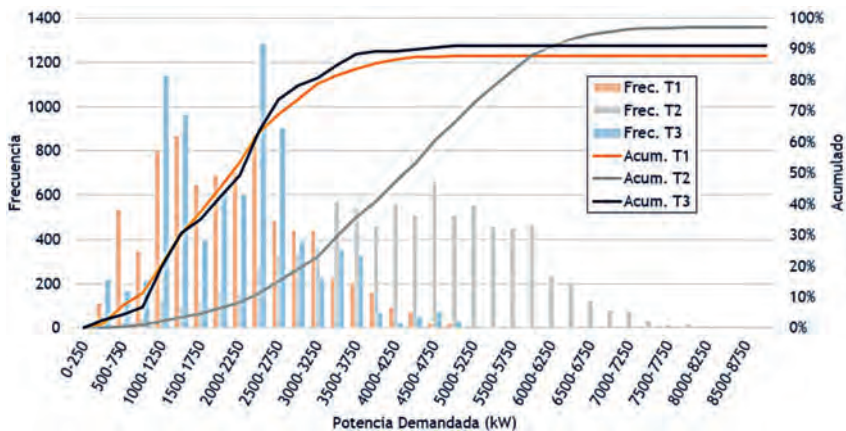


Fig. 3. Potencia Demandada en las Terminales de Conetadores en un Año.
Fuente: Siport21 (2024)

- *Buques*: el modelo necesita la eslora y el calado del buque para crear una secuencia aleatoria de llegadas al muelle, así como, un tiempo de estancia. La potencia demandada está vinculada al tipo del buque y a su capacidad. El número de buques generado depende de los intervalos entre llegadas definidos por los KPIs.
- *Zona portuaria y terminales*: áreas donde los buques permanecen por un tiempo determinado en función de sus operaciones. Las terminales están limitadas por su longitud y su calado, por tanto, un número máximo de buques puede estar en la terminal. Se tiene en cuenta la distancia mínima de seguridad entre dos buques atracados contiguos. Los muelles de las terminales son los puntos donde se realizan las mediciones de la potencia y, con esta información, se define la capacidad eléctrica de las subestaciones cercanas para la conexión OPS.
- *Otros*: fenómenos como el viento, mareas, nieblas, ... que puedan representar el clima local han de tenerse en cuenta.

2.5. Simulación

Una vez definidos los elementos del modelo, el proceso de simulación comienza generando un buque al azar y creando nuevos buques con un intervalo entre llegadas al puerto definido por las distribuciones definidas. A continuación, una serie de preguntas se plantean en el siguiente orden:

- *Terminal en función de la carga del buque:* en función de la carga y tamaño del buque, se asigna una terminal con la infraestructura adecuada. El buque atravesará el canal de navegación de la terminal.
- *Terminal en función del calado:* el buque debe tener un calado menor al de la terminal y, cumplir con el UKC (Under Keel Clearance) del puerto.
- *Terminal en función de la ocupación:* en función del tamaño del buque, hay que tener en cuenta el nivel de ocupación, las terminales tienen una longitud determinada.
- *Muelles disponibles:* la terminal puede distribuirse en diferentes muelles. Las mismas preguntas de ocupación se hacen en el acceso a los muelles. En caso de que los muelles estén ocupados, los buques se dirigen al fondeadero antes de acceder al puerto.

Se pueden considerar otras restricciones, donde en caso de no cumplir con ellas, los buques se dirigen al fondeadero hasta que las condiciones vuelvan a la normalidad o haya algún muelle disponible.

Esta serie de preguntas se formulan a cada buque creado en el modelo antes de acceder al puerto. Una vez que el buque haya finalizado su estancia, el buque espera en el muelle hasta que el canal de salida esté disponible antes de abandonar el puerto.

Una vez construido el modelo, se lleva a cabo la calibración ejecutando el modelo en un proceso iterativo de simulación (análisis de resultados) hasta alcanzar resultados próximos a la realidad. El proceso de calibración se realiza a partir de un escenario real del que se disponga información sobre el comportamiento de los buques atracados con un nivel de detalle y precisión adecuados.

El nivel de detalle necesario para obtener resultados fiables se basa en un adecuado análisis de los datos AIS. Sin embargo, hay cierta información que no puede extraerse de su análisis, como las causas de espera del buque.

2.6. Evaluación de escenarios

En general, los nuevos escenarios de interés serán aquellos que tenga un impacto en el tráfico actual. Entre ellos cabe citar un aumento del volumen de tráfico, una nueva demanda que requiera cambios en la infraestructura portuaria, nuevas regulaciones, buques de nueva capacidad con una nueva demanda de potencia eléctrica, tecnologías que reduzcan las estancias de los buques, etc.

Una vez construido y calibrado el modelo, los resultados se comparan con los datos AIS. Los resultados de la si-

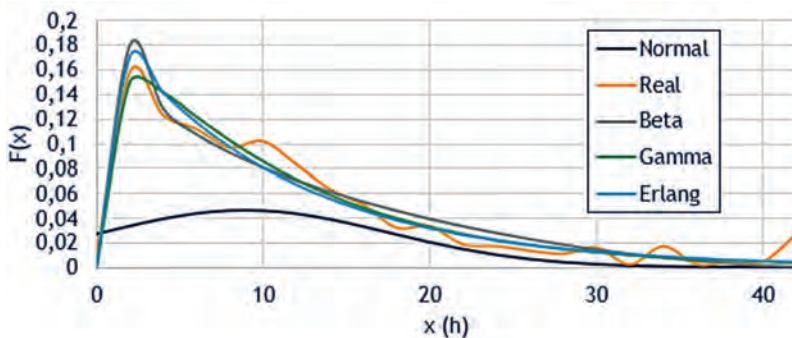


Fig. 4. Búsqueda de la Distribución de Ajuste.
Fuente: Siport21 (2024)

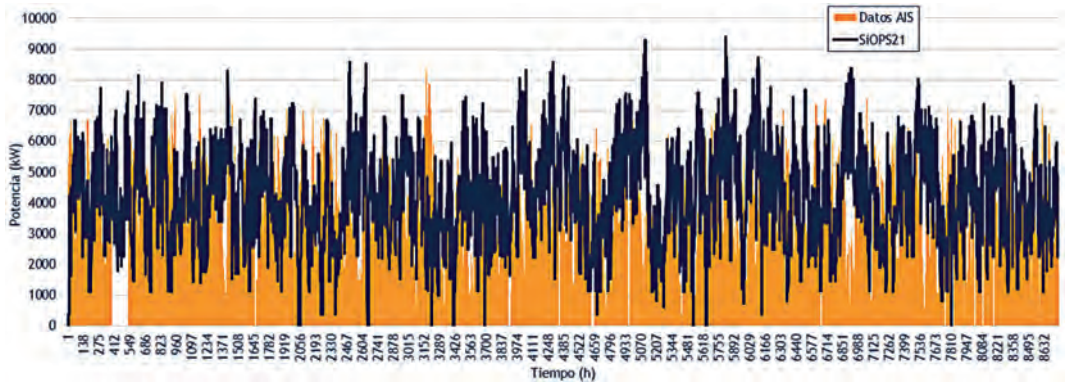


Fig. 5. Previsión de la Demanda Eléctrica en Terminal de Contenedores.
Fuente: Siport21 (2024)

Entorno	Media	Desviación	99%	95%	90%	85%
Puerto	4109	1553	7720	6662	6098	5718
SiOPS21	4313	1633	8111	6999	6405	6005

Tabla 1. Potencia Demandada Prevista para Cumplir Diferentes Demandas en kW.
Fuente: Siport21 (2024)

mulación se comparan con los KPIs definidos. En la fase de construcción del modelo, es posible adaptar el modelo a una previsión de tráfico añadiendo algunos cambios en el comportamiento del tráfico mediante la adición de nuevas variables y correlaciones.

Para encontrar el mejor ajuste, cada KPI se compara con datos reales utilizando diferentes distribuciones, con el objetivo de minimizar el error cuadrático. La función de densidad se usa a modo comparativo. En la Fig. 7 se muestra un ejemplo para el ajuste del intervalo entre llegadas a la terminal.

El volumen de tráfico para los escenarios futuros se define mediante estudios de previsión del tráfico. Datos históricos del tráfico portuario, nuevas infraestructuras, nuevas normativas, tendencias de tráfico de navieras y otros aspectos deben tenerse en cuenta para definir nuevas variables de calibración en el modelo.

En búsqueda del mejor ajuste, se analizan distintos escenarios para comprobar que la simulación se adapta a los KPIs y a las previsiones de tráfico.

En la Fig. 8 se muestra la predicción de tráfico que propone la herramienta basándose en datos históricos para un periodo de un año.

Para cumplir con las órdenes gubernamentales, los puertos tienen que ser capaces de satisfacer la demanda eléctrica del 90% de las escalas de buques portacontenedores, buques de pasaje y buques de carga rodada. Utilizando el valor medio y la desviación estándar de los valores obtenidos, la herramienta puede predecir la capacidad OPS para cubrir diferentes porcentajes de demanda. La Tabla 1 muestra la potencia a instalar para la conexión OPS en función de la demanda. Es posible tener más de un punto de conexión.

El análisis de varios volúmenes de tráfico permite determinar la capacidad de un determinado escenario, como el número máximo de buques. El objetivo de este estudio es estimar la potencia demandada por los buques para estimar la capacidad OPS y la subestación que cubrirá esta demanda.

A partir de una evaluación preliminar del volumen de tráfico por tipo y tamaño de buque, es posible estimar la futura

Entorno	Huella de carbono (t)
Puerto	24.304
SIOPS21	26.605

Tabla 2. Previsión de la Reducción de la Huella de Carbono.

Fuente: Siport21 (2024)

demanda de potencia que deberá cubrir la subestación en función del futuro número de acceso y se podrán conocer las consecuencias sobre el tráfico portuario.

La combinación de los resultados de los KPIs permite tomar decisiones sobre la potencia necesaria para cubrir la demanda. Los datos de las colas generadas son un indicador de la congestión del puerto y pueden tomarse otras decisiones sobre la infraestructura portuaria o el porcentaje que se desea cubrir.

2.7. Huella de Carbono

La conexión de los buques a la red eléctrica está asociada a una reducción de la huella de carbono. De acuerdo con la Guía Metodológica para el Cálculo de la Huella de Carbono en Puertos, el modelo calcula, a su vez, la huella de carbono no emitida durante la estancia del buque como resultado de la conexión OPS.

$$HC = \sum (P_{MMAA} \cdot FC_{MMAA} \cdot t_{ATRAQUE}) \cdot FE_{MMAA} \quad (1)$$

Aplicando la fórmula (1) y los datos generados con las distribuciones definidas a partir de los datos AIS, se calcula la huella de carbono.

3. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una metodología para evaluar la demanda eléctrica de los puertos y, a partir de los resultados, ayudar a los puertos a determinar qué requisitos debe tener en cuenta y qué porcentaje de la demanda energética puede satisfacer.

Dado que el diseño para picos de demanda dará lugar a sobreinversiones y sistemas sobredimensionados que solo se utilizarán unos días al año, es más recomendable

diseñar e invertir para un cumplimiento menor de la demanda energética, entendiendo que, en algunos casos, los buques podrían tener que esperar debido a la no disponibilidad de conexión OPS por las limitaciones de red.

4. REFERENCIAS

- EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY (2022). Shore-Side Electricity: Guidance to Port Authorities and Administrations. Part 1: Equipment and Technology.
- EUROPEAN MARITIME SAFETY AGENCY (2022). Shore-Side Electricity: Guidance to Port Authorities and Administrations. Part 2: Plannings, Operation and Safety.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF MARINE AIDS TO NAVIGATION AND LIGHTHOUSE AUTHORITIES (2008). Establishment of AIS as an Aid to Navigation. Guideline 1050.
- INTERNATIONAL ASSOCIATION OF MARINE AIDS TO NAVIGATION AND LIGHTHOUSE AUTHORITIES (2008). Establishment of AIS as an Aid to Navigation. Guideline 1062.
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (2020). Fourth IMO Greenhouse Gas Study.
- MITMA, CEDEX (2020). Guía Metodológica para el Cálculo de la Huella de Carbono en Puertos.
- MORENO-GUTIÉRREZ, J. (2015). "Methodologies for Estimating Shipping Emissions and Energy Consumptions: A comparative of Current Methods".
- PUERTOS DEL ESTADO (2021). OPS Master Plan for Spanish Ports.
- TORTOSA, E. & REBOLLO, J. F. (2010). "La Red AIS Portuaria. La tecnología AIS Aplicada a la Exportación Portuaria y a las Ayudas a la Navegación". Puertos N.º 158, 9-21.
- TROZZI, C. (2010). "Emission Estimate Technology for Maritime Navigation". US EPA 19th International Emission Inventory Conference.

Despliegue del OPS en Algeciras y Tarifa

Manuel Díaz Gómez

Jefe del Departamento de Conservación, Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, mdiaz@apba.es

Francisco Iglesias Andrades

Jefe de División de Infraestructuras y Planificación de Instalaciones Eléctricas, Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, ffiglesias@apba.es

1. ANTECEDENTES Y MARCO REGULATORIO

El Pacto Verde Europeo pretende que Europa sea el primer continente climáticamente neutro. Para ello, la Comisión Europea adoptó un conjunto de propuestas para adaptar las políticas de la UE en materia de clima, energía, transporte y fiscalidad, con el fin de reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero en, al menos, un 55% de aquí a 2030, en comparación con los niveles de 1990.

Este conjunto de medidas se denomina paquete “Fit for 55”, dentro del cual las dos más estrechamente relacionadas con la instalación OPS son las siguientes:

- La “Fuel EU Maritime Initiative”, dedicada a la mejora progresiva en el uso de combustibles descarbonizados en el transporte marítimo (establece obligaciones para buques).
- La “Alternative Fuel Infrastructure Regulation” (AFIR), dedicada a dotar a los puertos de infraestructuras para suministrar combustibles alternativos (establece obligaciones para puertos).

La Fuel EU Maritime obliga (a partir de 2030 a la red principal de transporte TEN-T y de 2035 en la red básica de transporte) a buques portacontenedores y pasajeros (>5.000GT) con escalas superiores a dos horas en puertos europeos, a conectarse a la red eléctrica de tierra en el atraque o usar otra tecnología “0 emisiones”.

La AFIR obliga, a partir de 2030, a puertos con un número medio de escalas de más de 50 portacontenedores y 40 de pasaje, a atender con tomas eléctricas al menos al 90% de buques portacontenedores y de pasaje (>5000GT).

Además de los requerimientos derivados del marco regulatorio, el desarrollo de esta infraestructura eléctrica está alineado con varios marcos de referencia internacional en materia de desarrollo sostenible y actividad portuaria, particularmente, cabe destacar los siguientes:

- Alineado con los ODS “8. Trabajo decente y crecimiento económico”, “9. Industria, innovación e infraestructuras”, “11. Ciudades y comunidades sostenibles” y “17. Alianzas para lograr los objetivos”.
- Alineado con los compromisos de la Agenda 2030 de la red de ciudades portuarias (AIVP), “1. Adaptación al Cambio Climático”, “2. Transición energética y economía circular”, “3. Movilidad sostenible” y “4. Gobernanza renovada”.
- Alineado con las prioridades ambientales de la Organización Europea de Puertos (ESPO) “1. Calidad del aire”, “2. Cambio climático” y “4. Ruido”.

Además del alineamiento con estos marcos de referencia internacionales, el despliegue del OPS en los puertos de la Bahía de Algeciras y de Tarifa se enmarca fundamentalmente en el Compromiso de Sostenibilidad 3 “Transición Energética” de la Estrategia Verde de la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras (en adelante, APBA), aunque también permite avanzar en los Compromisos de Sostenibilidad 10 “Cambio climático” y 6 “Calidad Ambiental”.

El despliegue del OPS en los puertos de la Bahía de Algeciras y Tarifa es por lo tanto una actuación clave para cumplir con los requerimientos normativos y con los objetivos de desarrollo sostenible de la APBA y de los principales organismos internacionales.

2. UN PROCESO DE LARGO RECORRIDO

2.1. Conexión a la red de alta tensión de las instalaciones portuarias

La posibilidad de suministro de energía eléctrica a buques pasa necesariamente por una adecuada conexión a la red eléctrica de alta tensión, lo cual implica un prolongado y complejo proceso de planificación energética, en el que la APBA es una parte interesada que carece de capacidad de decisión y ejecución. Por ello, con anterioridad al desarrollo del marco normativo expuesto, a los cambios en el contexto económico, social y regulatorio, y a la existencia misma de un planteamiento formal de necesidad de electrificación de los muelles para el suministro de electricidad a buques, la APBA, en un ejercicio de anticipación y planificación a largo plazo, inició en 2007 la búsqueda de soluciones para garantizar el suministro eléctrico a sus instalaciones vigentes y a futuras ampliaciones e incrementos de demanda energética. La solución, tras un ejercicio de coordinación entre administraciones, finalmente pasó por la construcción, por parte de Red Eléctrica de España (REE), gestor único de la red de transporte de energía en España, de la subestación eléctrica de El Cañuelo (en el T.M. de Los Barrios) y la conexión de ésta en doble circuito con la subestación de Pinar del Rey (en el T.M. de San Roque).

En paralelo a este proceso, y dentro del ámbito de sus competencias y del dominio público portuario, la APBA procedió a construir la subestación eléctrica de Isla Verde, que en 2021 se conectó a la de El Cañuelo mediante un doble circuito de alta tensión y 66 kilovoltios, lo que garantiza disponer de una potencia eléctrica de 78 megavoltiamperio, con posibilidad de ampliación (figura 1).

2.2. Definición de los requisitos de demanda eléctrica

Mientras se procedía al desarrollo de la necesaria conexión con la red nacional de transporte eléctrico, en 2014, la APBA realizó un estudio de viabilidad económica y ambiental del desarrollo y despliegue del OPS en sus puertos, al objeto de determinar, a nivel de anteproyecto, la potencia requerida y el tipo de infraestructura a desarrollar, estimando igualmente la inversión necesaria. Las conclusiones de dicho estudio establecen que la rentabilidad económica de la instalación y despliegue del OPS para el conjunto de actores (APBA y navieras), si bien es altamente dependiente de la evolución de los precios del petróleo y de la energía eléctrica, es difícilmente alcanzable, aunque sí tiene claros beneficios ambientales y sociales que justifican la inversión (al margen del cumplimiento de posibles obligaciones normativas, como la existente en la actualidad).



Figura 1. Conexión del Puerto de Algeciras a la red de alta tensión. Fuente: elaboración propia, 2022.

Posteriormente, en 2023, la APBA realizó un segundo estudio de “Análisis estratégico con el fin de promover la instalación de sistemas de generación de energías renovables en el recinto del puerto de Algeciras”, en el marco del cual se realiza la estimación del consumo eléctrico futuro de la Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras, una vez puesto en funcionamiento el servicio de OPS. Dicho estudio estima que el consumo eléctrico del puerto de Algeciras rondaría los 135.190,54 MWh, frente a los 10.000 MWh actuales (ver figura 2). En todo caso, las necesidades de consumo futuro quedan cubiertas por la conexión a la red de transporte de energía general.

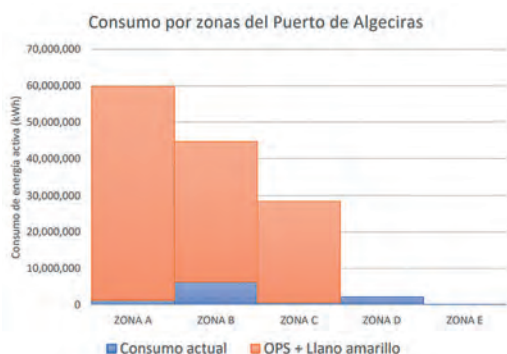


Figura 2. Consumo actual y futuro de la APBA.
Fuente: Gheonova, 2024.

3. DESPLIEGUE DEL OPS EN ALGECIRAS Y TARIFA

3.1. Diseño del sistema

Las condiciones de diseño para el sistema buscan, desde un inicio, que se trate de un sistema operativo y atractivo tanto para la APBA como para las navieras. De esta forma, los criterios que han guiado el diseño de la infraestructura son los siguientes:

- Integrarse con las infraestructuras existentes.
- Posibilidad de ampliarse en el futuro.
- Ser estándares, versátiles, operativas, seguras (minimización de riesgos eléctricos) y sencillas de mantener.
- Maximizar la operatividad de los buques.
- Atender la demanda con garantías de calidad y seguridad.
- Maniobras de conexión sencillas y rápidas.
- Requerimientos de adecuación de barcos poco costosos.

Con estos criterios, para la definición precisa de los requerimientos de potencia y tensión en los distintos muelles, se realizó un estudio de las escalas durante 2 años, identificándose, para cada muelle, las líneas regulares, las navieras, los buques y la duración media de las escalas. Además, se caracterizaron los distintos tipos de buque en función de la potencia, la tensión y la frecuencia que requieren (ver Tabla 1).

TIPO DE BUQUE	POTENCIA (MVA)	TENSIÓN (V)	FRECUENCIA (Hz)
Fast Ferry Catamarán	0,20	400	50
Ro-ro	2,00	11.000	50
Portacontenedores 150 m	2,00	6.600	60
Buque Cisterna	0,70	400 / 6.600	50
Buque Químico	0,70	6.600	60
Embarcación de Servicios	0,16	400	50
Remolcador	0,10	400	50
Patrullero Guerra	0,10	400	50
Embarcación Pesca	0,02	400	50
Salvamento	0,25	400	50
Pasaje	0,70	400	50
Transbordador	1,00	6.600	50

Tabla 1. Definición de la demanda por tipo de buque. Fuente: Elaboración propia.

TIPO DE BUQUE	TENSIÓN (V)	REFORMAS PRINCIPALES	COSTE (€)
Remolcador, Servicio, Fast Ferry, Salvamento y Guerra	400	<ul style="list-style-type: none"> Nuevo armario entrada BT con interruptor general, protecciones y 2 tomas 350 A. Cuadro control sistema gestión energía. 	120.000
Cisterna y pasaje	400	<ul style="list-style-type: none"> Nuevo armario entrada BT con interruptor general, protecciones y 4 tomas 350 A. Cuadro control sistema gestión energía. 	300.000
Químico, Transbordador y Portacontenedores	6.600	<ul style="list-style-type: none"> Nuevo armario entrada MT con interruptor general, toma 350 A y sistema puesta a tierra casco barco y red. Transformador reductor 6.600/400 V y protecciones. Adecuación armario BT buque. Cuadro control sistema gestión energía. 	500.000
Ro-ro	11.000	<ul style="list-style-type: none"> Nuevo armario entrada MT con interruptor general, toma 350 A y sistema puesta a tierra casco barco y red. Transformador reductor 11.000/400 V y protecciones. Adecuación armario BT buque. Cuadro control sistema gestión energía. 	500.000

Tabla 2. Estimación del coste de las reformas por tipo de buques. Fuente: Elaboración propia.

La solución en el lado tierra de cada muelle depende de la previsión de potencia requerida (en función de los buques y del coeficiente de simultaneidad) y de las características de los buques que emplean el muelle para diseñar el sistema más versátil posible.

Del lado mar, las navieras requieren llevar a cabo modificaciones y adaptaciones en su flota, dependiendo el coste de éstas del tipo de buque, en la Tabla 2, se muestra la estimación de costes realizada para los distintos tipos de buques.

3.2. Actuaciones en Algeciras

Las características, dimensiones y por tanto, necesidades de los puertos de Algeciras y de Tarifa son muy distintas, por lo que la definición de los sistemas de OPS en ambos puertos se abordan de forma separada. En el caso de Algeciras, dada la presencia de grandes consumidores de energía eléctrica, al margen de las necesidades de los buques, es imprescindible para la APBA conocer las necesidades eléctricas actuales y futuras de los principales consumidores de electricidad en el puerto (los principales concesionarios). Por ello, la APBA está realizando una intensa labor de coordinación con estos concesionarios para conocer sus planes en lo referente a transición energética (electrificación de buques, electrificación de maquinaria y vehículos industriales, empleo de combustibles alternativos...) de manera que la potencia instalada y la infraestructura desplegada permita dar respuesta de forma simultánea a la demanda total de energía eléctrica, puesto que la conexión de los buques a la

red eléctrica en tierra no va a ser el único elemento que va a provocar un incremento de demanda eléctrica.

Según las estimaciones realizadas, en las instalaciones de Algeciras, la máxima potencia a suministrar simultáneamente desde los distintos puntos de conexión a buque rondará los 40 MVA. Los puntos de conexión a los buques se alimentarán desde una subestación particular exclusiva para OPS 66/20 kV anexa a la subestación de distribución Isla Verde, desde la que se distribuirá la energía eléctrica a los distintos muelles, en los que se localizarán las subestaciones OPS y los centros de transformación.

La alimentación a los buques se realizará en baja tensión con valores entre 400÷690 V y en media tensión 6,6÷11 kV a 50 y 60 Hz según se requiera. La tensión de la red eléctrica interior para suministro OPS será de media tensión de 20 kV a 50 Hz, luego se dispondrán transformadores con una relación de transformación de 20/0,4 ; 20/0,69 ; 20/6,6 ; 20/11 kV a 50 Hz.

El total de potencia prevista en media/ baja tensión a 50 Hz en Algeciras será de 16.000 KVA. Esta red será capaz de dar servicio a 3 buques ro-ro, 6 transbordadores, 2 buques cisterna/ pasaje, 1 de salvamento, 6 fast ferry, 1 de servicio y 9 remolcadores.

En cuanto al total de potencia instalada en media tensión a 60 Hz será de 24.000 KVA, y dará servicio a 9 buques portacontenedores.



Figura 3. Despliegue del OPS en Algeciras. Fuente: Elaboración propia, 2022.

3.3. Actuaciones en Tarifa

Las necesidades del puerto de Tarifa son muy diferentes, pues no es necesario suministrar electricidad a grandes concesionarios con altos requerimientos de electricidad para sus operaciones terrestres. De hecho, sólo es necesario suministrar electricidad a dos tipos de buques, los fast ferries y los pesqueros. De esta manera, en Tarifa se ampliará la potencia existente en el puerto de manera que permita alimentar a tres buques simultáneamente, siendo la máxima potencia a suministrar simultáneamente de

aproximadamente 630 kVA. Para poder atender esta demanda se ha solicitado punto de conexión a la distribuidora de la zona, E-distribución, que ha concedido el punto de conexión en MT, 20 kV en una línea de MT en la plaza Mirador de Tarifa, junto a la fachada del Puerto. Por tanto, además de las instalaciones de extensión de la red de distribución, se proyecta un centro de entrega de la energía exclusivo para OPS, del que partirá un anillo interior de distribución en 20 kV y 50 Hz desde el que se alimentará a la subestación OPS y centros de transformación desde los que se atenderán a los distintos muelles.

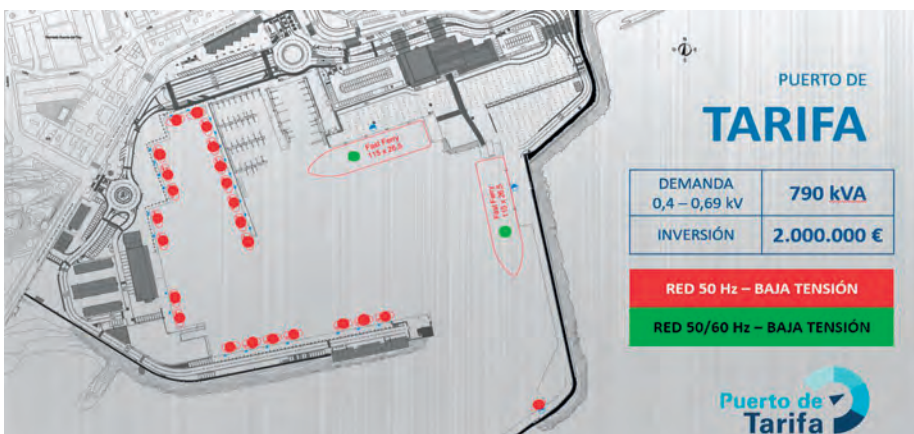


Figura 4. Despliegue del OPS en Tarifa. Fuente: elaboración propia, 2022.

Para hacer frente a esta demanda se procederá a la instalación de un nuevo centro de transformación CT-1 en el muelle pesquero con un transformador de 160 kVA, y una subestación OPS con un transformador de 630 kVA para atender a los fast ferries y otro transformador 100 para las embarcaciones militares y de la guardia civil. Estos transformadores tendrán relaciones de transformación 20/0,4 y 20/0,69 kV.

5. REFERENCIAS

Agenda 2030 AIVP, 10 Objetivos para ciudades portuarias sostenibles. 2019. www.aivpagenda2030.com

ESPO, 2016. European Port Industry Sustainability Report.

Actuación	2024	2025	2026	2027
Ferries Tarifa				
Atraques 7 y 8 La Galera				
Juan Carlos I (atraque 0), 1 a 5 de Tánger y 6 de Ceuta				
Etapas 2 y 3 de Isla Verde Interior y Príncipe Felipe. Tramo inicial Dique Norte				
Terminales de contenedores de Juan Carlos I e Isla Verde Exterior, resto del Dique Norte, muelle Norte de IV Exterior y Dique Exento				

Tabla 3. Cronograma del despliegue del OPS. Fuente: Elaboración propia.

REDUCCIÓN ANUAL DE EMISIONES (Factor de emisión x horas/año x potencia motor auxiliar)					
RECINTO PORTUARIO	NO _x (ton/año)	SO ₂ (ton/año)	CO ₂ (ton/año)	CO (ton/año)	COV (ton/año)
Puerto de Algeciras	286,831	-0,958	11.060,341	20,835	9,849
Puerto de Tarifa	26,436	-0,088	1.019,372	1,920	0,908

Tabla 4. Estimación de la reducción anual de emisiones de distintos gases.

3.4. Cronograma de las actuaciones

La APBA ha contratado diversas asistencias técnicas para la redacción y ejecución de los proyectos que permitan el despliegue del OPS en Algeciras y Tarifa. El desarrollo y ejecución de dichos contratos se plasman en un plan de despliegue del OPS que se estructura básicamente a través de las 5 actuaciones que se recogen en la Tabla 3.

4. INVERSIÓN Y REDUCCIÓN DE EMISIONES PREVISTAS

La inversión prevista para las actuaciones descritas es de 60.000.000 € en Algeciras y de 2.000.000 € en Tarifa. La estimación de reducción anual de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en toneladas de CO₂ equivalente, es de 11.261 t/año en Algeciras, y de 1.038 t/año en Tarifa. El desglose de reducción de emisiones por distintos tipos de gases se muestra en la Tabla 4.

Pacto Verde Europeo, 2020. Parlamento Europeo y Consejo Europeo.

Resolución de la Asamblea General de la ONU, por la que se adopta la Agenda 2030, para el Desarrollo Sostenible.

UE. “REGLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO relativo al uso de combustibles renovables y combustibles hipocarbónicos en el transporte marítimo y por el que se modifica la Directiva 2009/16/CE”. DOUE. 139 páginas.

UE. “Reglamento (UE) 2023/1804 del Parlamento Europeo y del Consejo de 13 de septiembre de 2023 relativo a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos y por el que se deroga la Directiva 2014/94/UE” DOUE. 47 páginas.

Los puertos para la industria eólica marina flotante. Perspectiva de un promotor.

Daniel González Martín

Concrete Industrialization Senior Manager, BFE, dgonzalez@bluefloat.com

Brice Le Normand

Industrialization & onshore works Steel Senior Manager, BFE blnormand@bluefloat.com

Walid Oulmane

Head of Sourcing and Ports, BFE, woulmane@bluefloat.com

Jorge Porres Sánchez-Chiquito

Engineering & Supply Chain Senior Director, BFE, jporres@bluefloat.com

“La belleza está en el ojo del espectador” (La Odisea)

BlueFloat Energy (BFE) es un promotor de proyectos de eólica marina ágil y de rápido crecimiento que está liderando la transformación energética mundial. Centrado en las tecnologías flotante, pero con desarrollos tanto fijos como flotantes, con presencia en 10 países y una cartera de proyectos en desarrollo que comprende más de 30 GW.

1. INTRODUCCIÓN

En un mercado tan dinámico como el de la eólica marina, la capacidad de adaptación y la agilidad se convierte en un pilar esencial para aprovechar las distintas oportunidades de negocio. La resiliencia de los desarrollos portuarios, pensar a corto, medio y largo plazo se erige como una estrategia clave para responder eficazmente a los desafíos de esta industria.

Actualmente sólo unos pocos puertos son aptos para atender los requerimientos de la industria eólica marina [ref 1] y menos aún para la eólica flotante. Alcanzar los objetivos establecidos en el Pacto Verde Europeo (2019) y más concretamente los definidos en las Estrategias UE sobre las Energías Renovables Marinas (2020) [ref 2] junto con el plan de REPower EU (2022) [ref 3] requiere construir, habilitar, adaptar y/o ampliar gran número de infraestructuras portuarias [ref 4].

Los puertos son un eslabón crítico en la cadena de suministro y un activo estratégico para el desarrollo, ejecución, operación, mantenimiento y desmontaje de los parques eólicos marinos flotantes.

BFE cuenta con experiencia específica en infraestructura portuaria para eólica marina flotante, tanto por la experiencia acumulada de su equipo en la ejecución de proyectos reales, como su extenso y continuo trabajo en el desarrollo de proyectos a nivel mundial.

2. OBJETO

El objeto de la ponencia se centra en presentar de forma somera:

- Una visión holística de los factores que influyen en la concepción del diseño de la infraestructura portuaria para atender esta industria y su interdependencia.
- Los distintos tipos de puertos y/o infraestructuras portuarias necesarias para afrontar cada una de las fases de ejecución, así como compartir ciertos requerimientos técnicos a considerar en los nuevos desarrollos portuarios.
- Presentar un conjunto de desafíos y/o breves reflexiones de esta industria que impactarán y están impactando en la realidad portuaria.

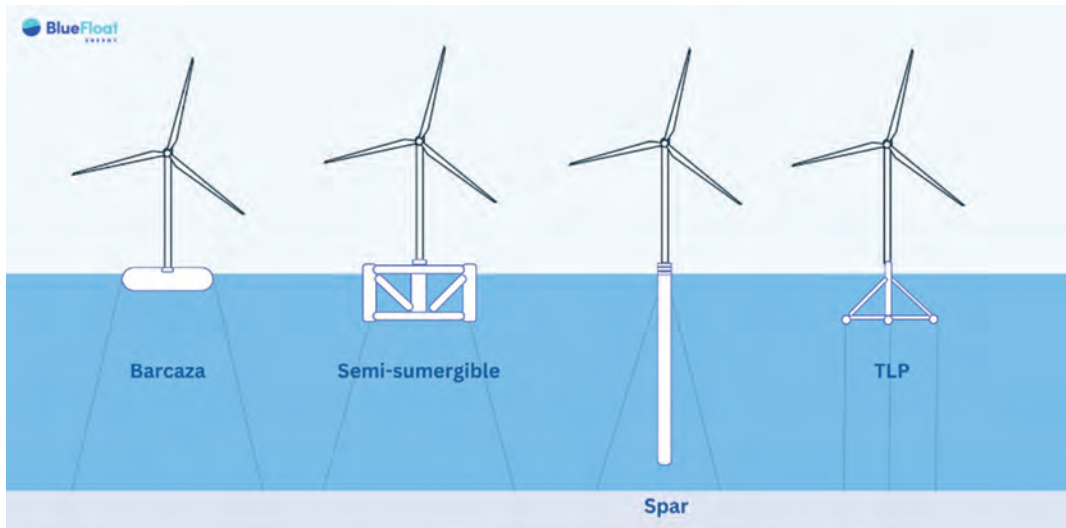


Fig. 1. Tipologías flotantes.
Fuente: BFE.

3. GENERALIDADES

La tecnología flotante consiste en instalar turbinas eólicas sobre plataformas flotante ancladas al fondo marino mediante un sistema de trenes de fondeo. Estas turbinas flotantes se interconectan eléctricamente entre sí y transmiten la energía eólica a una subestación para su posterior evacuación a la red. Las principales tecnologías flotantes se dividen en cuatro grandes grupos: barcaza, semi-sumergible, spar y TLP.

La industria flotante pese a encontrarse en una fase incipiente, ya cuenta en Europa con una capacidad instalada del orden de +200 MW¹, y de acuerdo con la ambición europea, se estima una capacidad acumulada operando y/o en instalación de hasta 2,8 GW en 2030 y de 38,5 GW para el 2040 [ref 5].

4. VISIÓN HOLÍSTICA

Responder a las preguntas qué, cuándo, dónde, quién, por qué, cuánto y cómo en esta industria naciente no es

tarea fácil. Este desafío exige una visión holística que permita definir de manera efectiva las distintas estrategias de negocio e ir dando respuestas a dichas preguntas. Encontrar el equilibrio adecuado entre los requerimientos específicos de los proyectos (ver Fig.2) y las condiciones de contorno es un desafío constante. Cada proyecto tiene sus propias necesidades y limitaciones, y las condiciones cambiantes del entorno pueden afectar de manera significativa los desarrollos portuarios. Identificar y gestionar estos riesgos es crucial para aprovechar las oportunidades emergentes.

El análisis de los avances tecnológicos, como las tecnologías flotantes y el crecimiento exponencial de la capacidad de las turbinas, es esencial para comprender las futuras demandas portuarias. Estos avances pueden alterar las especificaciones técnicas requeridas y, en consecuencia, los planes de desarrollo portuario.

Los aspectos políticos también juegan un papel fundamental. El desarrollo de proyectos eólicos marinos se extienden más allá de una legislatura, lo que hace que la estabilidad política sea un factor crítico. La seguridad legal y un marco regulatorio claro y consistente son esenciales

¹ Portugal: Windfloat Atlantic (25MW); UK: Kincardine (50MW), Hywind Scotland (30MW); Noruega: Hywind Tampen (88MW), Francia: Provence Grand Large (24MW).

para proporcionar la certidumbre necesaria para la inversión en estos proyectos a largo plazo.

La aceptación social de los proyectos también influye significativamente en su viabilidad. La consideración de los aspectos sociales y ambientales es indispensable para lograr el apoyo de la comunidad y mitigar el impacto ambiental del proyecto, así como de las operaciones portuarias.

Esta industria presenta numerosas incertidumbres que influyen en su ritmo de crecimiento. Las ambiciones políticas suelen no estar alineadas con el ritmo de desarrollo de la cadena de suministro, generando una tensión que puede dificultar la planificación a largo plazo.

Desde una perspectiva económica, los recursos son escasos. Garantizar un flujo continuo de actividad es fundamental para la sostenibilidad financiera de los desarrollos portuarios. Esto implica una planificación estratégica cuidadosa y una evaluación continua de las condiciones del mercado y de la cadena de suministro.

En resumen, adoptar una visión holística e integradora es esencial para el éxito en el desarrollo portuario dentro de la industria de la eólica marina flotante. Solo con una planificación integral y adaptable se podrán enfrentar los desafíos y aprovechar las oportunidades de este entorno cambiante. A continuación, se presenta un esquema no exhaustivo de factores que impactan en el desarrollo de los puertos para servir en la cadena de suministro de la energía eólica marina flotante (ver Fig. 2).

5. PUERTOS PARA LA EÓLICA MARINA FLOTANTE

La ejecución de estos proyectos requiere del apoyo de diversas instalaciones portuarias y/o puertos (ver Fig.3), cada uno adaptado a actividades específicas. Se podrían clasificar a grandes rasgos en cuatro grupos: (1) *puerto de fabricación y/o ensamblaje*, (2) *puerto de integración de turbina*, (3) *puerto logístico* y la (4) *base de operación y mantenimiento*, además, tras la vida útil del parque eólico será necesario instalaciones portuarias que permitan realizar las tareas de desmantelamiento.



Fig. 3. Ejecución de proyecto.
Fuente: BFE.

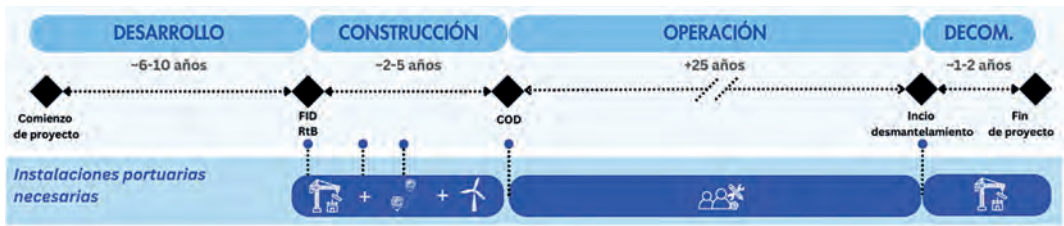


Fig. 4. Cronograma tipo desarrollo de un proyecto eólico marino flotante (arriba) e instalaciones portuarias requeridas (abajo).
Fuente: BFE.



Fig. 5. Tipos de puertos (izq.). Orden de magnitud (dcha.). Fuente: BFE.

Las necesidades de tiempo de ocupación requerido para cada actividad varían (ver Fig. 4), lo que subraya la importancia de analizar la viabilidad de cada instalación portuaria. Mientras que el puerto base de operación y mantenimiento se adapta claramente a una concesión portuaria a largo plazo, las actividades relacionadas con la construcción requieren de plazos muy ajustado.

Según el tipo de actividad a realizar en el puerto, demanda diferentes niveles de espacio, capacidad portante, calado y longitud de muelle. Las actividades constructivas (fabricación/ensamblaje de plataformas e integración de turbina) pueden demandar varias decenas de hectáreas en el patio portuario y cientos de metros de línea de muelle. En contraste, las bases de operación y mantenimiento generalmente necesitan solo unos pocos miles de metros cuadrados y un número reducido de atraques.

Existen varias estrategias para seleccionar la infraestructura portuaria en un proyecto de eólica marina flotante. Si las condiciones del proyecto y la capacidad del puerto lo permiten, se podría optar por concentrar todas las actividades en el único puerto. De lo contrario, se puede implementar una estrategia multipuerto, eligiendo distintos puertos para las distintas actividades.

6. DESAFÍOS Y REFLEXIONES SOBRE DESARROLLOS PORTUARIOS PARA ATENDER LA EÓLICA MARINA FLOTANTE

En línea con lo comentado en los capítulos anteriores, algunos desafíos que impactan directamente en los desarrollos portuarios son:

- *Tamaño de los parques comerciales.* La tendencia es desarrollar parques cada vez mayores, proyectos pre-comerciales 25 MW, primeros concursos de eólica flotante en Francia con parques de unos 250 MW (AO5 France Bretaña) al orden del GW por proyecto en UK (SCOTWIND).
- *Evolución exponencial del tamaño de las turbinas.* El aumento de tamaño permite conseguir más energía del viento y abaratar su generación (menor LCOE) ¿cuál será el tamaño medio de turbina a final de esta década, y en 2040 y en 2050?
- *Plataforma (flotador).* Actualmente hay más de 80 conceptos en desarrollo en una carrera por conseguir la suficiente madurez tecnológica (TRL).
- *Industrialización.* La demanda esperada de plataformas a construir, junto con los plazos de ejecución tan ajustados, subrayan la necesidad de implementar métodos

Puerto de fabricación/ensamblaje

Alcance: construir o ensamblar las plataformas flotantes.

Su dimensionamiento depende de varios factores, entre otros: la tecnología flotante considerada, el método constructivo, el esquema de industrialización, el número de plataformas y el ritmo de producción, disponibilidad de almacenamiento húmedo (wet storage), etc.

Las tareas llevadas a cabo incluyen el acopio de materias primas, piezas o bloques de plataforma, áreas de ensamblaje y/o estaciones de construcción, muelles de descarga de materiales y de carga y botadura de la plataforma flotante, así como disponer de talleres, equipos para movilización de carga pesada, grúas, almacenes, oficinas, accesos, aparcamiento, servicios y otras instalaciones auxiliares.

Puerto de integración de turbina

Alcance: Recepción y almacenamiento de los distintos componentes de la turbina (secciones de torre, góndola, palas), ensamblaje de la turbina sobre el flotador y posterior pre-commissioning de la turbina flotante.

Es recomendable que el puerto de integración se encuentre próximo al parque eólico con el objeto de facilitar y disminuir riesgos, tiempos y coste de transporte e instalación de la turbina flotante en el parque eólico (ej. <300 km).

Con carácter general cuenta con muelle de descarga de componentes de turbina, zona de almacenamiento, preservación de las góndolas, equipos de movilización de carga pesada, grúas, zona de integración y zona de pre-commissioning.

Es preciso tener en cuenta las servidumbres aéreas en la proximidad del puerto, pues las turbinas sobre flotador alcanzan alturas de varios cientos de metros (ver Fig. 5).

Puerto logístico

Alcance: Descarga, acopio, pre-ensamblaje (si procede) y carga en buque de instalación (AHTS) de los distintos componentes que configuran el tren de fondeo (SKS de sus siglas en inglés), tales como anclajes: pilotes de succión, anclas de arrastre, ..., cadenas, líneas de amarre, conectores, etc.

Para facilitar las operaciones de transporte e instalación es recomendable disponer de esta instalación portuaria próxima a los parques eólicos marinos.

Normalmente, los cables submarinos (exportación e interconexión) se cargan en los buques cableros directamente desde el centro de fabricación y no suele ser necesario una instalación portuaria específica para su pre-ensamblaje. No obstante, podría interesar descargar en el puerto logístico las bobinas de cables de interconexión para acomodar el ritmo de instalación conforme a necesidades de proyecto.

Base de operación y mantenimiento

Alcance: Actividades de operación y mantenimiento del parque, almacenamiento de piezas de repuesto, oficinas, taller, etc. así como atraques para embarcaciones de transporte de tripulación (CTVs) y/o buques de servicio offshore (SOV).

Es recomendable que la base de operación y mantenimiento se sitúe próxima al parque eólico marino.

Tabla 1. Tipos de puertos, alcance y comentarios.
Fuente: BFE.

de industrialización que cuenten con la capacidad de la cadena de suministro local, regional y global.

- *Continuidad de la actividad en el puerto.* La fase de construcción del proyecto eólico es limitada en el tiempo. Existe el riesgo de encontrarse el puerto con instalaciones infrautilizadas. Importancia de garantizar una masa crítica de proyectos que justifique y garantice la rentabilidad en el modelo de negocio.
- *Obsolescencia de las instalaciones portuarias.* El avance tecnológico principalmente derivado del desarrollo de turbinas cada vez mayores, deriva en requerimientos cada vez más exigentes, de ahí la importancia de concebir un desarrollo portuario con capacidad de adaptación para los futuros proyectos, prestando especial atención a aquellos elementos críticos, tales como estabilidad de muelle, aumento de calado, etc. así como definir estrategias de desarrollo por fases.

Los requerimientos específicos de esta industria requieren de anticipación, y una actitud proactiva para alinear los planes de inversión en puertos en etapas tempranas.

No hay eólica marina flotante sin puertos. La colaboración entre desarrolladores, autoridades portuarias, gobiernos y otros interesados, tanto públicos como privados, es

clave para un desarrollo robusto de la cadena de suministro, y en especial de los puertos.

7. REFERENCIAS

Hoja de ruta eólica marina y energías del mar en España
<https://www.miteco.gob.es/es/ministerio/planes-estrategias/desarrollo-eolica-marina-energias.html>

Offshore renewable energy. European Commission.
https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/offshore-renewable-energy_en

REPower EU Plan (2022) https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en

A 2030 Vision for European Offshore Wind Ports. Trends and opportunities. WindEurope. <https://windeurope.org/policy/topics/offshore-wind-ports/>

TGS 4C Offshore

BlueFloat Energy.

TRIWIND. Plataforma Flotante para la industria FOW

Ismael Verdugo

Director Comercial, Berenguer Ingenieros, iverdugo@beringenieros.com

Javier Berenguer

Director General, Beridi, javierberenguer@beridi.com

Gonzalo Berenguer

Director, Berenguer Ingenieros, gonzaloberenguer@beringenieros.com

1. INTRODUCCIÓN

Berenguer Ingenieros ha estado involucrado en la búsqueda de soluciones para la Industria Eólica Marina off-shore, aplicando el conocimiento y la experiencia acumulada en el diseño de estructuras de hormigón en la infraestructura portuaria.

En el año 2012 se plantearon los primeros diseños de plataformas de gravedad de hormigón para la instalación de turbinas eólicas off-shore.

La adjudicación del proyecto **Archime3**, dentro del programa **H2020**, consolida a **BERIDI**, dentro del Grupo Berenguer, como empresa especializada en el sector

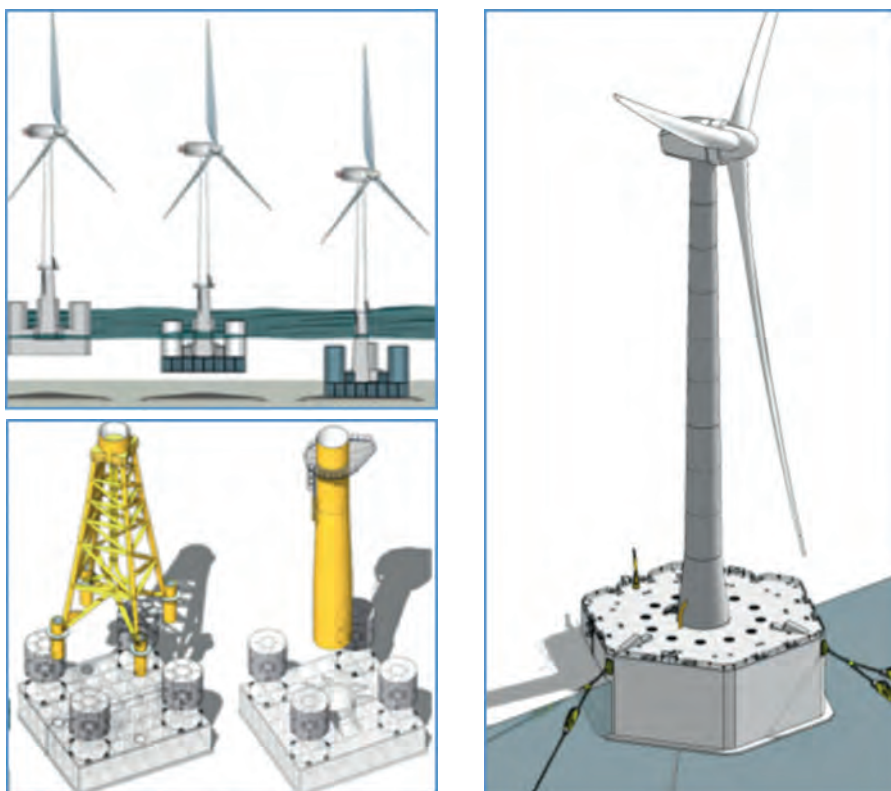


Figura 1. Evolución del diseño de plataforma. Beridi (2012-2024)

eólico marítimo, desarrollando un diseño eficaz y optimizado, para una solución flotante, reduciendo drásticamente los costos y tiempo de construcción de las plataformas eólicas flotantes dedicadas a la instalación de grandes aerogeneradores, reduciendo el LCOE.

2. DESARROLLO DE TRIWIND

La estructura TRIWIND ha sido diseñada para enfrentarse a los grandes retos de la industria FOW por un equipo téc-

nico formado por arquitectos especializados en Diseño Industrial, Ingenieros (ICCP) especializados en Estructuras de hormigón, Ingenieros Navales para estudiar la estabilidad y comportamiento en la mar, contando además con el apoyo de especialistas en i+d y planificación financiera. TRIWIND cuenta con un diseño sencillo y eficaz consistente en una infraestructura flotante hexagonal de hormigón convencional, más económico que el acero, con varias perforaciones pasantes que actúan como amortiguadores eliminando la necesidad de utilizar tanques de lastre activo para mejorar la estabilidad.

 REDUCCIÓN DE COSTE 50% CAPEX 40% OPEX MÍNIMO LCOE	 RÁPIDA EJECUCIÓN SEMANAS Vs MESES	 FACILIDAD DE CONSTRUCCIÓN VIABLE CASI EN CADA PUERTO
 DURABILIDAD ELEVADA RESISTENCIA ESTRUCTURAL	 SEGURIDAD ELEVADA ESTABILIDAD DINÁMICA Y NAVAL	 TURBINAS DE GRAN PORTE TECNOLOGÍA PARA TURBINAS 15 20 20+ MW



Figura 2. Renderizado de TRIWIND. Beridi.

Su diseño monolítico minimiza el uso refuerzos de acero, lo que además permite una construcción rápida, mediante encofrado deslizante, en muelle o sobre cajonero flotante. No necesita de infraestructuras portuarias ex-

traordinarias y exige un mínimo mantenimiento, con larga durabilidad y excelente comportamiento en fatiga. Además cuenta con espacio disponible en cubierta y para almacenamiento.

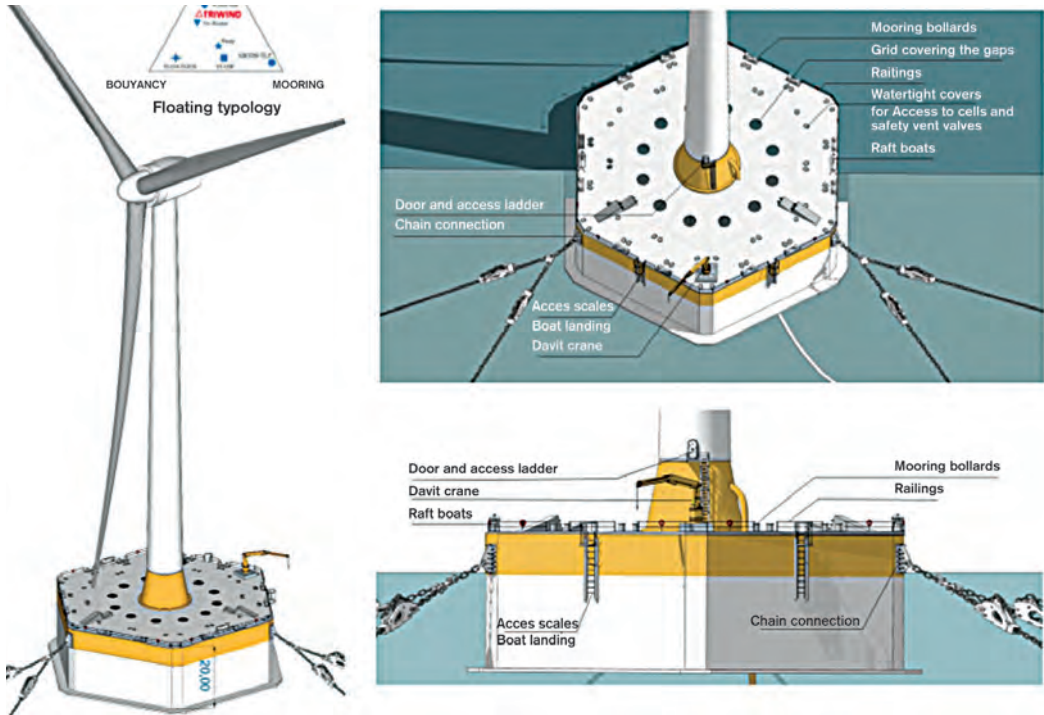


Figura 3. Plataforma TRIWIND. Beridi (2024).

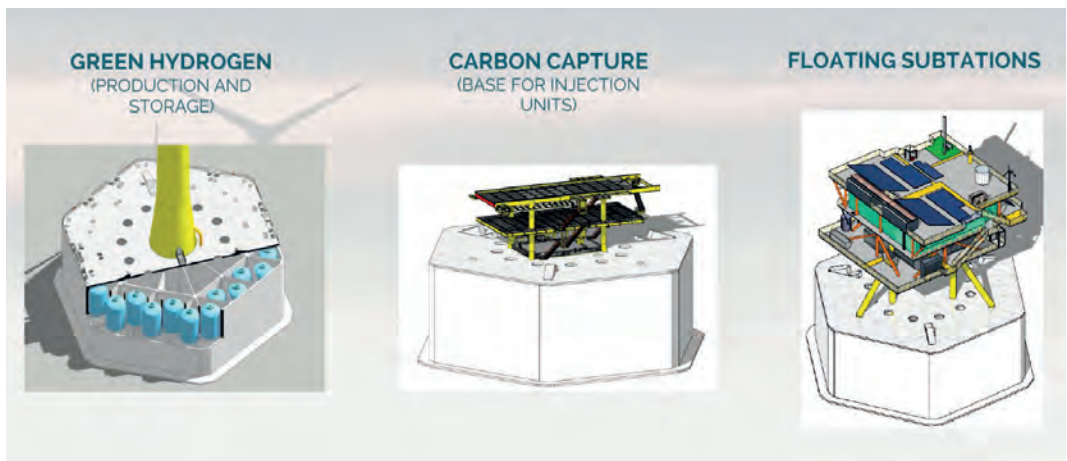


Figura 4. Usos alternativos TRIWIND. Beridi.

<p>CERTIFICADA TURBINAS DE 15+MW</p> <p>Approval In Principle by Bureau Veritas</p>  <p>BUREAU VERITAS</p> <p>Trabajando Certificación FEED Diciembre 2024</p>	<p>PROBADA EN IH CANTABRIA</p> <p>Ensayado en el Tanque de Olas de IH Cantabria.</p> <p>Comportamiento verificado: Estabilidad Aceleraciones Movimientos Esfuerzos y tensiones</p>  <p>IH cantabria INSTITUTO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL UNIVERSIDAD DE CANTABRIA</p> <p>Nuevos ensayos programados Verano 2024</p>	<p>... Y PATENTADA</p> <p>(PCT/ES2018/000007) <u>Granted</u> in USA, China and <u>Europe</u>.</p> <p>(PCT/ES2019/070175) <u>Review phase</u> in USA and <u>Europe</u>.</p> <p>(PCT/ES2019/070776) <u>Review phase</u> in USA and <u>Europe</u>, China, Japan, <u>Australia</u>, Brasil, Korea South Africa.</p>
---	---	--

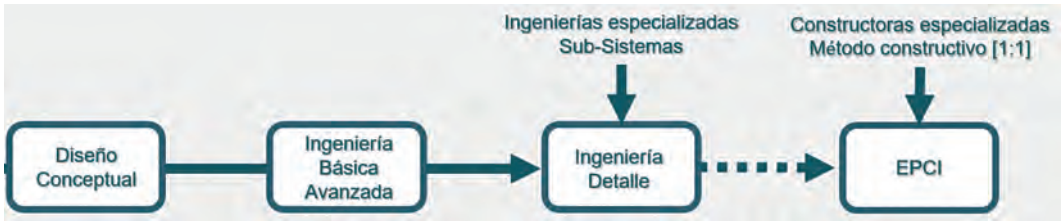


Figura 5. Imagen en planta de la tecnología TRIWIND. Beridi (2024).

Se trata de una alternativa real, práctica, económica frente al acero, además de segura que presenta muy buena estabilidad y comportamiento incluso para turbinas gran porte y con gran adaptabilidad a diferentes zonas y mercados (Captura de CO₂, subestaciones, hidrogeno verde...).

Su diseño conceptual está certificado por Bureau Veritas y ha sido patentado en varios países tras haber sido verificado mediante estudios realizados con herramientas de modelización numérica y ensayos a escala en laboratorio.

Asimismo, se está trabajando para desarrollar la ingeniería básica avanzada siguiendo los estándares que exige la certificación de Bureau Veritas, analizando todos los requerimientos solicitados por la sociedad de clasificación. Esta metodología de trabajo obliga a que el diseño sea supervisado por diferentes actores de la industria offshore wind:

- Ingenierías
- Empresas energéticas
- Desarrolladores de parques (developers)
- Empresas de logística
- Consultores específicos
- Epecistas
- ...

De esta manera, el diseño queda verificado atendiendo a los intereses de cada uno de ellos, proponiendo una solución real, segura, práctica y optimizada.

3. PROCESO DE FABRICACIÓN Y MONTAJE DEL SISTEMA

El proceso de diseño de la tecnología TRIWIND ha permitido entrar en contacto con diferentes entidades. Como resultado, BERIDI ha tenido la ocasión de participar en el FLOWIN Prize organizado por el Departamento de Energía (DEO) de Estados Unidos, quedando finalista en la primera etapa, cuyo objetivo fue el de vencer obstáculos críticos para la comercialización de la tecnología de la plataforma flotante.

Como consecuencia, se desarrolló un intenso trabajo, dentro de la segunda etapa del concurso, que consistió en planificar la producción y montaje de plataformas para el desarrollo de un parque eólico offshore de **1 GW** garantizando la viabilidad constructiva del proyecto minimizando costes y tiempo de construcción e instalación.

El proyecto exigió definir completamente la cadena logística, identificando y coordinando con los diferentes proveedores todas las tareas necesarias para desarrollar (diseñar, construir e instalar) un parque en una zona de la costa norteamericana.

Para ello hubo una primera etapa en la que se seleccionó la zona de proyecto, analizando el comportamiento de la plataforma en diferentes ubicaciones, ante condiciones meteorológicas extremas características.

Una vez verificado que los indicadores (movimientos y aceleraciones) cumplen lo requerido ante diferentes escenarios se selecciona la zona de estudio teniendo en

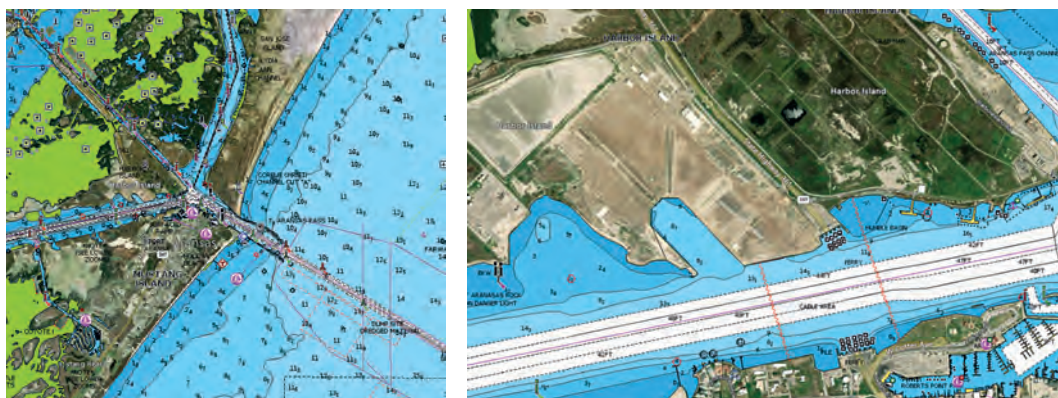


Figura 6, Puerto de Corpus Christi, Golfo de México.

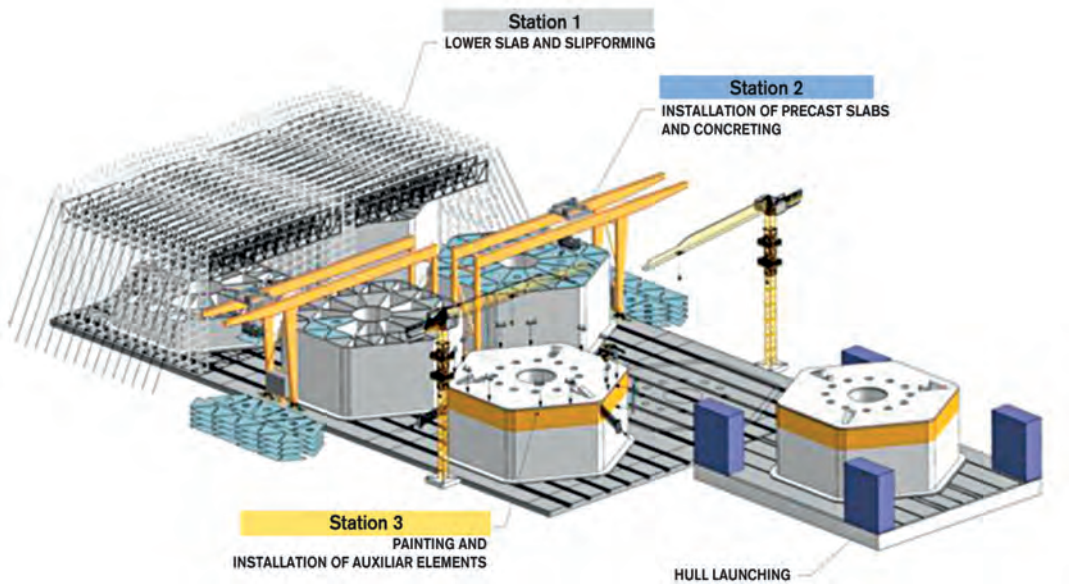


Figura 7. Procedimiento constructivo de TRIWIND. Beridi (2024).

cuenta además otros factores adicionales, como disponer de suficiente recurso eólico además de tener disponibilidad y experiencia con una cadena logística muy desarrollada derivada del sector OIL&GAS. Para este estudio se seleccionó la Terminal de Aransas en el Puerto de Corpus Christi, Golfo de México.

Los trabajos consistieron en verificar hasta que punto las infraestructuras portuarias están adaptadas para el desarrollo de los trabajos relacionados con la construcción, montaje y puesta a flote de esta plataforma.

Como resultado, se revisó la cadena logística completa para identificar las necesidades portuarias y adaptarlas al proceso constructivo, de ensamblaje y de puesta a flote

de las estructuras. Teniendo en cuenta las características del diseño de la tecnología flotante y equipos auxiliares (dimensiones, pesos, volúmenes) y las necesidades y ritmos de producción, se determinaron y ordenaron los espacios necesarios y sus características, chequeando las dimensiones de muelles y los espacios disponibles para garantizar el adecuado flujo de movimientos requerido.

El desarrollo de los trabajos se llevó a cabo en coordinación con empresas nacionales e internacionales, especializadas en el sector, definiendo y confirmando la viabilidad de cumplir con un cronograma exigente, identificando en él los cuellos de botellas, analizando los riesgos y resolviendo los problemas para garantizar el ritmo de producción.

El proceso constructivo de la tecnología TRIWIND, mediante encofrado deslizante, está altamente contrastado en el desarrollo de infraestructura marítima relevante y permite un proceso constructivo extremadamente rápido, permitiendo la puesta a flote de una unidad a la

semana (incluyendo márgenes de seguridad ante eventualidades).

Una vez definidos los procesos, se completó el diseño general del puerto, tanto en la explanada de tierra como

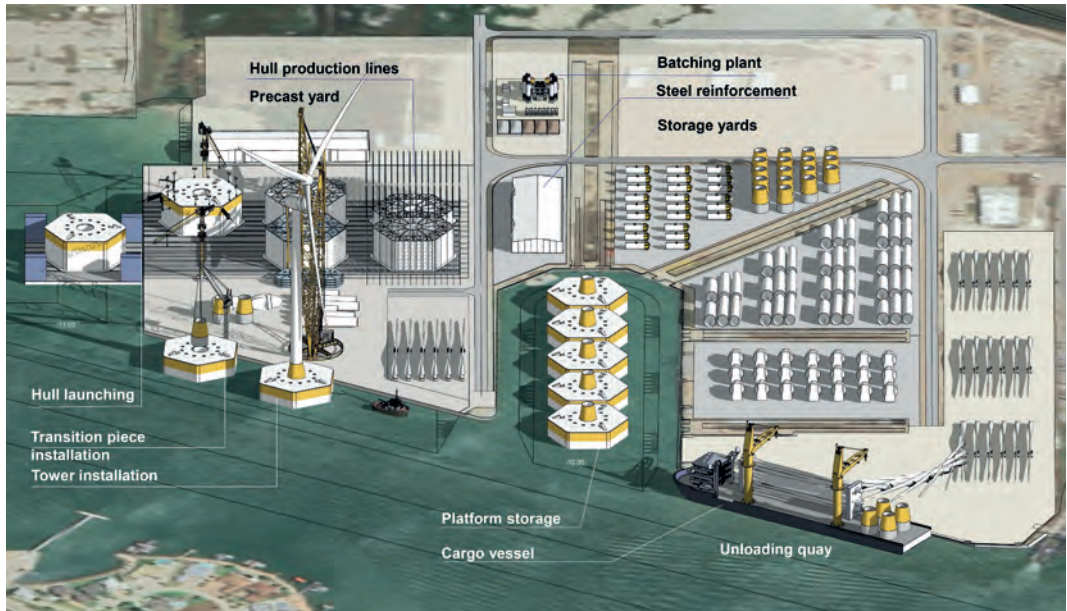
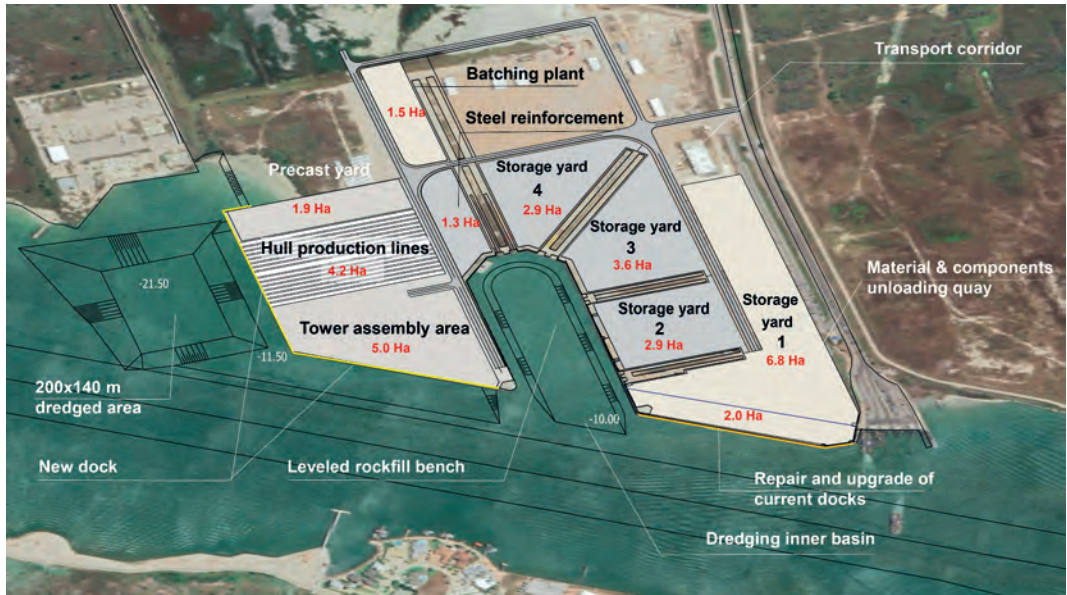


Figura. 8. Propuesta de ordenación de espacios y adaptación de infraestructura Portuaria para la industria FOW. Beridi (2024).

en el lado mar. Para ello es necesario definir los espacios navegables necesarios (profundidad y anchura mínimas del canal de navegación, las dimensiones y profundidad en la zona del muelle de carga), necesidades de dragado, identificar limitaciones de altura, profundidad mínima durante la maniobra de float-off, áreas necesarias para la fabricación de flotadores y montaje de turbinas, áreas de almacenamiento, canales de transporte y capacidad carga del pavimento necesarios para garantizar las operaciones seguras. uso de medios auxiliares (pontonas, grúas, remolcadores,...) definición de ventanas operativas, tiempos constructivos y demás características de interés.

Como resultado, se obtiene una primera propuesta de ordenación de los espacios y mejoras necesarias para el diseño del puerto, fruto del trabajo en coordinación con ingenierías y consultores especializados en logística y operaciones offshore, sistemas auxiliares y otros para definir en detalle los procesos involucrados. El proyecto supone un trabajo de mejora continua, identificando puntos débiles que se refuerzan planteando una visión integral involucrando a todas las partes.

Todo el trabajo se contrasta mediante estudios técnicos que permiten verificar los resultados para conseguir una certificación de la tecnología de la que está previsto tener un demostrativo a escala 1:1 para verificar su proceso constructivo.

4. ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA A LA INDUSTRIA OW

Como se puede comprender, dentro del análisis de viabilidad del proceso de fabricación, montaje y botadura del sistema OW, cobra especial relevancia la confrontación de las características de las infraestructuras portuarias del centro de fabricación de elementos offshore frente a los requerimientos que imponen los métodos y maquinarias que intervienen en dichos procesos y en el de su transporte hacia su emplazamiento definitivo.

Entre estos requisitos se pueden comentar, de forma muy concisa, los siguientes:

a) *Explanadas terrestres de superficie suficiente*

Con el fin de minimizar los costes, es conveniente que tanto las zonas dedicadas al almacenamiento de ma-

teriales y componentes y como a la prefabricación de partes o elementos se encuentren dentro de una zona portuaria conexas a la zona o muelle de botadura.

Lógicamente, la superficie mínima de esta explanada estará en función de las características de la plataforma y de los volúmenes y ritmos de fabricación requeridos. Valores comprendidos entre 10 y 40 ha podrían considerarse normales.

b) *Muelle para la botadura y armamento de las plataformas*

Dependiendo de las dimensiones de las plataformas, del número de las líneas de producción y de los procedimientos y ritmos de montaje de las superestructuras, la longitud de frente del muelle puede oscilar entre 160 y 500 m.

El calado mínimo al pie estará en función de los calados de la plataforma en lastre o del sistema plataforma-pontonera siendo normales valores comprendidos entre 12 y 24 m.

Obviamente, la utilización de los muelles portuarios para la fabricación de plataformas obliga a cambiar el concepto convencional de zonas portuarias (operación-almacenamiento) por otras adaptadas a los procedimientos constructivos en cada caso. Las sobrecargas uniformes de diseño pueden llegar a alcanzar valores dos o tres veces superiores a las de los muelles convencionales, lo que hace que se tengan que proyectar estructuras más robustas o reforzar drásticamente, las existentes.

c) *Muelle para el suministro*

Normalmente, será suficiente disponer de un muelle para un sitio de atraque de características similares al de una terminal polivalente convencional de calado superior a 12 m.

d) *Zona marítima abrigada para la botadura*

La operación de botadura, directa o con auxilio de pontona, requerirá disponer de un área abrigada de más de 1,0 ha de superficie con calado superior a 19-22 m.

e) *Disponibilidad de superficie marítima para el fondeo de plataformas*

En función de las dimensiones de las plataformas y de los ritmos de producción e instalación se requerirá una dársena semi-abrigada para el fondeo provisional de las plataformas de profundidad acorde con el calado en esa fase. Lógicamente, deberá estar separada de las sendas de navegación del puerto

f) *Accesibilidad marítima a los muelles*

Las plataformas off-shore suelen poseer unas condiciones de navegabilidad poco ágiles que exigen medios auxiliares potentes y amplias zonas de maniobra. El análisis de la viabilidad de sus maniobras en el interior de un puerto requiere ineludiblemente su estudio mediante simulación en tiempo real.

Asimismo, en el caso de proyectos en los cuáles se prevé el pre-ensamblaje de la turbina en el propio puerto, no deben existir limitaciones de gálibo para el acceso al mar abierto.

g) *Accesibilidad terrestre a la explanada de trabajo*

En la mayor parte de los casos, el proceso de fabricación requerirá del transporte de elementos de grandes dimensiones y pesos por los viarios interiores del puerto y/o por sus accesos. Se hará necesario, por tanto, verificar que la anchura de estos viarios y los radios de giro en sus intersecciones son compatibles con la operación con grandes vehículos y que no existen obstáculos para ello (edificaciones, torres, conducciones, etc)

h) *Adecuación de los pavimentos portuarios a las cargas operativas*

Los diferentes grados de sollicitación previsible en las diversas zonas de operación de la terminal de fabricación y su gran extensión, hará aconsejable la selección de tipos diversos de pavimentos para cada una de ellas. En principio, su diseño deberá adaptarse a grandes cargas y tráficos de baja intensidad y escasa velocidad.

i) *Protección frente agentes meteorológicos y contaminación aérea*

Los estrictos requisitos de calidad en el proceso de fabricación de todos los elementos de las plataformas conllevan la implantación de normas exigentes en cuanto a las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad, viento, etc) así como de la calidad del aire en la zona (polvo, humos, gases, etc). Mientras que las operaciones en la terminal pueden adaptarse a las primeras limitando los tiempos de operación, las segundas pueden tener efectos duraderos y difícilmente controlables.

La situación de la terminal de fabricación respecto de otras terminales potencialmente contaminantes existentes en el puerto debe tenerse en consideración a estos efectos.

Como se puede comprender, todos estos requisitos y condicionantes imponen retos de entidad relevante para la implantación de este tipo de terminales de fabricación de plataformas en un puerto de carácter general ya existente.

Desarrollo de parques eólicos con tecnología flotante en España y en Europa: Retos y oportunidades para los puertos españoles

José-Luis Monsó

Senior Advisor Ports, Sener, joseluis.monso@sener.es

Thomas Conduché

Project Manager Ports, Sener, thomas.conduche@sener.es

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES EN EL CONTEXTO DEL DESARROLLO DE LA INDUSTRIA OFFSHORE WIND (OW) FLOTANTE EN EUROPA Y ESPAÑA

En diversos países de la Unión Europea se han ido adoptando distintas regulaciones, estrategias y planes de acción en los que la eólica marina ha ganado protagonismo a medida que su potencial aumentaba. Por tanto, existe ya un marco regulatorio europeo para el desarrollo de la eólica marina como tecnología clave en el cumplimiento de los objetivos de descarbonización. La energía eólica marina en Europa prevé de aquí a 10 años un total de 100 GW de potencia instalada, suponiendo una tasa de crecimiento de 7 GW/año, incluida ya la potencia instalada.

En España, el borrador de la actualización del PNIEC 2023 establece como objetivo para el 2030 un total de 3 GW de capacidad instalada en eólica marina. Adicionalmente, la visión a largo plazo sobre el escenario de la eólica marina en España indica una gran potencialidad, que podría alcanzar los 17 GW en 2050.

Según el Plan de Ordenación del Espacio Marítimo (POEM) aprobado por el MITECO en 2023, se han definido 4 zonas de la costa española con alto potencial para el desarrollo de la energía eólica marina: Galicia Norte-Asturias, Andalucía (en Mediterráneo-Mar de Alborán), Cataluña Norte, Baleares (en Menorca) y Canarias (en Tenerife, Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote).

En base a estas cifras anteriores de capacidad en la UE, los puertos tendrán que dar servicio a 10.000 turbinas eólicas para O&M, instalar alrededor de 460 turbinas/año, recargar energía alrededor de 1 GW/año y desmantelar 600 turbinas/año (750 MW/año), y, por tanto, se estima

que los puertos pueden contribuir al 5% de la reducción total (directa e indirecta) del LCOE (Levelized Cost of Energy).

Para respaldar dicha reducción de costos de la energía eólica marina, los puertos necesitarán inversiones en el rango de 500 - 1000 millones de euros para actualizar y adaptar sus instalaciones y medios a las necesidades de la eólica marina. Las inversiones serán una combinación de mejora, rediseño y adaptación de las instalaciones de muelles y explanadas existentes, junto con la implantación de nuevas infraestructuras.

En diciembre de 2021, se aprobó la Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España. Una de sus líneas de acción tiene como objetivo el refuerzo de las capacidades logísticas y de infraestructura portuarias para la construcción y montaje de infraestructuras para parques eólicos marinos (Medida 2.1). Para ello, la hoja de ruta adelanta un programa de ayudas para el impulso y adaptación de instalaciones portuarias en el marco de ayudas del programa PERTE ERHA. En dicho programa se presenta la llamada medida transformadora de "Adaptaciones logísticas e instalaciones portuarias" en la que se prevé invertir y subvencionar a fondo perdido infraestructuras en puertos que se determinen estratégicos para el despliegue de la eólica marina.

Este artículo repasará primero los requisitos asociados a la fabricación de plataformas flotantes y al ensamblaje de turbinas. A continuación, se examinará la situación actual de los principales puertos de interés general españoles que podrían responder a estos requisitos. Y, finalmente, se presentará una estrategia de desarrollo de las infraestructuras necesarias para dar respuesta a las necesidades de la industria marina eólica flotante.

2. REQUISITOS FUNCIONALES Y OPERATIVOS DE LOS PUERTOS PARA RESPONDER A LAS NECESIDADES DE LA INDUSTRIA PARA FABRICACIÓN DE PLATAFORMAS Y EL ENSAMBLAJE DE TURBINAS

Los requisitos de las infraestructuras portuarias de muelles, explanadas y accesos portuarios dependen en gran medida del tamaño y capacidad de las turbinas eólicas que se pretenden instalar. Según el MITECO (2021), los próximos modelos de turbinas para el periodo 2025-2030 serán de entre 15 y 20 MW de potencia instalada, y en este apartado se analizan los requisitos asociados a dicha capacidad para plataformas flotantes semi-sumergibles de acero o de hormigón, y, más específicamente, se examinan los requisitos de infraestructuras portuarias asociados a las operaciones de fabricación de dichas plataformas y al ensamblaje de turbinas.

Las turbinas de 15MW, consisten en torres de aproximadamente 1200 t, góndolas de casi 1000 t, y palas de aproximadamente 120m de longitud y 65t de peso. Las góndolas se ubican a unos 150m por encima del nivel del mar. Las plataformas semi-sumergibles para turbinas de este tipo tienen, dependiendo de la tecnología seleccionada, huellas horizontales superiores a 70m x 70m.

2.1. Requisitos infraestructurales relacionados con la fabricación de plataformas flotantes semi-sumergibles

La fabricación de plataformas flotantes puede realizarse en tierra, o a flote, para las plataformas de hormigón mediante cajoneros.

La fabricación de plataformas de hormigón/acero en tierra se suele desarrollar mediante líneas de producción donde la plataforma se desplaza de una estación a otra a través de un sistema de arrastre (SPMT, Skidding).

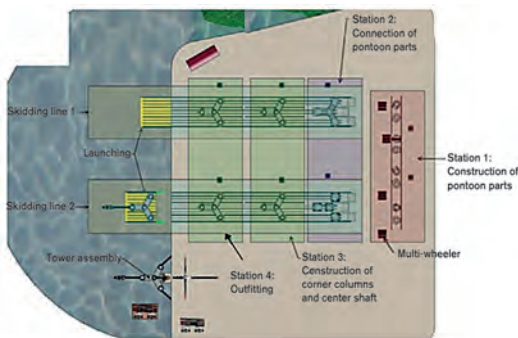
La fabricación de plataformas de hormigón a flote se ejecuta con una estructura flotante llamada cajonero mediante estaciones o puestos de producción donde la plataforma se desplaza de una estación a otra a lo largo del muelle. Los equipos, materiales e infraestructuras de soporte se ubican en el muelle y en la explanada (grúas, planta de hormigón, almacenamiento de materiales y piezas prefabricadas).

Los requisitos de las infraestructuras portuarias varían según la metodología constructiva del aerogenerador, sobre todo en términos del espacio disponible en explanada y la disponibilidad de línea de muelle.

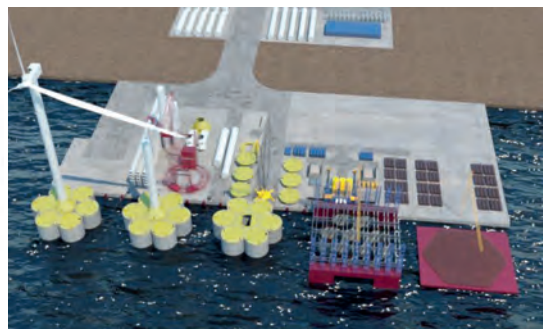
La fabricación en tierra requiere de un mínimo de 10 Ha a 20 Ha en explanada, y de 200 a 600 m de línea de muelle disponible para 1 a 3 líneas de producción. Para la fabricación de plataformas a flote, se requiere un espacio disponible en explanada de 5 Ha aproximadamente, y de una línea de muelle de al menos 400m.

Los requisitos de capacidad portante de las explanadas asociadas a estos procesos son importantes debido al elevado peso propio de las plataformas, y suelen ser superiores a 10t/m². Para las áreas auxiliares (áreas de almacenamiento, grúas, planta de hormigón, etc.) este requisito puede ser rebajado a 5t/m².

Una vez completadas, las plataformas flotantes son puestas a flote (load-out) gracias a pontones, barcasas semi-



Fabricación en tierra



Fabricación a flote

Fig. 1. Procesos de fabricación de plataformas flotantes. Fuente: Olav Olsen y Seaplace.

sumergibles y/o plataformas de lanzamiento desde la explanada o directamente desde el cajonero. Para la realización de esta operación de botadura, según la tipología de plataforma seleccionada se necesita un calado a pie de muelle de entre 12m y 16m.

2.2. Requisitos infraestructurales relacionados con el ensamblaje de turbinas.

El proceso de ensamblaje de turbinas en una plataforma flotante incluye la instalación de la torre, la góndola y de las tres palas. Dependiendo de las necesidades de producción, se pueden repartir por el muelle de una a tres estaciones de ensamblaje para instalar cada uno de estos tres componentes.

Las operaciones de ensamblaje están condicionadas por la instalación de la góndola a gran altura, requiriendo grúas específicas muy altas y de gran capacidad de carga. La instalación de las torres, que se suelen dividir en tres tramos, y de las palas, se puede realizar con grúas más convencionales (grúas sobre orugas). Las cargas debajo de las grúas son importantes, del orden de 25-30 t/m². Por ello, se necesita una zona específica con alta capacidad portante del terreno (> 25 t/m²) y cercana al muelle para el ensamblaje de las piezas de la turbina. Las capacidades portantes mínimas asociadas a las zonas de almacenaje son menores, del orden de 10t/m² para las torres y palas, y de 15t/m² para las góndolas.

El espacio en explanada y la longitud de línea de muelle disponible requeridos para el ensamblaje de turbinas depende de la capacidad de almacenaje objetivo de las piezas de turbinas, y del número de estaciones de ensamblaje a lo largo del muelle. Es recomendable dejar una línea de muelle disponible para el suministro de componentes por vía marítima, ya que el suministro por vía terrestre presenta más dificultades dado el tamaño y peso de los componentes de las turbinas. En base a estas consideraciones, se requiere una superficie de entre 10 a 15 Ha en la explanada y una línea de muelle disponible de un mínimo de 400m.

Finalmente, el calado a pie de muelle depende del calado de la plataforma flotante durante las operaciones de la instalación de turbina y puesta en marcha. Dependiendo de la tipología de plataforma utilizada, un mínimo de 12 m de calado es requerido a pie de muelle. (British Standards (2000) y DNV (2023)).

2.3. Otros requisitos

La altura de oleaje ($H_s < 0,3m-0,5m$) y la velocidad de viento (V_{10min} , $150m < 9-10m/s$) son igualmente un factor limitante para las operaciones de puesta a flote y de ensamblaje de las turbinas, siendo especialmente relevantes los límites asociados a la velocidad de viento. En ciertas zonas de España (por ejemplo, Canarias) el régimen medio de viento limita la capacidad de los puertos como hub de ensamblaje de turbinas.

Así mismo, debido al tamaño y altura de las turbinas, una vez instaladas pueden afectar a la actividad aeronáutica. La norma que regula el ámbito de las servidumbres aeronáuticas (SSAA) en España es el Decreto 584/1972 (modificado por el Real Decreto 1541/2003) de servidumbres aeronáuticas. Existen tres tipos de servidumbres aeronáuticas: Las servidumbres físicas, las servidumbres de instalaciones radioeléctricas y las servidumbres de operación. La capacidad de un puerto para albergar operaciones de ensamblaje de turbinas puede estar condicionada por la presencia de un aeropuerto cercano. El Mapa de SSAA presenta los entornos de las servidumbres aeronáuticas civiles en España que delimitan las zonas donde se requiere acuerdo previo favorable de AESA.

Finalmente, existe un límite operativo de distancia del puerto donde se ensamblan las turbinas al parque eólico marino donde se instalan. No existe un límite de distancia predefinido, aunque se suele considerar que las operaciones de ensamblaje deberían ubicarse en un radio máximo de aproximadamente 350 km alrededor del parque. Este límite viene condicionado por los tiempos de viaje máximos considerados, y por razones de seguridad y de coste de movilización de buques.

3. ANÁLISIS DE LOS PUERTOS ESPAÑOLES, SITUACIÓN ACTUAL Y PLAN DE DESARROLLOS FUTUROS

La ubicación de los puertos es esencial para el desarrollo de actividades relacionadas con la industria eólica marina flotante y específicamente en relación con el ensamblaje de turbinas.

A continuación, se ha seleccionado un conjunto de puertos españoles con un cierto potencial para el desarrollo de actividades de fabricación y ensamblaje. En la siguiente



Fig. 2. Situación de los puertos de potencial interés con relación a los POEM, PROPOS y PSOEM. Fuente: elaboración propia.

figura se ubican los puertos en relación con las zonas POEM (España), PROPOS (Francia) y PSOEM (Portugal) y los proyectos eólicos marinos presentados a consultas ambientales previas en los 3 países.

Los puertos españoles de potencial interés que podrían dar cobertura para el desarrollo de la eólica marina son presentados a continuación, en donde se enumeran los proyectos de muelles y explanadas existentes y futuros que podría servir para el desarrollo de actividades de fabricación y/o ensamblaje.

Los proyectos recopilados cumplen con los requisitos mínimos de área de explanada, y de longitud y calado de muelle, presentados anteriormente.

Para la zona de Galicia, el Puerto Exterior de La Coruña en Langosteira está muy bien situado para ser un hub de eólica marina flotante en esta área, extensible también a Portugal. Es el puerto que tiene la mayor superficie de explanada y de línea de muelle disponible para posibles usos asociados a la industria eólica marina flotante. No obstante, quedan pendientes de ejecutar las obras de

Puertos de apoyo para la eólica marina en España	Superficie de explanada (Ha)	Muelle disponible (m)	Calado de muelle (m)	Distancia al parque OW más cercano (km)
Puerto de Tarragona	Futura (medio Plazo): 20 Contradique Futura (largo plazo): 30	Futura (medio Plazo): 400 Contradique Futura (largo Plazo): 400	16	Cataluña Norte: 230
Puerto de Castellón	Futura: 30-50	400-800	16-18,5	Cataluña Norte: 320
Puerto de Almería	Futura (medio plazo): 10 Futura (largo plazo): 20 (total)	Futura (medio Plazo): 400 Futura (largo Plazo): 850 (total)	> 15	Andalucía Sur: 110
Puerto de Algeciras Campamento	Existente: 25 Futura: 49	Existente: 260 Futura: 900	16	Andalucía Sur: 80
Puerto exterior de A Coruña	50 + 30 (Pendiente obras de acabado)	1.350	20	Galicia Norte: 80
Puerto de Gijón (Dársena exterior)	74	800	23	Asturias: 40
Puerto de Bilbao	Futura 25	Futura: 350-400	21	Asturias: 240
Puerto de Las Palmas	12	250	10-14	Gran Canaria: 40
Puerto de Granadilla	Existente: 7 Futura: 20	Existente: 300 Futura: 580	> 16	Tenerife: 50

Tabla 1. Infraestructuras existentes y proyectadas en los puertos de potencial interés.
Fuente: Elaboración propia.

muelle, pavimento y una parte del relleno de explanada. Para la zona de Andalucía, los puertos de Algeciras y de Almería son a priori los mejor situados para los desarrollos de eólica marina flotante en esa área. Ambos puertos disponen de proyectos de extensiones portuarias con potencial para la fabricación de plataformas y ensamblaje de turbinas, pero los plazos de ejecución de estas extensiones aún están por definir.

En la zona de Cataluña y Baleares se destacan los puertos de Castellón y de Tarragona que han mostrado un interés en albergar actividades de eólica marina flotante y tienen proyectos de extensiones de muelles y explanadas en curso. El puerto de Castellón tiene como objetivo tener las infraestructuras preparadas para 2028 en el Muelle de Costa de la Dársena Sur. El puerto de Tarragona está pendiente de aprobación ambiental del proyecto del Con-

tradique, pero propone el uso temporal del muelle de Baleares previsto operativo para 2027 para operaciones asociadas a la eólica marina flotante.

Para la zona de las islas Canarias, el puerto de Granadilla y Las Palmas son actualmente los únicos puertos de las islas con potencial para su uso para la fabricación de plataformas flotantes metálicas y el ensamblaje de turbinas, respectivamente. Sin embargo, el ensamblaje de turbinas en el puerto de Granadilla está condicionado por servidumbres aeronáuticas y un régimen medio de viento alto.

Finalmente, se ha incluido en la lista de puertos de potencial interés para la industria eólica los puertos de Gijón y Bilbao, que podrían dar servicio a los parques eólicos atlánticos españoles y franceses. El Puerto de Gijón dis-

pone en su dársena exterior de grandes superficies de explanada y de una línea de muelle ya ejecutada y en operación. Actualmente, la mayor parte de estas superficies están en operación para cruceros y para graneles minerales. El puerto de Bilbao incluye en su Plan de Infraestructuras un proyecto de ampliación para eólica, pero con un plazo de ejecución indefinido y con limitaciones de servidumbres aeronáuticas.

4. ESTRATEGIAS DE DESARROLLO Y FINANCIACIÓN DE INVERSIONES EN LOS PUERTOS PARA LA INDUSTRIA EÓLICA MARINA FLOTANTE

Los puertos y astilleros españoles que cuenten con una buena ubicación estratégica jugarán un papel muy importante en el desarrollo de proyectos de eólica marina. No obstante, son necesarias algunas mejoras y ampliaciones de las infraestructuras existentes para poder responder a la futura demanda en parques eólicos marinos flotantes de aquí al horizonte 2030 y más allá.

El rango de inversión previsto es muy variable según las adaptaciones requeridas, pero suele ser bastante significativo, poniendo de relieve el problema de la financiación de dichas obras. Las obras de infraestructura importantes (muelles, rellenos portuarios) suelen ser financiadas por las autoridades portuarias, dejando las obras de mejora de explanadas para futuros concesionarios. Igualmente, las obras de mejora y de adaptación de muelles y explanadas ya existentes suelen ir a cargo del concesionario de la terminal. La inclusión de CAPEX significativos para obras portuarias a cargo del desarrollador del parque resulta en un incremento del LCOE del parque que podría dificultar la viabilidad del proyecto de inversión.

En este contexto es relevante la existencia de mecanismos de financiación, tanto a nivel nacional como europeo, que permitan fomentar la implementación de estas obras. El desarrollo de la eólica marina precisa inicialmente de mecanismos de apoyo que, tal como establece el PNIIEC (Plan Nacional Integrado de Energía y Clima), se irá adaptando a sus niveles de competitividad crecientes.

Existen diferentes mecanismos de financiación, tanto europeos como nacionales, a los que las diferentes autoridades portuarias podrían acceder. Algunos de estos fondos son los siguientes: Innovation Fund, Horizon Europe, Next Generation EU - Fondos IDAE-MRR (Plan de Recuperación Transformación y Resiliencia), Fondo Euro-

peo para Inversiones Estratégicas (FEIE), y CDTI (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial).

A continuación, se presenta una serie de planteamientos estratégicos de desarrollo que permitirían, de la mano de desarrolladoras, constructoras, autoridades portuarias y concesionarios, ofrecer soluciones para viabilizar los proyectos de eólica marina flotante en Europa mediante el uso de infraestructuras ad-hoc en algunos puertos españoles.

4.1. Desarrollo de hubs portuarios estratégicos en el marco de la energía eólica marina

Uno de los problemas actuales existentes es la compatibilización entre los plazos de un contrato de concesión de una terminal portuaria (típicamente 30 años) con los plazos de ejecución de un parque eólico flotante (fabricación y/o ensamblaje), significativamente menores (2-3 años). Existe la posibilidad de pedir una concesión temporal de un año ampliable hasta tres años que se ajustaría mejor a las necesidades asociadas a la ejecución de un proyecto de un parque eólico flotante. No obstante, para que esta opción sea atractiva para las autoridades portuarias, es necesario garantizar la continuidad temporal del uso de las infraestructuras mediante la concatenación en el tiempo de varios proyectos eólicos marinos en otras zonas costeras.

Por todo ello, resulta importante la creación de hubs especializados que permitan viabilizar un proyecto de concesión y repercutir el posible coste de inversión de obras portuarias en el LCOE de varios parques.

Recientemente, la compañía alemana RWE y la Autoridad Portuaria de A Coruña han sellado una alianza para convertir al recinto portuario gallego mediante transformación de la infraestructura actual, en un hub especializado en fabricación de plataformas flotantes, y en el ensamblaje, almacenamiento y distribución de componentes para proyectos eólicos marinos flotantes.

El año pasado (2023), la misma autoridad portuaria de A Coruña ha sellado un acuerdo con Repsol y dos empresas desarrolladoras para utilizar temporalmente las infraestructuras portuarias en las etapas de montaje e integración de aerogeneradores, plataformas flotantes, subestaciones, cableado, sistemas de amarre y equipamiento necesario para realizar proyectos de eólica marina.

En la costa mediterránea, la Autoridad Portuaria de Castellón ha aprobado el inicio de un proyecto de ordenación de la zona del muelle de Costa en la dársena sur para el desarrollo de un hub para la industria eólica marina, destinado específicamente a la construcción de parques eólicos marinos en Europa. La Autoridad Portuaria de Castellón aspira a captar fondos públicos (IDEA-MRR) para la financiación de dichas obras. Igualmente, dispone del respaldo de actores importantes del sector de la eólica marina (Asociación Eólica Española, Ferrovial, Acciona, Nervion Naval Offshore, Bluefloat Energy / SENER y Saitec) que le permiten garantizar el interés del uso de las infraestructuras proyectadas.

Las islas canarias, por su posición geográfica privilegiada entre Europa y América, y los beneficios fiscales para inversiones en Canarias que le ofrece la Zona Especial Canaria (ZEC), tiene un gran potencial para convertirse en un hub mundial de la eólica marina. Los puertos de Las Palmas en Gran Canaria y de Granadilla en Tenerife ofrecen espacios especiales para el ensamblaje de turbinas y la fabricación de plataformas flotantes, respectivamente.

En conclusión, el desarrollo de hubs portuarios con el respaldo de diversos actores como autoridades portuarias, empresas desarrolladoras, inversoras y constructoras podría garantizar la continuidad del uso de las infraestructuras portuarias proyectadas para la industria eólica marina flotante. El desarrollo de las obras necesarias para la industria podría ser financiada en parte por los futuros operadores que darían servicio a varios parques eólicos marinos flotantes, y por los fondos públicos disponibles a nivel estatal y europeo.

4.2. Usos mixtos

Para promover la industria eólica marina flotante existe una solución de usos portuarios mixtos que consistiría en utilizar astilleros para construir y reparar buques cuyas características permitan, con menor coste, fabricar plataformas flotantes y/o ensamblaje de turbinas, mientras continúa con su actividad principal, resultando en un modelo económico perenne.

Las características de las infraestructuras y de los manejo de este tipo de buques permitirían la compatibilización de las actividades de reparación y mantenimiento de dichos buques con la fabricación de plataformas flotantes de

acero en el propio puerto o en sus proximidades.

5. CONCLUSIONES

Los puertos españoles disponen de una situación privilegiada para dar servicio a la industria eólica marina por la calidad de sus infraestructuras actuales y la ubicación de sus puertos. No obstante, los requisitos infraestructurales y de espacio para el desarrollo de parques eólicos marinos flotantes con turbinas superiores a 15 MW requieren todavía de una inversión significativa en mejoras y adaptaciones de sus muelles que pasa necesariamente por una financiación con fondos públicos y privados, y el desarrollo de hubs especializados que permitan la creación de un modelo económico perenne de concesión de terminales a medio y largo plazo.

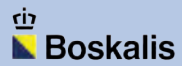
Por último, se destaca la posibilidad de incorporar modelos de uso mixto, compatibilizando el desarrollo de una actividad más limitada en el tiempo como es la fabricación de plataformas flotantes y ensamblaje de turbinas, con la de astillero para barcos.

6. REFERENCIAS

- MITECO, 2021. Hoja de Ruta para el Desarrollo de la Eólica Marina y de las Energías del Mar en España.
- MITECO, 2023. Borrador de actualización del plan nacional integrado de energía y clima 2023-2030.
- Asociación Empresarial Eólica (AEE), 2022. Libro blanco de la Industria Eólica Marina en España.
- ICEX, España Exportación e Inversiones, 2022. El mercado de la energía eólica en Portugal.
- España. Decreto 584/1972 (modificado por el Real Decreto 1541/2003)
- BRITISH STANDARDS (2000). Maritime Structures-Part 1 General criteria. BS 6349-1:2000
- ROM (2000). Proyecto de la configuración marítima de los puertos; canales de acceso y áreas de flotación. ROM 3.1-99
- DNV (2023-12). Marine operations and marine warranty. DNV-ST-N00

Colaboran

sacyr



Asociación Técnica de Puertos y Costas
Avda. del Partenón, 10 - Campo de las Naciones
28042 Madrid (ESPAÑA)
www.atpyc.com