

## IX SEMINARIO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA Y OPERACIÓN PORTUARIA

### UNA NUEVA GENERACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN SEGURA DE ATRAQUE BASADO EN EL ANÁLISIS DINÁMICO DE BUQUES AMARRADOS

FLORIAN MONETTI<sup>1</sup>, BENJAMIN HERNANDEZ<sup>2</sup>

#### 1. RESUMEN

Al igual que muchos puertos a nivel mundial, los puertos de América del Sur sufren de periodos de cierre ordenados por reglas portuarias conservadoras establecidas por las autoridades vigentes en respuesta a las condiciones meteo-marinas. Muchos terminales portuarios operan con umbrales estáticas de viento y olas para garantizar la seguridad de los buques y de los trabajadores. Sin embargo, aún ocurren cortes de líneas de amarre y ventanas seguras de atraque siguen sin explotarse. Se requiere un enfoque dinámico que integre las características de cada buque, la configuración de atraque y las variaciones de las condiciones meteo-marinas para lograr una planificación operativa optimizada y segura. Este documento presenta una nueva generación de sistemas de apoyo que se han desarrollado en conjunto con puertos para una toma de decisiones informada basada en pronósticos dinámicos de condiciones de atraque. Tales sistemas integran pronósticos meteorológicos locales y predicciones dinámicas de respuesta de buques amarrados. Su despliegue permite lograr una planificación operativa más eficiente y segura, anticipando interrupciones de las operaciones de transferencia de carga debido a movimientos excesivos de los buques atracados con varios días de anticipación. Estos resultados destacan cómo los sistemas dinámicos de gestión de atraque pueden ayudar a las autoridades portuarias y a los operadores de terminales a adoptar procedimientos adecuados para reducir los cierres de puertos y mejorar la planificación de sus servicios de muellaje y transferencia de carga. Esta tecnología puede ayudar los puertos chilenos a optimizar sus capacidades existentes antes de evaluar mejoras costosas de sus infraestructuras.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Costero Senior, DHI Group – Seaport OPX, [flmo@dhigroup.com](mailto:flmo@dhigroup.com)

<sup>2</sup>Ingeniero Costero, DHI Group, [beha@dhigroup.com](mailto:beha@dhigroup.com)

## 2. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, la globalización y la estandarización en la industria del transporte marítimo han aumentado significativamente la competencia entre los puertos. La eficiencia de las operaciones, la gestión de los costos, la conectividad interior y la proximidad con las áreas de importación y exportación, las instalaciones portuarias y la calidad de los servicios brindados suelen impulsar la competitividad del puerto. El incremento de la competencia entre puertos ha aumentado la presión sobre los operadores de terminales para maximizar las ventanas de atraque, reducir demoras, acomodar buques cada vez más grandes y optimizar las operaciones de carga y descarga sin poner en peligro la seguridad. Las autoridades portuarias deben adoptar regulaciones y procedimientos operativos efectivos y seguros sin reducir significativamente la operatividad de los terminales.

Al igual que muchos puertos al nivel mundial, los puertos del oeste de América del Sur sufren de cierres y tiempos de inactividad ordenados por reglas portuarias conservadoras establecidas por las autoridades en respuesta a condiciones climáticas adversas. Las interrupciones en las operaciones de atraque y transferencia de cargo impactan directamente la cadena de suministros y la competitividad de estos puertos a largo plazo. En el contexto del cambio climático, es probable que los escenarios meteorológicos desafiantes se vuelvan más frecuentes e intensos, lo que dificultará aún más la planificación operativa y estratégica de los puertos. Como respuesta, múltiples puertos recurren a costosas, y, a veces, innecesarias mejoras de infraestructuras y equipos, aunque existen soluciones tecnológicas rentables para ayudar a los puertos a enfrentar estos desafíos.

En muchos puertos, las ventanas seguras de atraque se definen usando umbrales estáticos de viento y olas en alta mar para reducir los riesgos mediante el cierre de puertos o la reducción de las operaciones en el muelle. Tal enfoque no permite lograr una planificación operacional optimizada y no garantiza la seguridad de los buques y trabajadores para todos los escenarios de atraque y condiciones meteo-marinas.

Lograr una planificación operacional segura y eficiente requiere un enfoque dinámico que integre las características específicas de cada buque programado, las configuraciones de atraque y las variaciones de las olas, vientos e hidrodinámica durante los períodos de atraque.

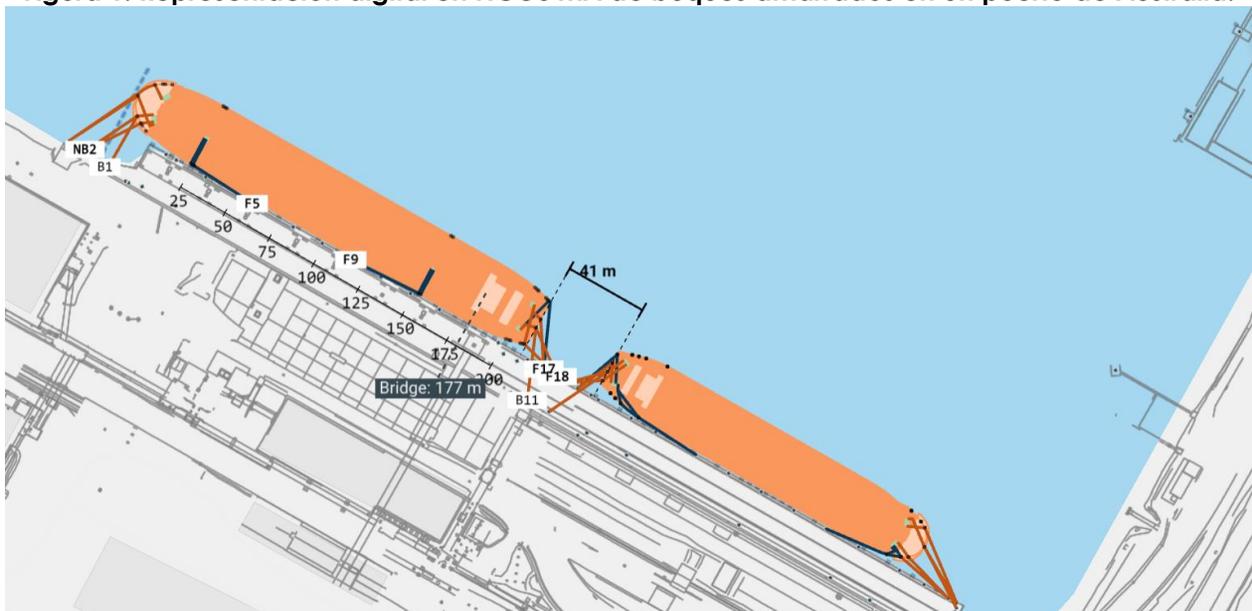
Este documento presenta una nueva generación de sistemas de apoyo robustos y exhaustivamente probados para la planificación operativa de atraque que integra el pronóstico de los movimientos de los buques amarrados, la tensión en las líneas de amarre y las cargas sobre los equipos e infraestructuras de amarre. Este marco integra pronósticos meteorológicos locales precisos y predicciones dinámicas de respuesta de buques amarrados gracias a una digitalización tridimensional de los buques y sistemas de atraque. La implementación de esta nueva generación de sistemas en varios puertos del mundo, sujetos a condiciones marítimas desafiantes, ha contribuido a maximizar las operaciones de atraque, respaldar la toma de decisiones operacionales, mejorar la seguridad y crear marcos para la mejora de infraestructuras específicas y equipos críticos sin proceder con grandes inversiones a veces innecesarias. Este enfoque ayudó también a las autoridades portuarias a adoptar regulaciones y procedimientos seguros y efectivos para reducir los cierres de puertos y respaldar algunas decisiones críticas bajo presión.

### 3. PRONÓSTICOS DE ATRAQUE EXTENDIDOS A 7 DÍAS

NCOS Online Mooring Analysis (NCOS MA) es un sistema digital de gestión segura de atraque que garantiza una mejor planificación operacional de atraque. Este sistema se basa en el uso combinado de pronósticos meteorológicos, datos medidos y modelación de respuesta de buque para pronosticar condiciones de atraque óptimas y seguras. Los puertos disponen de una herramienta que ayuda a una gestión de riesgo más eficiente gracias al pronóstico con 7 días de anticipación de las condiciones meteo-marinas, y a una evaluación automática y optimizada de las configuraciones de atraque en cualquier muelle. NCOS MA ofrece una alternativa fiable al uso de umbrales estáticos demasiado conservadores que causen demoras y costos innecesarias.

El cálculo de las interacciones complejas entre el buque amarrado, las infraestructuras y equipos de atraque y las condiciones ambientales se realizan a través de una representación digital (o *Digital Twin*) de los puertos, accesible a través de un portal web fácil de usar. El sistema ejecuta miles de iteraciones de arreglos de amarre a través de un algoritmo de amarre inteligente y automatizado que recomienda un arreglo de amarre óptimo para cada barco en el muelle según las normas de la industria portuaria, normas específicas de cada puerto y las mejores prácticas. La Figura 1 ilustra cómo NCOS MA representa las embarcaciones y la configuración de amarres en un puerto de Australia.

**Figura 1: Representación digital en NCOS MA de buques amarrados en un puerto de Australia.**



NCOS MA calcula la respuesta del buque amarrado a los forzantes utilizando un solver de paneles 3D completamente dinámico, que incluye el efecto no lineal de las fuerzas de amarre y los modos de resonancia del buque. La predicción dinámica de alta precisión de la respuesta de buques amarrados se encuentra impulsada por una representación precisa de los campos de corrientes, elevación del mar, vientos y olas que se pronostican combinando el uso de modelos numéricos, técnicas de asimilación de datos en tiempo real y algoritmos de aprendizaje automático.

En regiones expuestas a fuertes marejadas tales como Chile, muchos puertos están sujetos a campos de olas complejos en las dársenas y a lo largo de los muelles que mezclan la difracción de las olas alrededor de los rompeolas, la reflexión de las estructuras portuarias, las olas incidentes de largo período (LPW) y los fenómenos de resonancia. Por lo tanto, NCOS MA integra un marco de pronóstico innovador que tiene en cuenta los efectos de estos complejos campos de olas en el movimiento de los buques atracados. NCOS MA emite automáticamente advertencias y alertas cuando ocurren condiciones adversas que pueden provocar cortes de líneas de amarre o cargas excesivas sobre las infraestructuras y equipos de amarre, como bitas y ganchos. Tales incidentes son generalmente difíciles de anticipar utilizando métodos estáticos, ya que se requiere cuantificar el efecto combinado de múltiples forzantes sobre el movimiento del buque amarrado. El movimiento de buque se ve afectada por un amplio rango de mecanismos asociados con la velocidad y la dirección del viento, la altura, dirección y frecuencia de las olas, las velocidades de corriente, las variaciones del nivel del agua, la tensión en las líneas de amarre, el tipo y capacidad de las líneas de amarres, la configuración del atraque y el tránsito de otros buques. Durante décadas, la tecnología no permitió pronosticar la respuesta de los buques amarrados con varios días de anticipación ya que los modelos numéricos y algoritmos de pronóstico requerían recursos computacionales inaccesibles. Las autoridades portuarias y los operadores de terminales utilizaron reglas estáticas para compensar la falta de información y poder garantizar la seguridad. Sin embargo, los umbrales estáticos suelen a ser demasiado conservadores para la mayoría de los escenarios de atraque y, a veces, no son lo suficientemente seguros para algunas situaciones específicas. La metodología que se detalla a continuación considera todos los parámetros críticos para el pronóstico dinámico de condiciones de atraques.

#### **a. Pronósticos meteo-marinos**

El pronóstico dinámico de condiciones de atraque requiere como primer paso el despliegue de un sistema de predicción de corrientes, olas, vientos y elevación del nivel del mar con una resolución suficiente a la escala del puerto. Debido a la complejidad de estos procesos físicos en zonas portuarias, se debe disponer de modelos numéricos calibrados y validados con los datos medidos disponibles en el puerto y su cercanía para mantener la confianza en los pronósticos y poder gestionar de forma eficaz y segura la planificación operacional de atraque.

NCOS MA se basa en un marco integrado de modelos numéricos, procesos de asimilación de datos medidos y algoritmos correctivos de aprendizaje automático para predecir de forma precisa todos los parámetros físicos requeridos con siete días de anticipación. La comparación en tiempo real entre los pronósticos meteo-marinos y las mediciones en NCOS MA permiten una gestión controlada del riesgo tomando en cuenta la incertidumbre asociada con el pronóstico del clima.

El resguardo bajo quilla (UKC), la altura máxima de la obra muerta y la respuesta del buque a la hidrodinámica son necesarios para determinar las condiciones de atraque de buques. El nivel de agua asociado y los campos de corrientes se predicen en NCOS MA a lo largo de los muelles utilizando los modelos MIKE 21/3 FM (MIKE by DHI, 2022). Las correcciones se aplican en tiempo real mediante la asimilación de datos medidos transmitidos al sistema.

**Figura 2: Gráficos indicativos de pronósticos de olas, elevación de la superficie y vientos en NCOS Online para un puerto de Australia. La línea vertical rosada indica el tiempo presente. Se muestran comparaciones entre datos medidos y datos pronosticados durante los 3 últimos días.**

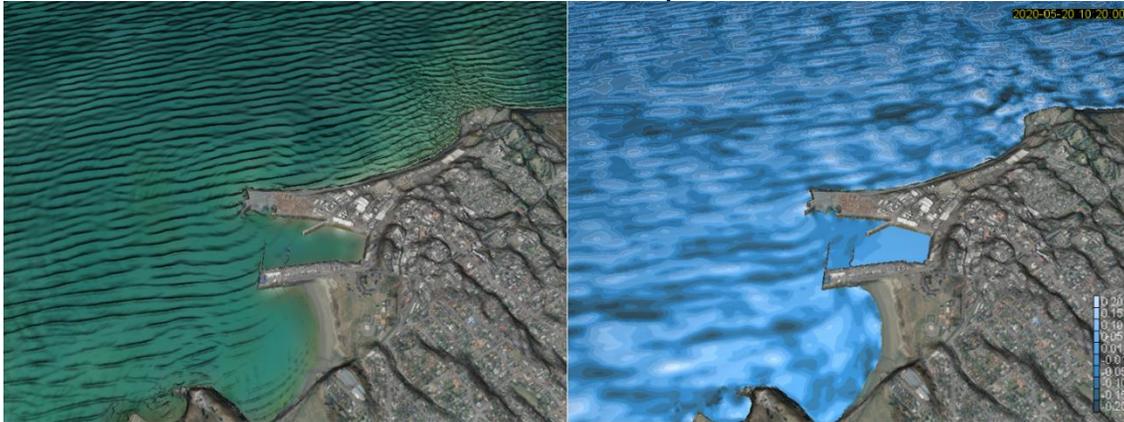


Los campos de olas, incluyendo las olas de período largo (LPW), se pronostican en todos los puntos de atraque mediante el acoplamiento del pronóstico de olas espectrales en alta mar con una matriz de escenario de olas de período largo de marejada interna preestablecida. Las olas de período largo se definen típicamente por períodos de olas en el rango de 25 a 300 segundos, y su amplitud no excede los 40 a 50 cm. Dichas olas causan problemas significativos para el atraque de buques en regiones expuestas a grandes oleajes, como la costa occidental de América del Sur, donde las frecuencias de las olas pueden alinearse con las frecuencias naturales de los buques y de los sistemas de amarre.

Los modelos numéricos espectrales de olas se implementan típicamente debido a su alta precisión en áreas costeras y de mar abierto y su bajo costo computacional. Sin embargo, no simulan los procesos físicos de reflexión, difracción y de transformación espectral no lineal que originan las olas de largo periodo. Para este propósito, se requiere un tipo diferente de modelos numéricos de olas, llamado modelos de resolución de fase de olas. Estos modelos numéricos son computacionalmente costosos, lo que hace que su implementación para ejercicios de pronóstico sea muy compleja con la tecnología existente.

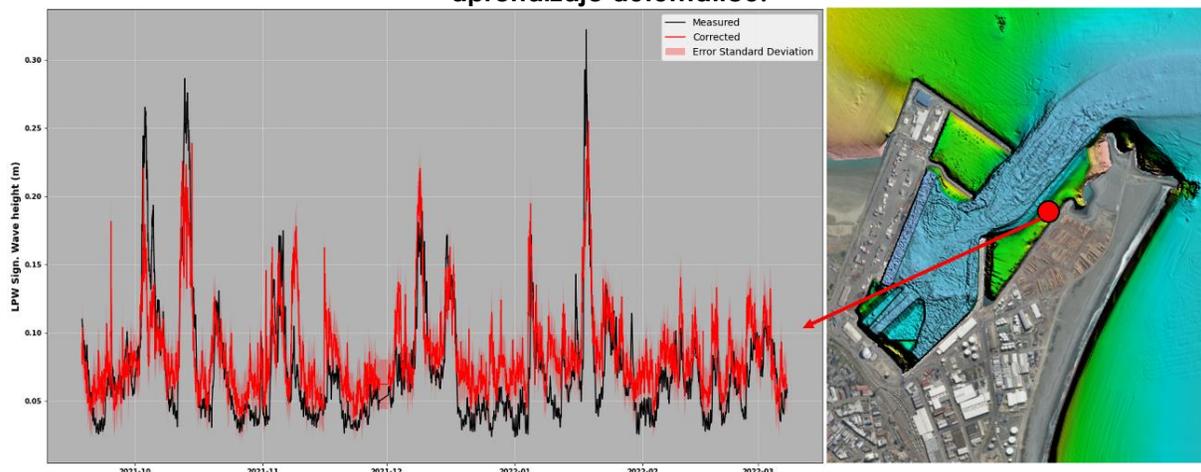
Por lo tanto, se desarrolló una solución que integra simulaciones de escenarios preestablecidos de olas utilizando el modelo tridimensional MIKE 3 Wave FM (DHI, 2022) y el pronóstico de olas espectrales costa fuera para predecir las condiciones de las olas en dársenas. MIKE 3 Wave FM es un modelo de olas de última generación basado en las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS) y la reproducción explícita de la evolución de la superficie del mar y el campo de velocidad utilizando capas sigma. Además de la física resuelta por los modelos espectrales de oleaje, MIKE 3 Wave FM captura la transmisión y la reflexión de las olas, los procesos hidrodinámicos, los procesos de transformación no lineal y los mecanismos de rotura de las olas tal como se presenta en la Figura 3.

**Figura 3: Modelación numérica 3D de olas de swell (periodos de 8 – 25 sec) y de periodo largo (25 – 300 sec) con el modelo numérico MIKE 3 Wave FM aplicado para generar una matriz de condiciones de olas en la dársena de un puerto en Nueva Zelanda.**



Se emplea el modelo numérico MIKE 3 Wave FM para simular todos los escenarios representativos del clima de oleaje con el fin de construir una base de datos de elevaciones de superficie y flujos en la dársena. El pronóstico de campos de oleaje se realiza mediante el acoplamiento de la matriz de transformación de olas costa afuera-costa adentro y el pronóstico de olas espectrales costa afuera. Finalmente, se aplica un algoritmo correctivo de aprendizaje automático basado en múltiples parámetros físicos como la altura, el periodo y la dirección de propagación del swell, el nivel de marea y los modos espectrales de las olas para corregir los sesgos de transformación en los escenarios de la matriz de olas disponibles. Al final del proceso, se valida el pronóstico de olas de periodo largo en el muelle a partir de datos medidos no usados para el aprendizaje automático. Un ejemplo de validación de pronóstico de olas de periodo largo para un puerto en Nueva Zelanda se presenta en la Figura 4.

**Figura 4: Validación del sistema de pronóstico de olas de largo plazo en un puerto de Nueva Zelanda combinando el uso de la modelación numérica y de algoritmos correctivos de aprendizaje automático.**

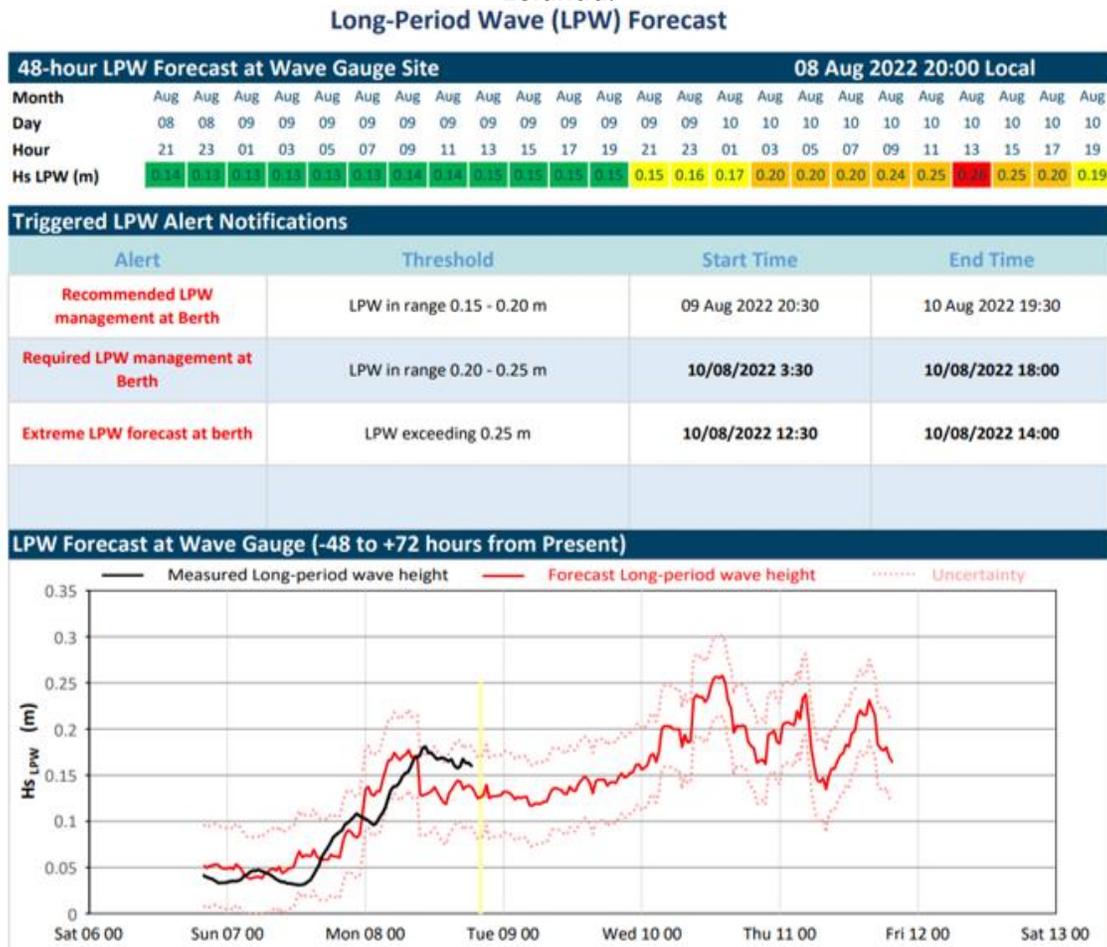


Además del uso de estos pronósticos de campos de olas para el análisis dinámico de buques amarrados, se emiten notificaciones al puerto cuando el nivel de las olas de largo periodo supera niveles de control, tal como se presenta en la Figura 5.

Las velocidades de corriente pronosticadas con MIKE 21/3 FM se suman a las velocidades de corrientes inducidas por las olas proporcionadas por MIKE 3 Wave FM para el análisis dinámico de amarre. Una descripción completa de la metodología para pronósticos los campos de olas en las dársenas esta presentada en Suhr et al. (2021).

Los campos de viento se extraen a partir de productos atmosféricos globales y regionales, o modelos atmosféricos WRF (Skamarock and Klemp, 2008) de alta resolución desarrollado específicamente para los puertos. La elección de la fuente de información que se utiliza depende de la complejidad del clima y de su impacto sobre las operaciones de atraque. Cuando es necesario reducir los sesgos sistémicos en el pronóstico, se aplican también algoritmos correctivos, los que son determinados al comparar los resultados del modelo con las mediciones.

**Figura 5: Ejemplo de informe automático generado por NCOS Online que presenta riesgos potenciales debido a condiciones desafiantes de olas de largo periodo en un puerto de Nueva Zelanda.**

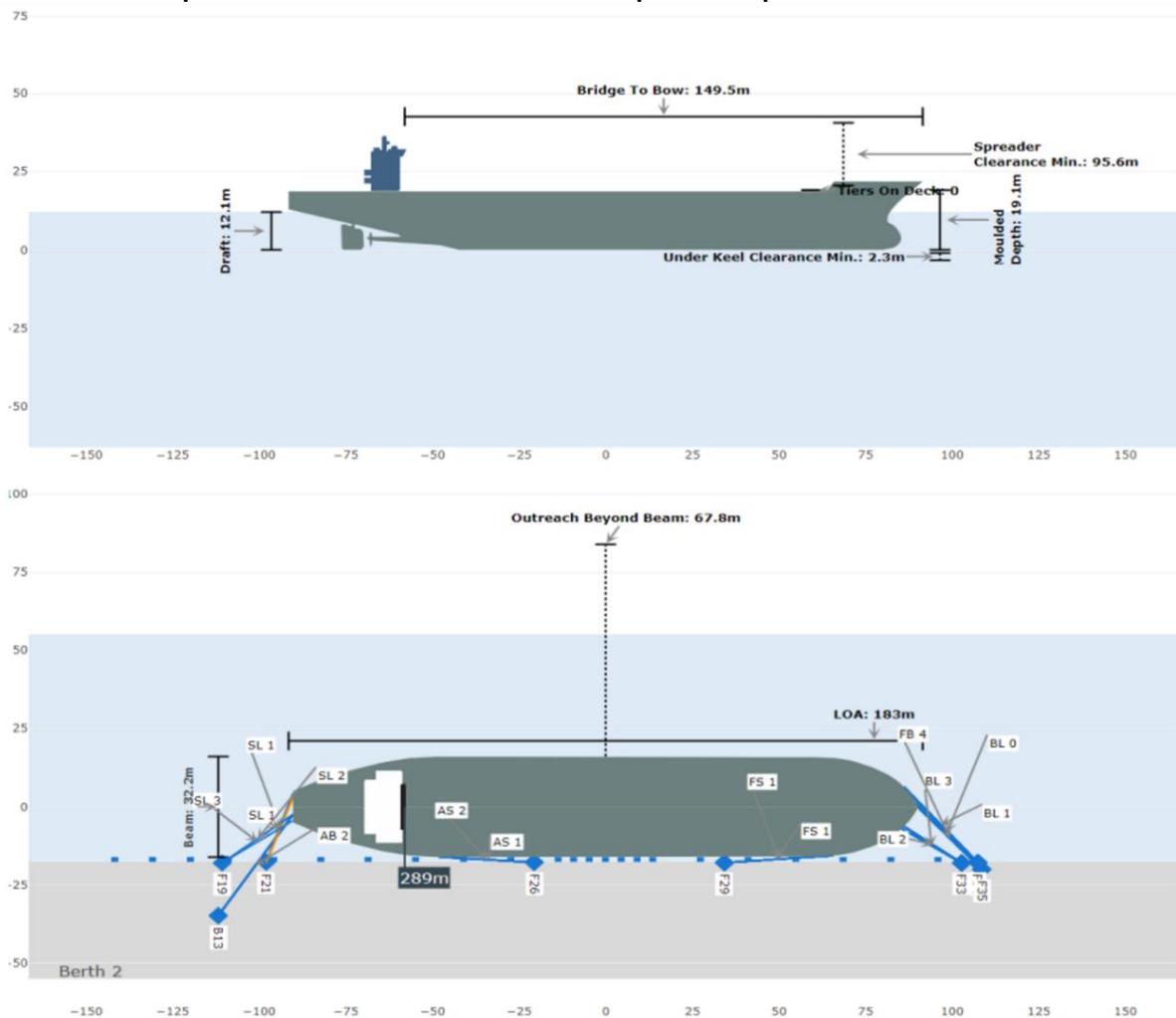


## b. Análisis dinámico de buque amarrado

NCOS MA pronostica dinámicamente el movimiento de los buques y las fuerzas que se aplican sobre las líneas y los equipos de amarre. El sistema proporciona también un análisis de los planes de ataque para identificar las condiciones meteo-marinas limitantes, y determinar la configuración de amarre óptima según las condiciones pronosticadas.

Durante la etapa de implementación del sistema, se lleva a cabo un proceso de digitalización de los muelles, de la ubicación tridimensional de las bitas de amarre, defensas y ganchos, y de la batimetría en la zona de atraque. Se definen también las cargas máximas de los equipos de amarre, y las fuerzas de reacción máxima y las curvas de reacción-deflexión de las defensas.

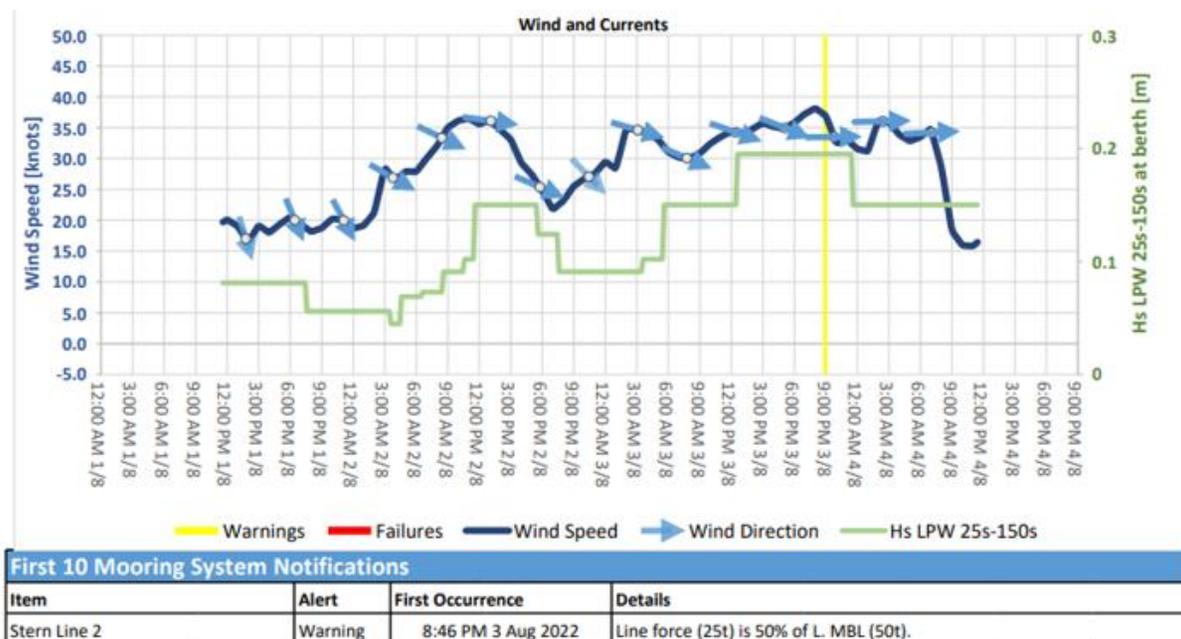
**Figura 6: Posicionamiento y configuración del buque amarrado en NCOS MA. El sistema pronostica las condiciones de atraque en un puerto de Australia.**



Una vez implementado, el sistema permite agregar cualquier nuevo escenario ingresando el nombre del buque. Todas las especificaciones del buque se completan automáticamente a partir de una biblioteca integrada en NCOS MA, excepto la condición de carga y la altura metacéntrica que debe ser ingresado por los operadores. La siguiente etapa consiste en seleccionar la zona de atraque, para la cual se realiza un proceso de preselección con el fin de filtrar las zonas que no disponen de la profundidad o de la capacidad de atraque requerida para el buque seleccionado. Se elige luego una configuración de amarre dentro de las configuraciones estándares definidas, y el sistema proporciona la longitud y el ángulo óptimos de las líneas de amarre teniendo en cuenta el número máximo de líneas para cada bita de amarre. El usuario tiene la posibilidad de cambiar fácilmente estos arreglos y mover el buque a lo largo del muelle.

Una vez ingresados los detalles del escenario, NCOS MA genera el fichero de configuración correspondiente para ejecutar el motor de análisis de amarre MIKE 21 MA (DHI, 2022c) que simula el movimiento del buque amarrado tomando en cuenta los datos ingresados por el operador, la configuración de atraque, las características del buque, el plan de líneas y las condiciones ambientales pronosticadas.

**Figura 7: Resultados del análisis dinámico sobre un periodo de 3 días del buque amarrado ilustrado en la Figura 6 tal como se presentan en el informe que se genera de manera automática en NCOS MA. Estos resultados incluyen los pronósticos de viento y ondas de largo periodo, así como una notificación de una posible excedencia de la carga máxima de una línea de popa.**



Cada configuración de MIKE 21 MA corresponde a un solo paso de tiempo en las condiciones ambientales pronosticadas para lo cual el análisis del buque amarrado se ejecuta durante al menos una hora en tiempo modelo. Las cargas máximas sobre las infraestructuras y equipos de

amarre y la tensión en las líneas de amarre se procesan posteriormente para cada modelo junto con los movimientos de la embarcación. La última etapa consiste en generar series temporales de carga máxima prevista y movimiento de buque durante todo el período de pronóstico.

Se genera automáticamente un informe que contiene gráficos y tablas detallando las condiciones de atraque para cada buque programado (Figura 6 y Figura 7) en conjunto con los pronósticos meteo-marinos. Se envían alertas por correo o mensaje al puerto para notificar cuando un riesgo de incidente o cuando la fuerza sobre un elemento del sistema de atraque está cerca de sobrepasar su máxima capacidad. El proceso de análisis dinámico de buque amarrado se repite automáticamente a cada actualización de los pronósticos meteo-marinos cada 6 o 12 horas. El sistema proporciona toda la información necesaria para poder programar y acomodar los buques con seguridad y eficiencia con 7 días de anticipación mediante su portal web integrado lo cual permite:

- ✓ evitar cortes de líneas o ruptura de bitas de amarre
- ✓ optimizar la configuración de amarre según el buque, la configuración del muelle y las condiciones meteo-marinas pronosticadas
- ✓ interrumpir las operaciones de transferencia de carga cuando no se puede garantizar la seguridad
- ✓ reducir y anticipar retrasos potenciales debidos a condiciones meteo-marinas desafiantes tales como marejadas
- ✓ reanudar las operaciones de (des)carga en el momento adecuado para una maximización de las capacidades
- ✓ evitar incidentes de colisión con grúas o de encalladura al muelle

#### **4. CONCLUSION**

Los avances tecnológicos y la mayor capacidad computacional disponible hoy en día permiten el despliegue de sistemas de pronósticos dinámicos de buques amarrados, para planear con mayor seguridad y eficiencia el atraque de buques en puertos, las operaciones de muellaje y transferencia de carga. Lo cual no es posible usando umbrales estadísticas de olas y vientos. Tales sistemas proporcionan la base de información necesaria para respaldar la toma de decisiones de las autoridades portuarias en cuanto a cierres de puerto, reducción de operaciones y configuración óptima de amarres según el contexto meteo-marino. Los análisis dinámicos de buques amarrados requieren pronósticos meteo-marinos precisos en las dársenas los cuales deben incluir todos los parámetros físicos que influyen el movimiento de los buques y las cargas resultantes en los elementos de amarre.

Mientras muchos sistemas operacionales proporcionan pronósticos de corrientes, elevación de la superficie y viento, la predicción de campos de olas en dársenas representa un reto dada la complejidad de los procesos físicos involucrados y los recursos computacionales requeridos para el despliegue los modelos numéricos en operación. Este documento proporciona un marco integrado para el pronóstico de olas en dársenas y su impacto sobre los buques amarrados, incluyendo el efecto de las olas de largo periodo que afectan significativamente el movimiento de buques amarrados.

## REFERENCIAS

- DHI, 2022a. MIKE 3 Wave Model FM, Hydrodynamic Module, Scientific Documentation.
- DHI, 2022b. MIKE 3 Wave Model FM, Hydrodynamic Module, Validation Report.
- DHI, 2022c. MIKE 21 Maritime, Frequency Response Calculator and Mooring Analysis, Scientific Documentation.
- DHI, M. by, 2022. MIKE 21 and MIKE 3 flow model FM - Hydrodynamic and Transport Module.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., 2008. A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *J. Comput. Phys.* 227, 3465–3485.
- Suhr, J., Monetti, F., Womersley, T.J., 2021. Forecasting Long Period Wave Events using 3D wave models and Machine Learning for Dynamic Mooring Analysis, Australasian Coasts and Ports 2021, Christchurch, New Zealand.