SIOP 2026 | COQUIMBO
XI Seminario Internacional de Ingeniería y Operación Portuaria

XI SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

INFLUENCIA DE LA CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LA ONDA LARGA EN LA RESPUESTA DINÁMICA DE BUQUES ATRACADOS. APLICACIÓN EN EL MARCO DEL PROYECTO PRESTAMAR

JUAN CARLOS CARMONA RICO[1], RAÚL ATIENZA MARTÍN[2]

RESUMEN

PRESTAMAR desarrolla una herramienta de apoyo a la decisión para anticipar el efecto de oleaje, onda larga, marea y corrientes sobre buques atracados, integrando instrumentación, simulación hidrodinámica, datos sintéticos, modelos predictivos y una plataforma IoT (Internet de las Cosas) que permite centralizar, gestionar y visualizar en tiempo real los datos procedentes de sensores y modelos. El piloto se desarrolla en el atraque 3 de PETRONOR, en el Puerto de Bilbao, donde la onda larga condiciona la operatividad. El trabajo describe la metodología de medida y modelización y analiza la sensibilidad del vaivén a la forma espectral de la onda larga. Se analizan más de un año de espectros medidos y simulaciones con espectros reales, JONSWAP y formas sintéticas obtenidas mediante clusterización. Los resultados muestran que estados con parámetros globales similares pueden producir respuestas muy diferentes cuando cambia la energía situada cerca de los periodos naturales del sistema de amarre. La caracterización espectral específica resulta esencial para construir modelos predictivos fiables.

Palabras clave: buque atracado, onda larga, amarre, simulación, predicción, PRESTAMAR.

[1] Director de área de Innovación. Siport21. raul.atienza@siport21.es
[2] Gerente de proyectos. Siport21. jcarlos.carmona@siport21.es

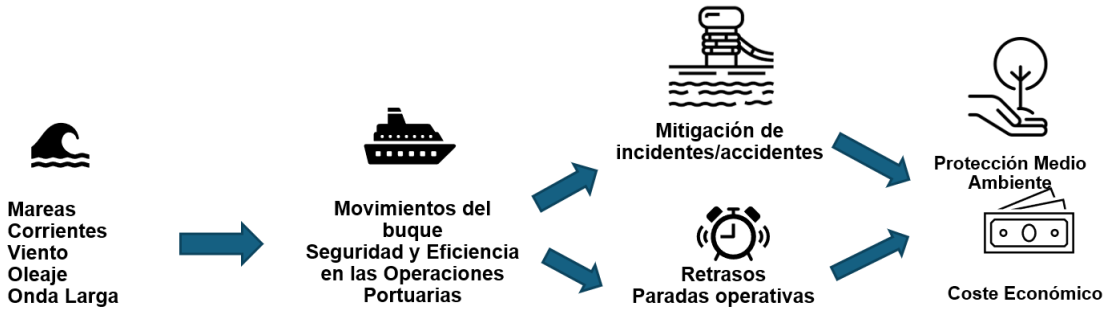
1 INTRODUCCIÓN

La operatividad de un buque atracado depende de que los movimientos y las cargas del sistema buque-amarras-defensas permanezcan dentro de límites compatibles con la transferencia de carga y con la permanencia segura en el atraque. Un movimiento excesivo puede obligar a suspender la operación por superar el rango de los equipos de conexión; una respuesta más severa puede exigir refuerzo del amarre o abandono preventivo. En terminales expuestos, decidir demasiado tarde aumenta el riesgo, mientras que decisiones excesivamente conservadoras generan inoperatividad y costes.

PRESTAMAR aborda este problema integrando medidas de campo, predicción ambiental, simulación numérica y modelos basados en datos dentro de una plataforma IoT. La herramienta pretende aportar al práctico, capitán y operador información objetiva y específica del atraque sobre la evolución prevista de las condiciones y del movimiento del buque. El piloto se desarrolla en el atraque 3 de PETRONOR, en Punta Lucero, Puerto de Bilbao, donde se han registrado paradas operativas y roturas de cabos asociadas a condiciones marítimas adversas.

En este emplazamiento oleaje de onda larga es especialmente relevante. Aunque su altura puede ser reducida, sus bajas frecuencias puedes coincidir con las frecuencias naturales de los movimientos horizontales del buque amarrado. Por ello, el objetivo de este trabajo es presentar el enfoque técnico de PRESTAMAR y demostrar que la forma del espectro de onda larga, además de Hs y Tp, condiciona la respuesta dinámica y la fiabilidad de los modelos predictivos. La figura siguiente ilustra los objetivos de la herramienta.

Figura 1: Propósito de la herramienta PRESTAMAR.

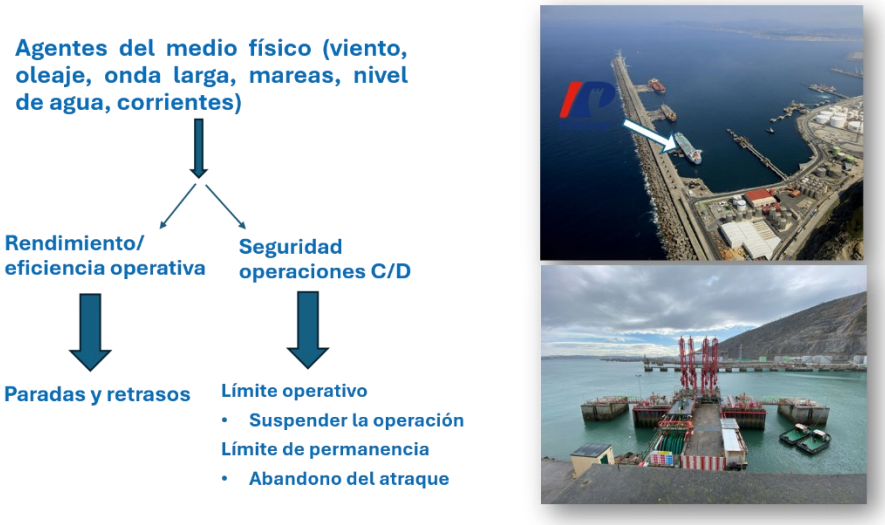


Fuente: material gráfico del proyecto PRESTAMAR.

2 CONTEXTO DEL PILOTO Y SOLUCIÓN PRESTAMAR

Los atraques de PETRONOR presentan una exposición desigual al oleaje y las corrientes, siendo el atraque 3 el más condicionado. La documentación del proyecto recoge alrededor de 192 días/año de demora por fuerza mayor para el conjunto de seis atraques en 2017-2020 y un coste medio superior a 3 MUS$/año por mal tiempo en 2020-2024. También se documentan 38 roturas de cabos en 2024, 22 en 2025 y 41 en 2026. Estas cifras son indicadores de contexto del conjunto terminal y muestran la necesidad de criterios operativos objetivos y anticipados.

Figura 2: Entorno del piloto PRESTAMAR en el atraque 3 de PETRONOR, Puerto de Bilbao.



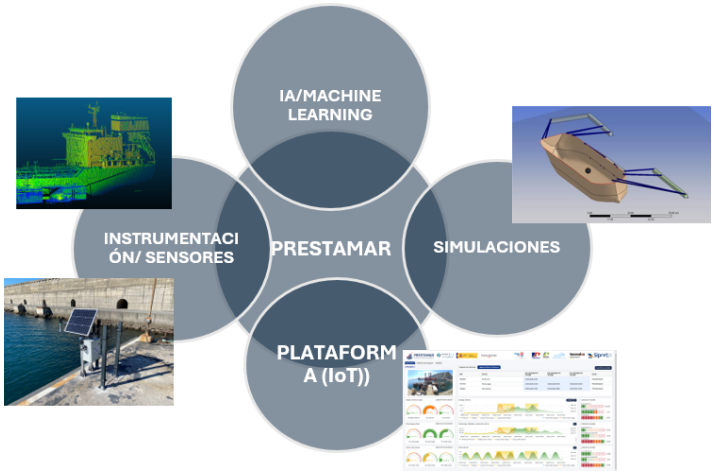
Fuente: material gráfico del proyecto PRESTAMAR.

La solución se organiza en cuatro bloques (Tabla 1): instrumentación para caracterizar el medio y el movimiento; simulación hidrodinámica del buque atracado; modelos predictivos basados en IA alimentados por medidas, predicción exterior y datos sintéticos; y una plataforma de datos que integra y visualiza la información. Esta arquitectura permite trasladar el análisis desde umbrales ambientales genéricos hacia indicadores ligados a la respuesta esperada de cada buque.

Tabla 1: Bloques técnicos de la solución PRESTAMAR.

Bloque	Elementos	Función
Medición	DeepWAVES RTK; LiDAR; DeepMotion	Oleaje/onda larga y movimientos.
Simulación	ANSYS AQWA y modelos de amarre	Respuesta dinámica y datos sintéticos.
Predicción	Datos medidos, sintéticos y predicción exterior	Condiciones locales y movimiento futuro.
Plataforma IoT	Adquisición, análisis y visualización	Integración y apoyo a la decisión.

Figura 3: Esquema de bloques técnicos de la solución PRESTAMAR.



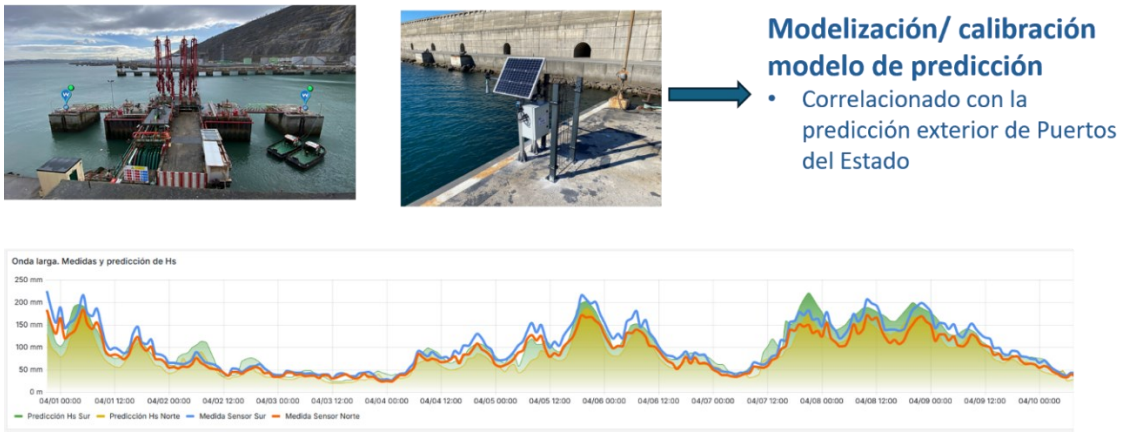
Fuente: material gráfico del proyecto PRESTAMAR.

3 INSTRUMENTACIÓN Y DATOS DE CAMPAÑA

3.1 Oleaje y onda larga

La agitación interior se mide con equipos DeepWAVES RTK. Las series se utilizan para separar oleaje de periodo corto y componentes de baja frecuencia (considerando oleaje de baja frecuencia aquel con un período igual o superior a 30s), y para calibrar modelos de predicción de las condiciones en atraque a partir de la predicción exterior de Puertos del Estado. La figura siguiente muestra imágenes de la instrumentación de medida de oleaje y series temporales registradas.

Figura 4: Medida de la agitación interior para captar la onda larga.

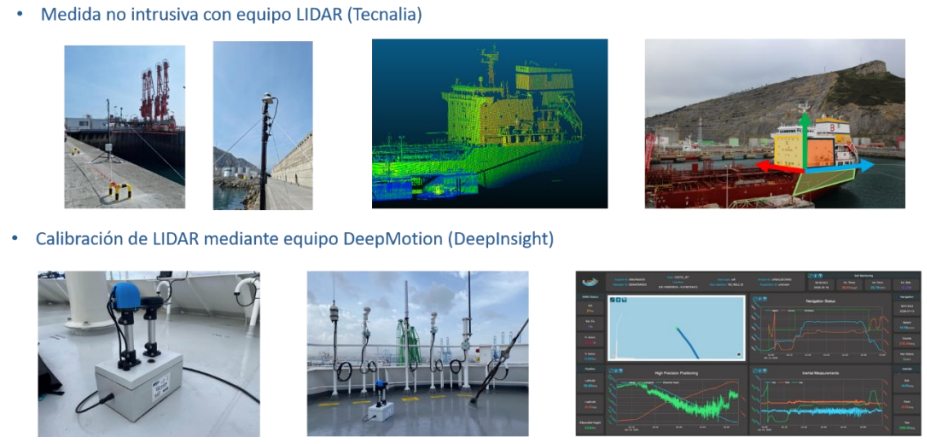


Fuente: material gráfico del proyecto PRESTAMAR.

3.2 Movimiento del buque

El movimiento se mide de forma no intrusiva mediante LiDAR de TECNALIA, reconstruyendo la posición de la superestructura a partir de nubes de puntos. La calibración se realiza con un sistema DeepMotion GNSS/PPK instalado temporalmente a bordo. La campaña incluye diez buques de aproximadamente 100 a 184 m de eslora. Los períodos de pico de vaivén se encuentran en el rango 30s - 65s. Estos períodos de pico son representativos del periodo natural del sistema de amarre en sus diferentes configuraciones para cada uno de los buques. La figura siguiente muestra esta instrumentación.

Figura 5: Sistemas de medida de movimiento de buques.



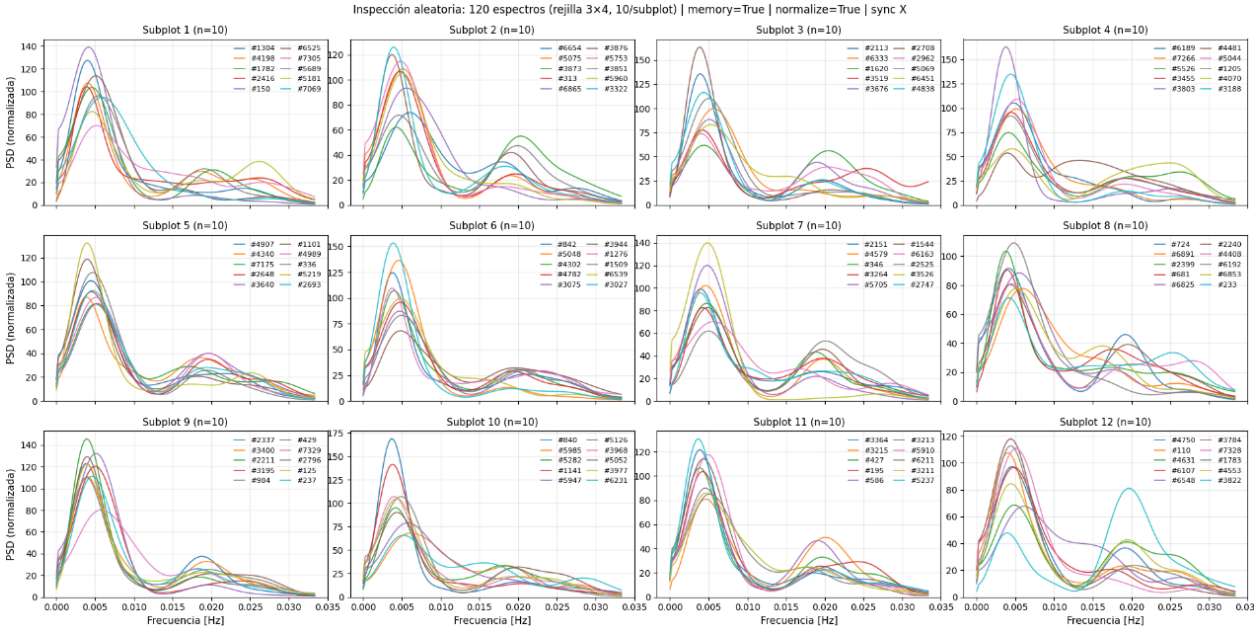
Fuente: material gráfico del proyecto PRESTAMAR.

4 CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LA ONDA LARGA

El análisis de las medidas de oleaje consiste fundamentalmente en la obtención de las formas de densidad espectral de las señales registradas. La estimación espectral se realiza mediante el método de Welch (Welch, P. D. 1967). Este procedimiento divide cada ventana temporal en segmentos de menor duración, calcula el espectro de cada uno de ellos y obtiene finalmente un espectro promedio. El promediado reduce la variabilidad de la estimación y proporciona una representación más estable mediante una única transformada de Fourier aplicada sobre toda la ventana. Se utilizaron registros de 3.600 s muestreados a 1 Hz, divididos en 16 segmentos con ventana Hann y solapamiento del 50 %. La resolución frecuencial obtenida fue de aproximadamente 0,00236 Hz, proporcionando 14 intervalos espectrales no nulos en el rango de onda larga (T > 30 s), con una discretización adecuada para su caracterización energética.

Mediante esta técnica se pueden obtener estimaciones adecuadas de las formas espectrales horarias. En la figura siguiente podemos ver ejemplos de resultados de estas formas espectrales, previamente normalizadas para una adecuada comparación de las mismas.

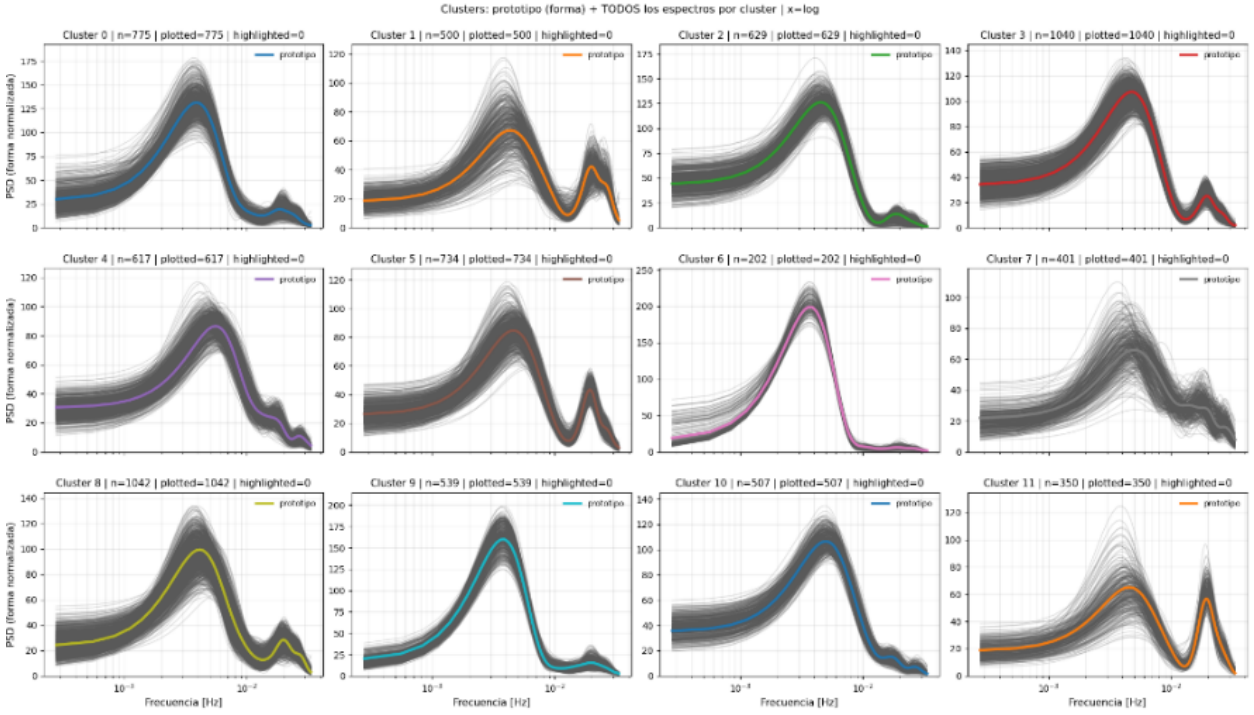
Figura 6: Ejemplos de formas espectrales normalizadas



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

Esta variedad de formas espectrales puede agruparse mediante técnicas de clusterización de Machine Learning. En la solución PRESTAMAR se utiliza concretamente Gaussian Mixture Models (GMM), en los que el número de componentes se fija previamente y cada espectro se asigna probabilísticamente al grupo más compatible con sus características. Los modelos GMM facilitan la obtención de un número controlado de tipologías espectrales cuando el objetivo consiste en definir un conjunto reducido de casos representativos para las simulaciones hidrodinámicas. La figura siguiente muestra el resultado obtenido para 12 clusters, comparando el espectro prototipo representante de cada clúster con el grupo de espectros asignado a ese clúster.

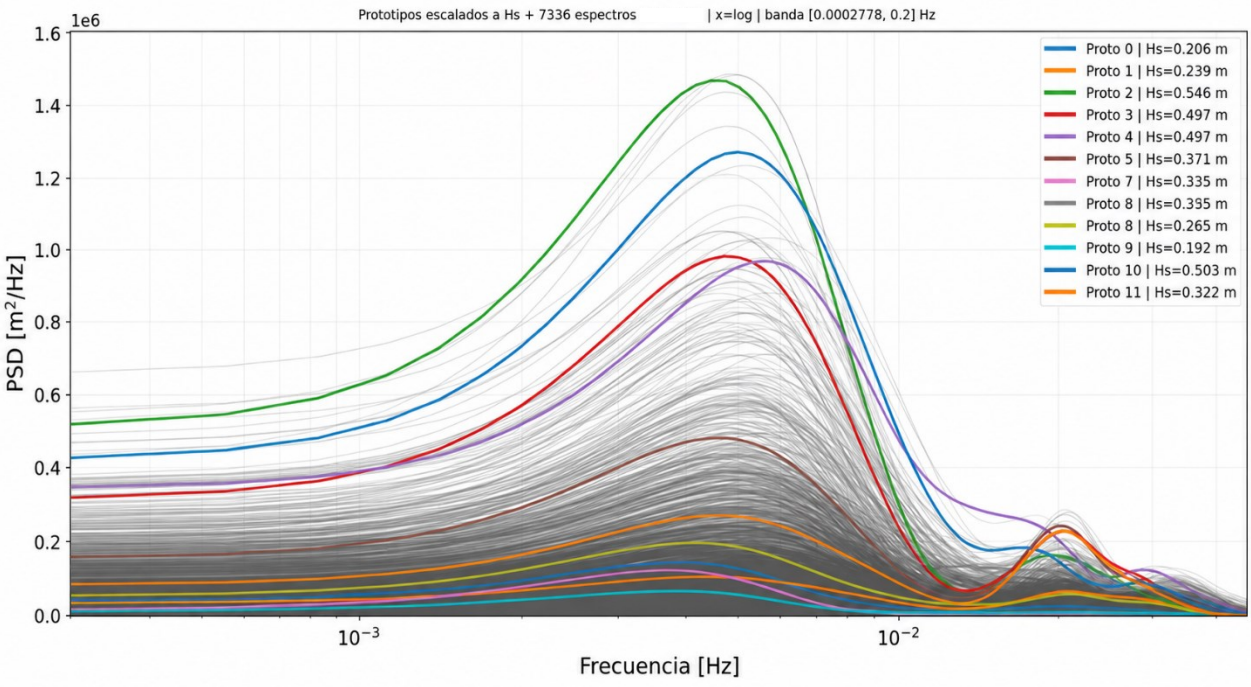
Figura 7: Clusterización de formas espectrales



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

Una vez realizada esta clusterización, cada forma tipo puede escalarse a diferentes niveles de Hs y emplearse en simulaciones dinámicas. De esta manera se conservan picos secundarios y energía en bandas locales que desaparecerían al imponer una forma teórica fija. La figura siguiente muestra los espectros escalados en comparación con el total de espectros de media.

Figura 8: Ejemplo de formas espectrales escaladas a valores específicos de Hs



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

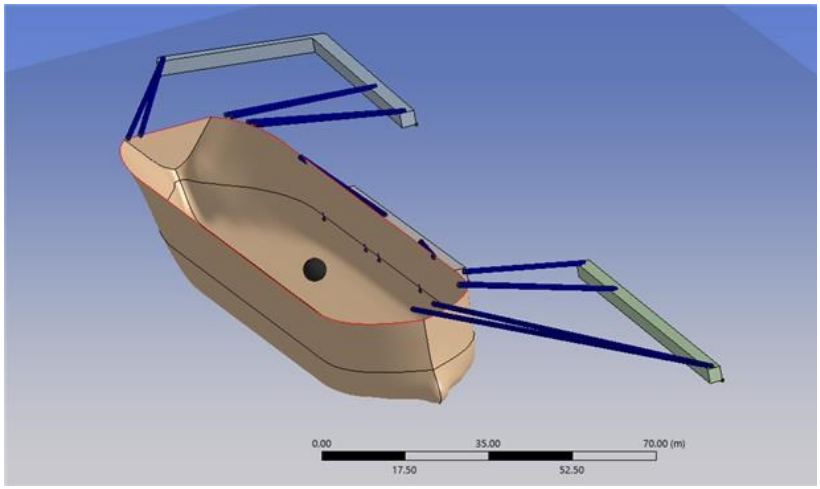
5 MODELIZACIÓN DEL BUQUE AMARRADO

La generación de datos sintéticos requiere disponer de un modelo hidrodinámico capaz de reproducir de forma realista la respuesta dinámica de los buques atracados frente a la acción de los distintos agentes ambientales. Con este objetivo se desarrolló un modelo numérico utilizando el software ANSYS AQWA, herramienta ampliamente empleada en ingeniería naval y portuaria para el análisis hidrodinámico de estructuras flotantes mediante teoría potencial lineal.

El proceso de modelización comenzó con la definición de los modelos geométricos de los buques objeto de estudio. Para cada tipología se construyó una representación tridimensional del casco con el nivel de detalle necesario para caracterizar correctamente su comportamiento hidrodinámico, preservando las principales dimensiones geométricas (eslora, manga, puntal y calado) y las formas del casco que condicionan la interacción con el oleaje. Estas geometrías constituyen la base para el cálculo de las acciones hidrodinámicas que actúan sobre el buque.

Sobre estos modelos geométricos se configuró el entorno de simulación en ANSYS AQWA, definiendo las condiciones de flotación correspondientes a los distintos escenarios analizados, así como las características del sistema de amarre y de las defensas. El modelo resuelve la interacción entre el casco y el fluido mediante un planteamiento basado en teoría potencial lineal, obteniendo la solución hidrodinámica para un amplio rango de frecuencias de excitación.

Figura 9: Calibración del modelo de buque amarrado mediante ensayo de extinción en surge.



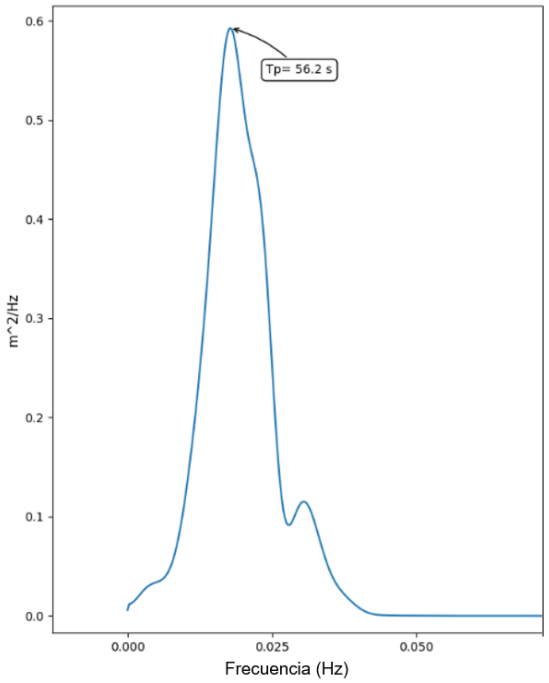
Fuente: material gráfico del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

Una vez desarrollado el modelo hidrodinámico del sistema terminal–equipo de amarre–buque, se llevó a cabo su proceso de calibración utilizando como referencia las mediciones de campo obtenidas durante la campaña experimental realizada en la terminal. La calibración tiene como objetivo ajustar el comportamiento dinámico del modelo para que reproduzca con la mayor fidelidad posible la respuesta observada en condiciones reales de operación, garantizando así la representatividad de las simulaciones empleadas posteriormente para la generación de datos sintéticos.

El proceso de calibración se basó en las medidas de movimiento obtenidas mediante receptores GPS de alta precisión, consideradas las fuentes de información más fiables para caracterizar el movimiento global del buque atracado. Entre los seis grados de libertad del movimiento, el ajuste se centró en el movimiento longitudinal (surge), al haberse identificado, tanto durante la campaña experimental como a partir de la experiencia de los operadores portuarios, como el

modo de movimiento que mayor influencia presenta sobre la operativa de carga y descarga. Como primera fase del proceso de calibración del modelo hidrodinámico se llevó a cabo el análisis del periodo natural del movimiento longitudinal (surge), al tratarse del modo de oscilación que presenta una mayor influencia sobre la operativa de la terminal. El período natural de oscilación puede estimarse mediante el período de pico del espectro de energía del movimiento. La figura siguiente muestra un ejemplo de espectro obtenido de una serie temporal de medida de surge:

Figura 10: Ejemplo de análisis espectral de movimiento de surge.



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

Con objeto de caracterizar adecuadamente la respuesta dinámica del sistema, se realizaron ensayos de extinción (decay tests) sobre el modelo hidrodinámico. Este tipo de ensayos consiste en desplazar inicialmente el buque de su posición de equilibrio y permitir posteriormente su oscilación libre bajo la acción combinada de las fuerzas restauradoras y del amortiguamiento del sistema. El análisis de la evolución temporal de dichas oscilaciones permite determinar el periodo

natural del movimiento. Desde un punto de vista teórico, el movimiento libre de un sistema con amortiguamiento lineal y cuadrático puede expresarse mediante la ecuación diferencial:

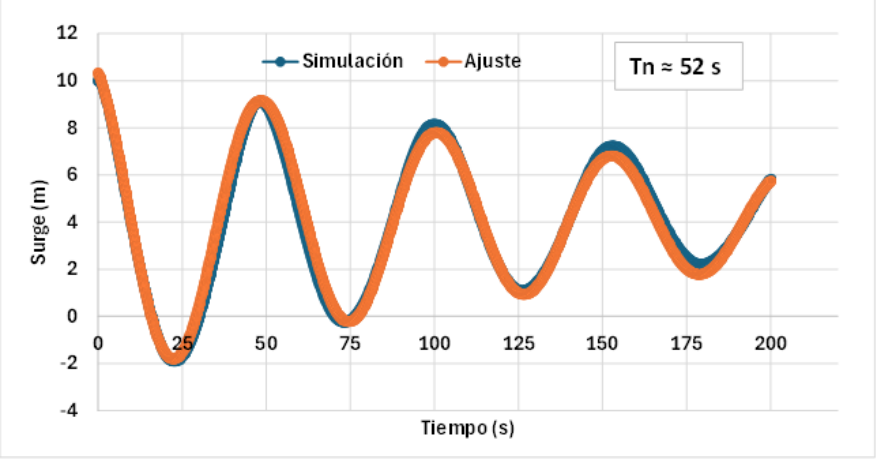
$$m\ddot{x} + B_1\dot{x} + B_2 \mid \dot{x} \mid \dot{x} + cx = 0 \qquad (1)$$

donde m representa la masa efectiva del sistema, B_1 y B_2 los coeficientes de amortiguamiento lineal y cuadrático, respectivamente, c la rigidez equivalente y x el desplazamiento respecto a la posición de equilibrio. Dividiendo la ecuación por la masa efectiva se obtiene la expresión normalizada:

$$\ddot{x} + p_1\dot{x} + p_2 \mid \dot{x} \mid \dot{x} + p_3 x = 0 \qquad (2)$$

donde los parámetros p_1, p_2 y p_3 agrupan los efectos del amortiguamiento y de la rigidez del sistema. Esta formulación constituye la base para la identificación de las propiedades dinámicas mediante el análisis de los ensayos de extinción. Mediante el método de minimización del error por mínimos cuadrados, se puede ajustar el modelo anterior para identificar el período natural de oscilación, como vemos en la siguiente figura:

Figura 11: Ejemplo de simulación de decay en surge.

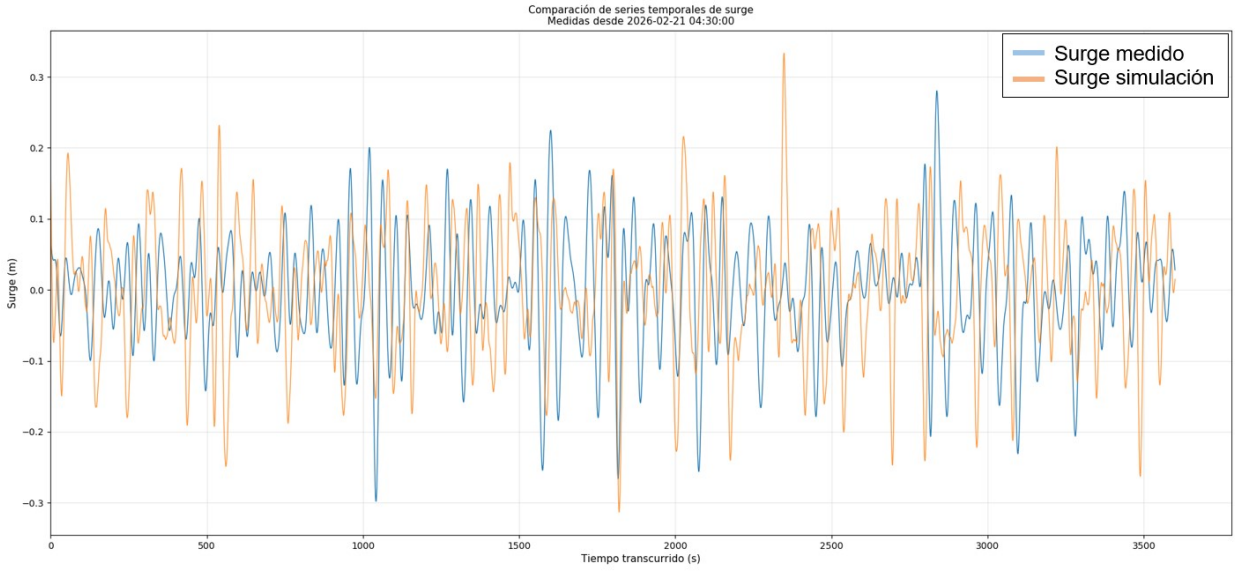


Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

Una vez completada la calibración considerando que los periodos naturales de oscilación de los modelos eran suficientemente similares a los registrados en las medidas, los modelos fueron validados comparando las respuestas temporales simuladas con los registros experimentales

obtenidos durante diferentes episodios de operación. La siguiente figura muestra un ejemplo de esta comparación de series temporales.

Figura 12: Comparación de medida con resultados de simulación en el dominio del tiempo.



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

Este proceso se llevó a cabo para 4 tamaños de buque y dos calados para cada buque, excepto el buque más pequeño, para el cual se modelizó únicamente un calado. La tabla siguiente muestra las diferencias entre el máximo valor absoluto de surge en valor en los registros de medidas y el máximo valor absoluto de las simulaciones:

Tabla 2: Comparación de resultados de surge.

Buque LOA (m)	Calado	Diferencia Surge (m)
113	6	0.077
129	5	0.075
	7.9	0.319
160	5.6	0.035
	8.6	0.126
184	7	0.113
	11	0.363

6 SENSIBILIDAD DE LA RESPUESTA A LA FORMA ESPECTRAL

La influencia de la distribución de energía se resume mediante la relación entre el espectro de excitación y la función de transferencia del movimiento:

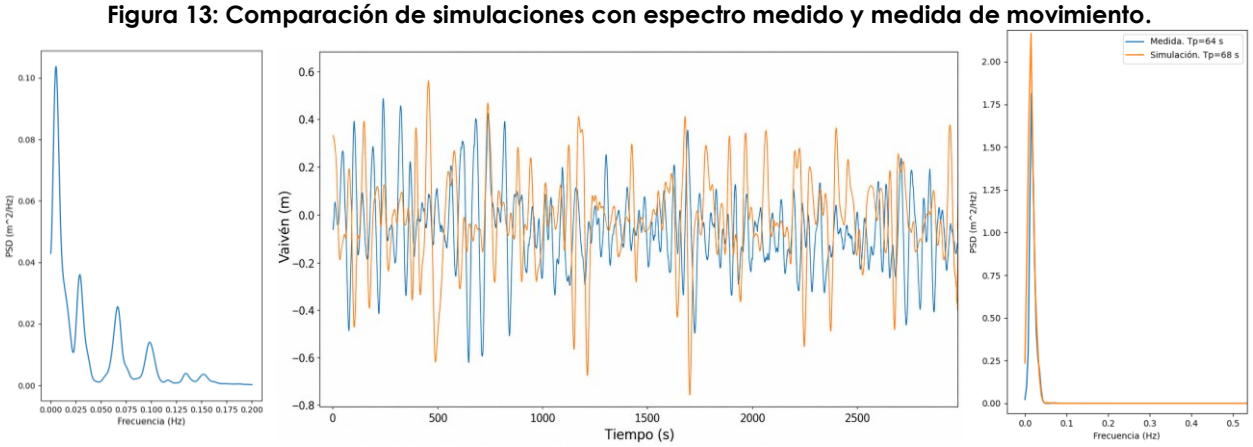
$$S_x(f) == |H_x(f)|^2 \cdot S\eta(f) \qquad (3)$$

Siendo $H_x(f)$ la función de transferencia en frecuencia y $S\eta(f)$ el espectro de energía de la excitación (oleaje). La respuesta será elevada si existe energía donde $H_x(f)$ es grande, aunque la altura significativa global sea moderada. Este mecanismo explica por qué dos espectros con Hs y Tp semejantes pueden producir movimientos de vaivén muy diferentes.

En un caso con espectro medido Hs=0,18 m y Tp=181 s, pero con picos de energía en frecuencias cercanas al período natural del movimiento de surge, el modelo calibrado genera una respuesta del mismo orden y con un periodo comparable al observado. Al sustituir la excitación por espectros teóricos JONSWAP con Hs=0,10 m, el resultado cambia de forma marcada: el caso con Tp próximo a 200 s produce una respuesta baja, mientras que el caso concentrado alrededor de 50 s amplifica excesivamente el vaivén respecto a las medidas. La concentración de energía cerca de la resonancia altera la respuesta aun cuando el nivel global de ola es reducido.

La comparación con espectros sintéticos derivados de medidas confirma la misma tendencia. Formas con parámetros integrales parecidos presentan respuestas distintas cuando cambia la energía disponible entre 50 y 70 s. Una forma cercana al espectro real reproduce mejor la respuesta, mientras que otra con menor contenido energético en esa banda conduce a amplitudes inferiores. En la figura siguiente se observa a la izquierda el espectro de oleaje obtenido de la serie temporal medida. En el centro se muestra el registro de movimiento de surge correspondiente en el tiempo en el tiempo al registro de oleaje analizado, comparado con el registro de surge obtenido en las simulaciones, alimentando el modelo con el espectro de oleaje medido. A la derecha podemos ver los espectros de ambas series temporales. Puede apreciarse la similitud existente entre las series temporales de surge, así como entre los espectros de estas series temporales, presentando ambas un período de pico muy similar

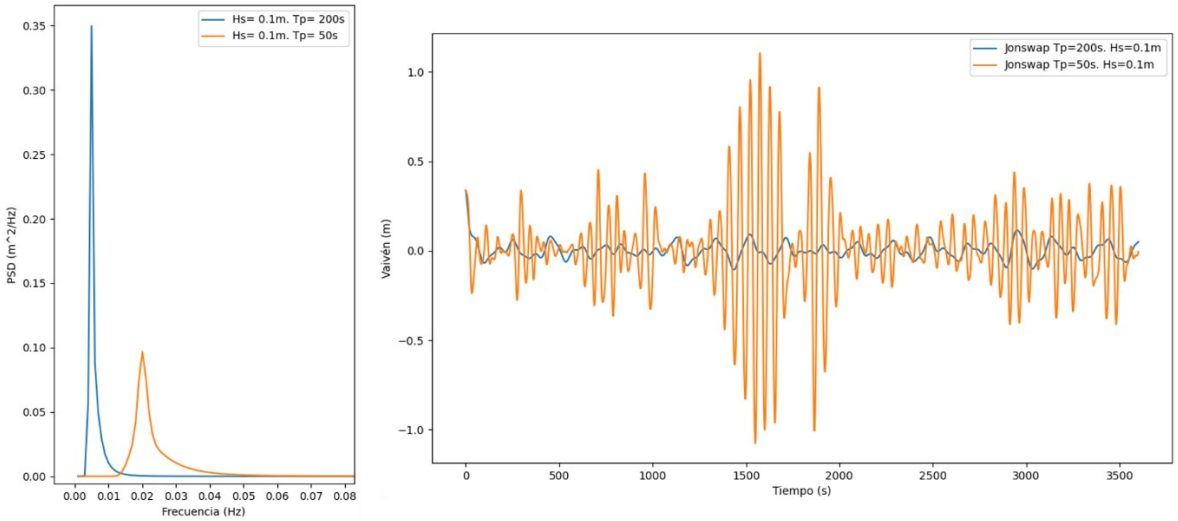
Figura 13: Comparación de simulaciones con espectro medido y medida de movimiento.



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

En la figura siguiente podemos ver resultados de simulaciones con espectros teóricos Jonswap con mismo Hs y diferente Tp. Se aprecia que la respuesta obtenida para el período de pico de 50s, cercano al período de pico del modelo (en torno a 55s), es mucho mayor que la respuesta obtenida con un período de pico de 200s.

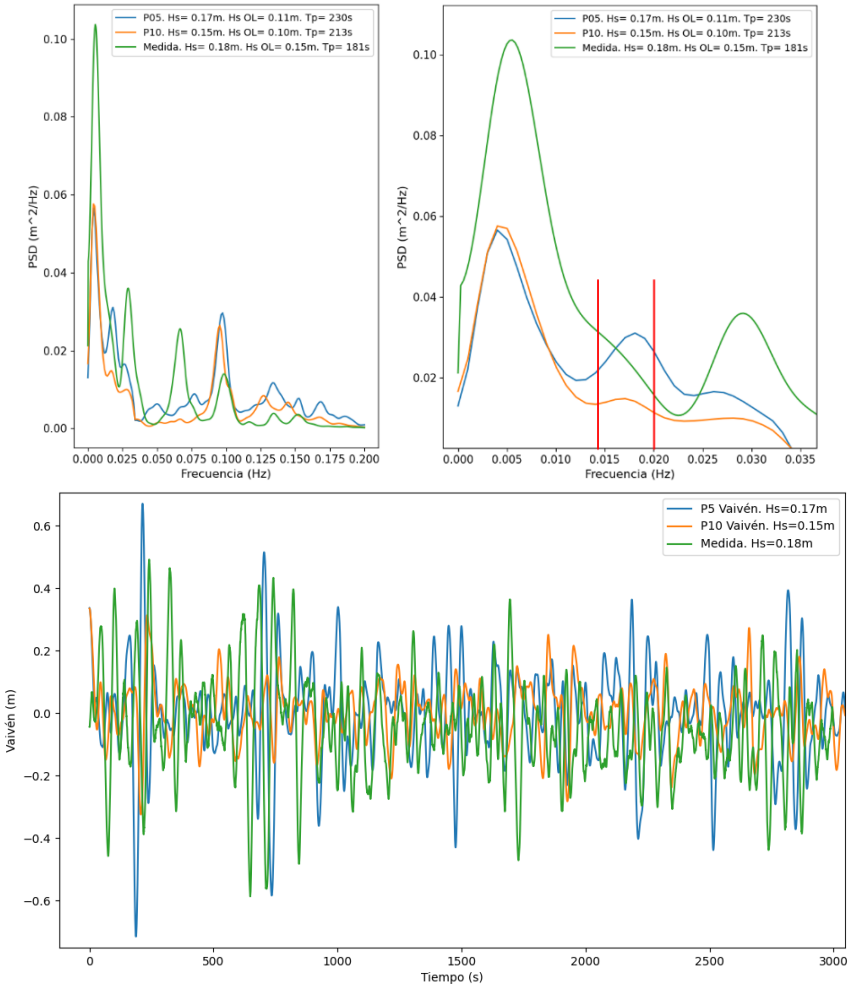
Figura 14: Comparación de simulaciones con espectros JONSWAP.



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

La siguiente figura muestra un ejemplo de comparación de resultados obtenidos con dos espectros prototipados mediante el clustering, junto a una serie temporal de medida. En la parte superior izquierda podemos ver los espectros prototipo de oleaje junto al espectro de medida (verde), disponiendo de un detalle de la zona del período natural de surge a la derecha. En la parte inferior se muestra la serie temporal de surge medida junto a los resultados de las simulaciones para los espectros prototipo. Se aprecia claramente que el resultado para el espectro P5 (azul) es similar a la serie temporal de media de surge, mientras que el resultado para el espectro prototipo P10 resulta en valores máximos de surge muy inferiores al presentar P10 mucha menos energía en la zona del período natural de surge.

Figura 15: Comparación de simulaciones con espectro medido y formas sintéticas basadas en medidas.



Fuente: resultados del proyecto PRESTAMAR. Elaboración propia

La tabla siguiente resume el comportamiento de la respuesta en surge en función de la energía de excitación.

Tabla 3: Efecto cualitativo de la representación espectral en los casos analizados.

Excitación	Distribución de energía	Respuesta observada
Espectro medido	Distribución real multimodal	Orden de magnitud y periodo similares a la medida.
JONSWAP Tp≈200 s	Concentrada en periodo alto	Vaivén reducido.
JONSWAP Tp≈50 s	Concentrada cerca de resonancia	Amplificación excesiva.
Forma sintética medida	Conserva rasgos locales	Depende de energía en 50-70 s.

7 CONCLUSIONES

PRESTAMAR configura una cadena completa desde la medida hasta la decisión operativa. En el piloto del atraque 3 de PETRONOR se integran instrumentación de oleaje y movimiento, simulación hidrodinámica, generación de datos sintéticos, modelos predictivos y una plataforma IoT orientada a anticipar la respuesta del buque atracado.

El análisis confirma que la onda larga debe caracterizarse mediante su distribución espectral. La existencia de energía en torno al periodo natural del vaivén puede dominar la respuesta, incluso con alturas de ola reducidas. Las simulaciones con espectros JONSWAP y con formas sintéticas demuestran que estados con parámetros globales similares pueden producir movimientos muy diferentes.

Por ello, la utilización de espectros medidos y formas típicas obtenidas mediante clusterización constituye una base más robusta para generar datos sintéticos y entrenar modelos de respuesta.

El resultado final es una herramienta capaz de traducir esta información técnica a predicciones y avisos operativos, mejorando la planificación, reduciendo decisiones excesivamente conservadoras y reforzando la seguridad ante condiciones adversas.

8 AGRADECIMIENTOS

PRESTAMAR forma parte del programa Ports 4.0, impulsado por Puertos del Estado. El proyecto está liderado por Siport21 y cuenta con PETRONOR y DeepInsight como socios, TECNALIA como colaborador tecnológico y el Puerto de Bilbao como agente facilitador.

9 REFERENCIAS

Welch, P. D. (1967). "The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms". IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 15(2), 70–73