

UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Herramientas de análisis y predicción del comportamiento de buque atracado en operaciones de carga y descarga. Aplicación a los Puertos Interior y Exterior de A Coruña



TESIS DOCTORAL

Andrés Figuero Pérez

Año 2020



Herramientas de análisis y predicción del comportamiento de buque atracado en operaciones de carga y descarga. Aplicación a los Puertos Interior y Exterior de A Coruña

Autor: Andrés Figuero Pérez

Tesis doctoral UDC / 2020

Directores:

Enrique Peña González

José Sande González-Cela

Programa de doctorado en Ingeniería Civil



Los abajo firmantes hacen constar que son los directores de la Tesis Doctoral titulada **“Herramientas de análisis y predicción del comportamiento de buque atracado en operaciones de carga y descarga. Aplicación a los Puertos Interior y Exterior de A Coruña”** realizada por **Andrés Figuero Pérez**, cuya firma también se incluye, en el marco del Programa de Doctorado en Ingeniería Civil de la Universidade da Coruña, dando consentimiento para su presentación y posterior defensa.

Directores:

Fdo.: Enrique Peña González

Fdo.: José Sande González-Cela

Doctorando:

Fdo.: Andrés Figuero Pérez

A mi familia y a Lorena

A Dani

Agradecimientos

Ya han pasado más de seis años desde aquel diciembre de 2013 cuando empecé a trabajar con Enrique Peña. Solo iban a ser dos meses. En aquel momento no pasaba por mi cabeza la idea de hacer una Tesis Doctoral y, sin embargo, mira dónde nos encontramos.

Es por eso que quiero comenzar agradeciendo a Quique, mi director de Tesis y amigo, la oportunidad y la confianza que depositó en mí. Muy probablemente mi vida sería muy distinta a lo que es hoy si nuestros caminos no se hubieran cruzado.

A José Sande, mi otro director, compañero y amigo. Pasamos muchas horas juntos, casi más que con nuestras mujeres. Nos conocimos durante la carrera, y míranos ahora, compañeros de despacho. Muchas gracias por tu ayuda y apoyo, no solo con esta Tesis.

A mis compañeros, los que están ahora y a los que en algún momento formaron parte del Grupo, en especial a Fernando, con quien tuve la suerte de trabajar varios años. Gracias también a Alberto y a Álvaro, por todas sus aportaciones.

Al personal del CITEEC, especialmente a los compañeros de la Oficina Técnica, a Félix y a JuanRa por su ayuda con la “cacharrada”.

Agradecer a la Autoridad Portuaria de A Coruña la confianza depositada en nuestro Grupo y su apuesta por el I+D, sin esta aportación no hubiera sido posible desarrollar esta Tesis.

Mi agradecimiento a la tripulación de todos los buques que han participado en el estudio, a los consignatarios y a los responsables de la Terminal de Repsol, gracias por vuestra paciencia y colaboración.

A mis padres, que me enseñaron a ser como soy y me dieron la libertad de decidir el camino a tomar. A mi hermano Luis, hemos pasado momentos muy duros juntos y aunque eres el pequeño (y con mucha diferencia) tu apoyo me ha ayudado siempre. A Rocío, más que mi tía es mi hermana mayor. También a mis abuelos, que suerte he tenido de disfrutar de vosotros.

A Lorena mi compañera de vida, gracias por tu paciencia, tu apoyo y ayuda. Eres el complemento que necesito.

Especialmente a Dani, mi hermano, siempre conmigo.

Índice

Índice de Figuras	V
Índice de Tablas.....	XI
Resumen.....	XV
Resumo	XVII
Abstract	XIX
Capítulo 1: Introducción	1
1.1. Análisis del comportamiento de buque atracado	6
1.1.1. Modelización física a escala reducida	7
1.1.2. Modelización numérica	10
1.1.3. Estudios en prototipo.....	13
1.2. Umbrales operativos	16
1.3. Herramientas para la gestión de la operatividad	21
Capítulo 2: Objetivos.....	25
Capítulo 3: Herramientas para la monitorización <i>in-situ</i> de los movimientos del buque atracado	27
3.1. Introducción.....	27
3.2. Unidad de medida inercial (IMU).....	27
3.3. Sistema de seguimiento por imagen basado en técnicas de visión artificial	35
3.3.1. Calibración del algoritmo.....	37
3.3.2. Selección de los puntos de seguimiento.....	39
3.3.3. Proceso de búsqueda	39
3.3.4. Seguimiento a largo plazo.....	41

3.4. Validación de las técnicas en laboratorio	43
3.5. Validación en campo (prueba de concepto)	51
3.5.1. Resultados de la unidad IMU	53
3.5.2. Resultados de la técnica de seguimiento por imagen	57
Capítulo 4: Evaluación de las condiciones operativas en puerto mediante técnicas monitorización en campo.....	61
4.1. Introducción	61
4.2. Caso de estudio: Puerto Interior de A Coruña.....	62
4.3. Metodología de análisis.....	63
4.3.1. Análisis de datos.....	65
4.4. Flota de estudio.....	67
4.5. Movimientos del buque atracado. Comparación con los umbrales operacionales...	69
4.6. Influencia de las condiciones marítimas y la localización del atraque sobre los movimientos del buque atracado.....	77
4.6.1. Análisis de correlación entre los movimientos del buque atracado y el clima marítimo	77
4.6.2. Análisis en el dominio de las frecuencias	82
Capítulo 5: Desarrollo de una herramienta de predicción del comportamiento de buque atracado y ayuda a la toma de decisiones en la operatividad portuaria.....	87
5.1. Introducción	87
5.2. Prueba de concepto: Puerto Exterior de A Coruña.....	88
5.3. Obtención de los datos de partida	89
5.4. Base de datos	96
5.5. Metodología de cálculo.....	98
5.6. Resultados de la modelización	100
5.6.1. Análisis de correlación y selección de variables predictoras	100

5.6.2.	Obtención de los modelos de cada movimiento	102
5.6.3.	Validación de los modelos	106
Capítulo 6: Conclusiones y Futuros Desarrollos		109
ANEXO I: Artículos publicados en el JCR para la tramitación de la Tesis Doctoral por compendio de publicaciones.....		115
ANEXO II: Otros artículos indexados en bases de datos SCOPUS/WOS relacionados con la Tesis Doctoral		183
Bibliografía.....		203

Índice de Figuras

Figura 1. Terminal de contenedores APM Terminals Algeciras. Fuente: Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras (https://www.apba.es/contenedores).....	2
Figura 2. Esquema de los posibles movimientos de un buque atracado.	4
Figura 3. Esquema de amarre tipo.....	5
Figura 4. Dispositivo para la monitorización de los movimientos de buque atracado. Fuente: Jensen et al. (1991).	14
Figura 5. Esquema de funcionamiento del gestor de tiempos de maniobra. Fuente: Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras (innovacion.apba.es).	22
Figura 6. Movimientos de rotación de un buque amarrado: cabeceo (Pitch), balance (Roll) y guiñada (Yaw).....	28
Figura 7. IMU y ordenador de control y almacenamiento de datos instalados en el interior del puente de mando de un buque.	29
Figura 8. Ejemplo de esquema de adquisición de imágenes para la obtención de los movimientos de alzada, vaivén y cabeceo del buque (izq.). Imagen procesada con los puntos de control y los vectores de desplazamiento (dcha.).	37
Figura 9. Dispositivo IMU colocado en la parte superior del balancín con patrón de ajedrez utilizado para registrar las oscilaciones con el sistema de visión artificial situado en el plano longitudinal (izq.) y en el plano transversal (dcha.).....	43
Figura 10. Registro del movimiento del balancín con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje longitudinal perpendicular al eje de oscilación (izq.). Ampliación del primer ciclo de oscilación de la misma prueba (dcha.).....	44
Figura 11. Registro del movimiento del balancín con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje transversal perpendicular al eje de oscilación (izq.). Ampliación del primer ciclo de oscilación de la misma prueba (dcha.).....	44
Figura 12. Montaje para los ensayos de validación con péndulo simple.	46

Figura 13. Movimiento oscilatorio del péndulo registrado con la técnica de seguimiento por imagen y la IMU en posición longitudinal (eje Y) durante los ensayos de amplitud 2.0° (izq.) y 0.5° (dcha.).....	47
Figura 14. Movimiento oscilatorio del péndulo registrado con la técnica de seguimiento por imagen y la IMU en posición transversal (eje X) durante los ensayos de amplitud 2.0° (izq.) y 0.5° (dcha.).....	47
Figura 15. Montaje experimental de los ensayos en el canal de ola-corriente del CITEEC.	49
Figura 16. Registro del movimiento de cabeceo (<i>pitch</i>) registrado durante el ensayo a largo plazo para la validación de la corrección de la deriva de la unidad IMU.....	49
Figura 17. Fragmento del registro del movimiento de cabeceo (<i>pitch</i>) durante los ensayos de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.5 Hz (izq.) y de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.7 Hz (dcha.).....	50
Figura 18. Espectro de frecuencias del movimiento de cabeceo (<i>pitch</i>) registrado durante los ensayos de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.5 Hz (izq.) y de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.7 Hz (dcha.).....	50
Figura 19. Buque <i>Urania Mella</i> atracado en las instalaciones del Puerto Exterior de Punta Langosteira (A Coruña) durante la campaña de monitorización. Fuente: elaboración propia	51
Figura 20. Puerto Exterior de Punta Langosteira, A Coruña (geometría del puerto durante la ejecución de la campaña de campo). Zona de atraque del buque <i>Urania Mella</i> y localización de los equipos de monitorización del oleaje (Radar Miros y boya de oleaje). Fuente: Google Earth®.....	52
Figura 21. Esquema de adquisición de imágenes (izq.). Puntos de control seleccionados y vectores de desplazamientos sobre una de las imágenes de la cámara de popa del <i>Urania Mella</i>	53
Figura 22. Amplitudes máximas y significantes de los movimientos de cabeceo (<i>pitch</i>), balance (<i>roll</i>) y guiñada (<i>yaw</i>) registrados durante la campaña de monitorización del buque <i>Urania Mella</i>	54

Figura 23. Evolución de la altura de ola significativa en el exterior del puerto (arriba) y en las proximidades del atraque (abajo) comparadas con la amplitud del movimiento significativo de guiñada (<i>yaw</i>) del <i>Urania Mella</i>	55
Figura 24. Evolución de las tensiones significantes registradas en un largo de proa (arriba) y un largo de popa (abajo) comparadas con la amplitud significativa de cabeceo (<i>pitch</i>) del <i>Urania Mella</i>	56
Figura 25. Muestra de 1000 s de duración de los movimientos de vaivén (arriba) y alteada (abajo) registrados en proa y popa del <i>Urania Mella</i>	57
Figura 26. Movimiento de cabeceo (<i>pitch</i>) obtenido a partir de los registros de alteada de proa y popa del <i>Urania Mella</i>	58
Figura 27. Evolución de la altura de ola (izq.) registrada por el radar <i>Miros</i> y su espectro de frecuencias asociado (dcha.).....	59
Figura 28. Comparación entre el espectro de frecuencias del oleaje (<i>Miros</i>) y los espectros de cabeceo (<i>pitch</i>), vaivén (<i>surge</i>) y alteada (<i>heave</i>), calculados a partir de los registros de estos movimientos obtenidos con la técnica de seguimiento por imagen.....	60
Figura 29. Localización e instalaciones del puerto interior de A Coruña. En la parte superior se destaca la ubicación del punto de propagación de oleaje utilizado en el estudio. Fuente: Google Earth® y Autoridad Portuaria de A Coruña (www.puertocoruna.com).....	62
Figura 30. Localizaciones de atraque monitorizadas durante el estudio.....	63
Figura 31. Unidad IMU instalada en el interior del puente de mando de un buque (arriba). Esquema de adquisición de imágenes (abajo). Cajas estantes para la ubicación de las cámaras para el registro de imágenes del buque (dcha.).....	64
Figura 32. Muestra de 1 h de duración de las series temporal de los movimientos de balance (arriba) y vaivén (abajo) registradas durante la operación de carga de un buque representativo.....	64
Figura 33. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de guiñada de un buque representativo registradas durante su operación de carga.....	65
Figura 34. Muestra de las funciones de densidad espectral de los movimientos de balance (izq.) y vaivén (dcha.) de un buque representativo.....	66

Figura 35. Representación esquemática de la posición del buque y la disposición de los amarres empleados en cada pantalán de la terminal petrolera.	68
Figura 36. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de balance del buque gasero <i>Scali del Teatro - III</i> durante la operación de carga.....	71
Figura 37. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de balance del buque gasero <i>Scali Reali</i> durante la operación de carga.....	71
Figura 38. Comparativa entre las amplitudes máximas de los movimientos angulares registrados por los pequeños buques gaseros y químicos, petroleros, y los umbrales de movimiento del PIANC (1995) y la ROM 2.0-11.....	72
Figura 39. Comparativa entre las amplitudes significantes de los movimientos angulares registrados por los pequeños buques gaseros y químicos, petroleros, y los umbrales de movimiento del PIANC (1995) y la ROM 2.0-11.....	73
Figura 40. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de vaivén del buque químico <i>Sichem Singapore - II</i> durante la operación de carga.	74
Figura 41. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de vaivén del buque gasero <i>Maingas</i> durante la operación de carga.....	75
Figura 42. Respuesta del plano vertical (vaivén-alteada) de los buques gaseros <i>Maingas</i> (a) y <i>Scali del Teatro - III</i> (b).....	75
Figura 43. Respuesta del plano vertical (vaivén-alteada) del buque gasero <i>Scali Reali</i> (a) y del petrolero <i>SKS Saluda</i> (b).	76
Figura 44. Gráficos de dispersión de los movimientos significantes de alteada (a), cabeceo (b) y vaivén (c) de los pequeños buques gaseros y químicos vs. altura de ola significativa (H_s) y periodo pico del oleaje (T_p) en el exterior del puerto.	79
Figura 45. Gráficos de dispersión de los movimientos significantes de alteada (a) y vaivén (b) de los grandes petroleros vs. altura de ola significativa (H_s) en el exterior del puerto..	81
Figura 46. Gráfico de dispersión de los periodos pico de oscilación del movimiento de alteada (T_{Heave}) frente al período pico promedio del oleaje (T_{p_Buoy}) en el exterior del puerto durante el tiempo de monitorización de los pequeños buques gaseros y químicos.	84

Figura 47. Instalaciones del Puerto Exterior de A Coruña. Línea de atraque analizada y localización de los equipos de monitorización de las variables océano-meteorológicas (boya de oleaje y estación meteorológica).	89
Figura 48. Equipos utilizados para la monitorización de los movimientos de los buques atracados (IMU, cámaras y distanciómetros láser).	91
Figura 49. Muestra de 1 h de duración de la serie temporal del movimiento de balance registrada durante la operación de un buque representativo.	92
Figura 50. Amplitudes máximas, medias y significantes de cada movimiento registrado durante la estancia en puerto del buque granelero <i>Western Boheme</i> y sus forzadores océano-meteorológicos concomitantes.	93
Figura 51. Rosas estacionales de oleaje y viento en el punto de la boya del Puerto Exterior de A Coruña durante el periodo 2015-2018.	94
Figura 52. Configuración de amarre utilizada por cada tipo de buque.	96
Figura 53. Distribución de frecuencia acumulada de cada una de las variables registradas.	97
Figura 54. Gráficos de dispersión de las amplitudes significativas medidas frente a las estimadas por los modelos de cada movimiento.	104
Figura 55. Gráficos de dispersión de las amplitudes significativas medidas frente a las estimadas por los modelos de cada movimiento con datos de validación.	106

Índice de Tablas

Tabla 1. Límites operativos en función de la altura de ola significativa máxima y la dirección del oleaje incidente en el atraque. Fuente: Thoresen (2003).	17
Tabla 2. Criterios de movimientos recomendados para condiciones de trabajo seguras ¹ . Fuente: <i>PIANC (1995)</i>	19
Tabla 3. Valores recomendados para los movimientos máximos admisibles del buque atracado compatibles con la realización de operaciones en condiciones seguras ^{1,2} . Fuente: ROM 2.0-11.....	20
Tabla 4. Criterios de movimiento recomendados para buques portacontenedores compatibles con una eficiencia del 95% en operaciones de grúa. Fuente: <i>PIANC (2012)</i> . ..	21
Tabla 5. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes consecutivos con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje longitudinal perpendicular al eje de oscilación.	45
Tabla 6. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes consecutivos con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje transversal perpendicular al eje de oscilación.....	45
Tabla 7. Valores del coeficiente de correlación obtenidos en los ensayos del péndulo de oscilación.	47
Tabla 8. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes en los ensayos de oscilación del péndulo de amplitud teórica 2.0°.....	48
Tabla 9. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes en los ensayos de oscilación del péndulo de amplitud teórica 0.5°.....	48
Tabla 10. Valores del coeficiente de correlación de <i>Pearson</i> entre los registros del movimiento de cabeceo de ambas técnicas en los ensayos realizados.	51
Tabla 11. Valores del coeficiente de correlación de <i>Pearson</i> de los movimientos angulares del buque <i>Urania Mella</i> con los valores de la altura de ola significativa en el exterior y el interior del puerto.	56

Tabla 12. Valores del coeficiente de correlación de Pearson de los movimientos angulares del buque Urania Mella con los valores de la tensión registrada en uno de los largos de proa (<i>bow line</i>) y de popa (<i>stern line</i>).	57
Tabla 13. Amplitudes de movimiento máximas recomendadas para unas condiciones de trabajo seguras, según el PIANC (1995).	66
Tabla 14. Amplitudes de movimiento máximas recomendadas para unas condiciones de trabajo seguras, según el PIANC (1995).	66
Tabla 15. Flota de estudio: nombre, tipología de buque, toneladas de peso muerto, eslora, localización de atraque y configuración de amarre (largos de proa - traveses de proa - springs de proa - springs de popa - traveses de popa - largos de popa) de cada buque analizado.....	67
Tabla 16. Condiciones océano-meteorológicas concomitantes más desfavorables registradas en el exterior del puerto durante el periodo de monitorización de cada buque (altura de ola significativa H_s , periodo pico del oleaje T_p , dirección del oleaje Dir (Norte = 0°) y velocidad media del viento W_s).	69
Tabla 17. Amplitudes máximas y significantes de cada movimiento angular registradas durante el periodo completo de monitorización y los criterios límite aplicables a cada tipo de buque.	70
Tabla 18. Amplitudes máximas y significantes de los movimientos de alteada y vaivén registradas durante el periodo completo de monitorización y los criterios límite aplicables a cada tipo de buque (el símbolo -- representa la ausencia de datos de monitorización o bien la no existencia de umbral para ese movimiento y tipo de buque).....	74
Tabla 19. Coeficientes de correlación de <i>Pearson</i> de los movimientos significantes de los pequeños buques gaseros y químicos con la altura de la ola y el periodo pico del oleaje en el exterior del puerto.....	78
Tabla 20. Coeficientes de correlación de <i>Pearson</i> de los movimientos significantes de los grandes buques con la altura de la ola y el periodo pico del oleaje en el exterior del puerto.	80
Tabla 21. Periodos pico de oscilación de cada movimiento y período pico promedio del oleaje en el exterior del puerto durante el tiempo de monitorización.....	83

Tabla 22. Parámetros del buque y de los amarres: porte del buque (<i>TPM</i>), desplazamiento, carga de rotura de los amarres (<i>MBL</i>) y número de líneas con contribución (<i>N</i>).	85
Tabla 23. Horquilla teórica de periodos naturales de oscilación del movimiento de vaivén para cada tipo de buque.	85
Tabla 24. Características de los buques monitorizados.	90
Tabla 25. Coeficiente de determinación (<i>R</i> ²), error cuadrático medio (<i>RMSE</i>) y error absoluto medio (<i>MAE</i>) de los valores de predicción frente a los valores reales de las variables océano-meteorológicas.	95
Tabla 26. Rango de valores de las variables utilizadas en la obtención de las funciones de transferencia.	97
Tabla 27. Distribución de los datos registrados de cada variable durante la campaña de campo.	98
Tabla 28. Posibles variables predictoras candidatas a participar en la obtención de los modelos de cada movimiento.	99
Tabla 29. Coeficientes de correlación de <i>Pearson</i> (<i>r</i>) obtenidos en el análisis de dependencia por pares de las posibles variables predictoras (en gris los valores de $r \geq 0.6$ y $r \leq -0.6$). .	101
Tabla 30. Variables predictoras seleccionadas para participar en la obtención de los modelos.	102
Tabla 31. Variables con un efecto estadísticamente significativo ($\alpha \leq 0.01$) en cada uno de los modelos de movimiento.	103
Tabla 32. Valores del coeficiente de determinación (<i>R</i> ²) y del error cuadrático medio (<i>RMSE</i>) de las funciones de transferencia.	105
Tabla 33. Valores del coeficiente de determinación (<i>R</i> ²) y del error cuadrático medio (<i>RMSE</i>) de las funciones de transferencia obtenidos en la validación.	107

Resumen

La eficiencia de la maniobra de carga y descarga de un buque en puerto depende fundamentalmente de su comportamiento en el atraque, siendo éste un condicionante de la propia operatividad. Aunque existen normativas en las que se fijan umbrales admisibles de movimientos, su aplicación general hace que no se ajusten correctamente a las características de todos los puertos. Tradicionalmente el comportamiento del buque atracado ha sido analizado mediante modelización física y numérica, existiendo pocos ejemplos de estudios en campo debido a las dificultades que conllevan.

Atendiendo a esta necesidad, esta Tesis Doctoral presenta el desarrollo y la validación de dos herramientas de bajo coste económico y de fácil manejo e instalación para la evaluación en campo de los movimientos de un buque atracado. Éstas se basan en la adaptación de dos tecnologías muy extendidas en el ámbito de la ingeniería, como son las unidades de medida inercial (IMU) y la visión artificial orientada al seguimiento de objetos.

La aplicación de estas técnicas en campañas intensivas de monitorización de buques durante su operación en los Puertos Interior y Exterior de A Coruña, ambos con características diferentes, ha confirmado la versatilidad de estas herramientas. Además, se ha demostrado su potencial como instrumento eficaz para analizar la influencia de los agentes forzadores de los problemas que realmente afectan a un determinado puerto. Los resultados obtenidos han permitido conocer las condiciones operativas reales de los buques, constatando la necesidad de actualizar o particularizar los umbrales de movimientos de las normativas.

Adicionalmente, se ha propuesto y aplicado una metodología para el desarrollo de herramientas predictivas de los movimientos de los buques atracados en una determinada instalación, a partir de registros reales de agentes océano-meteorológicos y movimientos. Este resultado constituye un avance significativo hacia el desarrollo de sistemas de ayuda a la toma de decisiones en la gestión de un puerto.

Resumo

A eficiencia da manobra de carga e descarga dun buque en porto depende fundamentalmente do seu comportamento no atracadoiro, sendo este un condicionante da propia operatividade. Aínda que existen normativas nas que se fixan límites admisibles de movementos, a súa aplicación xeral fai que non se axusten correctamente ás características de todos os portos. Tradicionalmente o comportamento do buque foi analizado mediante modelización física e numérica, existindo poucos exemplos de estudos en campo debido ás dificultades que conlevan.

Atendendo a esta necesidade, esta tese doutoral presenta o desenvolvemento e a validación de dúas ferramentas de baixo custo económico e de fácil manexo e instalación para a avaliación en campo dos movementos dun buque atracado. Estas baséanse na adaptación de dúas tecnoloxías moi estendidas no ámbito da enxeñería, como son as unidades de medida inercial (IMU) e a visión artificial orientada ao seguimento de obxectos.

A aplicación destas técnicas en campañas intensivas de monitoraxe de buques durante a súa operación nos Portos Interior e Exterior da Coruña, ambos con características diferentes, confirmou a versatilidade destas ferramentas. Ademais, demostrouse o seu potencial como instrumento eficaz para analizar a influencia dos axentes forzadores dos problemas que realmente afectan a un determinado porto. Os resultados obtidos permitiron coñecer as condicións operativas reais dos buques, constatando a necesidade de actualizar ou particularizar os límites de movementos das normativas.

Adicionalmente, propúxose e aplicouse unha metodoloxía para o desenvolvemento de ferramentas predictivas dos movementos dos buques atracados nunha determinada instalación, a partir de rexistros reais de axentes océano-meteorolóxicos e movementos. Este resultado constitúe un avance significativo cara ao desenvolvemento de sistemas de axuda á toma de decisións na xestión dun porto.

Abstract

The efficiency of a vessel's cargo operation in port mainly depends on its behavior at berth, being this a determining factor in the operability. Although there are regulations proposing acceptable movement thresholds, their general application means that they do not properly match the characteristics of all ports. Traditionally, the behavior of moored ships has been analyzed by means of physical and numerical modeling, and there are few examples of field studies due to their involved difficulties.

Taking this need into account, this doctoral thesis presents the development and validation of two low-cost, easy-to-use and easy-to-install tools for *in-situ* evaluation of moored vessel motions. They are based on the adaptation of two widely used technologies in engineering, such as inertial measurement units (IMU) and computer vision.

The application of these techniques in intensive ship monitoring campaigns during their operation at the Inner and Outer Port of A Coruña, both with different characteristics, confirmed the versatility of these tools. In addition, their potential as an effective way for analyzing the influence of forcing agents on the problems affecting a specific port has been demonstrated. The obtained results have shown the real operating conditions of the ships, highlighting the need to update or particularize the movement thresholds of the regulations.

Additionally, a methodology has been applied for moored ship motions predictive tools development in a specific facility, based on records of observed motions and meteorological and ocean data. This result constitutes a significant advance towards the development of decision-making systems to contribute in the management of a port.

Capítulo 1

Introducción

El transporte marítimo de mercancías es el modo más utilizado para trasladar productos de un país a otro. Actualmente, el 90 por 100 del total de las mercancías transportadas en todo el mundo se hace por vía marítima (UNCTAD, 2018). Esto significa que la gran mayoría de los productos precisa de un puerto y un barco para ser transportado desde el origen, donde es producido, hasta el destino final donde será procesado o consumido. Es por ello que este modo de transporte se ha convertido en un motor indispensable para el desarrollo económico e industrial de los países.

La importancia de este sector en España es evidente, y así lo ha sido a lo largo de su historia. En el año 2017 el transporte a través de los puertos españoles constituyó el 75% de las importaciones y el 61% de las exportaciones de productos, con una incidencia directa del 1.1% del PIB español (Puertos del Estado, 2017).

El crecimiento del sector se está viendo impulsado también por algunos acontecimientos a escala mundial y nacional. El cambio climático está acelerando el deshielo en el Ártico, aumentando las rutas marítimas que lo atraviesan, lo que tendrá una importancia mayor en las próximas décadas. El desarrollo de la industria naval y el constante aumento del tamaño de los buques, acompañado de la necesaria adaptación de los puertos para acoger sus escalas, o la ampliación del Canal de Panamá y las grandes inversiones de otros países con antiguos y nuevos intereses en las rutas tradicionales, son también ejemplos de la apuesta global en este campo.

En el ámbito nacional, se han construido grandes puertos exteriores en el Norte de España (A Coruña, Ferrol, Gijón, Bilbao) con instalaciones adecuadas a las nuevas exigencias del sector (mayores calados, grúas especializadas, explanadas mayores para el depósito de mercancías, etc.). Estos puertos exteriores forman parte de la red general de Puertos del Estado, en la que se incluyen otros en el Mar Mediterráneo como, por ejemplo, Algeciras, Valencia o Barcelona, que dotan a España de las infraestructuras necesarias para poder aprovechar las grandes rutas marítimas de transporte de mercancías.

Dentro del transporte marítimo, los puertos constituyen los nodos esenciales para el desarrollo del mismo. Tradicionalmente, las funciones básicas de un puerto eran las de proporcionar refugio a los barcos y permitir el transbordo de mercancías y/o personas de un modo de transporte a otro. Sin embargo, en las últimas décadas el concepto clásico de puerto se ha visto modificado por completo como consecuencia de la integración creciente de los procesos de producción, transporte, almacenamiento y distribución en sus instalaciones, convirtiéndolos en verdaderos centros logísticos. Además, la especialización progresiva de sus espacios en terminales portuarias centradas en un tipo de tráfico (graneles líquidos, graneles sólidos, contenedores, pasajeros, etc.), genera a su vez distintas necesidades dentro de un mismo puerto (tipología del atraque, equipos de manipulación de carga, espacios para el depósito y almacenaje de la mercancía, etc.).



Figura 1. Terminal de contenedores APM Terminals Algeciras. Fuente: Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras (<https://www.apba.es/contenedores>).

La globalización de la producción y el consumo, junto con la existencia de una red de transporte a escala mundial, ha fomentado la competencia entre puertos para atraer el mayor número de clientes. Esto hace que las terminales portuarias deban ser lo más competitivas posibles (Alderton, 2008). Para ello, además de tener buenas condiciones de abrigo, conexiones y grandes superficies para la manipulación y almacenamiento de productos, la estancia del buque en puerto debe ser segura y eficiente, permitiendo que las operaciones de carga y descarga puedan desarrollarse de forma exitosa.

De todas las maniobras involucradas en la estancia de buque en puerto (entrada/salida, atraque/desatraque, servicios técnico-náuticos y carga/descarga), la operación de carga/descarga es la que mayor tiempo consume. Un ejemplo de lo que supone esta operación lo encontramos en el estudio realizado por la empresa naviera *Maersk Line* (TOC Europe, 2013), el cual muestra que dos terceras partes del tiempo total de estancia en puerto de los buques portacontenedores corresponden a esta maniobra. Por lo tanto, cualquier iniciativa orientada a minimizar la duración de esta operación repercutirá positivamente en la eficiencia de las instalaciones portuarias.

De forma general en cualquier puerto, las condiciones en las que se va a realizar la maniobra de carga y descarga dependerán fundamentalmente del comportamiento de buque atracado. Este se suele evaluar en función de las amplitudes de los movimientos que registra el barco durante su estancia en puerto. A diferencia de lo que ocurre con un barco durante la navegación, el cual tiene tres modos naturales de oscilación (balance, cabeceo y alteada), un barco amarrado presenta tres modos adicionales como consecuencia de las restricciones al movimiento impuestas por el sistema de amarre (conjunto de amarras y defensas). De esta manera, un buque atracado podrá experimentar seis tipos de movimientos (Figura 2), tres desplazamientos (alteada, vaivén y deriva) y tres rotaciones (balance, cabeceo y guiñada):

- **Alteada:** Desplazamiento del barco en la dirección del eje vertical que pasa por su centro de gravedad.
- **Vaivén:** Desplazamiento del barco en la dirección del eje longitudinal que pasa por su centro de gravedad.
- **Deriva:** Desplazamiento del barco en la dirección del eje transversal que pasa por su centro de gravedad.
- **Balance:** Rotación del buque alrededor del eje longitudinal que pasa por su centro de gravedad.
- **Cabeceo:** Rotación del buque alrededor del eje transversal que pasa por su centro de gravedad.
- **Guiñada:** Rotación del buque alrededor del eje vertical que pasa por su centro de gravedad.

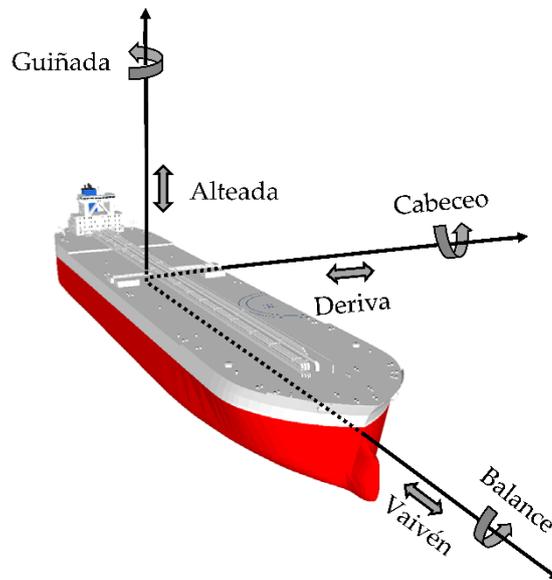


Figura 2. Esquema de los posibles movimientos de un buque atracado.

Cabe señalar que, desde el punto de vista de la maniobra de carga y descarga, los movimientos en el plano horizontal (vaivén, deriva y guiñada) son los que tienen una mayor importancia en la aparición de problemas durante la operación (interrupción del proceso, rotura de amarres, daños en las defensas, etc.). A su vez, éstos están fuertemente influenciados por las características del sistema de amarre (Gomez & Iribarren, 1993), por lo que cualquier modificación del mismo (número, rigidez y longitud de los amarres) producirá cambios en sus modos de oscilación. De forma general, el esquema de amarre de cualquier barco va a estar compuesto por tres tipos de amarres o estachas, según sea su posición de trabajo (Figura 3):

- **Largos de proa/popa:** con una orientación predominantemente longitudinal, su función principal es limitar el movimiento de vaivén.
- **Traveses de proa/popa:** con una orientación perpendicular al plano longitudinal del buque, su función es la de limitar la deriva y la guiñada.
- **Springs de proa/popa:** con orientación longitudinal, su función principal, al igual que los largos, es la de limitar el vaivén.

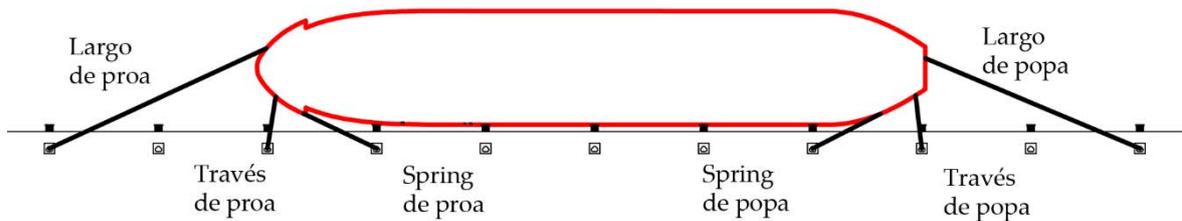


Figura 3. Esquema de amarre tipo.

Los movimientos de un buque amarrado son fundamentalmente inducidos por los agentes océano-meteorológicos presentes en las proximidades del atraque, siendo los más relevantes el oleaje, la marea, las corrientes y el viento. En este sentido, puede ser especialmente problemático el efecto del oleaje de onda larga que llega al puerto (periodos superiores a los 30 s). Su acción es difícilmente atenuable por las estructuras de protección (diques de abrigo) y, al tratarse de ondas de baja frecuencia, pueden producir el fenómeno de resonancia en la dársena (González-Marco et al., 2008; López et al., 2012). Además, sus periodos suelen encontrarse muy próximos a los periodos resonantes de los movimientos de vaivén, deriva y guiñada, lo que podría provocar grandes oscilaciones en dichos modos y por tanto generar problemas en los buques amarrados (Rabinovich, 2009).

Existen también otros forzadores en la generación de movimientos, como son las acciones introducidas por la propia manipulación de las cargas o el efecto del paso de un buque.

Sin embargo, el comportamiento de buque atracado no solo va a depender de estos agentes. La tipología de la terminal, las características del sistema de amarre y las defensas (disposición, número y tipo de líneas y defensas, elementos de fijación, etc.) y la propia configuración inercial del buque durante el proceso de carga/descarga, son factores que afectan a este comportamiento, haciendo que un mismo barco pueda responder de manera distinta ante la acción de los mismos agentes océano-meteorológicos.

Cuando un buque experimenta grandes movimientos durante su estancia en puerto, estos repercuten negativamente sobre los rendimientos de la operación, produciendo retrasos o incluso paradas operativas, con el correspondiente coste económico que ello supone. Como se verá más adelante en este capítulo, existen numerosas normativas y recomendaciones, tanto nacionales como internacionales (ASCE, 2014; PIANC, 1995, 2012; Puertos del Estado, 2011) en las que se proponen valores límite para las amplitudes de cada movimiento

compatibles con la ejecución de la operación de carga y descarga. Es importante señalar que estos criterios representan valores genéricos aplicables a instalaciones portuarias de todo el mundo, que en la mayoría de los casos han sido establecidos en base a observaciones subjetivas de operadores y capitanes de buque, sin estudios particularizados que los fundamenten. Su carácter generalista hace que estos criterios no se ajusten adecuadamente a las características de cada instalación portuaria, por lo que sería recomendable su particularización. En la actualidad, existen iniciativas en marcha para adecuar dichos umbrales a las nuevas exigencias de las terminales y buques, como la impulsada por la Asociación Internacional de Infraestructuras del Transporte Acuático (PIANC) a través de su grupo de trabajo *WG 212 (PIANC MarCom WG212)*.

Además, la importancia de este aspecto, se ve reflejada en el creciente interés de Autoridades Portuarias en toda Europa, como la de Algeciras, A Coruña o Róterdam, en la ejecución de proyectos de I+D+i para el análisis de la interacción entre el medio físico, el comportamiento del buque y la infraestructura de atraque. El objetivo principal es el desarrollo de herramientas avanzadas de gestión que ayuden a identificar y predecir posibles situaciones de riesgo y, por tanto, a replanificar la operativa y la asignación de recursos para ofrecer el nivel de servicio deseado, o bien reforzar las medidas de seguridad y protección portuaria.

1.1. Análisis del comportamiento de buque atracado

El comportamiento de los buques amarrados sujetos a la acción del oleaje, el viento y las corrientes, junto con los esfuerzos inducidos en los amarres, son consideraciones críticas para el diseño eficaz de los puertos y terminales marítimas.

Existen numerosas directrices y recomendaciones para el diseño de obras de atraque y amarre (British Standards Institute, 1994; BSRA, 1971; OCIMF, 2018; Puertos del Estado, 2011). Sin embargo, en la mayoría de los casos, ya sean proyectos de nueva construcción o de optimización de puertos existentes, debido a la diversidad y complejidad de los procesos físicos involucrados, resulta necesario recurrir a estudios particularizados de comportamiento de buque atracado que contemplen las condiciones específicas de cada instalación (geometría del puerto, características de la zona de atraque, buque tipo, clima marítimo, requisitos de explotación, etc.).

El análisis de este comportamiento se ha estudiado tradicionalmente desde tres posibles enfoques: modelización física a escala reducida, modelización numérica y estudios en prototipo (registro *in situ*), cuyo objetivo fundamental es el de investigar posibles problemas, evaluar alternativas de diseño y proporcionar una valiosa orientación a los ingenieros o a los gestores de las instalaciones.

1.1.1. Modelización física a escala reducida

La modelización física a escala reducida ha sido una de las técnicas más utilizadas para el análisis del comportamiento de buque atracado. Con la realización de estos modelos se persigue cuantificar tanto los movimientos que experimentará el buque en un determinado atraque, como evaluar los esfuerzos a los que estarán sometidas las defensas y las líneas de amarre bajo ciertas condiciones océano-meteorológicas. A pesar de ser reproducciones simplificadas de la realidad, permiten reproducir los fenómenos físicos más significativos que intervienen en el problema, por lo que durante décadas han desempeñado un importante papel en la optimización y validación del diseño de puertos y terminales marítimas.

Para que estos modelos sean fiables, y sus resultados puedan ser utilizados para el diseño de un puerto, es preciso asegurar que todas las variables relevantes sean reproducidas correctamente siguiendo los criterios de semejanza de *Froude* y *Cauchy*: oleaje incidente, geometría del buque y distribución de su masa, rigidez de las defensas, rigidez y orientación de la línea de amarre, geometría de la estructura del atraque, disposición del puerto y la batimetría (Davies et al., 2001). La mejor manera de asegurar la calidad de los resultados experimentales es a través de la calibración global del modelo físico utilizando datos de prototipo, lo que rara vez es posible. En la práctica, lo que se hace es calibrar cada componente de forma individual (oleaje, amarres, defensas, etc.) y verificar repetidamente que esta funciona correctamente. A partir de este procedimiento se puede generar suficiente confianza en el comportamiento reproducido.

El primer paso en el diseño de un modelo físico de buque atracado es la selección de la escala de trabajo. Esta debe ser lo suficientemente grande como para minimizar los efectos de escala y mejorar la precisión, y lo suficientemente pequeña como para reproducir todas las características del dominio a modelar satisfaciendo las restricciones impuestas por las

dimensiones físicas de la instalación de modelado y las capacidades de los equipos de generación de oleaje y los sistemas de instrumentación (Cornett, 2014). Normalmente se asume que para este tipo de estudios son apropiadas escalas entre 1:75 y 1:150 (Hughes, 1993). Estas cifras no constituyen una norma general y, por supuesto, cuanto más grande sea el modelo, menores serán los efectos de escala.

La selección del buque tipo a reproducir es una de las tareas que debería implicar una estrecha colaboración con la autoridad portuaria, los operadores de la terminal y las compañías navieras. Una vez escogido el buque o buques representativos de la flota del puerto, se debe proceder a su construcción a la escala previamente fijada. Los modelos de barcos suelen ser de fibra de vidrio, madera o espuma de alta densidad. Además de reproducir la forma geométrica del buque a escala real, el modelo tiene que ser lastrado para obtener las características dinámicas requeridas del prototipo. La calibración permite ajustar la posición del centro de gravedad, el radio de giro del buque, los calados y sus períodos naturales de oscilación en distintas condiciones de carga (Taveira Pinto et al., 2008). Habitualmente se plantean dos condiciones: a plena carga y en lastre.

Además del intenso trabajo de modelización del barco tipo, la simulación precisa del comportamiento de un buque amarrado en un puerto requiere:

- Reproducción fiel de la disposición y rigidez de las líneas de amarre y de las defensas (características de deformación de la fuerza), así como la posibilidad de aplicación de una tensión inicial adecuada y medición correcta de los esfuerzos durante las pruebas.
- Reproducción rigurosa de las condiciones de agitación reales en la zona de ensayo, teniendo en cuenta los efectos de las reflexiones de los contornos del dominio modelado.
- Medición precisa del movimiento del buque amarrado en los seis grados de libertad.

Para modelizar y monitorizar correctamente cada una de estas componentes es preciso utilizar diferentes sistemas de instrumentación. Así, las condiciones de oleaje incidente generado por los sistemas del laboratorio son normalmente verificadas antes del inicio de los ensayos mediante la utilización de sondas de nivel capacitivas o resistivas.

Para la simulación del comportamiento de las líneas de amarre y defensas se utilizan dispositivos contruidos *ad hoc* y calibrados en laboratorio, capaces de reproducir las curvas fuerza-deformación deseadas mediante la combinación de muelles helicoidales y poleas (incluyendo el comportamiento no lineal de las mismas) e incluso, en el caso de los amarres, de aplicar una pretensión inicial a cada línea. Estos simuladores están equipados con células de carga de precisión que permiten medir en todo momento los esfuerzos experimentados durante el ensayo.

Las tecnologías para la monitorización de los movimientos del buque amarrado han evolucionado notablemente durante las últimas décadas, pasando de la utilización de dispositivos intrusivos como los transductores de desplazamiento lineal (LVDT) o los potenciómetros en los primeros estudios de este tipo (Iribarren, 1988; Mansard & Pratte, 1982), a los actuales sistemas ópticos comerciales de alta precisión basados en el uso de cámaras estereoscópicas de luz infrarroja, dianas altamente reflectantes y un software específicamente desarrollado para el análisis y postprocesado de la información (OptiTrack; Qualisys).

En Cornett (2014) podemos encontrar una descripción detallada de las tecnologías utilizadas por el *National Research Council* (NRC) de Canadá, uno de los laboratorios de experimentación con más experiencia en este tipo de ensayos, presentadas a través de tres casos de estudio con diferentes problemáticas.

Tradicionalmente, los modelos físicos de buque atracado han sido utilizados en la fase de diseño de nuevos puertos o en obras de ampliación de instalaciones existentes, como medio para evaluar el comportamiento del buque y las condiciones operativas, o la disponibilidad de los atraques tras la construcción de las nuevas infraestructuras (Baker et al., 2016; C.E.P.Y.C, 1987; A. Cornett et al., 2012).

También han sido utilizados para cuantificar cómo la modificación de la tensión de amarre y la rigidez de las defensas puede contribuir a reducir los problemas de operatividad de un atraque existente, sin la necesidad de recurrir a la construcción de importantes estructuras de protección (Rosa-Santos & Taveira-Pinto, 2013; Rosa-Santos et al., 2014).

Además de la aplicación concreta a una determinada instalación, este tipo de ensayos han sido utilizados por los investigadores para estudiar los efectos de determinados forzadores

sobre los buques amarrados, como el oleaje generado por el paso de otros buques (Varyani & Vantorre, 2006), o también como herramienta de diseño de los sistemas de amarre frente a las tradicionales formulaciones empíricas o reglas de las sociedades de clasificación (Natarajan & Ganapathy, 1997).

A pesar de ser una herramienta ampliamente utilizada para analizar el comportamiento de buque atracado, estos modelos presentan una serie de limitaciones. Como se ha mencionado anteriormente, se trata de una reproducción simplificada de la realidad, por lo que conseguir una semejanza completa entre el modelo y el prototipo resulta realmente difícil.

Los procesos de construcción y calibración deben de ser altamente minuciosos lo que implica un elevado coste económico y consumo de tiempo. Además, presentan una gran rigidez a las modificaciones, ya que cualquier cambio en la configuración del ensayo (esquema de amarre, rigidez de las defensas, tensión de las líneas, buque tipo) obliga a repetir los intensos procesos de calibración.

Por otro lado, con esta metodología es habitual analizar una única condición de carga específica del buque (plena carga, en lastre, etc.). Sin embargo, no reproduce las variaciones experimentadas por la posición de su centro de gravedad durante la operación de carga y la influencia que esto tiene sobre su comportamiento dinámico.

Por último, se destaca la dificultad de seleccionar una escala adecuada para analizar en el mismo modelo el efecto de la onda corta y la onda larga, con una precisión adecuada y unos costes razonables.

1.1.2. Modelización numérica

Durante décadas la comunidad científica ha invertido esfuerzos y recursos en la descripción matemática del comportamiento de los buques bajo la acción del oleaje. Uno de los primeros hitos de estas investigaciones se alcanzó en los años 50, en trabajos como el de Finkelstein (1957), donde se aplicó un método en el dominio del tiempo para describir las olas no como la suma de componentes regulares, sino como un conjunto de fuentes impulsivas. Este enfoque fue utilizado en trabajos posteriores para describir las fuerzas impulsivas que actuaban sobre un cuerpo flotante (Wehausen, 1967).

Sin embargo, la descripción matemática del movimiento de un barco fue propuesta por primera vez por Cummins (1962). De acuerdo con este modelo, un buque amarrado es considerado como un cuerpo flotante en un fluido incompresible, homogéneo e irrotacional, cuyo movimiento arbitrario puede ser descrito por la siguiente expresión:

$$(M + A) \ddot{\vec{X}}(t) + B\dot{\vec{X}}(t) + C\vec{X}(t) + \int_0^\infty K(\tau) \dot{\vec{X}}(t - \tau) d\tau = \vec{F}(t) \quad (1)$$

Donde M representa la matriz de masas del buque. A , B y C son las matrices de masa añadida, de amortiguación viscosa y de amortiguación hidrostática, respectivamente. K contiene las funciones de respuesta del cuerpo a los estímulos. X es la posición del cuerpo flotante (que incluye los seis grados de libertad) y F representa las fuerzas exteriores aplicadas (oleaje, viento, amarres, etc.).

Muchos investigadores utilizaron este desarrollo en trabajos posteriores, como van Oortmerssen (1976), quien desarrolló un modelo matemático de predicción del comportamiento de un buque atracado bajo la acción del oleaje irregular que contemplaba las características no lineales del sistema de amarre, incluso su posible asimetría. De hecho, la expresión propuesta por Cummins (1962), sigue constituyendo hoy en día una de las ecuaciones de gobierno más utilizadas en los desarrollos de los distintos modelos de comportamiento de buque atracado (Bont et al., 2010; Molen et al., 2015; Taveira Pinto et al., 2008).

A medida que avanzaba la industria informática, comenzaba el desarrollo de los modelos de simulación de buque atracado. Uno de los primeros ejemplos lo encontramos en van Oortmerssen et al. (1986), en el que se presenta un modelo numérico para la simulación de movimientos y tensiones de amarre para estructuras flotantes arbitrarias excitadas por oleajes irregulares, viento y corrientes.

Durante las últimas décadas, el crecimiento exponencial de la capacidad de computación ha facilitado el avance de la modelización numérica aplicada a la ingeniería marítima. Si bien es cierto que la caracterización del oleaje en entornos costeros y portuarios ha adquirido un mayor peso (Grifoll et al., 2009; Herbers et al., 1995; López et al., 2012; Sammartino et al., 2014), son también numerosos los investigadores que han trabajado en el desarrollo de modelos de comportamiento de buque amarrado en puerto. Uno de los

enfoques más utilizados para resolver el problema se basa en la combinación de diferentes modelos para propagar el oleaje desde el exterior del puerto hasta la zona de atraque, reproducir los movimientos experimentados por el buque, y determinar los esfuerzos sobre los amarres y defensas (Molen, 2006; Pinheiro et al., 2016; Ven, 2012). Estas herramientas permiten resolver los mismos problemas prácticos de diseño que los abordados con la modelización física: el estudio de alternativas en la ampliación de un determinado puerto (Kumar et al., 2016), la evaluación de diferentes equipos y configuraciones de amarre (Bont et al., 2010; Molen et al., 2015), o el complejo análisis del efecto de la resonancia portuaria sobre el comportamiento de buque atracado (Kwak, 2017).

Además de los trabajos anteriormente mencionados, existen en el mercado distintos softwares comerciales desarrollados tanto por instituciones públicas como por empresas privadas para evaluar la respuesta dinámica de buques y otras estructuras flotantes, en entornos portuarios y áreas expuestas bajo la acción de diferentes forzadores (oleaje, viento, corrientes, etc.). Algunos de los más utilizados son:

- *MIKE21 Mooring Analysis* desarrollado por *DHI Group*
- *Optimoor-Mooring Analysis Software* de *Tension Technology International*
- *aNyMOOR.TERMSIN* de *Marin*
- *Quaysim* de *Baird*

De forma general, estos modelos son adaptables a las características de cualquier instalación, permitiendo configurar la geometría del puerto y la zona de atraque, las características elásticas de los amarres y defensas, la tipología del buque o las condiciones océano-meteorológicas de la zona de estudio.

También existen trabajos específicamente enfocados en la resolución de un determinado problema, como la evaluación de la respuesta de un buque amarrado sobre placas de hielo flotante (Aksnes, 2010), el análisis de los esfuerzos hidrodinámicos producidos por el paso de otros buques (Pawar et al., 2019), o la predicción de movimientos extremos y de zozobra de plataformas marinas offshore (Kat, 2001).

La evolución experimentada por estas herramientas las ha situado como una alternativa viable a la modelización física. Su principal ventaja frente a la utilización de modelos a escala reducida es su gran capacidad de adaptación para admitir modificaciones, tanto en

la geometría inicial, como en las condiciones de oleaje o la tipología de buque a estudiar, con un coste computacional admisible.

Sin embargo, a pesar de esa versatilidad, los modelos numéricos también presentan limitaciones. Un ejemplo es la adopción de simplificaciones en las hipótesis de partida para la resolución de las ecuaciones de gobierno empleadas o para la propia definición de las condiciones de contorno, asumiendo así ciertas desviaciones respecto de la realidad, pero manteniendo el coste computacional en unos márgenes asumibles. Además, el proceso de validación suele realizarse mediante la utilización de datos procedentes de modelización física (Molen et al., 2003) y no con datos de campo, lo que incorpora nuevas incertidumbres. Por otro lado, y ya en lo referido al proceso de análisis, estas herramientas también tienen limitaciones similares a las de los modelos físicos, como la desventaja de no reproducir las variaciones experimentadas por la posición del centro de gravedad del buque durante la operación de carga.

1.1.3. Estudios en prototipo

La monitorización *in-situ* representa la tercera alternativa para el análisis del comportamiento de buque atracado. A pesar de aportar una información muy valiosa para la detección de los problemas que realmente afectan a una determinada instalación, constituye la metodología menos explorada. Esto es debido fundamentalmente al elevado coste económico que supone, por un lado, la adquisición de equipos de monitorización, y por otro, la realización de campañas de campo extensas en el tiempo con un gran número de barcos analizados.

Uno de los primeros ejemplos de la utilidad de la monitorización *in-situ* del comportamiento de buque atracado lo encontramos en Jensen et al. (1991). En este trabajo se presentan los resultados del proyecto de investigación conjunta realizado en diferentes países nórdicos (Dinamarca, Islas Feroe, Islandia, Noruega y Suecia) para el análisis en prototipo de los movimientos de buques atracados en distintas instalaciones portuarias, junto con las condiciones de oleaje dentro y fuera del puerto, el viento y los esfuerzos en los amarres.

Se trata del único ejemplo en el que se ha realizado una amplia campaña de monitorización, con un total de 117 buques de distintas tipologías analizados durante su operación (ferries,

cruceros, buques ro-ro, pesqueros, portacontenedores, etc.). Para llevar a cabo este trabajo, se fabricaron equipos mecánicos de medida, similares al mostrado en la Figura 4, que eran instalados en el muelle para cada monitorización.

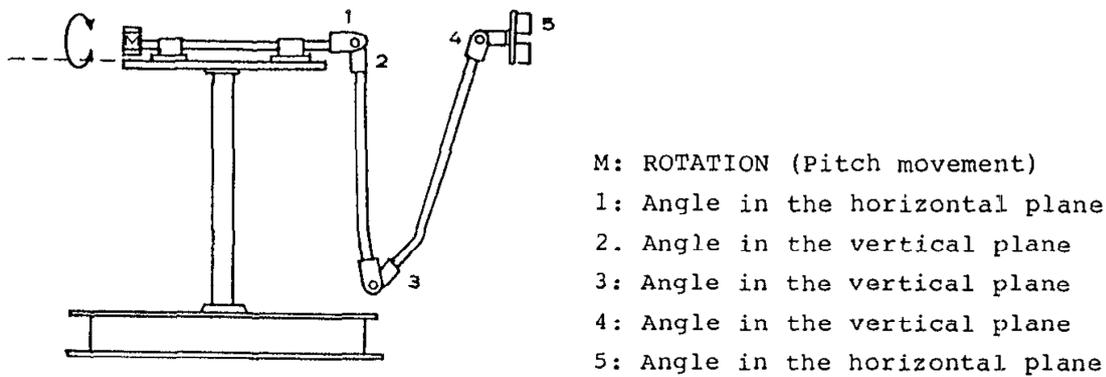


Figura 4. Dispositivo para la monitorización de los movimientos de buque atracado. Fuente: Jensen et al. (1991).

Los datos obtenidos sirvieron para elaborar uno de los criterios más utilizados en todo el mundo, incluso en la actualidad, sobre los movimientos aceptables de los buques en los puertos para condiciones de trabajo seguras (PIANC, 1995). Este resultado refleja el potencial de estas campañas para la obtención de elementos de juicio que faciliten la toma de decisiones en la gestión portuaria.

Dentro de las tecnologías actualmente existentes para la monitorización de los movimientos de un buque atracado, la más extendida es la basada en utilización de sistemas GPS – RTK. Mientras que los equipos GPS convencionales permiten conocer la posición de los objetos con una precisión del orden de metros, la utilización de sistemas RTK (*Real Time Kinematics*) basados en el envío de datos vía radio, permiten corregir el posicionamiento, obteniendo así medidas con mayor precisión. El sistema utilizado por diversos autores se basa en la instalación de varios receptores sobre la cubierta del buque a monitorizar y una estación base en tierra que actúa como referencia (Deyzen et al., 2015; Trejo et al., 2014; Zwijnsvoorde et al., 2018). De esta manera, conocida la posición de cada uno de los receptores situados sobre el barco, es posible determinar los movimientos del mismo.

Otra de las tecnologías para la monitorización del comportamiento de un buque amarrado en campo se basa en el uso de equipos láser. Un ejemplo lo encontramos en López & Iglesias (2014), donde utilizaron cinco estaciones totales equipadas con distanciómetros láser para

la medición de los seis grados de libertad del buque. Aunque se trata de una técnica con gran precisión, la dificultad para ubicar un importante número de equipos sobre el muelle sin que estos supongan un obstáculo para la operativa habitual de un puerto, supone un gran inconveniente. A esto hay que sumarle, al igual que ocurre con los equipos GPS-RTK, el elevado coste de la instrumentación, lo que nuevamente dificulta su utilización como técnica de monitorización intensiva.

Como alternativa a las dos tecnologías anteriores, algunos autores han utilizado en sus trabajos programas comerciales de captura de movimientos basados en el análisis de imágenes (Uzaki et al., 2010). Se trata de herramientas inicialmente diseñadas para otras aplicaciones pero que admiten su utilización para el análisis de algunos movimientos del buque atracado. Su principal inconveniente, además de su elevado coste, es que se trata de software cerrado que funcionan como una “caja negra” a cuyo código no puede tener acceso el usuario para adaptar su desarrollo a otras necesidades y usos.

Por último, aunque los buques disponen de sistemas inerciales de posicionamiento que podrían utilizarse para obtener determinados movimientos cuando éste está atracado, su aplicación no se encuentra desarrollada en la actualidad.

Durante las últimas décadas, aunque la tecnología de los equipos de medida ha experimentado una evolución notable, los trabajos de monitorización en campo se han limitado a analizar un número reducido de buques durante cortos periodos de tiempo, abandonando el planteamiento de campañas intensivas como la del trabajo anteriormente citado. Sin embargo, este planteamiento se ha mostrado también válido para la consecución de resultados científicos relevantes.

Uno de los problemas más estudiados mediante la monitorización en campo ha sido el efecto de la onda larga en los movimientos experimentados por los buques y su relación con la aparición de dificultades en la operación (Hiraishi et al., 1997; López & Iglesias, 2014; Uzaki et al., 2010). Por otro lado, este mismo enfoque sirvió para detectar las causas de problemas específicos que afectan a instalaciones concretas, como en Sakakibara et al. (2001), donde se identificó que los grandes movimientos de largo periodo experimentados por los buques (vaivén y deriva) eran inducidos por procesos secuenciales de grandes movimientos de balance.

Otra aplicación para la información recogida en estas campañas es su utilización para validar modelos numéricos de comportamiento buque atracado. Aunque estas herramientas han sido tradicionalmente validadas mediante datos de modelos físico, existen algunos ejemplos en los que la validación se realizó a partir de datos de campo (Bont et al., 2010; Moon-su Kwak & Pyun, 2013), lo que proporciona una mayor confianza en los resultados obtenidos (siempre y cuando su fiabilidad esté contrastada).

A la vista de los trabajos anteriores, se puede concluir que la monitorización en campo del comportamiento del buque atracado, a pesar de ser una técnica menos extendida que la modelización física o numérica, constituye una herramienta perfectamente válida para la evaluación de problemas operativos en instalaciones portuarias y sus posibles soluciones. Sin embargo, el menor número de estudios científicos de este tipo y la reducida cantidad de muestras recogidas en ellos pone de manifiesto la necesidad de desarrollar equipos y técnicas de monitorización fácilmente instalables, que permitan la proliferación de este tipo de trabajos.

1.2. Umbrales operativos

La finalidad de toda obra de atraque es mantener el buque en unas condiciones de movimiento compatibles con su permanencia en el puerto, y con el desarrollo de la operación con unos rendimientos aceptables económicamente. Siendo conscientes de que la situación ideal de cero movimientos es inviable al constituir el conjunto buque – amarres – defensas un sistema elástico, es necesario definir unos márgenes de movimiento admisibles. Por otro lado, la diversidad de tipologías de buque, de equipos de manipulación de cargas, de operación y de sistemas de amarre, aumenta la complejidad de esta definición, siendo necesaria una discretización particularizada.

Como en cualquier ámbito de la ingeniería, es posible definir dos tipos de límites:

- **Límites de seguridad:** valor máximo a partir del cual los movimientos del buque pueden producir daños en la infraestructura de atraque, en los amarres y defensas o en el propio barco. Dependerán fundamentalmente de que las cargas transmitidas a estos elementos como consecuencia de los movimientos superen el valor máximo admisible.

- **Límites operativos:** valores máximos de los movimientos de un buque a partir de los cuales se considera que no es posible realizar la operación de manera eficiente. Se trata de un criterio con cierta subjetividad, muy relacionado con el tipo de buque y el equipo de manipulación de cargas.

Una de las formas de evaluar el funcionamiento de una obra de atraque se basa en definir el estado de mar limitante, en lugar de restringir directamente los movimientos del buque, ya que resulta más sencillo conocer el oleaje predominante en una instalación portuaria determinada, que llevar a cabo un análisis dinámico específico de buque atracado. El parámetro descriptor más utilizado para definir el umbral operativo es la altura de ola significativa (H_s) presente en un determinado atraque. Existen multitud de ejemplos en la literatura con propuestas de umbrales en función del tipo de buque. La Tabla 1 muestra el criterio propuesto por Thoresen (2003), en el que se introduce como parámetro relevante la incidencia del oleaje sobre el buque.

Tabla 1. Límites operativos en función de la altura de ola significativa máxima y la dirección del oleaje incidente en el atraque. Fuente: Thoresen (2003).

Tipo de buque	Altura de ola límite en el atraque H_s (m)	
	0° (por proa/popa)	45°-90° (de costado)
Embarcaciones de recreo	0.3	0.3
Pesqueros	0.4	0.4
Buque de carga general	1.0	0.8
Buques Portacontenedores o Ro-Ro	0.5	--
Graneleros (30.000-100.000 TPM) carga	1.5	1.0
Graneleros (30.000-100.000 TPM) descarga	1.0	0.8-1.0
Graneleros líquido (< 30.000 TPM)	1.5	--
Graneleros líquido (30.000-200.000 TPM)	1.5-2.5	1.0-1.2
Graneleros líquido (> 200.000 TPM)	2.5-3.0	1.0-1.5
Pasajeros	1.0	0.7

Como puede verse en la Tabla 1, y de manera general en el resto de criterios límite existentes, los buques más grandes pueden tolerar olas más altas que los buques más pequeños y, a su vez, los oleajes que inciden por proa o popa del buque van a ser menos

problemáticos que oleajes similares que incidan de costado. Como con la mayoría de las reglas generales, hay muchas excepciones y circunstancias especiales en las que estos límites no se aplicarían, por lo que es necesario manejarlos con precaución.

Aunque los valores de altura de ola propuestos en estos criterios están teóricamente relacionados con movimientos que permitirían la realización de operaciones en condiciones aceptables, estos no están definidos ni se refleja la importancia de cada tipo de movimiento sobre el proceso de carga y descarga. Por lo tanto, si se pretende realizar un análisis más exhaustivo, parece razonable utilizar criterios detallados, basados en el establecimiento de umbrales para cada tipo de movimiento.

De igual modo que en el caso anterior, numerosos autores han propuesto criterios límite para los movimientos de los buques. La amplitud de movimiento considerada aceptable para el atraque de un barco varía ampliamente según un conjunto complejo de factores:

- Las dimensiones del buque.
- El estado de carga.
- El tipo de carga y el equipo de manipulación.
- Habilidad del operador.
- La velocidad del movimiento.
- El grado de libertad que se está considerando (cabeceo, balance, guiñada, alteada, vaivén o deriva).
- La naturaleza del sistema de amarre en tierra (bolardos fijos, ganchos de escape rápido, sistemas especiales, etc.).
- El tipo de cabrestantes de amarre a bordo (de tensión constante o fijos).
- Parámetros subjetivos (experiencia y percepción del capitán, etc.).

De forma general, los umbrales propuestos por los diferentes autores y recomendaciones no representan límites superiores a partir de los de los cuales es imposible seguir operando. Más bien, el efecto de aumentar los movimientos de los buques por encima de estos valores puede suponer la pérdida de eficiencia operativa. Como en todos los ámbitos de la ingeniería, se debe utilizar el criterio profesional para determinar lo que es razonable en unas circunstancias particulares.

Uno de los umbrales más extendidos a nivel internacional es el propuesto por el PIANC (1995). En este trabajo se establecen los límites de movimiento recomendados, no sólo para las condiciones operativas de trabajo, sino también para los movimientos máximos permitidos desde el punto de vista de la seguridad (Tabla 2).

Tabla 2. Criterios de movimientos recomendados para condiciones de trabajo seguras¹. Fuente: PIANC (1995).

Tipo de buque	Equipo de carga	Vaivén (m)	Deriva (m)	Alteada (m)	Guiñada (°)	Cabeceo (°)	Balance (°)
Pesquero	Grúa elevadora	0.15	0.15				
	Lift on – Lift off	1.0	1.0	0.4	3.0	3.0	3.0
	Bomba succión	2.0	1.0				
Cargueros pequeños	Aparejos propios	1.0	1.2	0.6	1.0	1.0	2.0
	Grúa Quarry	1.0	1.2	0.8	2.0	1.0	3.0
	Rampa rodante	0.6	0.6	0.6	1.0	1.0	2.0
Ferries, RoRo	Rampa del buque	0.8	0.6	0.8	1.0	1.0	4.0
	Link spam	0.4	0.6	0.8	3.0	2.0	4.0
	Rampa con raíl	0.1	0.1	0.4	--	1.0	1.0
Carga general	--	2.0	1.5	1.0	3.0	2.0	5.0
Portacontenedores	100% eficiencia	1.0	0.6	0.8	1.0	1.0	3.0
	50% eficiencia	2.0	1.2	1.2	1.5	2.0	6.0
	Grúas	2.0	1.0	1.0	2.0	2.0	6.0
Graneleros	Cangilones	1.0	0.5	1.0	2.0	2.0	2.0
	Cinta transportadora	5.0	2.5	--	3.0	--	--
Petroleros	Brazos de carga	3.0 ²	3.0	--	--	--	--
Gaseros	Brazos de carga	2.0	2.0		2.0	2.0	2.0

Nota:

1. Los valores mostrados en esta tabla se refieren a las amplitudes pico a pico de los movimientos, a excepción de la deriva, cuya amplitud se considera medida de cero a pico.
2. Para localizaciones expuestas se admite un incremento del valor hasta 5.0 m cuando los brazos de carga estén específicamente diseñados para permitir grandes movimientos.

Otros de los criterios más citados a nivel mundial son los propuestos por Brunn (1981), Thoresen (2003) y Ueda & Shiraishi (1988). Aunque no se han reproducido en este documento, pueden ser consultados en las publicaciones originales. A nivel nacional podemos encontrar también una propuesta de umbrales de movimiento incluida dentro de la ROM 2.0-11 (Puertos del Estado, 2011), en la que se realiza un planteamiento similar a las anteriores (Tabla 3).

Tabla 3. Valores recomendados para los movimientos máximos admisibles del buque atracado compatibles con la realización de operaciones en condiciones seguras^{1,2}. Fuente: ROM 2.0-11.

Tipo de buque	Equipo de carga	Vaivén (m)	Deriva (m)	Alteada (m)	Guiñada (°)	Cabeceo (°)	Balance (°)
Pesqueros	Elevación	±0,5	1,0	±0,2	±1,5	±1,5	±1,5
Ferry/Crucero	Pasarela	±0,4	0,8	±0,25	±0,1	±0,1	±0,1
	Rampa lateral	±0,5	0,6	±1,2	±0,1	±1	±2,5
RoRo	Rampa 3/4	±0,5	0,6	±1,0	±0,8	±0,6	±1
	Rampa proa/popa	±0,3	0,6	±1,0	±0,5	±0,6	±0,8
Carga general	Elevación	±1,0	1,5	±0,5	±1,5	±1	±2,5
Portacontenedores	Elevación	±0,5	0,6	±0,4	±0,5	±0,5	±0,5
	Elevación (carga)	±1,0	1,0	–	±1	±1	±1
	Elevación (descarga)	±0,5	0,5	±0,5	±1	±1	±1
Granelero	Carga continua	±2,5	2,5	–	±1,5	–	–
	Descarga continua	±0,5	0,5	±0,5	±1	±1	±1
	Brazos de carga	±3,5	3,0	–	–	–	–
Petrolero	Brazos de carga	±2,0	2,0	–	±1	±1	±1
Gasero	Brazos de carga	±2,0	2,0	–	±1	±1	±1

Nota:

1. Los máximos movimientos horizontales y verticales incluidos en esta tabla se consideran respecto a la situación de reposo del buque atracado, medidos en su centro de gravedad, excepto para el caso del movimiento de deriva que se corresponden con la distancia medida en la dirección de alejamiento del sistema de atraque (obra de atraque + defensa). Los giros también se consideran medidos alrededor de los ejes horizontales y vertical que pasan por su centro de gravedad, respecto a la situación de reposo.
2. Los valores reflejados en la tabla son válidos para movimientos del buque causados por viento, corrientes y oleajes; es decir para movimientos con periodos medios entre 10 y 20 s. para movimientos del buque amarrado con periodos mayores, así como en presencia de ondas largas podrán aceptarse valores mayores. A su vez, los datos de la tabla corresponden a buques de dimensiones medias en relación con el rango de los existentes de cada tipo. Los movimientos admisibles tienden a ser más reducidos para los buques de mayores dimensiones que las correspondientes al buque medio y más amplios para los buques de menores dimensiones que éste.

Además de estos criterios generalistas, existen propuestas particularizadas para una tipología concreta de buque. Un ejemplo lo encontramos en las nuevas directrices para las operaciones de buques portacontenedores publicadas por el PIANC (2012). Durante las últimas décadas, la evolución sustancial del tamaño de estos buques, unido a las pequeñas

tolerancias de los sistemas de fijación y anclaje de los contenedores a bordo, hace que los portacontenedores requieran unos umbrales de movimiento mucho más restringidos (Tabla 4). Estas nuevas directrices predicen una pérdida continua en la eficiencia de la manipulación de las cargas a medida que aumenta la amplitud del movimiento, siendo los movimientos de alta frecuencia generalmente más perjudiciales que los movimientos de baja frecuencia para la misma amplitud. Es decir, los operadores de las grúas pueden compensar más fácilmente los movimientos de baja frecuencia (movimientos más lentos).

Tabla 4. Criterios de movimiento recomendados para buques portacontenedores compatibles con una eficiencia del 95% en operaciones de grúa. Fuente: PIANC (2012).

Tipo de buque	Equipo de carga	Vaivén (m)	Deriva (m)	Alteada (m)	Guiñada (°)	Cabeceo (°)	Balance (°)
Portacontenedores	95% eficiencia	0.2 - 0.4	0.2	0.3	0.3	0.3	1.0

Nota: Los movimientos se refieren a la máxima amplitud de movimiento significativa permitida.

Como se puede extraer de la información expuesta, no existe un criterio universal aplicable, por lo que se debe seleccionar el más apropiado para las características locales de cada instalación.

Aunque el cumplimiento de estos límites debería proporcionar condiciones de trabajo razonables para la mayoría de los tipos de operaciones y puertos, al tratarse de criterios generales, es muy posible encontrar excepciones. Esto hace muy recomendable la realización de estudios que ayuden a definir unos criterios particularizados para cada instalación.

1.3. Herramientas para la gestión de la operatividad

La evolución tecnológica unida al incremento de la inversión en I+D+i tanto de organismos públicos como de empresas privadas ha permitido la creación de herramientas de gestión orientadas a la optimización de las diferentes actividades relacionadas con el tránsito de buques en puertos.

Un ejemplo lo encontramos en los sistemas AIS (*Automatic Identification System*), inicialmente concebidos para proporcionar de forma automática la posición, el rumbo y la velocidad de cada embarcación, haciéndola visible para el resto de buques y evitando así

colisiones. Además de esta funcionalidad, suministran información actualizada relativa al viaje, como el destino, el calado o la hora estimada de llegada (ETA), que puede ser utilizada por otros sistemas para la gestión del tráfico marítimo. En la actualidad existen distintas plataformas que permiten a sus usuarios tener acceso a esta información, siendo MarineTraffic una de las más utilizadas, tanto por particulares como por profesionales.

Apoyándose en parte en los datos AIS, se han realizado distintos proyectos cuyo objetivo era desarrollar herramientas que permitieran mejorar la coordinación entre los actores de las escalas portuarias, compartiendo datos en tiempo real y agilizando trámites, de forma que esto facilite la gestión operativa de la entrada y salida de buques en puerto, reduciendo así los tiempos de espera y de fondeo e impulsando la utilización óptima de los recursos. Entre estos destaca *Sea Traffic Management Project (STM)* desarrollado dentro del proyecto europeo Monalisa 2.0.

También podemos encontrar ejemplos impulsados directamente desde las propias autoridades portuarias, como las aplicaciones *Pronto Port Call Optimisation* del Puerto de Rotterdam (Pronto | Port of Rotterdam) o *PitStop Port Operations* del Puerto de Algeciras (PitStop Port Operations | Puerto de Algeciras).

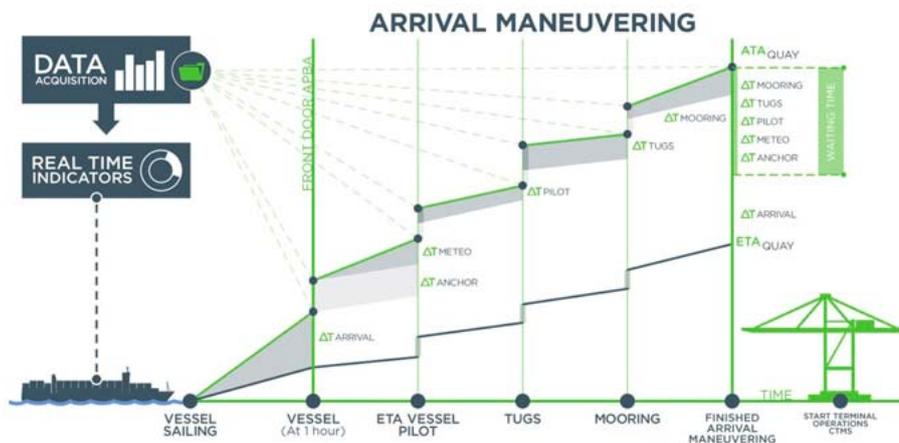


Figura 5. Esquema de funcionamiento del gestor de tiempos de maniobra. Fuente: Autoridad Portuaria Bahía de Algeciras (innovacion.apba.es).

Además de estas aplicaciones, los principales puertos a nivel mundial están implantando sistemas PMS (*Port Management System*) que integran todas las herramientas necesarias para apoyar las funciones administrativas y las operaciones de las autoridades portuarias, permitiendo gestionar, planificar y visualizar todas las acciones y movimientos del puerto.

También proporcionan información oportuna y precisa a las partes interesadas, proveedores de servicios, las terminales, órganos de gobierno, etc., agilizando así la toma de decisiones.

Todos los sistemas anteriormente mencionados buscan mejorar la eficiencia de las operaciones mediante la reducción de los tiempos de espera en las maniobras de entrada/salida, atraque/desatraque y suministro de servicios portuarios, dejando a un lado la propia operación de carga y descarga.

Como se ha mencionado durante esta introducción, esta maniobra es la que mayor tiempo consume de las operaciones en puerto y, por tanto, cualquier iniciativa destinada a optimizar este proceso repercutiría significativamente en la eficiencia del puerto.

Las condiciones en las que se va a realizar la operación de carga y descarga dependerán fundamentalmente del comportamiento de buque atracado, y este, a su vez, de los forzadores océano-meteorológicos actuantes. Aunque la mayoría de puertos cuentan con redes de monitorización y sistemas de predicción de las principales variables del medio físico (clima marítimo, viento, etc.), la relación entre éstas, el comportamiento del buque en el atraque y la eficiencia de la operación de carga y descarga no ha sido abordada con éxito, debido en gran parte a la dificultad para encontrar técnicas y herramientas que cubran la totalidad de estas necesidades.

A pesar de la complejidad del problema, las autoridades portuarias han mostrado un creciente interés en el desarrollo de herramientas de predicción del comportamiento del buque atracado, que sirvan para identificar y predecir posibles situaciones de riesgo y, en consecuencia, ayuden en la planificación de escalas y operaciones.

En el marco de esta Tesis Doctoral, se presentan resultados novedosos aplicados a los Puertos Interior y Exterior de A Coruña, orientados al desarrollo de este tipo de herramientas. Además, su relevancia se pone de manifiesto con el reciente lanzamiento del ambicioso proyecto *PROAS* (Port Risk Optimized Advanced System) impulsado por la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras, responsable de la gestión del puerto más importante de España y pionera en muchas ocasiones, en la actividad investigadora en el ámbito portuario nacional.

Capítulo 2

Objetivos

Teniendo en cuenta las necesidades destacadas en el capítulo anterior, el objetivo principal de esta Tesis Doctoral es el desarrollo de herramientas competitivas de monitorización *in-situ* del comportamiento de buque atracado que puedan representar una alternativa a la modelización numérica o física, como técnica para detectar, evaluar y aportar soluciones a los problemas operativos particulares de una instalación portuaria, incluso potenciar su uso para la creación de sistemas de predicción de la operatividad buque-infraestructura. Dicho objetivo principal se desglosa en los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollo de herramientas para la monitorización de los movimientos del buque atracado en campo, basadas en la adaptación de técnicas utilizadas en diferentes ámbitos de la ingeniería, como la visión artificial aplicada al seguimiento de objetos por imagen y los equipos de medida inerciales, fácilmente aplicables en cualquier entorno portuario.
- Validar la versatilidad de estas herramientas mediante su aplicación en campañas intensivas de monitorización en instalaciones portuarias con necesidades diferentes (terminales de graneles sólidos y mercancía general con atraque continuo, y terminales especializadas en graneles líquidos).
- Analizar la influencia de cada tipo de movimiento experimentado por los buques durante la operación de carga y descarga, identificar comportamientos diferenciados, movimientos restrictivos y situaciones críticas en función del tipo de barco, operación, zona de atraque y forzadores océano-meteorológicos.
- Revisión de los umbrales de movimiento establecidos en diferentes recomendaciones (PIANC 1995 y ROM 2.0-11) apoyada en datos de campo de comportamiento de buque, y la discusión de su adaptación a las características de una determinada instalación.
- Desarrollo de una metodología para la obtención de herramientas de predicción del comportamiento de buque atracado a partir de datos de campo de clima marítimo, viento y movimientos, que permitan generar un sistema de ayuda a la toma de

decisiones en la gestión de la operatividad, adaptado a las particularidades del puerto de estudio.

Capítulo 3

Herramientas para la monitorización *in-situ* de los movimientos del buque atracado

En este capítulo se presenta una síntesis de la información contenida en los artículos JCR I y II incluidos en el Anexo I de este documento:

- Artículo I: *Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application.*
- Artículo II: *Dynamical study of a moored vessel using computer vision.*

3.1. Introducción

Como se ha descrito en la introducción de esta Tesis, la monitorización en campo de los movimientos de buque atracado es una metodología poco extendida. Esto es consecuencia del importante coste que supone la adquisición de equipos de monitorización precisos y adaptados a los requerimientos de un entorno portuario, que permitan la realización de campañas intensivas con un gran número de buques analizados.

A pesar de ello, existe una demanda creciente de estudios en campo que analicen la interacción buque-infraestructura y que permitan detectar incidencias y establecer umbrales para la operatividad portuaria. Atendiendo a esta necesidad, se presenta el desarrollo y la validación, tanto en laboratorio como en campo, de dos herramientas de bajo coste económico y computacional, y de fácil manejo e instalación con las que se pretende dar solución a los inconvenientes anteriormente mencionados.

Estas herramientas se basan en la adaptación de dos tecnologías extendidas en el ámbito de la ingeniería como son las unidades de medida inercial (IMU) y la visión artificial orientada al seguimiento de objetos.

3.2. Unidad de medida inercial (IMU)

Las unidades de medida inercial (IMU) son equipos ampliamente utilizados en aplicaciones de diversas ramas de la ingeniería (civil, robótica, informática, etc.). Desde el punto de vista de la industria naval, las IMUs constituyen uno de los principales componentes de los

sistemas de navegación de los buques (Ayub et al., 2012; Phuong et al., 2009). Estos permiten conocer la orientación y la posición de un objeto móvil, como un barco, con respecto a un punto de referencia inicial. Aunque las IMUs suelen utilizarse en combinación con sistemas de posicionamiento absoluto para descartar errores o derivas a largo plazo (Woodman, 2007), pueden usarse para estimar movimientos angulares sin referencias externas.

Teniendo en cuenta esta posible aplicación, en el marco de esta Tesis Doctoral se diseñó un equipo inercial de bajo coste y un algoritmo computacional que integrara las medidas proporcionadas por el mismo para el estudio de los tres movimientos angulares de un buque atracado: cabeceo, balance y guiñada (Figura 6).

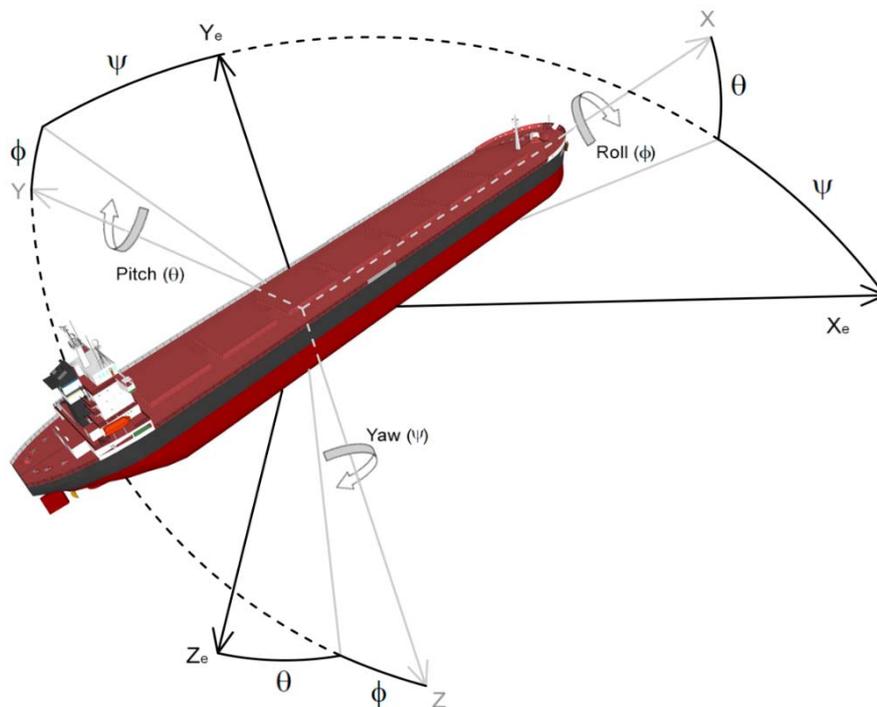


Figura 6. Movimientos de rotación de un buque amarrado: cabeceo (Pitch), balance (Roll) y guiñada (Yaw).

El equipo diseñado estaba formado por tres tipos de sensores. Un giróscopo microelectromecánico (MEM) de 3 ejes utilizado para medir la velocidad angular del cuerpo (STMicroelectronics L3GD20H). Un acelerómetro de 3 ejes para obtener las aceleraciones del objeto en movimiento con respecto a sí mismo (STMicroelectronics LSM303DLHC). Y finalmente, tres sensores anisotrópicos magneto-resistivos (AMR) ortogonales para medir

la fuerza y la dirección del campo magnético local (STMicroelectronics LSM303DLHC). La integración de estos sensores permite obtener una IMU robusta.

El objetivo final era el de disponer de un equipo compacto, económico y portátil que pudiera ser instalado en el interior del puente de mando de un buque para monitorizar sus tres movimientos angulares durante la totalidad de la duración de la operación (Figura 7).



Figura 7. IMU y ordenador de control y almacenamiento de datos instalados en el interior del puente de mando de un buque.

Desde el punto de vista numérico, la orientación de un barco puede definirse con matrices de rotación que describen la orientación de un sistema de coordenadas ortogonales móvil (barco) con respecto a otro fijo (Tierra).

Tal y como se ha explicado anteriormente, un buque amarrado puede experimentar tres movimientos de rotación alrededor de los ejes X , Y , Z :

- **Balance (ϕ):** ángulo de rotación del buque alrededor del eje longitudinal que pasa por su centro de gravedad (eje X).
- **Cabeceo (θ):** ángulo de rotación del buque alrededor del eje transversal que pasa por su centro de gravedad (eje Y).
- **Guiñada (ψ):** ángulo de rotación del buque alrededor del eje vertical que pasa por su centro de gravedad (eje Z).

Utilizando como referencia fija el sistema de ejes de la Tierra, la orientación del barco $R(t)$ puede obtenerse a partir de las matrices de rotación del balance R_x , el cabeceo R_y , y la guiñada R_z expresadas en base a los ángulos de Euler (ϕ, θ, ψ) :

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R(t) = R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \phi & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

Esta matriz $R(t)$ se denomina habitualmente como matriz de rotación (DCM, *Direction Cosine Matrix*), y es ortogonal. Con ella es posible rotar un vector de posición del marco del buque al marco de referencia de la Tierra de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = R(t) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

Siendo u_x, u_y, u_z las coordenadas del vector en el marco de referencia de la Tierra, v_x, v_y, v_z las coordenadas en el marco de referencia del buque y r_{ij} (con $i = x, y$ o z , y $j = x, y$ o z) cada una de las componentes de la matriz $R(t)$.

Teniendo en cuenta las implicaciones cinemáticas de la rotación de un cuerpo rígido (Premerlani & Bizard, 2009), la evolución en el dominio del tiempo de la orientación del buque se puede expresar en términos de su vector de rotación, cuya información es aportada por los giróscopos del IMU:

$$r(t) = r(0) + \int_0^t d\bar{\omega}(t) \times (t) \quad (5)$$

Donde $r(0)$ representa el valor inicial del vector de rotación y $\int_0^t d\bar{\omega}(t) \times (t)$ representa las variaciones en dicho vector.

En una situación ideal, el objetivo es seguir los ejes del buque desde la referencia de la Tierra, pero las mediciones de los giróscopos se hacen en el marco del propio buque. Esto se puede solucionar teniendo en cuenta la simetría de la rotación. Desde el marco de referencia del buque, los ejes de la Tierra experimentan la misma rotación con sentido opuesto. Por lo tanto, basta con invertir el signo de las medidas del giróscopo e intercambiar

los factores en el producto vectorial del término $\int_0^t d\bar{\omega}(\tau) \times (\tau)$. La expresión resultante queda de la siguiente forma:

$$d\bar{\omega}(t) = w(t) dt \quad (6)$$

$$r_e(t) = r_e(0) + \int_0^t r_e(t) \times d\bar{\omega}(t) = r_e(0) + \int_0^t r_e(t) \times w(t) dt \quad (7)$$

Donde, $r_e(t)$ representa el vector de rotación de los ejes de la tierra desde el punto de vista del buque en movimiento, $r_e(0)$ es el valor inicial de dicho vector, $\bar{\omega}(t)$ es el ángulo de rotación en cada instante y $w(t)$ es la velocidad angular del movimiento.

La Ecuación (7) puede expresarse de forma diferencial de la siguiente manera:

$$r_e(t + dt) = r_e(t) + r_e(t) \times w(t) dt \quad (8)$$

Cada uno de los vectores de la ecuación anterior se corresponde con las filas de la matriz $R(t)$. De esta forma, la expresión de la Ecuación (8) desde un enfoque matricial se representa de la siguiente manera:

$$R(t + dt) = R(t) \begin{bmatrix} 1 & -w_z(t)dt & w_y(t)dt \\ w_z(t)dt & 1 & -w_x(t)dt \\ -w_y(t)dt & w_x(t)dt & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Utilizando la Ecuación (9), la matriz $R(t)$ puede actualizarse a partir de señales del giróscopo. Sin embargo, debido a que se espera que los errores numéricos en la integración de datos violen gradualmente su ortogonalidad, es necesario realizar un ajuste. El proceso utilizado se encuentra descrito en detalle en Ayub et al. (2012).

Llegados a este punto, es posible obtener los tres ángulos de rotación que van a definir los movimientos de balance, cabeceo y guiñada del buque a partir de la matriz $R(t)$, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\text{Balance (roll)} \rightarrow \phi = \tan^{-1}(r_{zy}, r_{zz}) \quad (10)$$

$$\text{Cabeceo (pitch)} \rightarrow \theta = \tan^{-1}\left(\frac{r_{zx}}{\sqrt{r_{zy}^2 + r_{zz}^2}}\right) = -\sin^{-1}(r_{zx}) \quad (11)$$

$$\text{Guiñada (yaw)} \rightarrow \psi = \tan^{-1}(r_{yx}, r_{xx}) \quad (12)$$

Es preciso tener en cuenta que los sensores de la IMU están afectados por dos fuentes principales de error, que es necesario corregir antes de utilizar la información que proporcionan. En primer lugar, tenemos la componente de ruido de la señal, conocida como BIAS. Esta fuente de error es fácilmente controlable restando el valor promedio de la señal obtenido durante la realización de un test a largo plazo sin rotación (Groves, 2015).

En segundo lugar, está la tendencia de la señal a desviarse de suposición inicial. Esta deriva es uno de los mayores problemas de los giróscopos integrados en las IMUs, por lo que es necesario corregir su medida:

$$w(t) = w_{\text{giróscopo}}(t) + w_{\text{corrección}}(t) \quad (13)$$

Generalmente estas correcciones se realizan apoyándose en las mediciones de otros sensores, que minimizan los errores en los datos de los giróscopos cuya información constituye la fuente principal de orientación del sistema (Gebre-Egziabher et al., 2004; Premerlani & Bizard, 2009). También existen ejemplos en los que se utilizan algoritmos de fusión de datos basados en filtros de *Kalman* como solución al problema (Setoodeh et al., 2004; Yun & Bachmann, 2006).

En el sistema desarrollado se ha optado por calcular los vectores de corrección de la guiñada, del cabeceo y el balance usando los datos de los magnetómetros y los acelerómetros, respectivamente. Estos se obtienen mediante el producto vectorial de un vector de referencia proporcionado por los sensores anteriores y el calculado a partir de la matriz $R(t)$.

El primer paso en el proceso es la obtención de la corrección de la guiñada (rotación alrededor del eje Z , definida por el ángulo ψ). Para ello, se utiliza la información de los magnetómetros. Estos sensores proporcionan una medida de la guiñada utilizando como referencia el campo magnético de la Tierra (brújula magnética). Su salida puede verse comprometida por una fuente de error como consecuencia de la inclinación del barco, por lo que debe ser corregida según los ángulos de balance (ϕ) y de cabeceo (θ). Esto se consigue de la siguiente manera (Xisheng et al., 2009):

$$x_c = x_{\text{mag}} \cos(\theta) - z_{\text{mag}} \sin(\theta) \quad (14)$$

$$y_c = y_{\text{mag}} \cos(\phi) + z_{\text{mag}} \sin(\phi) \quad (15)$$

Donde $x_{mag}, y_{mag}, z_{mag}$ representan la salida de los magnetómetros, x_c, y_c son los valores corregidos y ϕ, θ son los ángulos de balance y cabeceo obtenidos de la matriz $R(t)$ siguiendo las Ecuaciones (10) y (11).

Tras corregir las componentes magnéticas del plano horizontal, y considerando el vector orientación normalizado 2D para $Z=0$ (x_c, y_c), es posible obtener las siguientes relaciones a partir del movimiento de guiñada calculado con los datos de los magnetómetros:

$$\text{Guiñada}_{mag} (\text{Yaw}_{mag}) \rightarrow \psi_{mag} = \tan^{-1}(y_c, x_c) \quad (16)$$

$$x_c = \cos(\psi_{mag}) \quad (17)$$

$$y_c = \sin(\psi_{mag}) \quad (18)$$

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, y dado que las mediciones de los magnetómetros se realizan en el sistema de coordenadas de la Tierra, es posible obtener el vector de corrección de la guiñada como el producto vectorial del vector orientación medido por los magnetómetros, y la proyección del eje X del buque en el plano $Z = 0$ de la Tierra:

$$\text{Corrección}_{guiñada, Tierra} = \begin{bmatrix} r_{xx} \\ r_{yx} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{xx}y_c - r_{yx}x_c \end{bmatrix} \quad (19)$$

Por último, el resultado obtenido se traduce al sistema de coordenadas del buque mediante la matriz de rotación $R(t)$:

$$\text{Corrección}_{guiñada} = R^T \text{Corrección}_{guiñada, Tierra} = \begin{bmatrix} r_{zx}(r_{xx}y_c - r_{yx}x_c) \\ r_{zy}(r_{xx}y_c - r_{yx}x_c) \\ r_{zz}(r_{xx}y_c - r_{yx}x_c) \end{bmatrix} \quad (20)$$

Para garantizar el correcto funcionamiento de este ajuste es necesario instalar cuidadosamente la unidad IMU en el interior del puente de mando, puesto que los magnetómetros se ven afectados por el metal ferromagnético, típico del casco de un buque. El siguiente paso en el proceso es la obtención de los vectores de corrección del balance y el cabeceo (rotaciones alrededor de los ejes X e Y, definidas por los ángulos ϕ, θ , respectivamente) a partir de las mediciones de los acelerómetros.

La salida de estos sensores proporciona la diferencia entre el valor de la aceleración de la gravedad y el valor de la aceleración experimentada por el cuerpo en cada uno de los ejes (X, Y, Z). Estas medidas son sólo fiables cuando el buque no está acelerado, ya que la aceleración debida a las fuerzas no gravitatorias interfiere con la estimación de la gravedad. En un buque amarrado por definición, las principales fuerzas no gravitatorias, como son las generadas por el sistema de propulsión o las centrífugas debidas a los cambios en la dirección de avance, pueden ser despreciadas. Aun así, los buques experimentan pequeñas aceleraciones y deceleraciones como consecuencia de la acción del oleaje, las corrientes, el viento y su interacción con el sistema de amarre. Sin embargo, se puede considerar que estos efectos se cancelan a medio-largo plazo, por lo que, en promedio, las aceleraciones del buque amarrado pueden despreciarse. Además de estas hipótesis, los valores atípicos (outliers), se filtran explícitamente cuando la magnitud obtenida del vector aceleración sea inferior a $0.5g$ o superior a $1.5g$, siendo g la magnitud de la aceleración de la gravedad de la Tierra (9.80665 m/s^2). Dichos umbrales se fijaron considerando las características de los movimientos de los buques amarrados (movimientos lentos poco acelerados).

Teniendo en cuenta lo anterior, los acelerómetros nos permiten obtener una medida de referencia del vector aceleración de la gravedad en el marco de referencia del cuerpo, a partir de la cual es posible calcular los movimientos de balance y cabeceo de la siguiente manera:

$$\text{Balance}_{acc} (\text{Roll}_{acc}) \rightarrow \phi_{acc} = \tan^{-1}(y_{acc}, z_{acc}) \quad (21)$$

$$\text{Cabeceo}_{acc} (\text{Pitch}_{acc}) \rightarrow \theta_{acc} = \tan^{-1}\left(\frac{x_{acc}}{\sqrt{y_{acc}^2 + z_{acc}^2}}\right) \quad (22)$$

Donde $x_{acc}, y_{acc}, z_{acc}$ representan la salida de los acelerómetros.

Llegados a este punto, es posible obtener el vector de corrección para el balance y el cabeceo como el producto vectorial del vector de referencia calculado a partir de las medidas de los acelerómetros, y el vector aceleración de la gravedad proyectado en el sistema de referencia del buque (r_{zx}, r_{zy}, r_{zz} , fila Z de la matriz de rotación $R(t)$):

$$\text{Corrección}_{balance-cabeceo} = \begin{bmatrix} r_{zx} \\ r_{zy} \\ r_{zz} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{acc} \\ y_{acc} \\ z_{acc} \end{bmatrix} \quad (23)$$

Finalmente, cada uno de los vectores de corrección es ponderado y alineado mediante un controlador de retroalimentación proporcional-integral (controlador PI):

$$Out_{PI}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (24)$$

$Out_{PI}(t)$ representa la salida del controlador PI. K_P , K_I son los parámetros de ajuste denominados ganancias proporcional e integral, respectivamente, y $e(t)$ es el error de estimación en el instante t .

Por lo tanto, la salida del controlador PI representa el término de corrección aditiva de la salida de los giróscopos en la Ecuación (13). En la práctica, este valor de corrección se calcula de la siguiente manera:

$$w_{corrección}(t) = w_P(t) + w_I(t) + K_I e(t) dt \quad (25)$$

$$w_P(t) = K_P e(t) \quad (26)$$

$$w_I(t) = K_I e(t) \quad (27)$$

$$e(t) = W_{guiñada} Corrección_{guiñada}(t) + W_{balance-cabeceo} Corrección_{balance-cabeceo}(t) \quad (28)$$

$W_{guiñada}$ y $W_{balance-cabeceo}$ son parámetros de ponderación ajustados empíricamente siguiendo las recomendaciones expuestas en Premerlani & Bizard (2009). A su vez, K_P y K_I se ajustan utilizando el método de Ziegler & Nichols (1942).

La aplicación iterativa de estas correcciones permite actualizar la matriz de rotación $R(t)$ definida en la Ecuación (9). De esta manera, es posible corregir el problema de la deriva en la medida de los giróscopos, obteniendo así una IMU robusta.

3.3. Sistema de seguimiento por imagen basado en técnicas de visión artificial

La visión artificial es una disciplina científica basada en la captura y tratamiento de imágenes para que estas puedan ser percibidas y comprendidas por un ordenador. En la actualidad, estas técnicas son utilizadas en aplicaciones de multitud de ámbitos. Su principal objetivo es la solución de un determinado problema que pueda presentarse en un proceso tanto industrial como no industrial. Así podemos encontrar desarrollos orientados a mejorar la productividad y la calidad de procesos de fabricación, herramientas de

seguridad para la detección de movimientos, sistemas de reconocimiento facial (Xu et al., 2015), o aplicaciones médicas para la localización de tumores (Robertson et al., 2014).

En el ámbito naval y marítimo, también existen varias aplicaciones basadas en técnicas de visión artificial. Por ejemplo, Broggi et al. (2012) desarrollaron un sistema de alerta de velocidad para embarcaciones en un canal de navegación, o Yun Jip et al. (2014) presentaron un método de detección automática de buques en zonas portuarias. Estas aplicaciones se basan generalmente en la utilización de un filtro de *Kalman* para rastrear un barco durante la navegación, aunque también existen ejemplos en los que se utilizan otras técnicas para el mismo fin, como el uso de la auto-similitud (*self-similarity*) o los gráficos de factores (Castaldo & Palmieri, 2014; Hu et al., 2009).

Desde el punto de vista de la monitorización de buque atracado, solo existen algunos ejemplos de desarrollos para analizar sus movimientos, como en Malheiros et al. (2013) que utilizaron cámaras estereoscópicas para rastrear un conjunto de marcas situadas sobre un modelo de un petrolero en laboratorio. El principal inconveniente de esta investigación fue que los ensayos sólo se habían realizado en condiciones de luz interior y controlada, sin abordar las cuestiones de un escenario real, donde los cambios climáticos y de luz pueden representar importantes desafíos.

Teniendo en cuenta esta limitación, se planteó en esta Tesis Doctoral el desarrollo de una técnica de visión artificial para la estimación de los movimientos de buque atracado bajo condiciones reales. El sistema se basa en la instalación y calibración de un conjunto de cámaras sincronizadas entre sí, en las proximidades del atraque, que permitan obtener distintos puntos de vista del buque amarrado. Las imágenes obtenidas son tratadas mediante un algoritmo de desarrollo propio que realiza el seguimiento de un conjunto de puntos en cada vista, e integra los desplazamientos para obtener los movimientos 3D del buque (Figura 8).

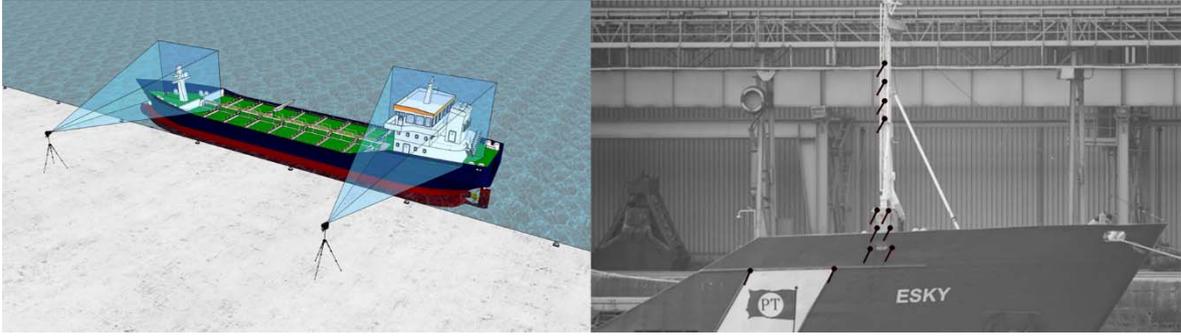


Figura 8. Ejemplo de esquema de adquisición de imágenes para la obtención de los movimientos de alzada, vaivén y cabeceo del buque (izq.). Imagen procesada con los puntos de control y los vectores de desplazamiento (dcha.).

Con ello se busca obtener una tecnología fácil de implementar en una instalación portuaria, con un bajo coste económico y computacional, que complemente la información proporcionada por la IMU, e incluso la reemplace cuando la localización de las cámaras y la perspectiva de las imágenes permita analizar los seis movimientos del buque atracado.

3.3.1. Calibración del algoritmo

La técnica propuesta puede utilizarse tanto desde un enfoque 2D (obtención de movimiento en el plano), como desde un enfoque 3D. Sin embargo, aunque el funcionamiento en ambos escenarios es similar, existen importantes diferencias en el proceso de calibración que es necesario puntualizar.

En un sistema de cámaras 2D, cada cámara hace un seguimiento de diferentes características o referencias, por lo que se deben calibrar de forma independiente siguiendo las ecuaciones de cámara estenopeica (*pin-hole camera equations*) expresadas de la siguiente manera (Zhang, 1999):

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = M \times \begin{bmatrix} \frac{X_c}{Z_c} \\ \frac{Y_c}{Z_c} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Donde X_c, Y_c, Z_c representan las coordenadas de un punto en el espacio de la cámara, x_i, y_i son las correspondientes coordenadas en píxeles, M es la matriz de transformación, $f(f_x, f_y)$ es la distancia focal de la lente y $c(c_x, c_y)$ su centro óptico.

En la práctica, debido a las pequeñas imperfecciones que suelen presentar las lentes, las imágenes capturadas pueden integrar ciertas distorsiones. Estas pueden ser modeladas usando las siguientes ecuaciones paramétricas (Weng et al., 1992):

$$dr_x(x) = xk_1r^2 + xk_2r^4 + xk_3r^6 \quad (31)$$

$$dr_y(y) = yk_1r^2 + yk_2r^4 + yk_3r^6 \quad (32)$$

$$dt_x(x, y) = k_3(r^2 + 2x^2) + 2k_4xy \quad (33)$$

$$dt_y(x, y) = 2k_3xy + k_4(r^2 + 2y^2) \quad (34)$$

Siendo x e y las coordenadas espaciales de un determinado punto de la imagen, r la distancia al centro óptico de la lente, dr y dt la distorsión radial y tangencial, respectivamente, y k_i los parámetros de distorsión a determinar.

En este caso, la calibración se realiza teniendo en cuenta la geometría real de un patrón en 2D. Los tipos de movimiento que se pueden medir dependen de la cantidad y localización de las cámaras, ya que solo se analizan movimientos contenidos en dicho plano 2D.

Por otro lado, en un sistema de cámaras 3D, se utilizan al menos dos cámaras para observar el mismo conjunto de características o referencias. En este caso, el proceso de calibración se basa en determinar la estructura de la escena a partir de las dos vistas.

Para ello, en primer lugar, se realiza el mismo procedimiento descrito en el caso 2D con cada una de las cámaras, para luego obtener la estimación de los vectores de traslación (T) y la matriz de rotación (R) de la segunda cámara con respecto a la primera. Esto se puede expresar de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T \quad (35)$$

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \quad (37)$$

Donde X, Y, Z representan las coordenadas del punto de interés o referencia en el espacio real, y X_c, Y_c, Z_c en el sistema de coordenadas de la cámara. El proceso completo de calibración se encuentra descrito en detalle en Hannah (1974) y en Bolles et al. (1993).

Aunque la utilización de sistemas 3D tienen la ventaja de permitir analizar la totalidad de movimientos con solo dos cámaras, este no es adecuado para un entorno como un muelle de un puerto, ya que su distancia óptima de trabajo se encuentra por debajo de los 20 metros al objeto a monitorizar y, en muchas ocasiones, será preciso ubicar las cámaras a mayor distancia para evitar interferencias en la operativa habitual de estas instalaciones. Es por esto que se decidió utilizar para el presente estudio un sistema de cámaras 2D.

3.3.2. Selección de los puntos de seguimiento

Para la selección de las referencias o puntos de interés utilizados en el proceso de seguimiento, se planteó un enfoque semiautomático que consta de tres pasos:

- En primer lugar, el usuario selecciona un punto y su región de interés asociada en una de las imágenes del barco. Esta región debería corresponderse idealmente con una parte situada en el plano sagital o frontal del buque, según el movimiento que interese estudiar.
- A continuación, se aplica una técnica automática para la detección de características en imágenes sucesivas. En este caso, se utilizó la técnica SURF (*Speeded Up Robust Features*) descrita en Bay et al. (2008). Se trata de un detector de características que no varía de escala, basado en la matriz Hessiana. Esta se calcula utilizando derivadas gaussianas de segundo orden en forma de filtros de caja (Tuytelaars & Mikolajczyk, 2008).
- Finalmente, el usuario tiene la posibilidad de añadir, editar o modificar los puntos resultantes.

3.3.3. Proceso de búsqueda

Tras seleccionar los puntos de interés, la estrategia empleada para el seguimiento de características se basa en un proceso piramidal iterativo de multiresolución. Este desarrollo de búsqueda se fundamenta en la comparación de las regiones alrededor de los puntos de interés de la imagen original con las que representan un desplazamiento candidato según un modelo de movimiento. Para ello se utiliza el coeficiente de correlación de *Pearson* (r) como métrica de similitud. El proceso de búsqueda se divide en dos etapas:

1) **Modelo de movimiento de primer orden**

En esta etapa, el proceso de búsqueda se restringe a encontrar una transformación rígida de la escena. Para ello, se utilizan tres grados de libertad que representan los principales efectos del movimiento:

$$X'_i = X_i - C_X \cos(\alpha) + C_Y \sin(\alpha) + C_X + d_X \quad (38)$$

$$Y'_i = Y_i - C_X \sin(\alpha) + C_Y \cos(\alpha) + C_Y + d_Y \quad (39)$$

Donde X_i, Y_i y X'_i, Y'_i representan las coordenadas de la imagen antes y después del primer desplazamiento del punto da interés i , α es el ángulo de rotación 2D con relación al centro de la imagen (C_X, C_Y) y d_X, d_Y representan un desplazamiento lineal.

Este modelo de movimiento de primer orden se utiliza con la descomposición piramidal mediante un enfoque *coarse-to-fine* (de grueso a fino). Por lo tanto, la primera iteración se ejecuta con una imagen submuestra y en una amplia área de búsqueda. Para ello, el usuario selecciona un ángulo de rotación y un desplazamiento lineal máximos. Posteriormente, en cada iteración la resolución de la imagen se incrementa en un factor de 2, mientras que el rango de búsqueda de movimientos se reduce en consecuencia. Esta técnica aumenta la precisión y reduce el coste computacional de los cálculos. El número de pasos piramidales y las iteraciones en plena resolución también pueden ser configurados por el usuario.

2) **Modelo de movimiento de segundo orden**

Después de obtener la máxima similitud global en el paso anterior, la medición del movimiento se refina con un segundo proceso de búsqueda para encontrar localmente desplazamientos lineales para cada punto de interés. Esto se puede representar de la siguiente manera:

$$x_i^d = X'_i + l_X \quad (40)$$

$$y_i^d = Y'_i + l_Y \quad (41)$$

Donde x_i^d, y_i^d representan la coordenadas optimizadas del punto de interés i tras un desplazamiento lineal discreto (l_X, l_Y).

Con la técnica descrita, el desplazamiento lineal más probable de una determinada región de interés entre imágenes sucesivas viene determinado por su máximo valor de correlación discreta (r). Para obtener una precisión subpixel en la medida, es necesario traducir los valores de correlación a un espacio continuo. Para ello, el verdadero pico de la similitud se calcula ajustando una función gaussiana en cada dimensión del movimiento, utilizando tres puntos para su resolución. Este procedimiento se puede expresar para la dimensión x del desplazamiento de la siguiente manera:

$$x_i^c = x_i^d + \frac{N}{D} \quad (42)$$

$$N = \ln(r(x_i^d - 1)) - \ln(r(x_i^d + 1)) \quad (43)$$

$$D = 2 \ln(r(x_i^d - 1)) - 4 \ln(r(x_i^d - 1)) + 2 \ln(r(x_i^d + 1)) \quad (44)$$

Siendo x_i^c la coordenada del punto de interés i en un espacio continuo tras un desplazamiento lineal, y $r(x_i^d)$ el máximo valor de correlación discreta para dicho punto de interés, ambos en la dimensión x .

Tras este paso, los desplazamientos locales se limitan a un modelo paramétrico de movimiento global, que utiliza el algoritmo de *Gauss-Newton* para resolver la transformación homográfica de cada punto de interés (transformación no lineal de 8 parámetros):

$$X_i'' = \frac{(x_i^c h_1 + y_i^c h_2 + h_3)}{(x_i^c h_7 + y_i^c h_8 + 1)} \quad (45)$$

$$Y_i'' = \frac{(x_i^c h_4 + y_i^c h_5 + h_6)}{(x_i^c h_7 + y_i^c h_8 + 1)} \quad (46)$$

Donde X_i'' , Y_i'' representan las coordenadas de la imagen tras la aplicación del modelo de movimiento de segundo orden, y h_k son cada uno de los ocho parámetros de homografía calculados a partir de los valores anteriores.

3.3.4. Seguimiento a largo plazo

Uno de los principales problemas a la hora de aplicar técnicas de visión artificial para el seguimiento de objetos a largo plazo en localizaciones exteriores son los cambios drásticos de iluminación y color que experimenta la escena, como consecuencia de los ciclos día-noche o las variaciones en las condiciones meteorológicas. Además, en un entorno como el

portuario, se espera que en ocasiones cuerpos extraños como gaviotas o la propia tripulación del barco puedan interferir en la imagen, ocluyendo alguno de los puntos de interés. A la vista de estas dificultades, se diseñó un algoritmo robusto capaz de manejar ambas problemáticas de la siguiente manera:

- En primer lugar, las oclusiones son manejadas por el modelo de movimiento de primer orden, permitiendo el uso de un subconjunto de referencias en el proceso de búsqueda. Con este fin, las referencias o puntos de interés con una baja correlación son descartadas cuando la mayoría de ellas han logrado una buena coincidencia. Además, en este escenario el proceso de búsqueda de segundo orden no actualizará la posición de una referencia con baja correlación. Este umbral puede ser establecido por el usuario, siendo su valor por defecto 0.5 (habitual en este tipo de trabajos).
- En segundo lugar, la métrica de similitud utilizada es invariable al promedio de la intensidad lumínica (coeficiente de correlación de *Pearson*). Esto proporciona robustez a los cambios rápidos y cortos de iluminación. Además, el uso de una región de interés para correlacionar cada uno de los puntos de interés, permite lograr un alto nivel de correlación incluso cuando la imagen está desenfocada como consecuencia de grandes movimientos del objeto, que provocan su salida del área de enfoque fijada manualmente al inicio del seguimiento.
- Finalmente, para superar los cambios lentos y a largo plazo en la iluminación, las referencias rastreadas se refrescan a lo largo del tiempo, actualizando la imagen de origen una vez transcurrida la tasa de refresco definida por el usuario. Para ello, el punto fuente de la medición se renueva dinámicamente usando los desplazamientos previos para seguir la posición de las referencias originales en el buque. Esta estrategia ha sido aplicada con éxito en trabajos realizados por el grupo de investigación al que pertenezco, como Rodríguez et al. (2012), donde se explica el procedimiento en detalle.

3.4. Validación de las técnicas en laboratorio

Tras finalizar ambos desarrollos, se diseñaron diferentes ensayos de laboratorio orientados a validar el funcionamiento general y a determinar la precisión de las dos técnicas. Estos experimentos se realizaron en las instalaciones del Centro de Innovación Tecnológica en Edificación e Ingeniería Civil (CITEEC) de la Universidad de Coruña.

En los primeros ensayos, se pretendía analizar el funcionamiento general de ambas técnicas ante un movimiento constante de gran amplitud. Para ello, se utilizó un balancín oscilatorio de plataforma que describía un movimiento periódico de amplitud constante de 15° y periodo ajustable, fijado para estos ensayos en 0.2 Hz.

El movimiento oscilatorio descrito por el agitador fue registrado simultáneamente con ambas técnicas en tests de 35 segundos de duración. La unidad IMU se situó tanto con su eje longitudinal como con su eje transversal perpendicularmente alineados con el eje de rotación del balancín, analizando así las medidas de la rotación alrededor de los ejes X e Y (Figura 9).

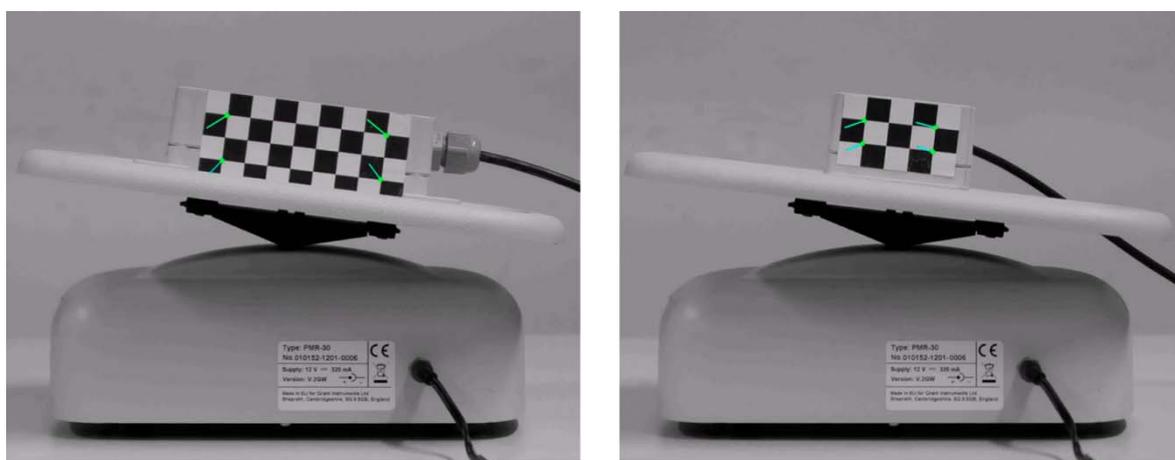


Figura 9. Dispositivo IMU colocado en la parte superior del balancín con patrón de ajedrez utilizado para registrar las oscilaciones con el sistema de visión artificial situado en el plano longitudinal (izq.) y en el plano transversal (dcha.).

La cámara que se utilizó para aplicar la técnica de seguimiento por imagen, se situó a una distancia de 1.5 m del objeto, perpendicular al plano del movimiento y con el objetivo centrado en el patrón ajedrezado situado sobre la IMU para facilitar la detección de puntos de control. La resolución utilizada para el registro de las imágenes fue de 4 Mpx y se seleccionaron 4 puntos de interés para analizar el movimiento de oscilación (Figura 9).

Las figuras 10 y 11 muestran los resultados obtenidos en ambos ejes de la unidad IMU (ensayo longitudinal - rotación alrededor del eje Y y del ensayo transversal - rotación alrededor del eje X). Como puede observarse, las medidas de las dos técnicas muestran una fuerte relación lineal, alcanzando valores del coeficiente de correlación de *Pearson* (r) de 0.999 en ambos casos.

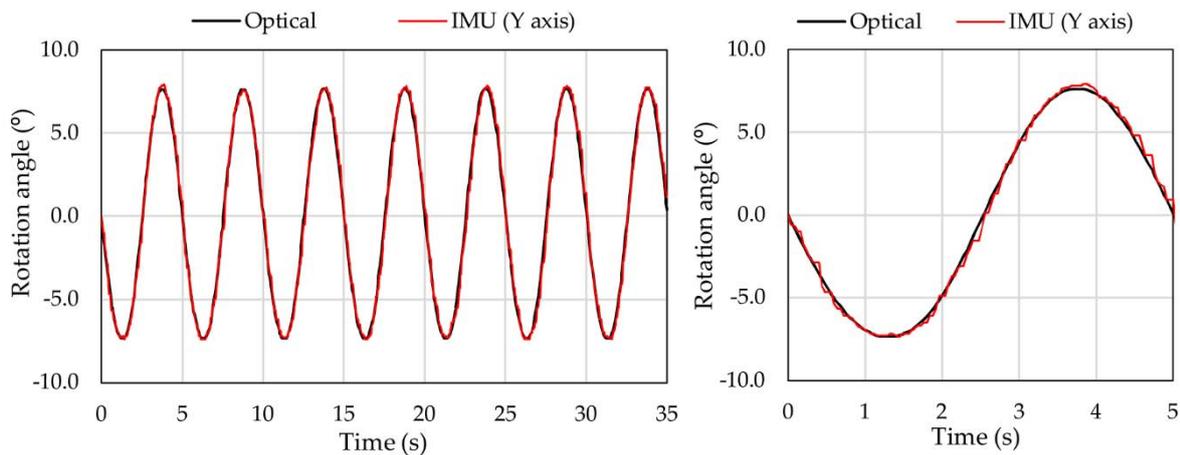


Figura 10. Registro del movimiento del balancín con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje longitudinal perpendicular al eje de oscilación (izq.). Ampliación del primer ciclo de oscilación de la misma prueba (dcha.).

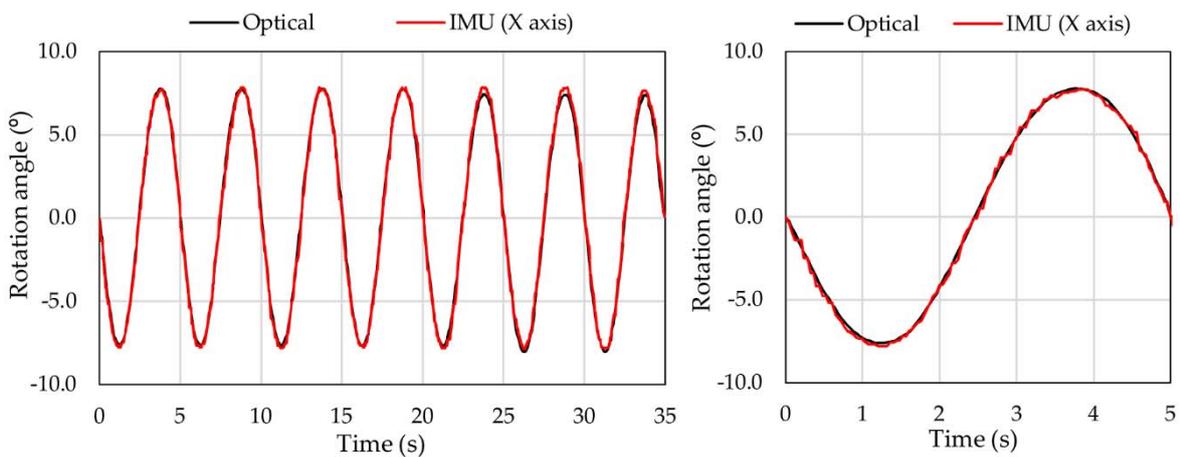


Figura 11. Registro del movimiento del balancín con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje transversal perpendicular al eje de oscilación (izq.). Ampliación del primer ciclo de oscilación de la misma prueba (dcha.).

Fijándose en la oscilación ampliada de las figuras anteriores, se aprecia cómo el registro de la IMU es ligeramente más inestable, como consecuencia de su sensibilidad y del ruido

derivado del propio balancín, al encontrarse el dispositivo situado sobre el objeto a monitorizar.

Además de la correlación entre las medidas, se analizaron las amplitudes del movimiento registradas por ambas técnicas a lo largo de cada ensayo, cuyos resultados se muestran en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes consecutivos con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje longitudinal perpendicular al eje de oscilación.

Cicle	Optical (°)	IMU Y axis (°)	Diff. IMU vs. Optical (°)
1	14.95	15.3	0.34
2	14.95	15.1	0.14
3	14.99	15.2	0.21
4	14.98	15.2	0.21
5	14.99	15.1	0.10
6	14.96	15.2	0.23
7	14.95	15.1	0.14
Average (°)	14.96	15.16	0.20

Tabla 6. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes consecutivos con la técnica de seguimiento por imagen y la unidad IMU situada con su eje transversal perpendicular al eje de oscilación.

Cicle	Optical (°)	IMU X axis (°)	Diff. IMU vs. Optical (°)
1	15.04	15.2	0.16
2	15.14	15.2	0.06
3	15.04	15.3	0.26
4	15.09	15.3	0.25
5	15.08	15.2	0.12
6	15.03	15.3	0.27
7	14.99	15.2	0.17
Average (°)	15.06	15.24	0.18

Como puede verse, tanto la amplitud de cada ciclo de oscilación, como el valor promedio al final de cada ensayo alcanzaron valores muy próximos a los 15° de amplitud de oscilación del balancín, con independencia de la técnica utilizada y el ensayo realizado. Este resultado pone de manifiesto la buena precisión en la estimación de movimientos de gran amplitud de ambas técnicas, siendo ligeramente más precisa la técnica de seguimiento por imagen.

Con la segunda batería de ensayos, se pretendía determinar la capacidad de las técnicas para analizar pequeños movimientos, cuyas amplitudes estuvieran próximas a los valores que podrían registrar los buques durante su operación en condiciones normales.

Para ello se construyó un péndulo simple de longitud 2.95 m, equipado con una plataforma centrada en su eje de rotación que permitiera la instalación de la unidad IMU y la monitorización del movimiento mediante el sistema de seguimiento por imagen (Figura 12).

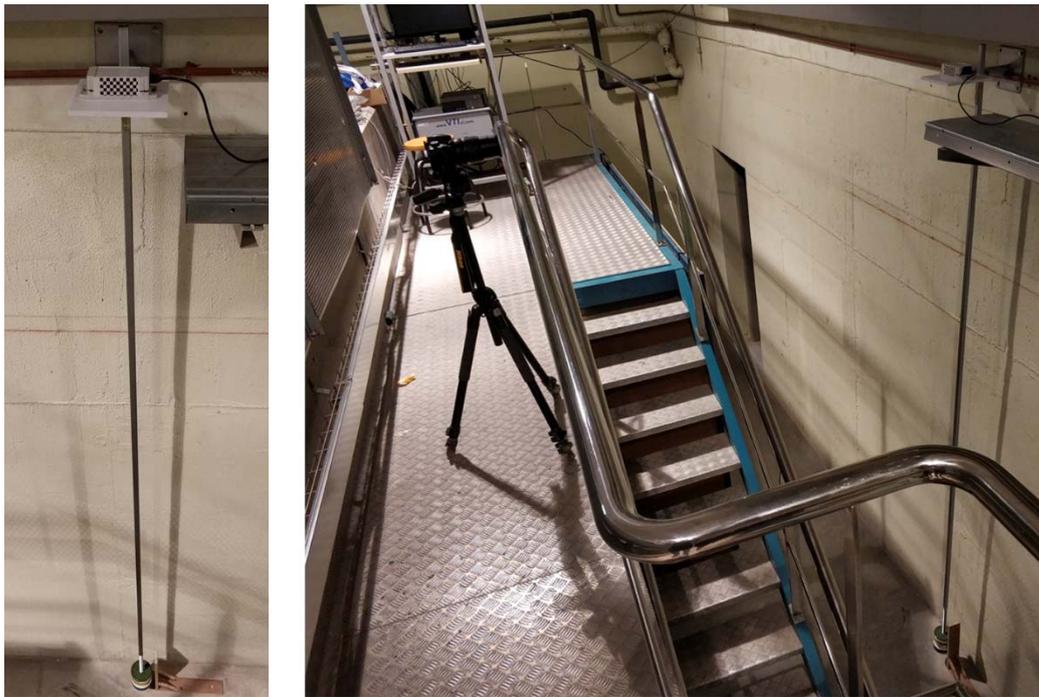


Figura 12. Montaje para los ensayos de validación con péndulo simple.

La estrategia de ensayos fue la misma que en el caso anterior, analizar el movimiento oscilatorio descrito por el péndulo con los ejes X e Y de la unidad IMU y la técnica de seguimiento por imagen. Las amplitudes teóricas ensayadas fueron de 2.0° y 0.5° , respectivamente.

Las figuras 13 y 14 muestran los resultados obtenidos con ambos ejes de la unidad IMU para cada una de las amplitudes ensayadas.

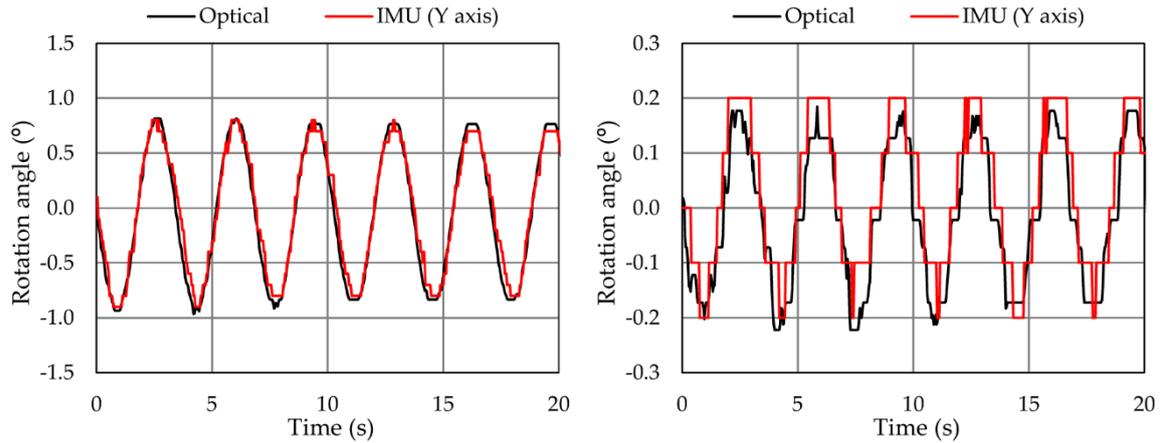


Figura 13. Movimiento oscilatorio del péndulo registrado con la técnica de seguimiento por imagen y la IMU en posición longitudinal (eje Y) durante los ensayos de amplitud 2.0° (izq.) y 0.5° (dcha.).

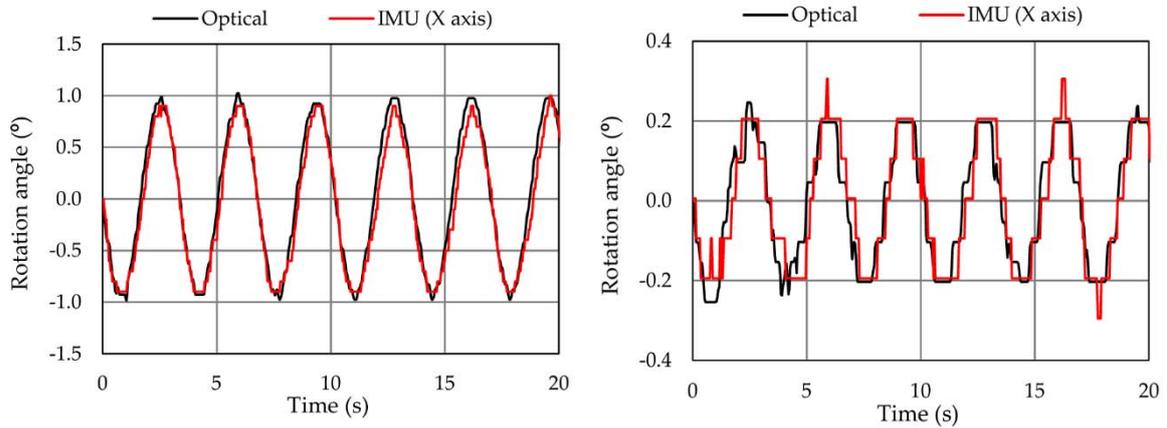


Figura 14. Movimiento oscilatorio del péndulo registrado con la técnica de seguimiento por imagen y la IMU en posición transversal (eje X) durante los ensayos de amplitud 2.0° (izq.) y 0.5° (dcha.).

De nuevo, las medidas de las dos técnicas muestran una fuerte relación lineal, con valores del coeficiente de correlación de *Pearson* (r) superiores a 0.92 en todos los ensayos analizados (Tabla 7).

Tabla 7. Valores del coeficiente de correlación obtenidos en los ensayos del péndulo de oscilación.

	2.0° amplitude tests	0.5° amplitude tests
r coeff. IMU (X-axis) vs. Optical	0.98	0.95
r coeff. IMU (Y-axis) vs. Optical	0.98	0.93

Si analizamos las amplitudes registradas durante los ensayos, podemos ver como no existen desviaciones significativas entre los datos ofrecidos por ambas técnicas, manteniéndose la diferencia entre las amplitudes promedio por debajo de 0.1° en todos los ensayos (Tablas 8 y 9).

Aunque en ninguno de los test el valor promedio registrado ha alcanzado el de la amplitud teórica (2.0° y 0.5° , respectivamente), el hecho de que las dos técnicas mostraran resultados tan similares hace pensar que esto fue debido a las imperfecciones en la ejecución del desplazamiento inicial del péndulo. Por tanto, se puede concluir que las técnicas permitieron el registro estable de un movimiento ondulatorio de amplitud 0.4° , lo que se traduce en una precisión en la medida de ángulos de al menos 0.2° .

Tabla 8. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes en los ensayos de oscilación del péndulo de amplitud teórica 2.0° .

Cicle	2.0° amplitude test - IMU (Y axis)			2.0° amplitude test - IMU (X axis)		
	Optical (°)	IMU (°)	Diff. IMU vs. Optical (°)	Optical (°)	IMU (°)	Diff. IMU vs. Optical (°)
1	1.74	1.7	0.04	1.97	1.9	0.07
2	1.77	1.7	0.07	1.94	1.8	0.14
3	1.69	1.6	0.09	1.85	1.8	0.05
4	1.62	1.6	0.02	1.94	1.8	0.14
5	1.56	1.5	0.06	1.95	1.9	0.05
Avg. (°)	1.68	1.62	0.06	1.93	1.84	0.09

Tabla 9. Amplitudes del movimiento registradas entre dos pasos por cero descendentes en los ensayos de oscilación del péndulo de amplitud teórica 0.5° .

Cicle	0.5° amplitude test - IMU (Y axis)			0.5° amplitude test - IMU (X axis)		
	Optical (°)	IMU (°)	Diff. IMU vs. Optical (°)	Optical (°)	IMU (°)	Diff. IMU vs. Optical (°)
1	0.38	0.4	0.02	0.50	0.4	0.10
2	0.39	0.4	0.01	0.43	0.5	0.07
3	0.40	0.4	0.00	0.40	0.4	0.00
4	0.38	0.4	0.02	0.40	0.4	0.00
5	0.35	0.4	0.05	0.40	0.5	0.10
Avg. (°)	0.38	0.40	0.02	0.43	0.44	0.01

Tras determinar el correcto funcionamiento de las técnicas, tanto en la determinación de movimientos controlados de gran amplitud como de amplitud reducida, se diseñó una

última batería de ensayos para analizar su viabilidad bajo condiciones de oleaje y también para validar la corrección de la deriva de la unidad IMU. Las pruebas se realizaron en el canal de ola-corriente del CITTEC, analizando con ambas técnicas el movimiento de cabeceo (*pitch*) de un modelo a escala reducida del casco de un catamarán sometido a diferentes condiciones de oleaje. La Figura 15 muestra el montaje experimental utilizado para estos ensayos.

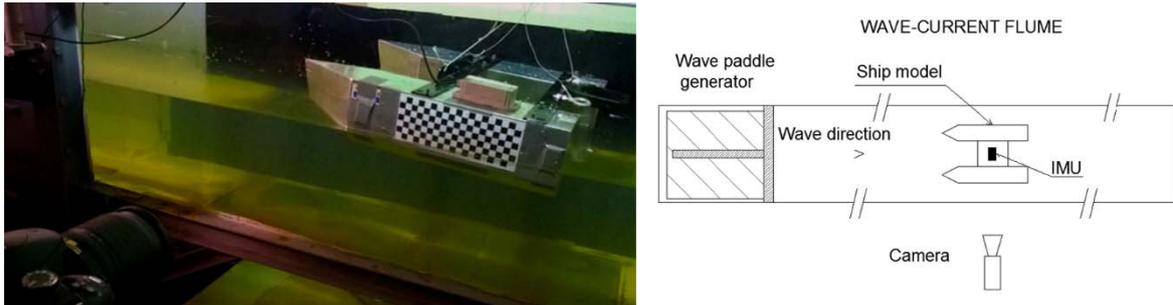


Figura 15. Montaje experimental de los ensayos en el canal de ola-corriente del CITTEC.

En primer lugar, se realizó un ensayo de siete horas de duración en condiciones estacionarias con oleaje constante (frecuencia: 0.8 Hz; amplitud: 8 cm) para verificar el correcto funcionamiento de la corrección de la deriva aplicada al equipo inercial. La Figura 16 muestra el registro del cabeceo (*pitch*) medido en uno de los ejes de la unidad IMU (eje Y).

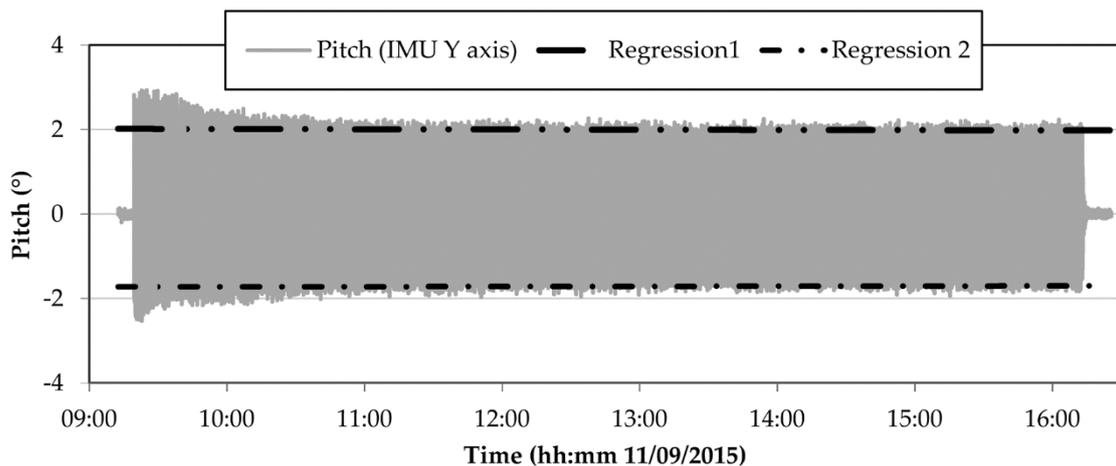


Figura 16. Registro del movimiento de cabeceo (*pitch*) registrado durante el ensayo a largo plazo para la validación de la corrección de la deriva de la unidad IMU.

El valor promedio del cero, calculado con el barco en reposo al inicio y al final del ensayo mostró una desviación de 0.0015° , por lo que se pudo confirmar que el dispositivo no presenta ninguna deriva a largo plazo.

Una vez comprobada la ausencia de deriva en la IMU, se realizaron varios ensayos con distintas combinaciones de altura de ola y frecuencia, para analizar el movimiento de cabeceo con ambas técnicas:

- Frecuencia del oleaje de 0.5 Hz con alturas de ola de 18 cm, 20 cm y 24 cm.
- Frecuencia del oleaje de 0.7 Hz con alturas de ola de 18 cm, 20 cm y 24 cm.

Algunos de los resultados obtenidos se muestran en las figuras 17 y 18.

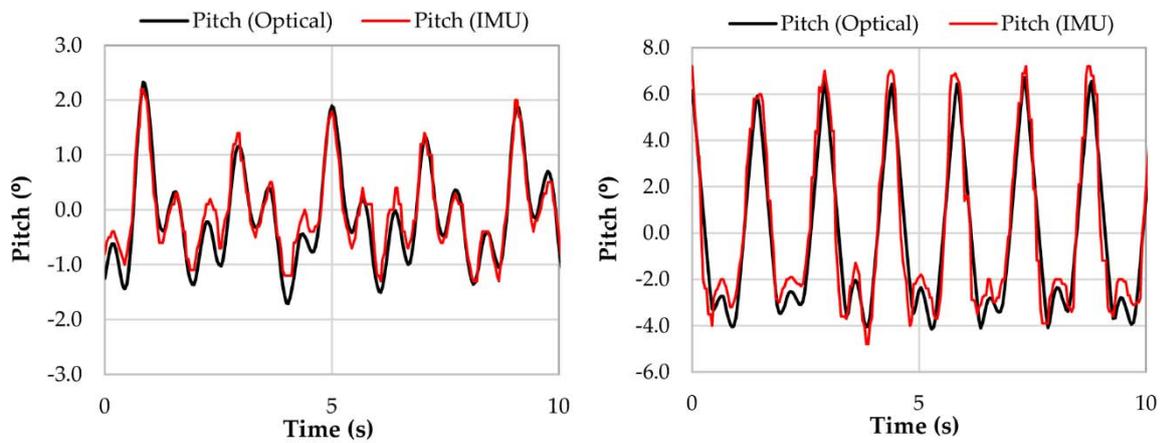


Figura 17. Fragmento del registro del movimiento de cabeceo (*pitch*) durante los ensayos de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.5 Hz (izq.) y de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.7 Hz (dcha.).

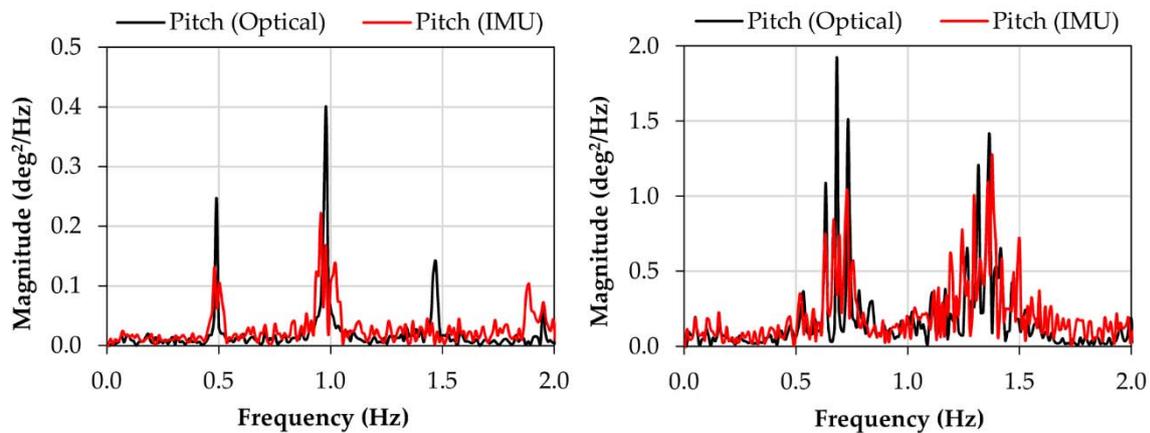


Figura 18. Espectro de frecuencias del movimiento de cabeceo (*pitch*) registrado durante los ensayos de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.5 Hz (izq.) y de altura de ola 18 cm y frecuencia del oleaje 0.7 Hz (dcha.).

Tanto los registros del movimiento, como los espectros de frecuencia de las figuras anteriores, muestran claramente cómo ambas técnicas proporcionaron unos resultados casi idénticos, incluso con un movimiento menos controlado que en el caso del balancín o del péndulo. Esto se ve reflejado también en los buenos valores de correlación obtenidos en cada ensayo (Tabla 10).

Cabe señalar que los registros de la unidad IMU, tal y como sucedía en los ensayos anteriores, presentaron cierto nivel de ruido, probablemente inducido por su sensibilidad y por encontrarse el dispositivo situado sobre el objeto a monitorizar.

Tabla 10. Valores del coeficiente de correlación de *Pearson* entre los registros del movimiento de cabeceo de ambas técnicas en los ensayos realizados.

Correlation (<i>r</i>)		Wave Height		
		18 cm	20 cm	24 cm
Wave Frequency	0.5 Hz	0.93	0.81	0.93
	0.7 Hz	0.95	0.93	0.96

3.5. Validación en campo (prueba de concepto)

Una vez demostrado su correcto funcionamiento en condiciones de laboratorio, se decidió validar ambas técnicas bajo condiciones reales de campo mediante la monitorización del comportamiento del buque anticontaminación *Urania Mella* (Figura 19).



Figura 19. Buque *Urania Mella* atracado en las instalaciones del Puerto Exterior de Punta Langosteira (A Coruña) durante la campaña de monitorización. Fuente: elaboración propia

Dicho buque, de 72 m de eslora, 15 m de manga y un peso muerto de 3,000 TPM, permaneció amarrado en el Muelle Transversal del Puerto Exterior de Punta Langosteira, en la ciudad de A Coruña, durante un periodo de tres meses. En el momento de la realización de la campaña de campo, la geometría del puerto estaba constituida por un dique de abrigo principal de 3,360 m de longitud, un martillo de 390 m, un contradique de 450 m en la parte sureste, finalizado en su primera fase de ejecución, y una línea de atraque continua de 900 m de longitud (Figura 20). Este contradique sería posteriormente ampliado hasta los 1,500 m de longitud, quedando así definida la geometría final de las estructuras principales de abrigo del puerto.



Figura 20. Puerto Exterior de Punta Langosteira, A Coruña (geometría del puerto durante la ejecución de la campaña de campo). Zona de atraque del buque *Urania Mella* y localización de los equipos de monitorización del oleaje (Radar Miros y boya de oleaje). Fuente: Google Earth®.

Aprovechando la presencia del buque en puerto, la unidad IMU fue colocada en el interior de su puente de mando, para registrar en continuo los movimientos angulares (cabeceo, balance y guiñada) durante los tres meses de estancia. Adicionalmente, se colocaron dos cámaras digitales frente a la proa y la popa del barco, aisladas de las condiciones atmosféricas, que permitían obtener los movimientos del buque en su plano longitudinal

(vaivén, alteada y cabeceo) mediante la aplicación de la técnica de seguimiento por imagen. En este caso, el registro de estos tres movimientos no se realizó en continuo, sino de forma puntual a intervalos de 2 h de duración, al no disponer de suministro eléctrico estable en la zona durante la campaña de campo.

Tanto para calibrar el sistema como para obtener los movimientos se establecieron seis puntos de control sobre el buque (Figura 21). La resolución utilizada para la adquisición de imágenes fue de 12 Mpx con una frecuencia de disparo de 1 Hz, considerada suficiente para caracterizar los movimientos de un buque real amarrado, teniendo en cuenta la velocidad de los mismos.

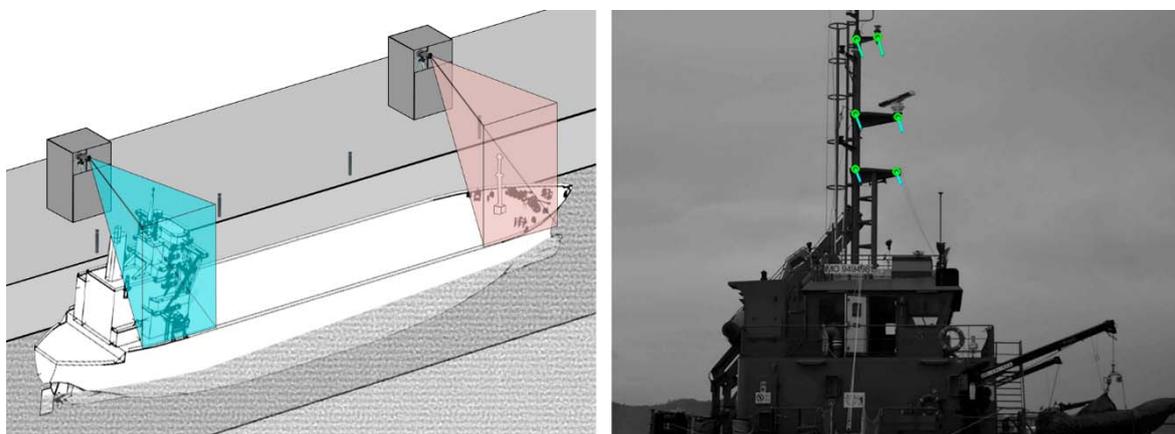


Figura 21. Esquema de adquisición de imágenes (izq.). Puntos de control seleccionados y vectores de desplazamientos sobre una de las imágenes de la cámara de popa del *Urania Mella*.

Adicionalmente, junto con la monitorización de los movimientos del buque, se realizaron medidas del oleaje tanto en el interior como en el exterior de la dársena, así como registros de las tensiones en determinados amarres del barco. Por un lado, se instaló una boya de oleaje situada a 1 km del dique principal del puerto, y un radar *Miros* en la línea de atraque donde se encontraba amarrado el *Urania Mella* (Figura 20). Por otro lado, las cargas experimentadas por un largo de proa y otro de popa fueron medidas con sendas células de carga.

3.5.1. Resultados de la unidad IMU

En primer lugar, se analizan los resultados obtenidos con la unidad IMU. Puesto que se disponía de un registro continuo a largo plazo del cabeceo, el balance y la guiñada del

buque, cada serie temporal fue procesada mediante una técnica de pasos por cero. Para ello se utilizó como referencia la posición inicial del buque, calculando las amplitudes de cada movimiento. Las series temporales se dividieron en bloques de 1 h de duración, obteniendo para cada bloque el valor máximo de la amplitud y su valor significativo, calculado como el promedio del tercio más alto de las amplitudes de cada bloque. De esta manera, se tendrían dos valores estadísticos que describirían los movimientos angulares del buque en cada hora de monitorización durante toda la campaña de campo. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 22.

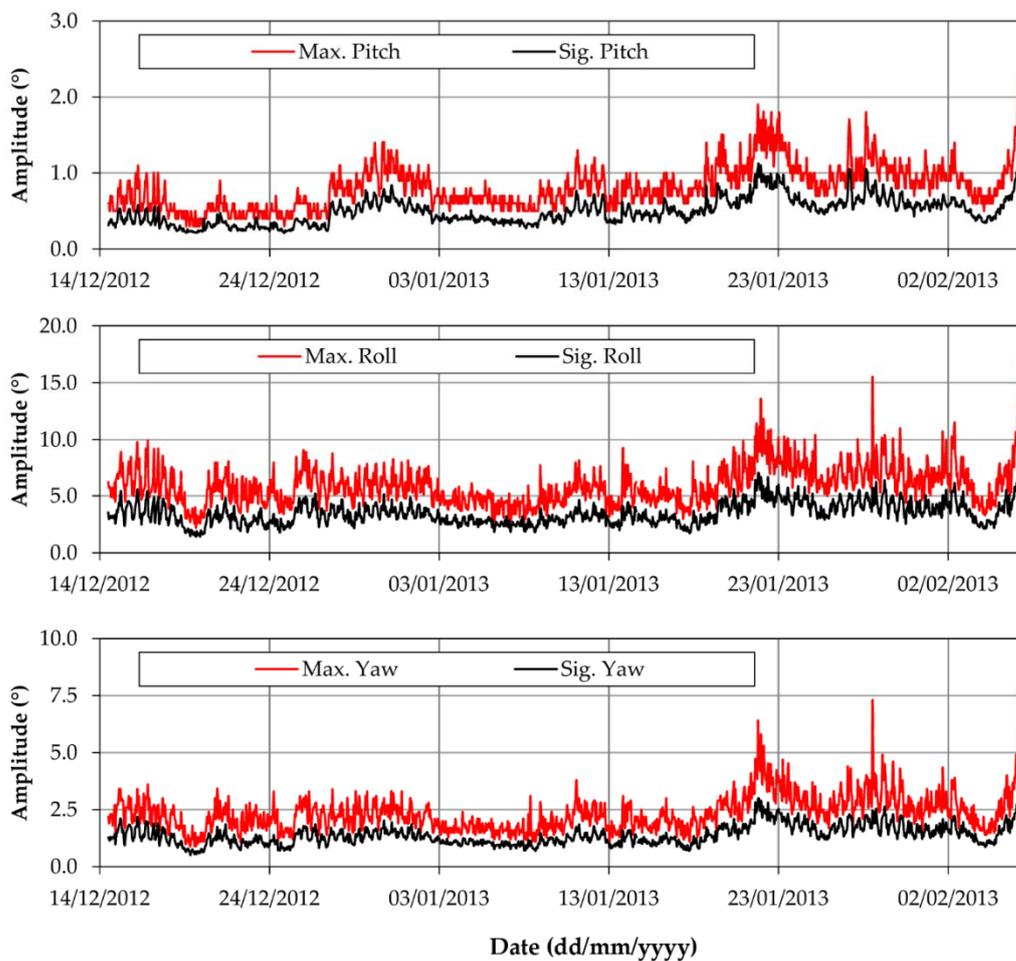


Figura 22. Amplitudes máximas y significantes de los movimientos de cabeceo (*pitch*), balance (*roll*) y guiñada (*yaw*) registrados durante la campaña de monitorización del buque *Urania Mella*.

Como puede verse, existe una fuerte relación lineal entre los tres movimientos, con un patrón de comportamiento muy similar. Los altos valores del coeficiente de correlación de

Pearson obtenidos entre la guiñada, y el balance y cabeceo, así lo atestiguan (0.87 y 0.97, respectivamente, siendo los resultados estadísticamente significativos, $p\text{-valor} < 0.05$).

Puesto que se disponía de datos concomitantes de altura de ola significativa tanto en el exterior del puerto (boya de oleaje) como en las proximidades de la zona de atraque del barco (radar *Miros*), se decidió comparar conjuntamente estos valores y las amplitudes significantes de los movimientos angulares. La Figura 23 muestra la comparación con el movimiento de guiñada.

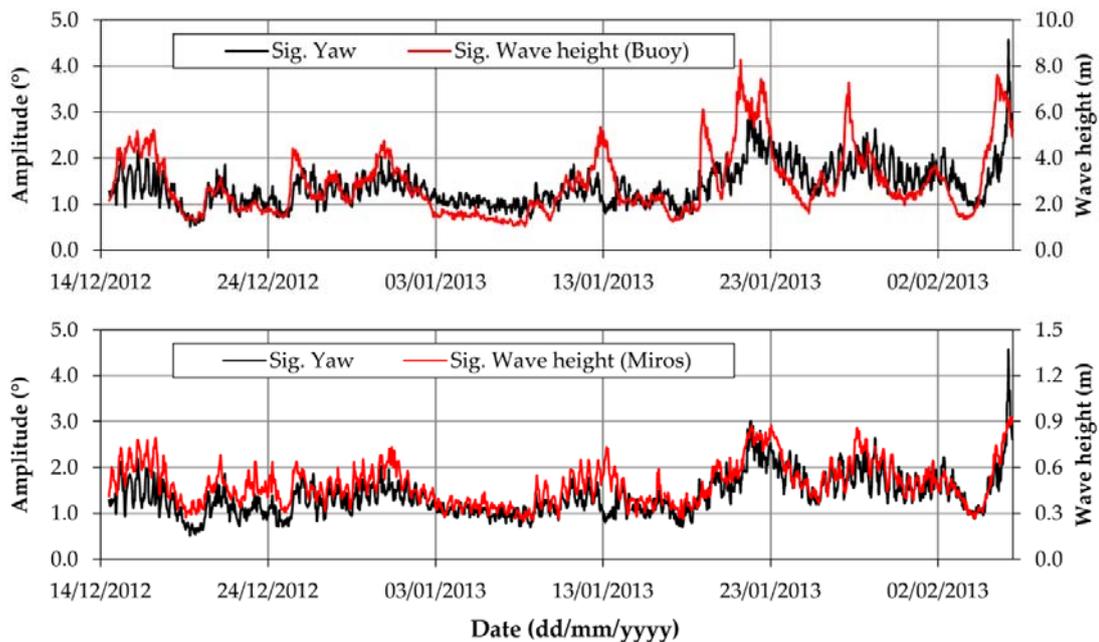


Figura 23. Evolución de la altura de ola significativa en el exterior del puerto (arriba) y en las proximidades del atraque (abajo) comparadas con la amplitud del movimiento significativo de guiñada (*yaw*) del *Urania Mella*.

Observando la figura anterior, puede verse la influencia del parámetro altura de ola significativa sobre este movimiento. A medida que esta incrementa su valor, también lo hace la amplitud de movimiento, coincidiendo temporalmente los valores máximos de ambas variables. Esta tendencia, aun siendo más evidente en la guiñada, es extensible al resto de movimientos angulares, los cuales mostraron una fuerte relación lineal con la altura de ola, especialmente en el interior del puerto (Tabla 11).

Tabla 11. Valores del coeficiente de correlación de *Pearson* de los movimientos angulares del buque *Urania Mella* con los valores de la altura de ola significativa en el exterior y el interior del puerto.

	Wave Height Ocean	Wave Height Port
Pitch	0.62	0.72
Roll	0.64	0.79
Yaw	0.68	0.83

Este análisis se repitió con los valores significantes de los esfuerzos registrados por las células de carga colocadas en los largos de proa y popa. La Figura 24 muestra los resultados obtenidos en el caso del movimiento de cabeceo.

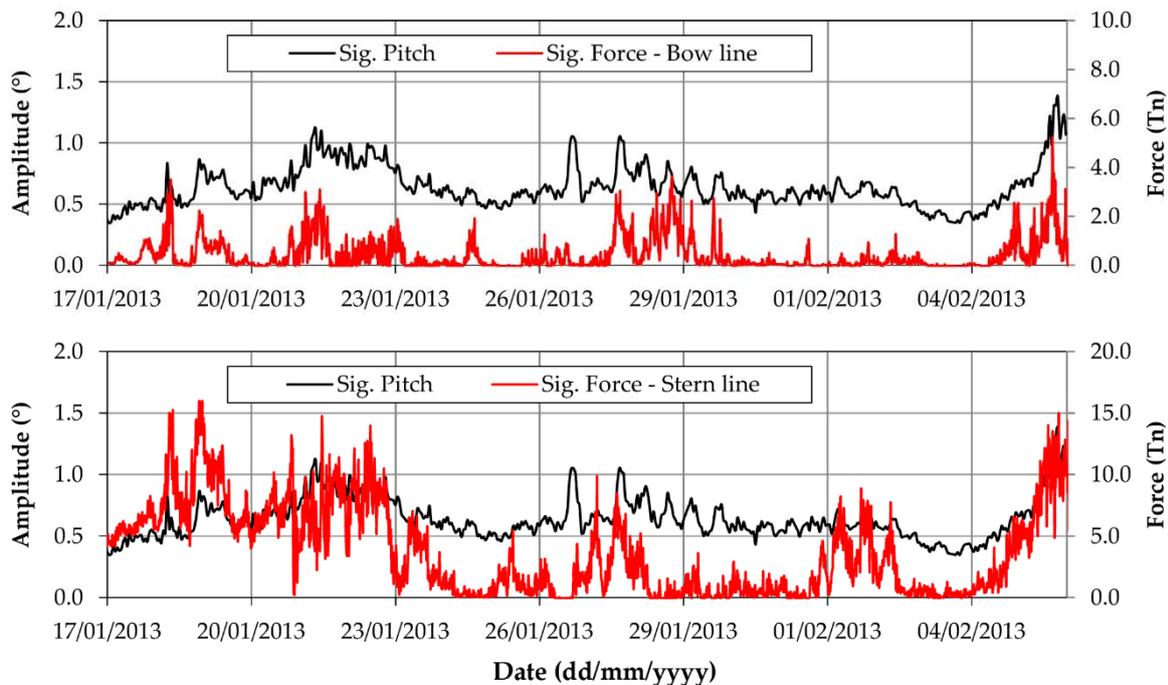


Figura 24. Evolución de las tensiones significantes registradas en un largo de proa (arriba) y un largo de popa (abajo) comparadas con la amplitud significativa de cabeceo (*pitch*) del *Urania Mella*.

Aunque se puede apreciar cierta similitud entre las tendencias de ambas variables, esta relación no es tan evidente como en el caso anterior, siendo confirmado por el estudio de correlación (Tabla 12).

Tabla 12. Valores del coeficiente de correlación de Pearson de los movimientos angulares del buque *Urania Mella* con los valores de la tensión registrada en uno de los largos de proa (*bow line*) y de popa (*stern line*).

	Bow Line Load	Stern Line Load
Roll	0.29	0.39
Pitch	0.51	0.53
Yaw	0.33	0.47

3.5.2. Resultados de la técnica de seguimiento por imagen

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con la monitorización de los movimientos de alteada, vaivén y cabeceo mediante la aplicación de la técnica de seguimiento por imagen. Como se mencionó anteriormente, esta técnica se aplicó de manera puntual en muestreos de 2 h de duración, por lo que no se realizó una comparación a largo plazo con los datos de oleaje y tensiones de amarre.

El primer paso para validar la técnica fue comparar los registros del movimiento de vaivén y alteada obtenidos en las regiones de proa y popa del buque. La Figura 25 muestra un ejemplo de los resultados.

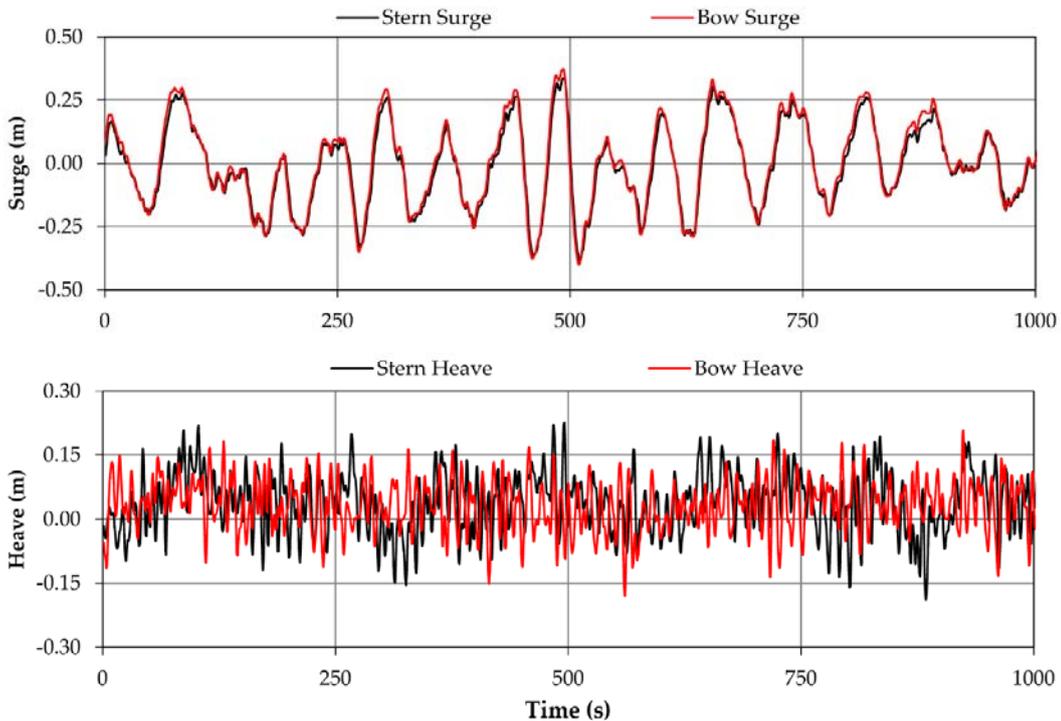


Figura 25. Muestra de 1000 s de duración de los movimientos de vaivén (arriba) y alteada (abajo) registrados en proa y popa del *Urania Mella*.

Como puede verse, los registros del movimiento de vaivén de proa y popa resultaron casi idénticos, con valores del coeficiente de correlación r superiores a 0.97, lo que indica que los errores en la medida son muy bajos. Las pequeñas diferencias que se observan entre ambos registros son probablemente inducidas por la distorsión del plano de referencia de las cámaras, como consecuencia del movimiento de guiñada o deriva.

Por el contrario, los registros del movimiento de alteada de proa y popa mostraron valores de correlación muy bajos. Este resultado es lógico y previsible, como consecuencia del propio movimiento de cabeceo del barco, inducido a su vez por las variaciones en la distribución de pesos y las diferencias de tiempo entre las olas que alcanzan los distintos puntos de la superficie del casco.

Además de este análisis, la anterior figura permite ver las diferencias en el comportamiento de los dos movimientos. Mientras que el vaivén es un movimiento de baja frecuencia, con largos periodos de oscilación, la alteada, por el contrario, muestra un periodo de oscilación mucho más corto.

Adicionalmente, teniendo en cuenta las mencionadas diferencias entre la alteada de proa y popa, es posible obtener de forma sencilla el movimiento de cabeceo del buque aplicando trigonometría. La Figura 26 muestra el registro del cabeceo obtenido a partir de las series temporales de la Figura 25.

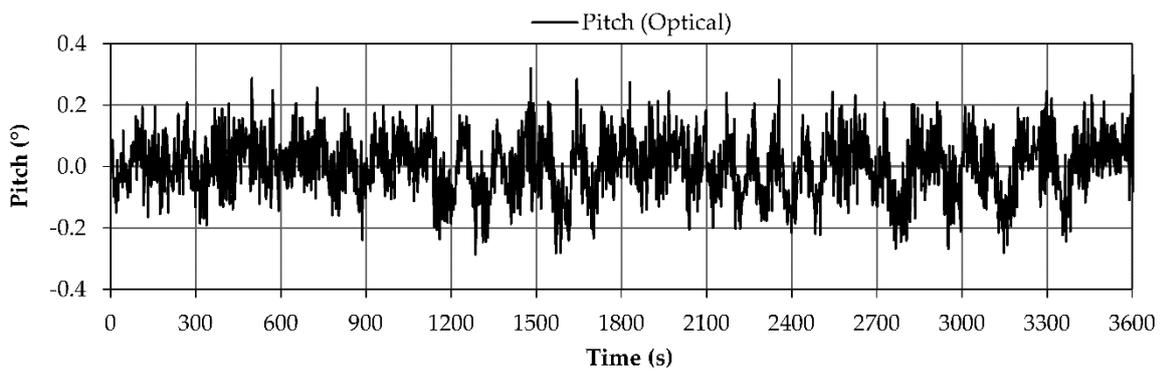


Figura 26. Movimiento de cabeceo (*pitch*) obtenido a partir de los registros de alteada de proa y popa del *Urania Mella*.

Además del movimiento de cabeceo, a partir de los registros sincronizados de la alteada de proa y popa, se obtuvo el valor de la alteada del punto medio situado entre dos puntos de control cuya separación entre proa y popa era conocida (medida en campo). De esta forma, y considerando al buque como un sólido rígido, se tendría el valor de la alteada en un punto

situado dentro del su tercio central, donde se encontrará el centro de gravedad del barco, obteniendo así una medida representativa de este movimiento.

Finalmente, los resultados obtenidos se compararon en el dominio de la frecuencia con los registros concomitantes de altura de ola medidos cerca del *Urania Mella* por el radar *Miros* situado en la parte sur del Muelle Transversal (Figura 20).

En la Figura 27 se muestra el registro de la altura de ola concomitante con los registros de alteada, vaivén y cabeceo, y su espectro asociado. El análisis de frecuencias reveló dos picos predominantes, el más energético (0.08 Hz) que corresponde al periodo pico del oleaje equivalente a 12.5 s, y un pico adicional (0.157 Hz) asociado a un período de 6,37 s, probablemente inducido por el efecto de la reflexión del primero en el interior de la dársena.

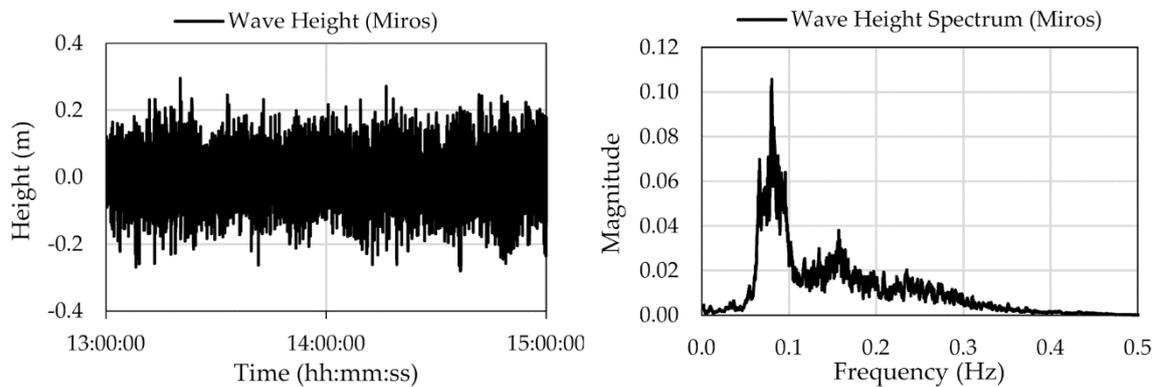


Figura 27. Evolución de la altura de ola (izq.) registrada por el radar *Miros* y su espectro de frecuencias asociado (dcha.).

Tal y como se mencionó anteriormente, el espectro del oleaje fue comparado con los espectros de frecuencias de cada movimiento (cabeceo, vaivén y alteada), con el objetivo de buscar patrones de comportamiento.

Observando la Figura 28, se puede ver que el movimiento de cabeceo del buque presentó una distribución de frecuencias similar a la obtenida para el oleaje, con dos picos claros correspondientes a oscilaciones de baja frecuencia (período de 91.0 s) y de alta frecuencia (período de 11.1 s), próximo al período pico del oleaje en ese intervalo de tiempo. El movimiento de vaivén, sin embargo, mostró un espectro de frecuencias muy diferente al del oleaje, con un único pico de baja frecuencia correspondiente a un período de oscilación de 59.7 s. Esto sugiere un comportamiento de oscilación complejo, probablemente inducido

por el sistema de amarre, especialmente por el efecto de los springs de proa y popa encargados de limitar este movimiento.

En cuanto al movimiento de alteada, este presentó la mayor similitud con el espectro del oleaje. Ambas series mostraron el mismo período pico (12,5 s). Este resultado sugiere que el movimiento de alteada está estrechamente relacionado con la altura de ola cerca del buque.

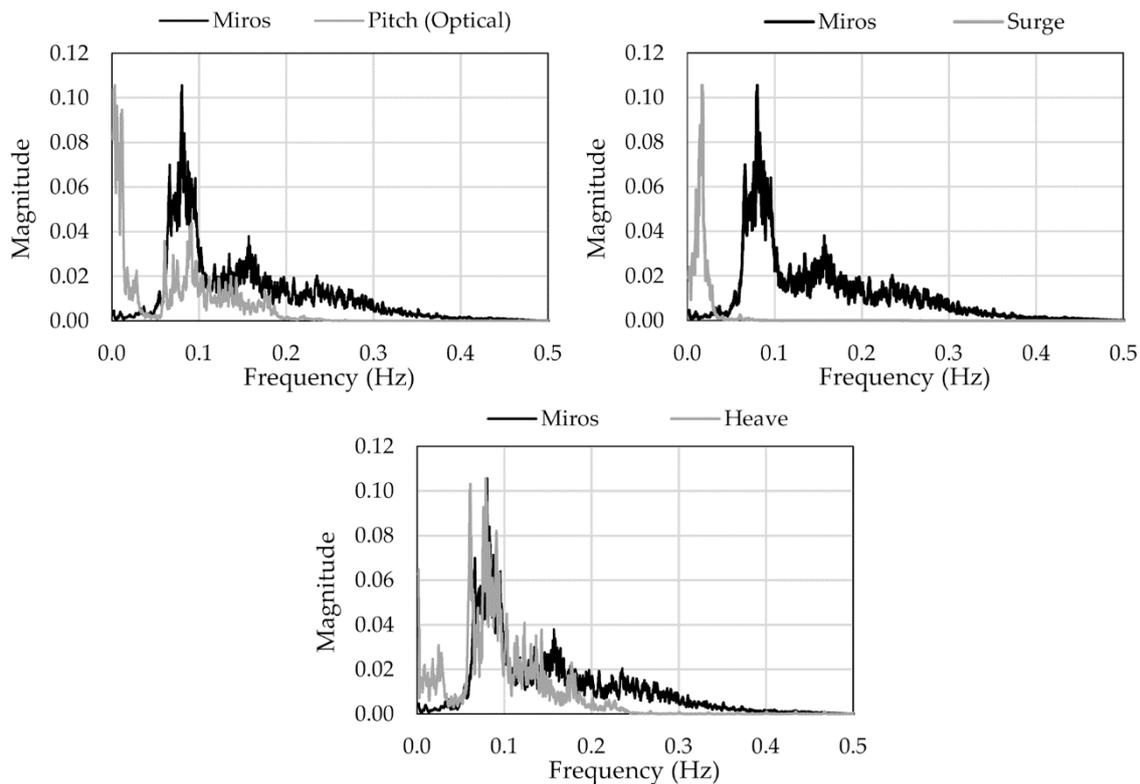


Figura 28. Comparación entre el espectro de frecuencias del oleaje (*Miros*) y los espectros de cabeceo (*pitch*), vaivén (*surge*) y alteada (*heave*), calculados a partir de los registros de estos movimientos obtenidos con la técnica de seguimiento por imagen.

Los resultados obtenidos en esta prueba de concepto, han servido para validar, en un escenario real, la capacidad de las técnicas desarrolladas para la monitorización de los movimientos de un buque atracado. Además, han permitido establecer relaciones interesantes entre los movimientos del buque y ciertos agentes forzadores (altura de ola significativa), demostrando su potencial como herramientas para evaluar las condiciones operativas de los atraques de una terminal portuaria.

Capítulo 4

Evaluación de las condiciones operativas en puerto mediante técnicas monitorización en campo

En este capítulo se presenta una síntesis de la información contenida en el artículo JCR III incluido en el Anexo I de este documento:

- Artículo III: *Operational thresholds of moored ships at the oil terminal of inner port of A Coruña (Spain)*.

4.1. Introducción

Mejorar la eficiencia de los puertos implica reducir los tiempos de las operaciones de carga y descarga. Tal y como se ha dicho anteriormente en esta Tesis Doctoral, éstas se ven afectadas por el comportamiento dinámico de los buques amarrados. Cuando un barco experimenta grandes movimientos, pueden ocurrir consecuencias negativas, como la disminución de la eficiencia de la operación, la ruptura de las líneas de amarre, o incluso daños en el buque y las instalaciones portuarias.

Desde hace años, distintas instituciones han reconocido la necesidad de actualizar los límites operacionales establecidos por las diferentes normativas y recomendaciones, con el objetivo de adaptarlos a las exigencias de los puertos modernos, los nuevos buques y los equipos de manipulación de carga.

En el marco de esta Tesis Doctoral, y como aplicación práctica de las técnicas presentadas en el capítulo anterior, se planteó el estudio de las condiciones operativas en los atraques del Puerto Interior de A Coruña, para evaluar si los umbrales de movimiento propuestos por el PIANC (1995) y la norma española ROM 2.0-11 (Puertos del Estado, 2011) se ajustaban a las características particulares de esta instalación. Como instrumento esencial para lograr este objetivo se propuso la ejecución de una campaña intensiva de monitorización de distintos tipos de buque durante su estancia en puerto, mediante la aplicación de las dos técnicas desarrolladas.

4.2. Caso de estudio: Puerto Interior de A Coruña

El Puerto Interior de A Coruña, situado en la propia ciudad, es un complejo multipropósito integrado por una terminal petrolera, atraques para la carga y descarga de graneles secos y mercancía general, una terminal de contenedores con capacidad para 2,330 TEU, un muelle de cruceros y distintas zonas de amarre para embarcaciones deportivas (Figura 29). Su principal estructura de protección está formada por un dique de abrigo de 1,330 m de longitud. En definitiva, esta instalación constituye la principal industria de la ciudad.

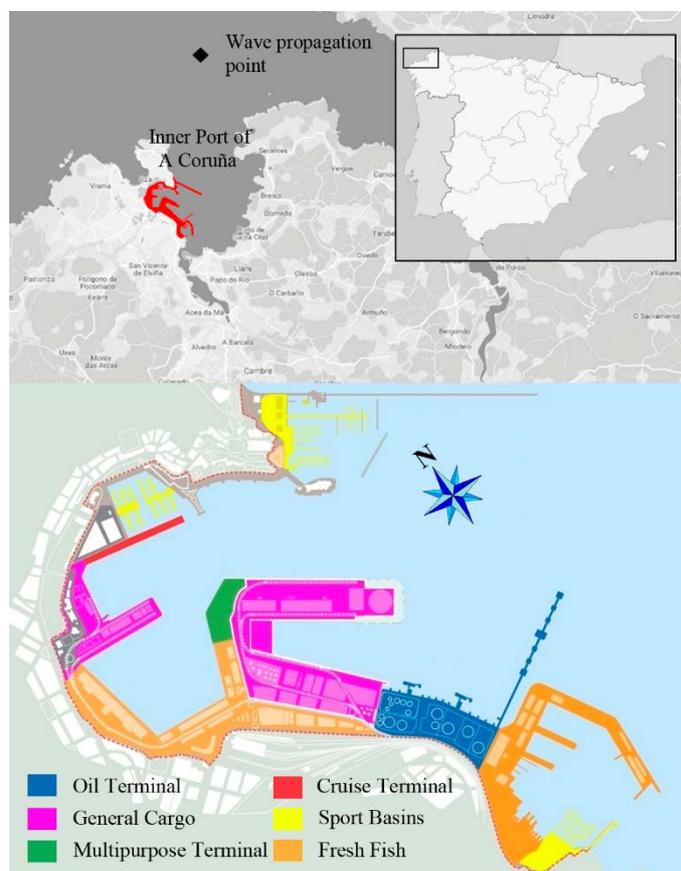


Figura 29. Localización e instalaciones del puerto interior de A Coruña. En la parte superior se destaca la ubicación del punto de propagación de oleaje utilizado en el estudio. Fuente: Google Earth® y Autoridad Portuaria de A Coruña (www.puertocoruna.com).

Tras analizar las distintas localizaciones de atraque, la frecuencia de las escalas y el histórico de incidencias operativas, se decidió enfocar el estudio en la terminal petrolera de Repsol. Dentro de estas instalaciones, se analizó el comportamiento de los buques que operaban en

los pantalanes 1, 2 y 3, así como en el Muelle de San Diego, contiguo a esta instalación, y también gestionado por el mismo operador (Figura 30).



Figura 30. Localizaciones de atraque monitorizadas durante el estudio.

4.3. Metodología de análisis

Durante el estudio, cinco de los seis movimientos que un buque amarrado puede experimentar fueron monitorizados mediante la aplicación de las dos técnicas desarrolladas (cabeceo, balance, guiñada, alteada y vaivén). Debido a la imposibilidad de ubicar cámaras con visión directa del plano transversal del buque, el movimiento de deriva no pudo ser analizado.

La unidad IMU fue instalada en el interior del puente de mando de cada buque analizado (Figura 31), registrando en continuo sus tres movimientos angulares (cabeceo, balance y guiñada). El análisis de los movimientos de alteada y vaivén se realizó mediante la aplicación de la técnica de seguimiento por imagen. Para conseguir un registro continuo de estos movimientos, fue necesaria la instalación de cajas estancas con puerta translúcida dotadas de suministro eléctrico en las que alojar las cámaras. En cada atraque, se utilizaron dos cámaras digitales de alta resolución tomando imágenes de la proa y la popa de cada buque en su plano longitudinal (Figura 31). A partir de los registros sincronizados de ambas cámaras, y conociendo la separación real entre puntos de control, se obtuvieron estos movimientos en un punto del tercio central del buque, lugar donde se encontrará en cualquier situación de carga su centro de gravedad.



Figura 31. Unidad IMU instalada en el interior del puente de mando de un buque (arriba). Esquema de adquisición de imágenes (abajo). Cajas estantes para la ubicación de las cámaras para el registro de imágenes del buque (dcha.).

Por lo tanto, utilizando de forma sincronizada ambas tecnologías se obtuvieron las series temporales de los cinco movimientos: cabeceo $\theta_{pitch}(t)$, balance $\theta_{roll}(t)$, guiñada $\theta_{yaw}(t)$, alteada $\delta_{heave}(t)$ y vaivén $\delta_{surge}(t)$. En la Figura 32 se muestra un ejemplo de 1 h de duración de las series temporales de un movimiento angular y un desplazamiento.

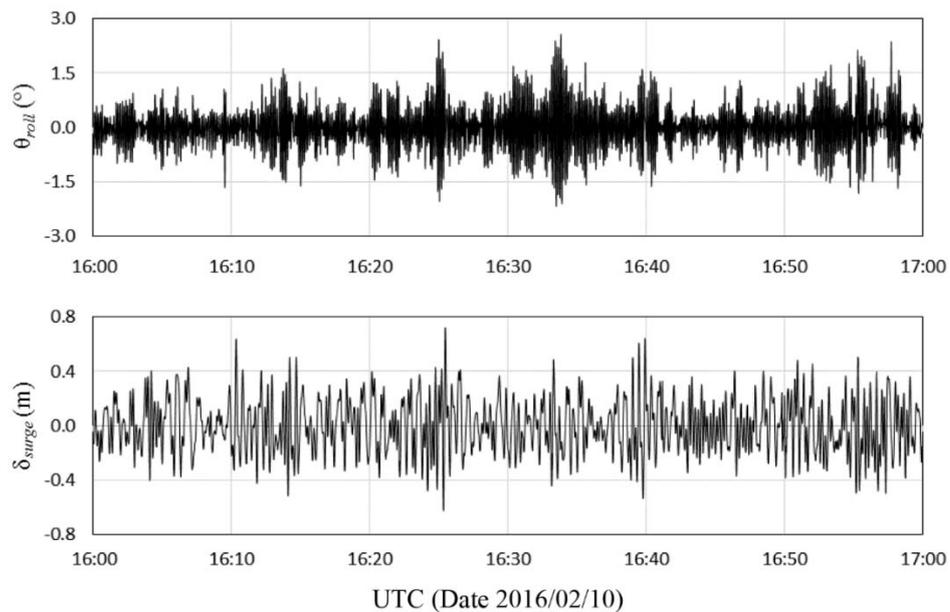


Figura 32. Muestra de 1 h de duración de las series temporal de los movimientos de balance (arriba) y vaivén (abajo) registradas durante la operación de carga de un buque representativo.

4.3.1. Análisis de datos

Las series temporales registradas durante la operación en puerto de cada buque fueron procesadas mediante la aplicación de la técnica de pasos por cero para obtener los valores de las amplitudes de cada movimiento (PIANC, 1995): A_i ($^{\circ}$) para los movimientos de rotación y L_i (m) para los movimientos de traslación. Tomando como referencia la posición inicial del buque, la amplitud de cada ciclo de movimiento se calcula como la diferencia entre el valor máximo y mínimo registrado entre dos pasos por cero ascendentes consecutivos.

Cada serie temporal completa se dividió en intervalos de 1200 s, obteniendo para cada bloque el valor máximo de la amplitud de movimiento (A_{max} o L_{max}), el valor medio (A_m o L_m) y la amplitud significativa (A_s o L_s), calculada como la media del tercio de las amplitudes mayores. De esta manera se puede analizar la evolución del comportamiento del buque durante el desarrollo de su operación. Además, estos valores se compararon con los umbrales de movimiento compatibles con la realización de operaciones en condiciones seguras, propuestos tanto por la normativa española ROM 2.0-11 (Puertos del Estado, 2011), como por el PIANC (1995). La Figura 33 muestra un ejemplo de los resultados para el movimiento de guiñada de un buque.

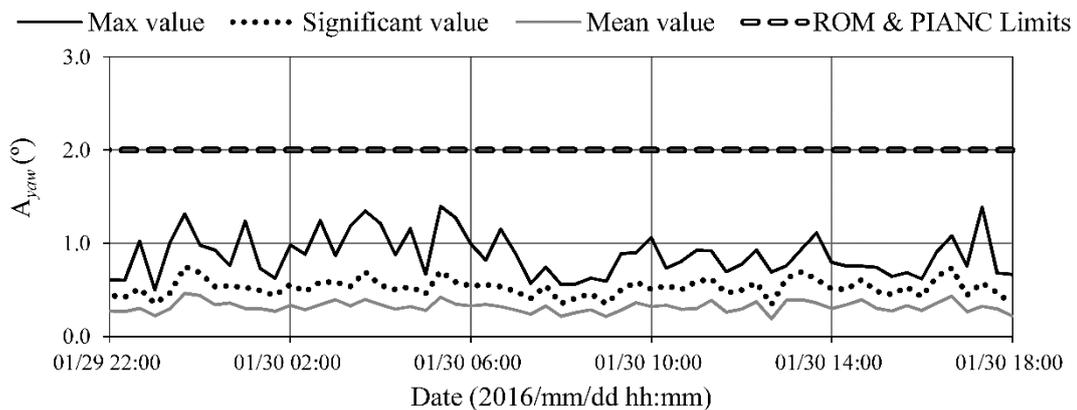


Figura 33. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de guiñada de un buque representativo registradas durante su operación de carga.

Estos límites se seleccionaron entre los recomendados por ambas publicaciones en función del tipo de buque y del equipo de manipulación de la carga (Tablas 13 y 14). Se decidió adoptar el mismo criterio para buques gaseros y químicos, puesto que ambos tenían dimensiones similares y utilizaban los mismos equipos de carga/descarga.

Tabla 13. Amplitudes de movimiento máximas recomendadas para unas condiciones de trabajo seguras, según el PIANC (1995).

Ship Type	Cargo handling equipment	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)	Heave (m)	Surge (m)
Oil tankers	Loading arms	--	--	--	--	3.0
Gas/Chem. tankers	Loading arms	2	2	2	--	2.0
General cargo	--	5	2	3	1.0	2.0

Tabla 14. Amplitudes de movimiento máximas recomendadas para unas condiciones de trabajo seguras, según el PIANC (1995).

Ship Type	Cargo handling equipment	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)	Heave (m)	Surge (m)
Oil tankers	Loading arms	--	--	--	--	7.0
Gas/Chem. tankers	Loading arms	2	2	2	--	4.0
General cargo	--	5	2	3	1.0	2.0

Adicionalmente, se calculó el valor máximo, medio y significativo de las amplitudes de movimiento de cada serie completa, de forma que estos estadísticos aportaran una visión global acerca del comportamiento general del buque durante la operación.

Además de trabajar con las amplitudes de movimiento en el dominio del tiempo, las series temporales completas fueron analizadas en el dominio de las frecuencias, obteniendo su función de densidad espectral mediante la aplicación de la transformada rápida de *Fourier* (*FFT*). Los datos se dividieron en una componente de largo período (*LF*) y una componente de corto período (*SF*), utilizando una frecuencia umbral de 0.04 Hz (período de oscilación de 25 s). Para cada una de las bandas de frecuencia se obtuvo el período pico asociado (T_{LF} y T_{SF}), permitiendo determinar qué banda de frecuencia era más relevante en cada tipo de movimiento (Figura 34).

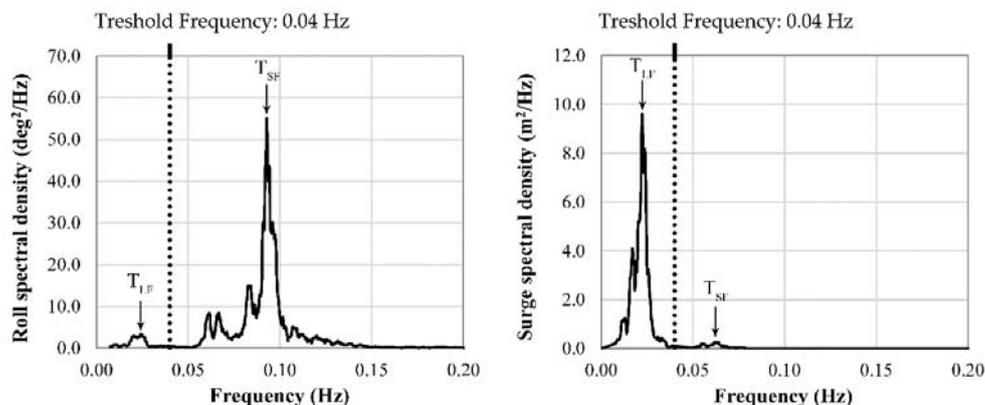


Figura 34. Muestra de las funciones de densidad espectral de los movimientos de balance (izq.) y vaivén (dcha.) de un buque representativo.

4.4. Flota de estudio

Durante la campaña de campo realizada entre primavera-otoño de 2015 e invierno de 2016 en las instalaciones de la terminal petrolera de Repsol, se monitorizaron un total de 19 buques de cuatro tipologías diferentes (seis buques gaseros, siete buques químicos, cuatro petroleros y dos buques de carga general), con una estancia media en puerto entre 0.5 y 1.5 días. En este periodo, los buques fueron instrumentados para analizar sus movimientos tal y como se describió en el apartado anterior. La Tabla 15 muestra la flota analizada y sus principales características.

Tabla 15. Flota de estudio: nombre, tipología de buque, toneladas de peso muerto, eslora, localización de atraque y configuración de amarre (largos de proa - traveses de proa - springs de proa - springs de popa - traveses de popa - largos de popa) de cada buque analizado.

Ship name	Type	DWT (t)	Length (m)	Mooring location	Mooring config.
Scali del Teatro - III	Gas tanker	3,600	88.4	1 st jetty	3-0-3-3-0-3
Scali Reali	Gas tanker	3,600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Scali del Teatro - I	Gas tanker	3,600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Maingas	Gas tanker	3,932	96.6	2 nd jetty	3-0-2-2-0-3
Matthew	Gas tanker	3,600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Scali del Teatro - II	Gas tanker	3,600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Habip Bairak	Chemical tanker	8,400	123.6	1 st jetty	3-0-3-3-0-3
Sichem Singapore - I	Chemical tanker	13,141	128.6	2 nd jetty	3-0-2-2-0-3
Sichem Singapore - II	Chemical tanker	13,141	128.6	1 st jetty	3-0-2-2-0-3
RC Behar	Chemical tanker	5,600	107.6	2 nd jetty	3-0-2-2-0-3
Castillo de Trujillo	Chemical tanker	30,583	182.1	2 nd jetty	4-0-3-3-0-4
Nave Sextans	Chemical tanker	51,200	183.1	2 nd jetty	4-0-2-2-0-4
Acacia Noir	Chemical tanker	5,895	105.5	San Diego Dock	2-0-1-1-0-2
Banda Sea	Oil tanker	105,576	237.7	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
Nissos Serifos	Oil tanker	115,500	249.0	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
SKS Saluda	Oil tanker	159,438	274.2	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
Marianna V.V	Oil tanker	84,999	239.0	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
Eems Exe	General cargo	3,800	88.6	San Diego Dock	2-0-1-1-0-2
Esky	General cargo	3,675	88.2	San Diego Dock	2-0-1-1-0-2

Tal y como puede verse en la tabla anterior, algunos de los buques fueron estudiados varias veces en diferentes escalas, como el buque químico *Sichem Singapore* (denominado I y II, respectivamente) o el buque gasero *Scali del Teatro* (denominado I, II y III, respectivamente).

En cuanto a la configuración de amarre, los barcos de tamaño similar y misma ubicación de atraque presentaron esquemas de amarre idénticos o con ligeras variaciones en cuanto al número de springs utilizados. En la Figura 35 se muestra la posición de los buques en el interior de la terminal petrolera, y la disposición de amarre habitual utilizada en cada uno de las zonas. Como puede observarse, los buques amarrados en los pantalanes 1 y 2 presentaban una línea de popa auxiliar, tendida a una pequeña boya de amarre. Su función principal es facilitar la maniobra de desamarre en situaciones de emergencia, no contribuyendo a la estabilidad del buque durante la operación de carga.

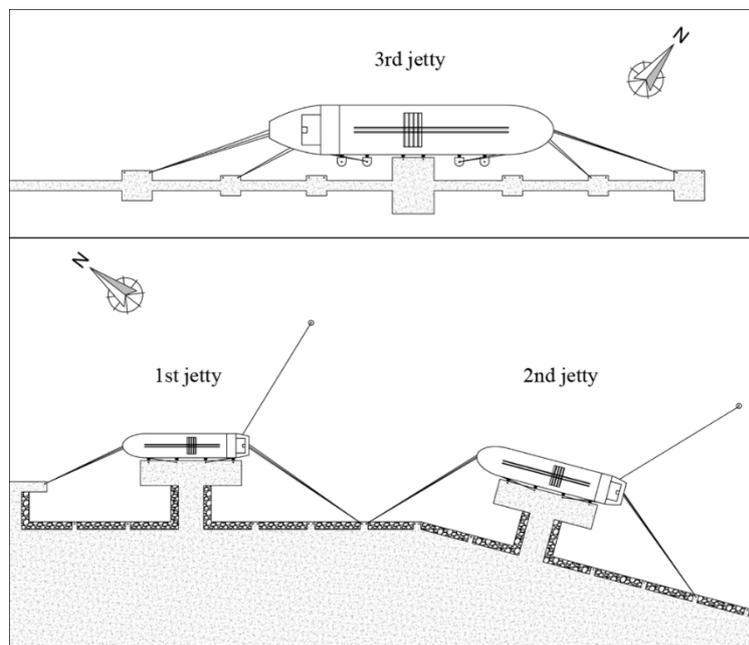


Figura 35. Representación esquemática de la posición del buque y la disposición de los amarres empleados en cada pantalán de la terminal petrolera.

En línea con el objetivo de validar la adecuación de los umbrales de movimiento propuestos por el PIANC (1995) y la ROM 2.0-11 a las características de la terminal petrolera, los barcos seleccionados se monitorizaron bajo situaciones meteorológicas adversas. En la Tabla 16 se muestran las peores condiciones océano-meteorológicas concomitantes registradas durante la operación de cada buque (altura de ola significativa H_s , periodo pico del oleaje T_p , y velocidad media del viento W_s).

Los datos de viento se obtuvieron de la estación meteorológica situada en el morro del dique y los de clima marítimo de la red de propagación de oleaje de Puertos del Estado (PORTUS - Puertos del Estado). Esta red proporciona series temporales con frecuencia

horaria de los parámetros del oleaje procedentes de la propagación, en tiempo real, de los datos medidos por la Red de Boyas de Aguas Profundas (REDEXT), hasta un punto de interés en la costa. En este trabajo se utilizaron los datos del punto de propagación CORUÑA (43° 24' 48" N, 08° 23' 00" O), situado a 4,8 km del dique principal del Puerto Interior de A Coruña (Figura 29).

Tabla 16. Condiciones océano-meteorológicas concomitantes más desfavorables registradas en el exterior del puerto durante el periodo de monitorización de cada buque (altura de ola significativa H_s , periodo pico del oleaje T_p , dirección del oleaje Dir (Norte = 0°) y velocidad media del viento Ws).

Ship name	Type	Mooring location	Worst maritime conditions			
			H_s (m)	T_p (s)	Dir (°)	Ws (km/h)
Scali del Teatro - III	Gas tanker	1 st jetty	4.9	15.1	315.0	24.8
Scali Reali	Gas tanker	2 nd jetty	2.5	12.8	325.0	12.8
Scali del Teatro - I	Gas tanker	2 nd jetty	4.1	10.7	326.0	43.2
Maingas	Gas tanker	2 nd jetty	4.9	16.0	310.0	25.7
Matthew	Gas tanker	2 nd jetty	1.1	11.4	323.0	8.8
Scali del Teatro - II	Gas tanker	2 nd jetty	1.8	15.0	320.0	22.2
Habip Bairak	Chemical tanker	1 st jetty	3.7	12.8	302.0	12.8
Sichem Singapore - I	Chemical tanker	2 nd jetty	--	--	--	26.5
Sichem Singapore - II	Chemical tanker	1 st jetty	3.7	17.6	319.0	28.1
RC Behar	Chemical tanker	2 nd jetty	2.3	12.6	300.0	14.3
Castillo de Trujillo	Chemical tanker	2 nd jetty	2.9	12.5	321.0	10.4
Nave Sextans	Chemical tanker	2 nd jetty	3.9	15.6	314.0	35.7
Acacia Noir	Chemical tanker	San Diego Dock	--	--	--	60.4
Banda Sea	Oil tanker	3 rd jetty	3.9	14.9	308.0	25.6
Nissos Serifos	Oil tanker	3 rd jetty	--	--	--	52.9
SKS Saluda	Oil tanker	3 rd jetty	2.7	12.9	311.0	5.3
Marianna V.V	Oil tanker	3 rd jetty	1.0	14.0	308.0	4.3
Eems Exe	General cargo	San Diego Dock	--	--	--	45.7
Esky	General cargo	San Diego Dock	1.8	13.7	334.0	37.3

4.5. Movimientos del buque atracado. Comparación con los umbrales operacionales

A continuación, se muestran los resultados referentes a la respuesta de los buques durante su operación en puerto en términos de magnitud de los movimientos experimentados, comenzando en primer lugar por los movimientos angulares.

De los tres movimientos angulares, el balance y la guiñada fueron los que mayores amplitudes registraron, alcanzando valores máximos de hasta $A_{max}^{roll} = 10.3^\circ$ y $A_{max}^{yaw} = 5.4^\circ$, respectivamente (buque gasero *Scali del Teatro*). Durante la campaña de campo, 13 de los 19 buques analizados experimentaron amplitudes de balance que excedieron en algún momento los umbrales del PIANC (1995) y de la ROM 2.0-11. Es importante señalar que, no solo se trataba de grandes movimientos puntuales, ya que en 6 de estos buques el valor de la amplitud significativa del movimiento durante el periodo completo de monitorización superó los límites establecidos por ambas recomendaciones (valor límite PIANC/ROM = 2.0°), sin que se registraran paradas de operación o algún problema destacable, como la rotura de amarres (Tabla 17).

Tabla 17. Amplitudes máximas y significantes de cada movimiento angular registradas durante el periodo completo de monitorización y los criterios límite aplicables a cada tipo de buque.

Type	Ship Name	Roll (°)		Pitch (°)		Yaw (°)		PIANC Limits (°)			ROM Limits (°)		
		A _{max}	A _s	A _{max}	A _s	A _{max}	A _s	A _{Roll}	A _{Pitch}	A _{Yaw}	A _{Roll}	A _{Pitch}	A _{Yaw}
Gas tankers	Scali del T. - III	10.3	4.2	0.8	0.4	1.4	0.5				2.0		
	Scali Reali	7.6	3.4	0.5	0.3	3.6	1.7				2.0		
	Scali del T. - I	7.4	2.9	0.8	0.4	5.4	2.5				2.0		
	Maingas	6.8	2.8	1.0	0.4	5.6	3.1				2.0		
	Matthew	6.0	2.1	0.4	0.1	2.5	0.7				2.0		
	Scali del T. - II	4.3	1.3	0.6	0.3	1.2	0.4				2.0		
Chemical tankers	Habip Bairak	4.7	2.1	1.0	0.4	1.8	0.8				2.0		
	Sichem S. - I	3.9	1.8	0.5	0.3	3.2	1.4				2.0		
	Sichem S. - II	3.8	1.7	0.9	0.4	1.6	0.7				2.0		
	RC Behar	3.3	1.1	0.4	0.2	0.6	0.2				2.0		
	Castillo de T.	4.4	1.8	0.6	0.3	0.9	0.4				2.0		
	Nave Sextans	3.2	1.4	0.3	0.1	1.1	0.5				2.0		
Oil tankers	Acacia Noir	2.6	1.1	0.9	0.5	1.7	0.7				2.0		
	Banda Sea	1.0	0.4	0.6	0.3	0.4	0.2	--	--	--	--	--	--
	Nissos Serifos	0.7	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	--	--	--	--	--	--
	Marianna V.V	0.4	0.2	0.4	0.2	0.7	0.2	--	--	--	--	--	--
General cargo	SKS Saluda	0.6	0.3	0.2	0.1	0.6	0.3	--	--	--	--	--	--
	Eems Exe	4.7	2.1	1.1	0.6	0.9	0.4	5.0	2.0	3.0	5.0	2.0	3.0
	Esly	2.9	1.3	0.4	0.3	1.7	0.6	5.0	2.0	3.0	5.0	2.0	3.0

Las figuras 36 y 37 muestran la evolución del balance a lo largo del tiempo de la operación de los dos buques que mayores amplitudes de este movimiento registraron (buques gaseros *Scali del Teatro – III* y *Scali Reali*). Como puede verse, incluso los valores medios del movimiento superaron los criterios límite de las recomendaciones durante la operación de carga.

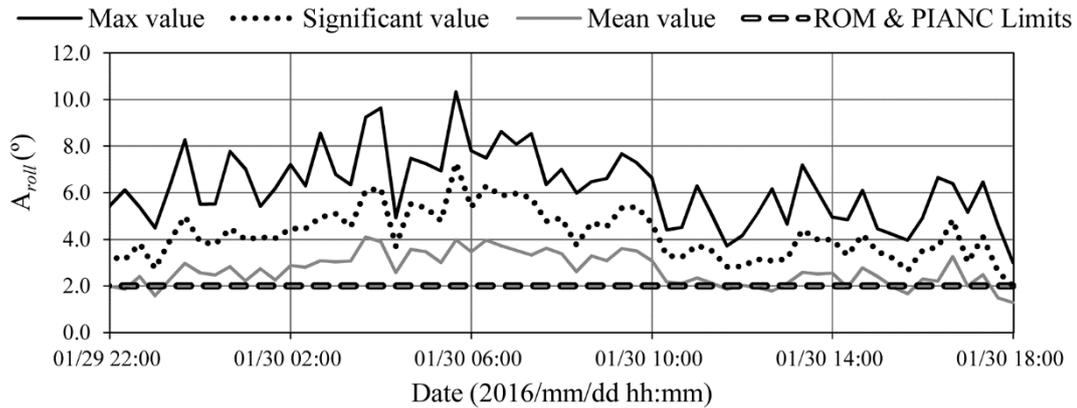


Figura 36. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de balance del buque gasero *Scali del Teatro - III* durante la operación de carga.

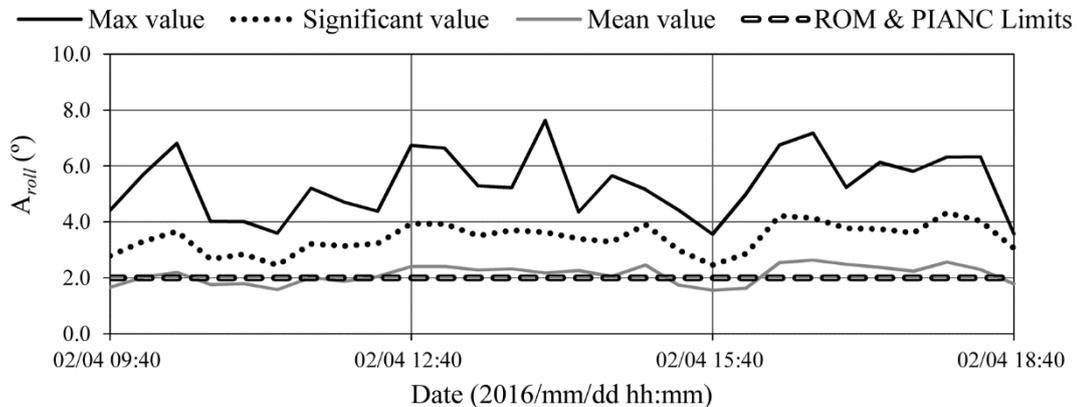


Figura 37. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de balance del buque gasero *Scali Reali* durante la operación de carga.

En cuanto al movimiento de guiñada, éste presentó un patrón de comportamiento similar al del balance, registrando grandes amplitudes, aunque con menor frecuencia y magnitud. En este caso, 5 de los buques analizados alcanzaron valores máximos de guiñada por encima de los umbrales propuestos, y tan solo en 2 de ellos la amplitud significativa del movimiento durante el periodo completo de monitorización superó dichos límites (Tabla 17).

En lo referente al movimiento de cabeceo, éste registró las menores amplitudes de los movimientos angulares en todos los buques analizados. Las amplitudes máximas y significantes alcanzaron valores de 1.1° y 0.6°, respectivamente (buque de carga general *Eems Exe*), registros considerablemente inferiores al límite propuesto por las recomendaciones (Tabla 17).

Es importante señalar que los movimientos angulares que superaron los umbrales recomendados, fueron registrados fundamentalmente por pequeños buques gaseros y químicos (de hasta 130 m de eslora) amarrados en los pantalanes 1 y 2. En cambio, los grandes petroleros atracados en el pantalán 3 experimentaron movimientos más pequeños, con amplitudes en todos los casos inferiores a 1°. En las figuras 38 y 39 se muestra el valor máximo y significativo de cada movimiento angular registrado por estos buques durante su operación. Como puede verse, los buques de menor porte experimentaron movimientos angulares mucho mayores que los petroleros, en especial los gaseros, con valores realmente altos de balance y guiñada.

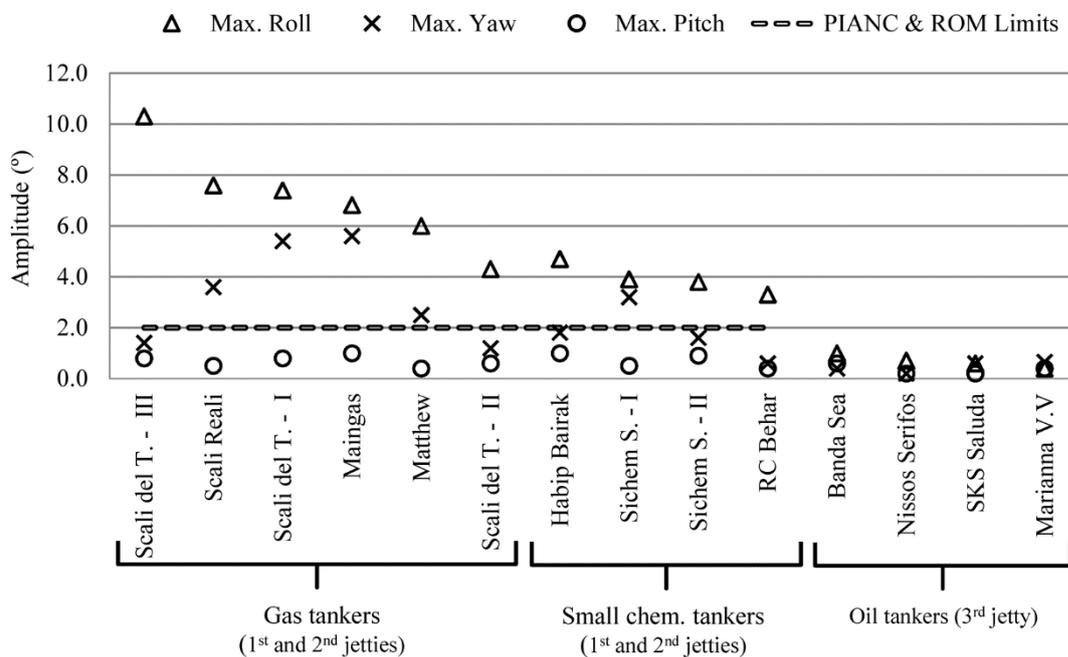


Figura 38. Comparativa entre las amplitudes máximas de los movimientos angulares registrados por los pequeños buques gaseros y químicos, petroleros, y los umbrales de movimiento del PIANC (1995) y la ROM 2.0-11.

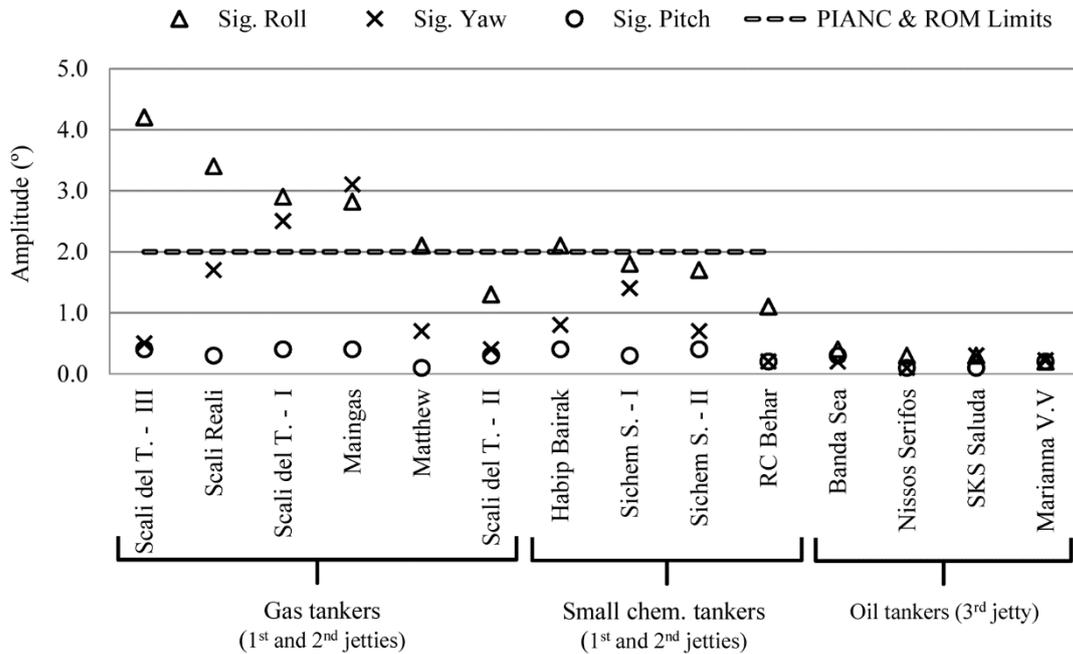


Figura 39. Comparativa entre las amplitudes significantes de los movimientos angulares registrados por los pequeños buques gaseros y químicos, petroleros, y los umbrales de movimiento del PIANC (1995) y la ROM 2.0-11.

En cuanto a los movimientos lineales, de forma general, el vaivén registró mayores amplitudes que la alteada, con valores máximos de $L_{max}^{surge} = 2.20$ m (buque gasero *Maingas*) y $L_{max}^{heave} = 1.00$ m (buque gasero *Scali del Teatro - III*), respectivamente (Tabla 18).

Tal y como ocurría con los movimientos angulares, los pequeños buques gaseros y químicos registraron los mayores movimientos lineales. Sin embargo, las amplitudes de vaivén y alteada no alcanzaron con tanta frecuencia valores superiores a los límites propuestos en el PIANC (1995) y la ROM 2.0-11. De hecho, solo dos de los buques monitorizados (buque químico *Sichem Singapore - II* y buque gasero *Maingas*) registraron amplitudes de vaivén puntuales próximas o superiores a dichos umbrales (Figuras 40 y 41), sin que esto provocara la interrupción de la operación.

Tabla 18. Amplitudes máximas y significantes de los movimientos de alzada y vaivén registradas durante el periodo completo de monitorización y los criterios límite aplicables a cada tipo de buque (el símbolo -- representa la ausencia de datos de monitorización o bien la no existencia de umbral para ese movimiento y tipo de buque).

Type	Ship Name	Heave (m)		Surge (m)		PIANC Limits (m)		ROM Limits (m)	
		L _{max}	L _s	L _{max}	L _s	L _{Heave}	L _{Surge}	L _{Heave}	L _{Surge}
Gas tankers	Scali del T. - III	1.00	0.50	1.55	0.60	--	2.0	--	4.0
	Scali Reali	0.65	0.30	0.70	0.30	--	2.0	--	4.0
	Scali del T. - I	0.60	0.30	1.20	0.40	--	2.0	--	4.0
	Maingas	0.86	0.43	2.20	1.13	--	2.0	--	4.0
	Matthew	0.35	0.20	0.25	0.12	--	2.0	--	4.0
	Scali del T. - II	0.35	0.15	0.60	0.20	--	2.0	--	4.0
Chemical tankers	Habip Bairak	0.75	0.35	1.30	0.5	--	2.0	--	4.0
	Sichem S. - I	0.55	0.25	0.40	0.20	--	2.0	--	4.0
	Sichem S. - II	0.45	0.25	2.00	0.75	--	2.0	--	4.0
	RC Behar	0.40	0.15	0.55	0.25	--	2.0	--	4.0
	Castillo de T.	0.30	0.10	1.10	0.45	--	2.0	--	4.0
	Nave Sextans	--	--	--	--	--	2.0	--	4.0
Oil tankers	Acacia Noir	--	--	--	--	--	2.0	--	4.0
	Banda Sea	--	--	--	--	--	3.0	--	7.0
	Nissos Serifos	--	--	--	--	--	3.0	--	7.0
	Marianna V.V	0.14	0.05	0.05	0.03	--	3.0	--	7.0
General cargo	SKS Saluda	0.20	0.10	0.15	0.10	--	3.0	--	7.0
	Esky	0.40	0.20	1.10	0.45	1.0	2.0	1.0	2.0
	Eems Exe	0.85	0.45	1.75	0.8	1.0	2.0	1.0	2.0

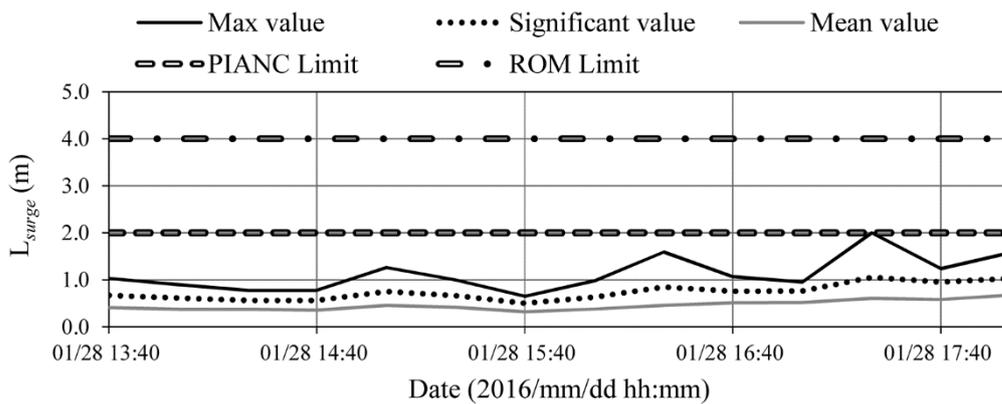


Figura 40. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de vaivén del buque químico *Sichem Singapore - II* durante la operación de carga.

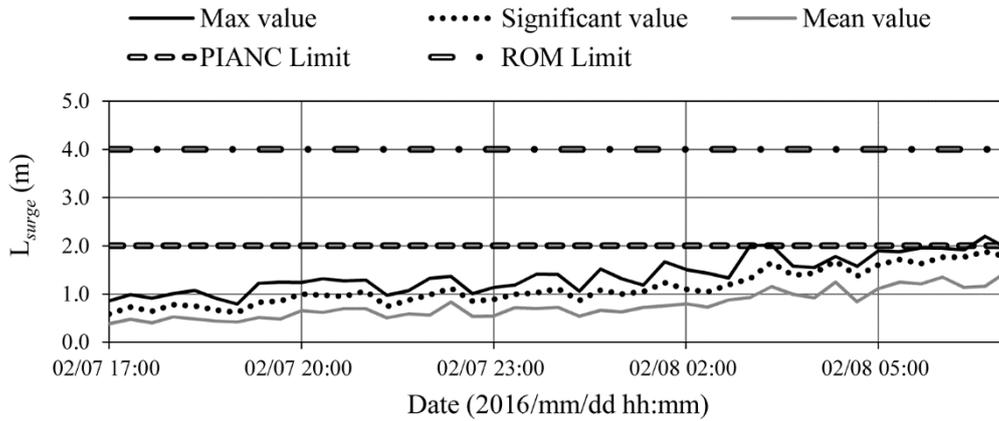


Figura 41. Amplitudes máximas, significantes y medias del movimiento de vaivén del buque gasero *Maingas* durante la operación de carga.

Si analizamos el comportamiento en el plano vertical de dos de los buques anteriormente mencionados (*Maingas* y *Scali del Teatro – III*), se puede ver como presentaron un patrón de movimiento similar, registrando las mayores amplitudes de alzada y vaivén del estudio (Figura 42). Además de tener un tamaño similar, estuvieron sometidos a las peores condiciones de clima marítimo, con combinaciones de altura de ola significativa y periodo pico de oleaje en el exterior del puerto de hasta 4.9 m y 16.0 s, respectivamente. Este hecho podría explicar su comportamiento, en especial los grandes movimientos de vaivén, en comparación con el resto de la flota analizada (la relación de estos forzadores con los movimientos se analizará en el siguiente apartado de este capítulo).

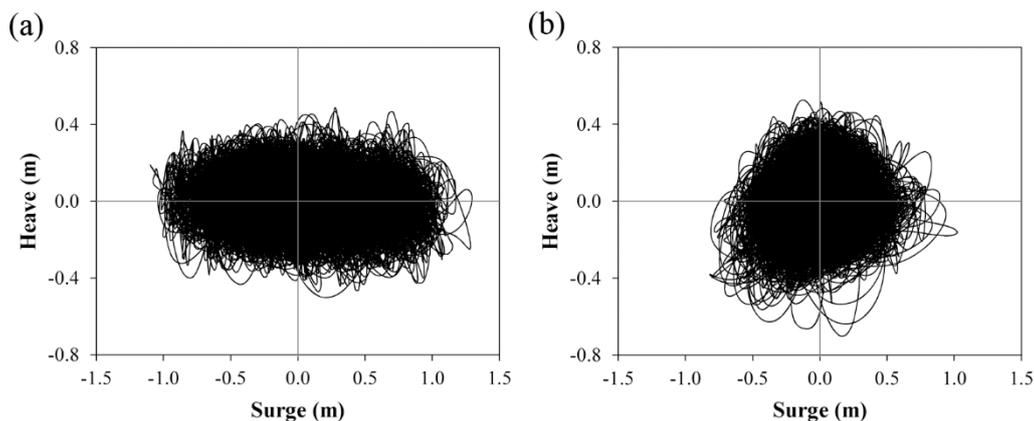


Figura 42. Respuesta del plano vertical (vaivén-alzada) de los buques gaseros *Maingas* (a) y *Scali del Teatro – III* (b).

La Figura 43 muestra la comparación entre la respuesta del plano vertical de un pequeño buque gasero (*Scali Reali*) y de un petrolero (*SKS Saluda*), ambos sometidos a unas

condiciones de clima marítimo similares durante su operación (Tabla 16). De nuevo, como en el caso de los movimientos angulares, los buques de gran porte presentaron un patrón de movimiento más restringido.

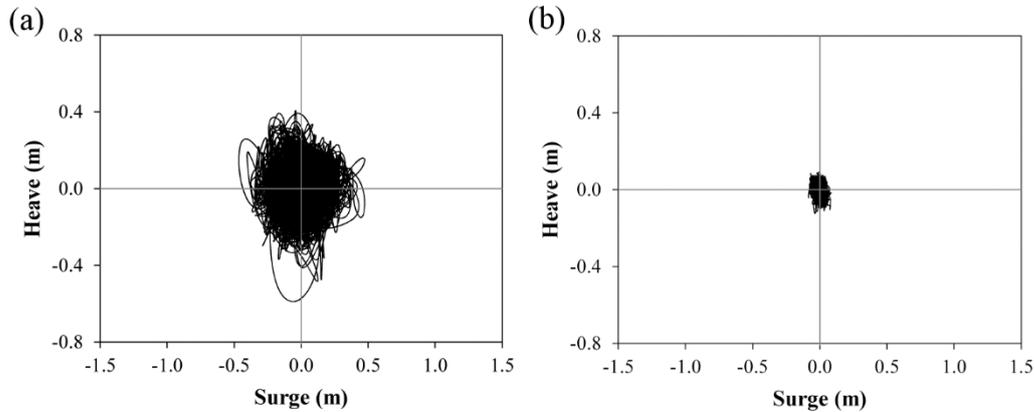


Figura 43. Respuesta del plano vertical (vaivén-alteada) del buque gasero *Scali Reali* (a) y del petrolero *SKS Saluda* (b).

Analizando todos los resultados obtenidos en este apartado, se puede concluir que los movimientos angulares no representan los factores determinantes de las paradas de operación en estas instalaciones. Aunque los movimientos de balance y guiñada registraron amplitudes máximas y significantes superiores a los umbrales de las normativas (Figuras 38 y 39), no se produjeron interrupciones del proceso de carga/descarga. Teniendo en cuenta el tipo de buque (pequeños buques gaseros, químicos y de carga general) y el equipo de manipulación de cargas empleado en el puerto (brazos de carga y cintas transportadoras), los períodos de inactividad están probablemente inducidos por grandes movimientos lineales de los buques (alteada, vaivén y deriva). Puesto que las amplitudes de alteada y vaivén se mantuvieron dentro de unos límites razonables (Tabla 18), este hecho puede explicar la ausencia de interrupciones operativas inducidas por movimientos excesivos.

En cuanto a los umbrales de movimiento propuestos en las normativas consultadas (PIANC, 1995; Puertos del Estado, 2011), los resultados indican que los límites de los movimientos angulares son extremadamente restrictivos para las características de los buques y de las instalaciones portuarias. Los barcos analizados pudieron operar con normalidad, aunque sus movimientos angulares registraron amplitudes importantes durante el tiempo de operación, especialmente los buques gaseros y químicos atracados en

los pantalanos 1 y 2. Es importante señalar que ambos criterios representan valores genéricos aplicables a instalaciones en todo el mundo, por lo que pueden existir excepciones como la presentada en este trabajo. Por ello, los estudios como el realizado en la terminal petrolera de Repsol podrían ayudar a particularizar los criterios de limitación en función de las características de cada instalación (puertos exteriores o interiores, tamaño de los buques, condiciones marítimas, etc.). Este resultado se considera por tanto relevante como conclusión del estudio realizado en esta Tesis Doctoral, y ya ha sido trasladado al grupo de trabajo WG 212 del PIANC (PIANC *MarCom* WG212), encargado de actualizar las recomendaciones sobre umbrales de movimiento incluidas en el PIANC (1995). Esta nueva versión será publicada previsiblemente durante el primer trimestre de 2020, incluyendo la información aquí presentada.

4.6. Influencia de las condiciones marítimas y la localización del atraque sobre los movimientos del buque atracado

Tal y como se ha mencionado anteriormente en esta Tesis, el comportamiento del buque atracado está altamente influenciado por las condiciones océano-meteorológicas en la zona de amarre. Aunque la campaña de campo no incluyó la monitorización de estos forzadores en el interior del puerto (oleaje, onda larga, viento y corrientes), sí se disponía de información sobre las condiciones marítimas en el exterior, obtenida de la red de propagación de oleaje de Puertos del Estado (ver sección 4.4 de este capítulo). Por lo tanto, se decidió comparar los datos horarios de altura de ola significativa (H_s) y periodo pico del oleaje (T_p) proporcionados por dicha red, con las amplitudes significantes de cada movimiento, registradas en el mismo espacio temporal (estados de mar de 1 h de duración), con el objetivo de analizar las posibles relaciones entre estas variables.

4.6.1. Análisis de correlación entre los movimientos del buque atracado y el clima marítimo

Tras confirmar en apartados anterior la existencia de patrones de movimiento diferenciado en función del tamaño del buque, se decidió clasificarlos en dos grupos para realizar los estudios de correlación de forma independiente.

En primer lugar, se analizó la relación entre los movimientos experimentados por los buques gaseros y químicos de hasta 130 m de eslora atracados en los pantalanes 1 y 2, y los parámetros del oleaje (H_s y T_p). Este tipo de buques mostraron cierta relación lineal con la altura de ola significativa y el período pico del oleaje, especialmente los movimientos de cabeceo, alteada y vaivén, cuyos valores de correlación se indican en la Tabla 19.

Tabla 19. Coeficientes de correlación de *Pearson* de los movimientos significantes de los pequeños buques gaseros y químicos con la altura de la ola y el periodo pico del oleaje en el exterior del puerto.

Pearson correlation coefficient		
	Hs	Tp
Sig. Roll	0.64	0.35
Sig. Pitch	0.86	0.66
Sig. Yaw	0.63	0.45
Sig. Heave	0.87	0.65
Sig. Surge	0.76	0.73

Como puede verse en la tabla anterior, el cabeceo y la alteada presentaron una alta correlación con la altura de ola significativa en el exterior del puerto, reflejando la importancia de este parámetro como excitador de ambos movimientos. Probablemente, la relación habría sido aún mayor con los datos de la altura de ola en las proximidades de la zona de atraque, al tratarse de movimientos con un comportamiento más predecible, en especial la alteada, como consecuencia de la menor restricción impuesta sobre ellos por el sistema de amarre (movimientos en el plano vertical del buque).

En cuanto a la relación con el período pico del oleaje, el movimiento de vaivén presentó el valor de correlación más alto del estudio (Tabla 19). Este resultado muestra la influencia del parámetro sobre este movimiento, especialmente de los oleajes con períodos superiores a 14 s que, como puede verse en la Figura 44c, están relacionados con los mayores movimientos de vaivén.

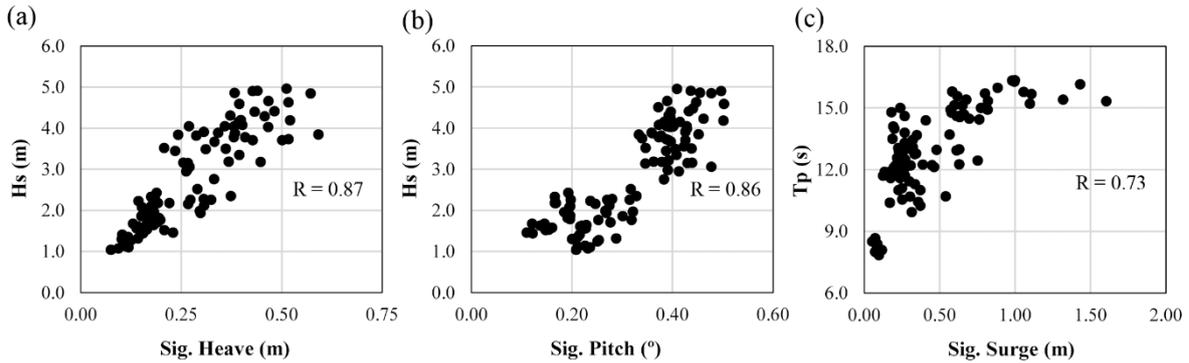


Figura 44. Gráficos de dispersión de los movimientos significantes de alteada (a), cabeceo (b) y vaivén (c) de los pequeños buques gaseros y químicos vs. altura de ola significativa (H_s) y periodo pico del oleaje (T_p) en el exterior del puerto.

Aunque los resultados muestran buenas relaciones lineales, se aprecian ciertas agrupaciones en los patrones de dispersión de los movimientos (Figura 44), probablemente inducidas por las diferencias entre las características de las distintas zonas de atraque y los sistemas de amarre, y en particular por la variación en la pretensión de las líneas utilizada por cada buque. La configuración del amarre también podría desempeñar un papel relevante, pero no en este caso, ya que casi todos los buques presentaban el mismo esquema (Tabla 15, sección 4.4).

Además de los resultados mencionados, se observaron comportamientos diferentes entre barcos que operaron en la misma localización de atraque, especialmente en aquellos movimientos que menores correlaciones obtuvieron con los parámetros del oleaje (balance y guiñada). En lo que respecta a los buques que operaron en el pantalán 1, el gasero *Scali del Teatro – III* registró las mayores amplitudes de balance del estudio, mientras que los buques químicos *Habip Bairak* y *Sichem Singapore – II* experimentaron amplitudes de este movimiento muy inferiores (Figura 39). Por el contrario, la guiñada de estos buques mostró un patrón de comportamiento semejante, registrando valores muy próximos. A pesar de que los tres buques estuvieron expuestos a unas condiciones océano-meteorológicas similares (Tabla 16, sección 4.4), con la misma protección frente a la acción de estos agentes (misma localización de atraque) y el mismo esquema de amarre, el movimiento de balance del primero fue muy distinto al de los otros dos, posiblemente explicado por el menor porte del buque *Scali del Teatro – III*, lo que le confería una menor inercia en el eje de rotación.

Un ejemplo opuesto al mencionado anteriormente se encuentra en el comportamiento mostrado por los buques gaseros *Scali Reali*, *Scali del Teatro – I* y *Maingas* (Tabla 17 y Figura 39, sección 4.5), atracados en el pantalán 2. Mientras que todos ellos registraron valores similares de balance, alcanzando las máximas amplitudes en este atraque, la guiñada del *Maingas* experimentó un comportamiento diferente, siendo el único barco en el que las amplitudes de este movimiento fueron mayores que las registradas por el balance (Figura 39). Aunque estos barcos tenían dimensiones similares y la misma localización, el buque *Maingas* estuvo expuesto a unas condiciones de oleaje diferentes, especialmente en términos de periodo pico del oleaje y de su dirección de procedencia (Tabla 16, sección 4.4), lo que puede justificar este comportamiento diferenciado.

El análisis anterior, realizado entre los movimientos significantes de los pequeños buques gaseros y químicos, y los parámetros del oleaje (*Hs* y *Tp*) se repitió utilizando en este caso los datos de movimiento de los grandes buques petroleros. Los resultados mostraron valores de correlación más bajos que los obtenidos para los buques pequeños, especialmente en el caso de los movimientos angulares (Tabla 20).

Tabla 20. Coeficientes de correlación de *Pearson* de los movimientos significantes de los grandes buques con la altura de la ola y el periodo pico del oleaje en el exterior del puerto.

	Pearson correlation coefficient	
	Hs	Tp
Sig. Roll	0.17	0.29
Sig. Pitch	0.41	0.16
Sig. Yaw	0.12	0.03
Sig. Heave	0.81	0.62
Sig. Surge	0.61	0.56

Por su parte, los movimientos lineales (altea y vaivén) presentaron los valores de correlación más altos dentro de este grupo de buques. Sin embargo, a diferencia de lo ocurrido con los buques de menor tamaño, no se aprecia una tendencia lineal entre la altea y la altura de ola significativa en el exterior del puerto, mostrando este movimiento dos conjuntos de datos (Figura 45).

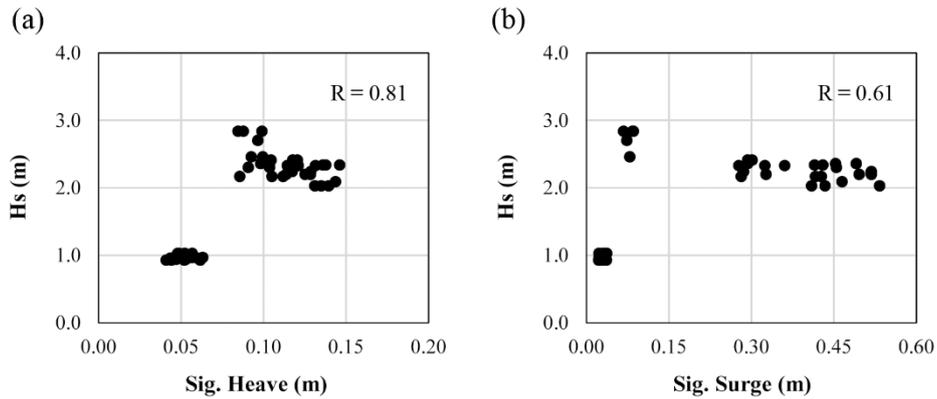


Figura 45. Gráficos de dispersión de los movimientos significantes de alteada (a) y vaivén (b) de los grandes petroleros vs. altura de ola significativa (H_s) en el exterior del puerto.

El comportamiento diferenciado entre los dos grupos de barcos, tanto en términos de amplitud de movimiento como en su relación con los agentes forzadores, se debe no solo a la diferencia en el tamaño de los buques, sino también a las diferentes características de los equipos y elementos de amarre. Así pues, los petroleros de mayor tamaño presentaron una configuración de amarre con un mayor número de líneas (incluyendo largos, traveses y springs) y una pretensión inicial más alta, mantenida a lo largo del tiempo por los chigres de tensión constante instalados a bordo. Esto contribuye a restringir la capacidad de movimiento de los buques, lo que reduce las amplitudes de los movimientos y modifica sus modos de oscilación.

La orientación de las zonas de atraque utilizadas por cada grupo de barcos (Figura 30, sección 4.2), es también otro factor determinante de este diferente comportamiento. Este aspecto se manifiesta sobre todo en el caso del movimiento de balance de los pequeños buques (amarrados en los pantalanes 1 y 2), a los que las olas difractadas por el morro del dique les inciden de costado, contribuyendo a incrementar las amplitudes de este movimiento.

4.6.2. Análisis en el dominio de las frecuencias

Además del estudio anterior, las series temporales completas de cada movimiento se analizaron en el dominio de frecuencias para obtener sus periodos pico de oscilación, tal y como se describió en la sección 4.3 de este capítulo. De esta forma, los resultados obtenidos se pueden comparar con los periodos del oleaje para analizar su posible relación.

Hay que tener en cuenta que los períodos de oscilación de un buque amarrado dependen de múltiples parámetros, como la localización de atraque, los forzadores del movimiento (condiciones marítimas y de viento), la condición de carga o la configuración y características del sistema de amarre. Los cambios de esos parámetros pueden generar variaciones en esos períodos, incluso para un mismo buque.

De forma general, las funciones de densidad espectral mostraron un único pico predominante (Figura 34, sección 4.3), cuyo valor oscila dentro de las bandas de alta (>0.04 Hz) o baja frecuencia (<0.04 Hz) dependiendo del tipo de movimiento analizado.

Los valores obtenidos de los periodos de oscilación asociados a esos picos (inversa del valor de la frecuencia) se situaron entre los siguientes intervalos:

- Periodos de oscilación del balance (T_{Roll}): 6.0-17.2 s
- Periodos de oscilación del cabeceo (T_{Pitch}): 6.6-14.6 s
- Periodos de oscilación de la guiñada (T_{Yaw}): 10.4-68.8 s
- Periodos de oscilación de la alteada (T_{Heave}): 10.8-16.8 s
- Periodos de oscilación del vaivén (T_{Surge}): 25.2-98.0 s

En la Tabla 21 se muestran los periodos pico de oscilación de los movimientos de cada buque analizado.

Tabla 21. Periodos pico de oscilación de cada movimiento y período pico promedio del oleaje en el exterior del puerto durante el tiempo de monitorización.

Type	Ship Name	Peak oscillation periods of each motion					Avg. T_{p_Buoy} (s)
		T_{Roll} (s)	T_{Pitch} (s)	T_{Yaw} (s)	T_{Heave} (s)	T_{Surge} (s)	
Gas tankers	Scali del Teatro-III	16.1	7.5	32.9	15.0	43.0	14.6
	Scali Reali	14.0	6.2	14.0	14.1	49.3	13.0
	Scali del Teatro-I	17.2	11.4	15.7	11.2	32.6	10.6
	Maingas	11.0	8.6	47.4	16.5	68.6	15.6
	Matthew	12.5	5.7	60.0	11.6	25.2	11.3
	Scali del Teatro-II	16.5	8.3	40.7	16.8	37.7	13.2
Chemical tankers	Habip Bairak	12.6	12.6	12.6	11.4	45.8	12.5
	Sichem Singapore I	10.8	7.4	11.0	14.9	35.9	--
	Sichem Singapore II	10.5	10.7	10.4	13.6	43.8	12.9
	Rc Behar	11.9	12.3	11.6	13.1	36.6	12.4
	Castillo de Trujillo	11.8	13.2	37.6	10.8	98.0	13.5
	Nave Sextans	10.7	9.3	41.6	--	--	16.4
Oil tankers	Acacia Noir SD	9.7	10.3	68.0	--	--	--
	Banda Sea	11.8	14.6	11.8	--	--	14.9
	Nissos Serifos	10.6	10.6	10.3	--	--	--
General cargo	SKS Saluda	12.4	11.4	12.4	10.8	49.9	11.8
	Eems Exe	8.0	6.9	38.5	13.6	44.6	--
	Esky	6.0	6.6	37.3	14.3	42.9	12.2

Como puede verse, los movimientos en el plano vertical (balance, cabeceo y alteada) registraron periodos de oscilación más cortos que los movimientos en el plano horizontal (guiñada y vaivén). La guiñada y, especialmente el vaivén, fueron movimientos gobernados por la banda de bajas frecuencias y, por lo tanto, podrían ser excitados como consecuencia la acción del oleaje de largo periodo que afecta a multitud de puertos. Por el contrario, la banda de altas frecuencias fue más relevante para los movimientos de balance, cabeceo y alteada, lo que indica que éstos pueden ser directamente excitados por los oleajes de período corto. Esta influencia fue más evidente en el movimiento de alteada, en el que no sólo su período de oscilación fue similar al periodo pico del oleaje, como en el caso del cabeceo y el balance, sino que también se identificó una fuerte relación lineal entre ambos valores, especialmente en el caso de los pequeños buques gaseros y químicos (Figura 46). Cabe señalar que los resultados obtenidos son coherentes con la literatura, en términos de frecuencia oscilatoria de los movimientos de los buques.

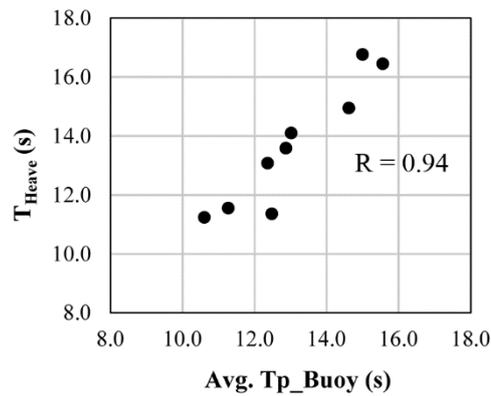


Figura 46. Gráfico de dispersión de los períodos pico de oscilación del movimiento de alzada (T_{Heave}) frente al período pico promedio del oleaje (T_{p_Buoy}) en el exterior del puerto durante el tiempo de monitorización de los pequeños buques gaseros y químicos.

Además del trabajo anterior, se realizó una estimación de los períodos naturales de oscilación del movimiento de vaivén para cuatro buques representativos de la flota de estudio (gasero de 3,800 TPM, quimiquero de 13,000 TPM, quimiqueros de 30,000 TPM y petrolero de 115,000 TPM). De esta manera es posible comparar los valores con los resultados obtenidos en el análisis de frecuencias. La estimación del período natural de oscilación del vaivén (T_{nSurge}) se realizó considerando al buque amarrado como un sistema masa-resorte ordinario:

$$T_{nSurge} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{M}{K}\right)^{1/2} \quad (47)$$

Donde M representa el desplazamiento del buque (peso del mismo para una determinada condición de carga), y K representa la constante elástica de las líneas de amarre en la dirección del movimiento de vaivén (sólo se considera la contribución de los largos y springs de proa y popa).

Para obtener la horquilla de valores entre la que se encontrarían los períodos naturales de este movimiento para cada tipo de buque, se consideraron dos posibles condiciones carga (buque en lastre y buque a plena carga) y dos valores de rigidez (K) de las líneas de amarre, suponiendo la utilización de distintos tipos de material (poliamida: *soft K*; polipropileno: *stiff K*).

Tabla 22. Parámetros del buque y de los amarres: porte del buque (TPM), desplazamiento, carga de rotura de los amarres (MBL) y número de líneas con contribución (N).

DWT	Displacement (t)		Mooring lines	
	Ballasted	Loaded	MBL (kN)	N
3,800	3,908	6,010	320	12
13,000	10,588	17,472	500	10
30,000	24,414	40,690	500	12
115,000	63,632	134,346	900	12

Los resultados obtenidos de la estimación se muestran en la Tabla 23. Al comparar los valores del periodo natural de oscilación del vaivén (T_{nSurge}), con los obtenidos en el análisis de frecuencias, puede observarse que sólo los buques químicos *Sichem Singapore* (I y II) y *Habip Bairak* (de 13,141 TPM y 8,400 TPM, respectivamente) registraron periodos de oscilación con valores dentro de su horquilla teórica de frecuencias naturales (Tablas 21 y 23). Además, sólo uno de ellos (*Sichem Singapore - II*) registró amplitudes de vaivén importantes, cercanas a los 2.0 m. Por lo tanto, el hecho de que el movimiento no haya sido excitado por los forzadores océano-meteorológicos en su banda de frecuencias naturales puede explicar la ausencia de grandes amplitudes en la mayoría de los buques analizados.

Tabla 23. Horquilla teórica de periodos naturales de oscilación del movimiento de vaivén para cada tipo de buque.

3,800 DWT Gas tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
	stiff K	soft K	stiff K	soft K
T_{nSurge} (s)	15	21	18	26
13,000 DWT Chemical tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
	stiff K	soft K	stiff K	soft K
T_{nSurge} (s)	29	41	38	53
30,000 DWT Chemical tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
	stiff K	soft K	stiff K	soft K
T_{nSurge} (s)	46	65	59	84
115,000 DWT Oil tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
	stiff K	soft K	stiff K	soft K
T_{nSurge} (s)	45	63	65	92

Tal y como se ha comentado anteriormente, las variaciones de la condición de carga o de la rigidez de las líneas de amarre producen cambios en los periodos de oscilación. Su efecto se aprecia en el estudio de periodos naturales de vaivén (Tabla 23), en el que las modificaciones de estos parámetros produjeron cambios de hasta 20 s en los valores obtenidos, siendo esta variación aún mayor en los grandes buques. Además, estas diferencias pueden observarse también en los barcos *Sichem Singapore* y *Scali del Teatro*, ambos monitorizados dos y tres veces, respectivamente, en diferentes escalas y atraques (pantalanes 1 y 2). Estos buques experimentaron cambios en sus períodos de oscilación, siendo más relevantes en la guiñada y el vaivén, probablemente debido a la mayor influencia del sistema de amarre en los movimientos horizontales.

Capítulo 5

Desarrollo de una herramienta de predicción del comportamiento de buque atracado y ayuda a la toma de decisiones en la operatividad portuaria

En este capítulo se presenta una síntesis de la información contenida en el artículo JCR IV incluido en el Anexo I de este documento:

- *Artículo IV: Application of an analytic methodology to estimate the movements of moored vessels based on forecast data.*

5.1. Introducción

La competencia entre puertos para atraer el mayor número de tráfico a sus terminales hace que deban de ser cada vez más eficientes y competitivos. Esto no solo requiere que las instalaciones estén dotadas de buenas condiciones de abrigo, equipamientos y vías de comunicación que faciliten la logística terrestre, sino también de una buena planificación que se anticipe a las posibles situaciones de riesgo, evitando retrasos innecesarios en las escalas y los correspondientes costes económicos asociados. En este sentido, disponer de herramientas de ayuda a la toma de decisiones en las actividades portuarias constituye un apoyo indispensable.

Como se ha mencionado anteriormente, la maniobra de carga/descarga es la que mayor tiempo consume. Las condiciones en las que ésta se realice o la imposibilidad de llevarla a cabo, van a depender fundamentalmente del comportamiento del barco en el atraque. Por ello, poder predecir este comportamiento en base a unos determinados agentes forzadores, ayuda a mejorar la planificación de escalas y operaciones, contribuyendo en la eficiencia del proceso.

Teniendo en cuenta esta potencial aplicación, y como aportación final de esta Tesis Doctoral se presenta una metodología para el desarrollo de herramientas predictivas de los movimientos de los buques atracados en una determinada instalación, a partir de registros reales de agentes océano-meteorológicos y movimientos. Esta metodología se testó en las

instalaciones del Puerto Exterior de A Coruña, obteniendo resultados adaptados a sus características.

5.2. Prueba de concepto: Puerto Exterior de A Coruña

El objetivo fundamental del estudio consiste en desarrollar una metodología analítica para predecir el comportamiento de los buques atracados, que pueda ser extrapolable a cualquier instalación portuaria. Para ello, cada uno de los seis grados de libertad es modelado mediante funciones de transferencia que relacionaran los valores de un determinado movimiento con los valores concomitantes de ciertas variables océano-meteorológicas y parámetros del buque.

Estas relaciones se obtienen a partir de los datos registrados durante las campañas monitorización de los agentes involucrados.

Puesto que la idea fundamental es que dichas funciones de transferencia constituyan una herramienta dentro de un sistema de gestión de la operatividad, a partir de cuyos resultados se identifiquen posibles ventanas de trabajo idóneas o la aparición de problemas en una determinada operación, todas las variables involucradas en su obtención deberían ser proporcionadas por los sistemas de previsión que disponga cada instalación. De esta manera, se podría alimentar la herramienta para obtener estimaciones de los movimientos en un determinado horizonte temporal (estimaciones a 12 h, 24 h, 48 h, etc.), y así tomar decisiones en función de los resultados aportados.

La metodología propuesta, cuyo desarrollo completo se describe en los siguientes apartados, fue testada en el Puerto Exterior de A Coruña. Situado 10 km al suroeste de la ciudad, sus instalaciones están protegidas de la acción del oleaje por un dique principal de 3,360 m de longitud y un contradique de 1,320 m, generando así una dársena de 230 Ha de agua abrigada, la mayor de toda la fachada atlántica. En el momento del estudio, el puerto contaba con una línea continua de atraque de 900 m de longitud y calado medio de 22 m (Muelle Transversal), que constituía su principal zona de operaciones (Figura 47)

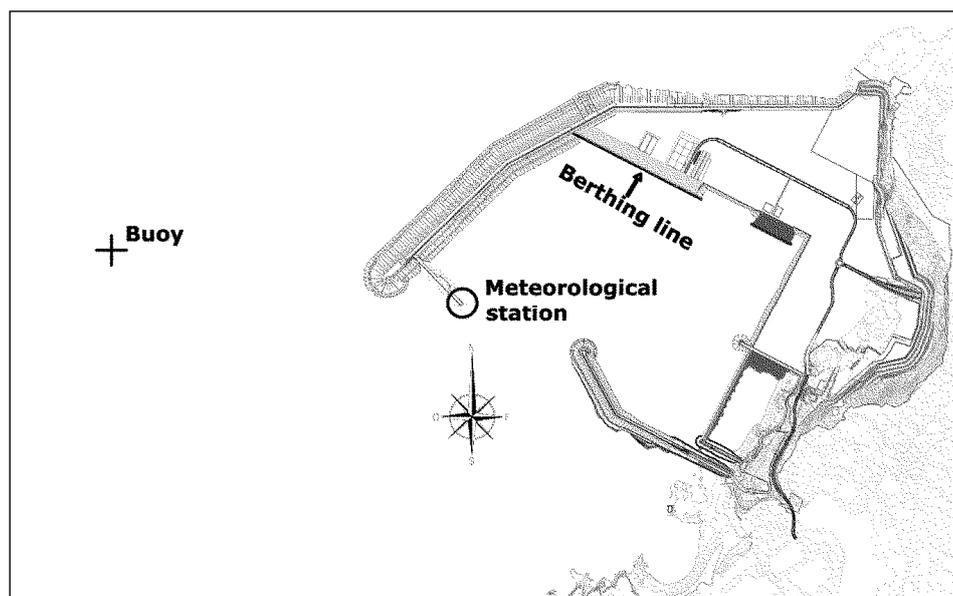


Figura 47. Instalaciones del Puerto Exterior de A Coruña. Línea de atraque analizada y localización de los equipos de monitorización de las variables océano-meteorológicas (boya de oleaje y estación meteorológica).

5.3. Obtención de los datos de partida

El primer paso del proceso fue la obtención de la información de partida para calcular las funciones de transferencia. De esta forma, se realizaron tres campañas de campo en el Puerto Exterior de A Coruña, con una duración total de 18 meses (octubre-marzo de los años 2015-2016, 2016-2017 y 2017-2018), en las que se registraron tanto movimientos de los buques atracados como los agentes océano-meteorológicos concomitantes.

Un total de 27 buques de dos tipologías diferentes (15 graneleros y 12 buques de carga general) fueron monitorizados bajo diferentes condiciones climatológicas, representando la flota típica presente en estas instalaciones (Tabla 24). Al tratarse de un muelle continuo (Figura 47), estos buques atracaron en diferentes zonas ocupando la totalidad de la línea de atraque.

Tabla 24. Características de los buques monitorizados.

Vessel	Type	Deadweight Tonnage DWT (t)	Length (m)	Beam (m)
Fu Da	Bulk carrier	71,330	224.9	32.2
Avax	Bulk carrier	87,030	225.0	32.2
Yannis	Bulk carrier	50,792	189.9	32.2
Western Boheme	Bulk carrier	37,000	186.9	28.6
Pina Cafiero	Bulk carrier	75,668	225.0	32.2
Jing Jin Hai	Bulk carrier	77,872	225.0	32.2
Lowlands Saguenay	Bulk carrier	37,152	179.9	30.0
Aloe	Bulk carrier	30,618	178.7	28.0
CSK Unity	Bulk carrier	77,105	225.0	32.2
Topaz	Bulk carrier	75,499	225.0	32.2
Walsall	Bulk carrier	58,018	189.9	32.3
Kyzicos	Bulk carrier	92,598	229.5	36.9
Nautical Lucia	Bulk carrier	63,548	199.9	32.2
Nord Saturn	Bulk carrier	77,288	225.0	32.2
Orange Harmony	Bulk carrier	81,837	229.0	32.2
Marc	General cargo	4,135	89.8	13.6
Celine	General cargo	8,600	129.4	15.8
Dominica	General cargo	13,022	127.3	21.2
Kelly C	General cargo	6,250	106.0	15.5
Notos	General cargo	8,049	125.1	16.4
Don Juan	General cargo	21,057	158.0	23.0
Eems River	General cargo	4,066	89.9	12.5
Linau	General cargo	3,699	88.0	12.8
Fortune	General cargo	12,692	138.9	21.3
Moraimé	General cargo	7,300	118.0	16.5
Onego Capri	General cargo	10,273	138.9	15.9
Oppland	General cargo	9,273	107.0	18.4

Para la monitorización de los seis movimientos de los buques, además de las técnicas desarrolladas en esta Tesis Doctoral, técnica de seguimiento por imagen (movimientos de alzada y vaivén) y unidad IMU (movimientos angulares de balance, cabeceo y guiñada), se utilizaron dos distanciómetros láser colocados en el cantil del muelle para obtener el movimiento de deriva y una medida adicional de la guiñada. Estos equipos se instalaron en la zona de atraque de cada barco analizado, disparando sus haces a los extremos del tercio central del buque, lugar donde el casco presentaba una estructura homogénea, próxima a un plano (Figura 48).



Figura 48. Equipos utilizados para la monitorización de los movimientos de los buques atracados (IMU, cámaras y distanciómetros láser).

Conocida la separación entre distanciómetros (L), a partir de los registros de ambos equipos (x_{proa} y x_{popa}) se obtuvo el valor de la deriva en el punto medio y una medida redundante del movimiento de guiñada.

$$deriva_{punto\ medio} \rightarrow \delta_{deriva}(t) = x_{proa}(t) + \frac{x_{proa}(t) - x_{popa}(t)}{2} \quad (48)$$

$$guiñada \rightarrow \theta_{guiñada}(t) = \tan^{-1}\left(\frac{x_{proa}(t) - x_{popa}(t)}{L}\right) \quad (49)$$

Todos los equipos involucrados en las mediciones fueron sincronizados previamente a su instalación, empleando el mismo servidor de tiempos NTP (hora.roa.es), obteniendo así las series temporales de los seis movimientos con una frecuencia de muestreo de 1 Hz (Figura 49): $\theta_{cabeceo}(t)$, $\theta_{balance}(t)$, $\theta_{guiñada}(t)$, $\delta_{alteada}(t)$, $\delta_{vaivén}(t)$ y $\delta_{deriva}(t)$.

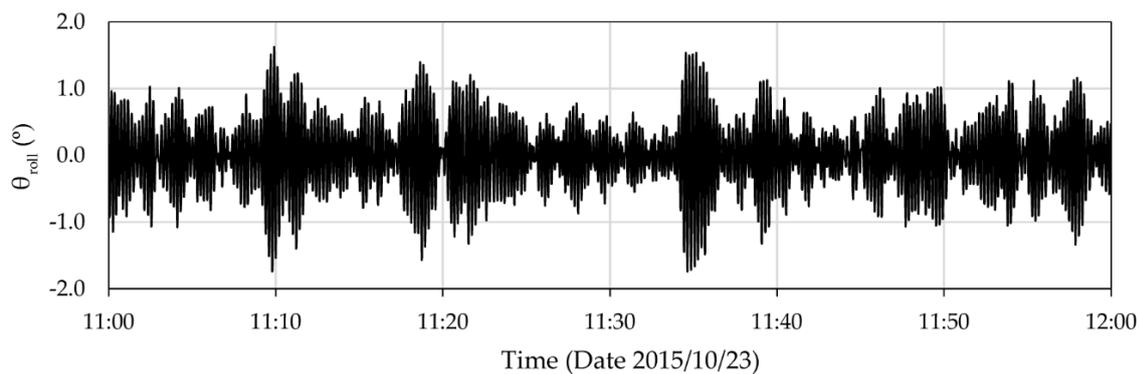


Figura 49. Muestra de 1 h de duración de la serie temporal del movimiento de balance registrada durante la operación de un buque representativo.

Aplicando el procedimiento descrito en el capítulo anterior, cada serie temporal completa se dividió en intervalos de 1 h duración, obteniendo para cada bloque el valor máximo (A_{max} o L_{max}), medio (A_m o L_m) y significativo (A_s o L_s) de la amplitud del movimiento. De esta manera, se obtendrían los estadísticos de dicho movimiento con la misma frecuencia de muestreo que los parámetros del clima marítimo, permitiendo así la comparación directa de los valores concomitantes. La Figura 50 muestra la comparación entre la evolución de las amplitudes de movimientos y sus forzadores océano-meteorológicos durante la monitorización del buque granelero *Western Boheme*.

Como puede verse, un buque amarrado que bajo la acción de unas determinadas condiciones océano-meteorológicas se mueve con ciertas amplitudes, puede experimentar un movimiento puntual máximo mucho mayor que su movimiento significativo o medio. Este valor que abandona la tendencia principal del movimiento, podría ser ocasionalmente causado por la acción de otros agentes externos, como las olas generadas por el paso de los buques o la modificación puntual de la tensión de las líneas de amarre para adaptarlas a las variaciones de la carrera de marea. Es por ello que resultan difícilmente predecibles.

Por tanto, y dado que el objetivo del estudio es el desarrollo de modelos predictivos en base a variables océano-meteorológicas, se decidió seleccionar como estadístico a emplear en el análisis el valor significativo del movimiento. De esta manera, los parámetros del oleaje (altura de ola significativa y periodo pico) se obtendrán siguiendo un análisis similar, lo que contribuirá a lograr mejores relaciones con uno de los principales forzadores de los movimientos. Además, este valor ha sido comúnmente utilizado en otros estudios de

comportamiento de buque atracado (López & Iglesias, 2014; Molen et al., 2015), lo que demuestra su viabilidad como descriptor del movimiento.

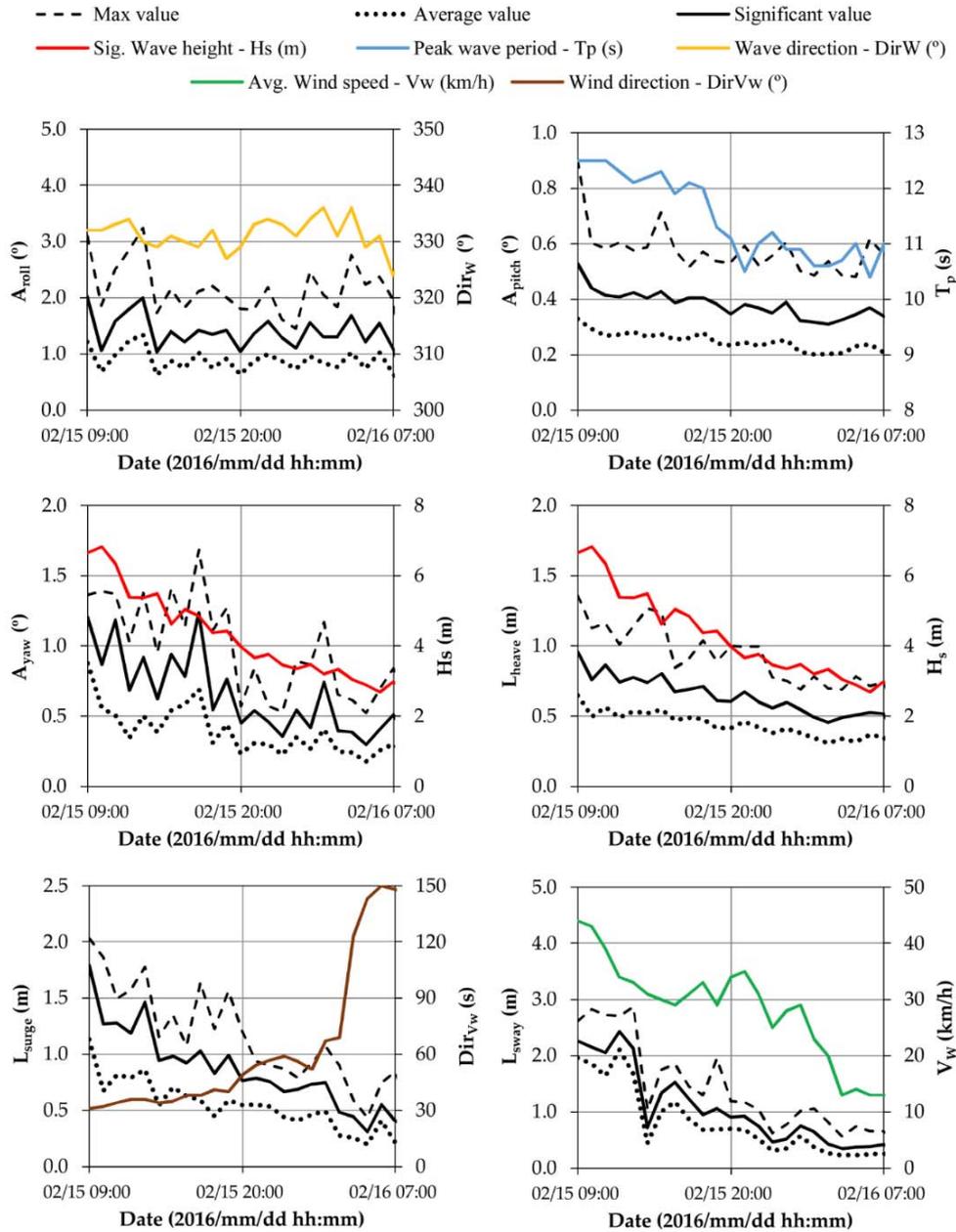


Figura 50. Amplitudes máximas, medias y significantes de cada movimiento registrado durante la estancia en puerto del buque granelero *Western Boheme* y sus forzadores océano-meteorológicos concomitantes.

Para la caracterización de las variables océano-meteorológicas se utilizó la instrumentación disponible en el puerto (Figura 47). En primer lugar, los parámetros de clima marítimo fueron registrados por la boya direccional LANGOSTEIRA II (43.35° N 8.56° O), perteneciente a la Red de Boyas Costeras de Puertos del Estado (REDCOS). Este equipo

genera datos de los principales parámetros del oleaje con frecuencia horaria (estados de mar de 1 h): altura de ola significativa (H_s), altura de ola máxima (H_{max}), periodo pico del oleaje (T_p), periodo medio del oleaje (T_m) y dirección media de procedencia ($DirW$).

En segundo lugar, los datos de viento se obtuvieron de la estación meteorológica situada en el martillo del dique principal, propiedad de la Autoridad Portuaria de A Coruña (Cuadro de Mando Ambiental - Puerto A Coruña). El dispositivo proporciona datos diez-minutales de los siguientes parámetros del viento: velocidad media (V_w), dirección media ($DirV_w$), velocidad de racha (V_g) y dirección de racha ($DirV_g$). Puesto que ambos equipos presentaban una frecuencia de muestreo diferente, los datos de viento fueron agrupados en intervalos horarios obteniendo los valores medios de cada parámetro durante dicho periodo. De esta manera se tendrían datos concomitantes en cada espacio temporal de 1 h.

En la Figura 51 se muestran las rosas estacionales de oleaje y viento (invierno y verano) en la posición de la boya para el período 2015-2018, a fin de aclarar los valores de los principales forzadores que actúan en el Puerto Exterior de A Coruña.

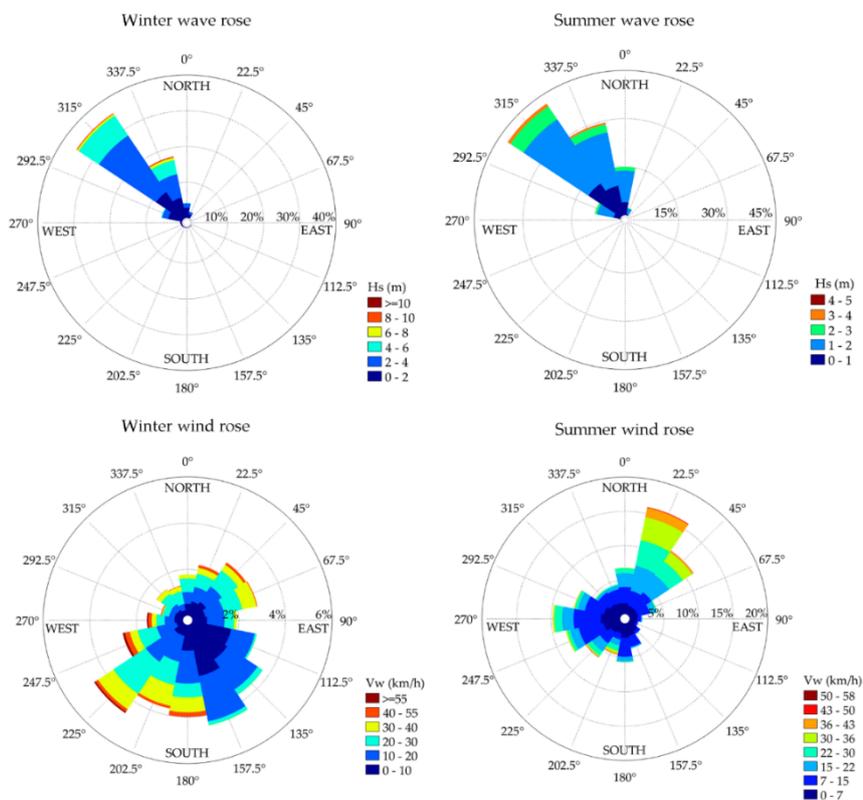


Figura 51. Rosas estacionales de oleaje y viento en el punto de la boya del Puerto Exterior de A Coruña durante el periodo 2015-2018.

A pesar de disponer de múltiples parámetros para la caracterización del oleaje y el viento, el sistema de previsión meteorológica del puerto sólo proporciona los siguientes datos en la localización de la boya, de modo que estos parámetros fueron los seleccionados para participar en el análisis:

Clima marítimo:

- Altura de ola significativa (H_s)
- Periodo pico (T_p)
- Dirección de procedencia ($DirW$)

Viento:

- Velocidad media (V_w)
- Dirección media de procedencia ($DirV_w$) del viento.

Aunque los modelos de estimación de los movimientos se obtengan en base a datos reales recogidos en campo, su futura aplicación como herramienta de ayuda a la toma de decisiones implica que sean ejecutados con datos de previsión meteorológica para un horizonte temporal determinado. Por ello, es importante conocer las desviaciones existentes entre ambas fuentes de información (Datos reales vs. Datos de previsión). En la Tabla 25 se muestran los resultados del análisis de los errores de estimación de cada variable.

Tabla 25. Coeficiente de determinación (R^2), error cuadrático medio (RMSE) y error absoluto medio (MAE) de los valores de predicción frente a los valores reales de las variables océano-meteorológicas.

Forecast variable vs. Observed variable	R^2	RMSE	MAE
Hs forecast vs. Hs observed	0.86	0.39 m	0.29 m
Tp forecast vs. Tp observed	0.63	1.9 s	1.2 s
DirW forecast vs. DirW observed	0.77	18.2°	11.3°
Vw forecast vs. Vw observed	0.64	6.8 km/h	5.2 km/h
DirVw forecast vs. DirVw observed	0.51	55.1°	36.5°

Como puede verse, los parámetros H_s , T_p , $DirW$ y V_w presentaron la mejor aproximación al valor real (observado), mostrando errores de predicción aceptables. Por el contrario, $DirV_w$, mostró la mayor desviación entre el valor observado y el de pronóstico. Dado que los modelos se alimentarán con información procedente del sistema de previsión

meteorológica del puerto, cuanto mejor sea el funcionamiento del mismo, los resultados de estas herramientas mostrarán mayor similitud en términos de precisión a los obtenidos en su etapa de desarrollo.

Por último, y a pesar de su influencia sobre el comportamiento del buque atracado, no se ha incluido en el análisis ningún parámetro que aporte información sobre el sistema de amarre (material, pretensión inicial, número de líneas, etc.), puesto que no se dispondría de datos de previsión sobre estos parámetros para alimentar posteriormente los modelos obtenidos.

Además, como resultado de las características y la disposición de los sistemas de amarre en el puerto, los buques analizados solamente utilizaron dos configuraciones de amarre (Figura 52): 4-2-2-4 para los grandes graneleros (4 largos de proa, 2 springs de proa, 2 springs de popa, 4 largos de popa) y 3-2-2-3 para los buques de carga general (3 largos de proa, 2 springs de proa, 2 springs de popa, 3 largos de popa). Por lo tanto, no hay una variabilidad en el número de líneas dentro de un mismo tipo de buque que permita introducirla como parámetro.

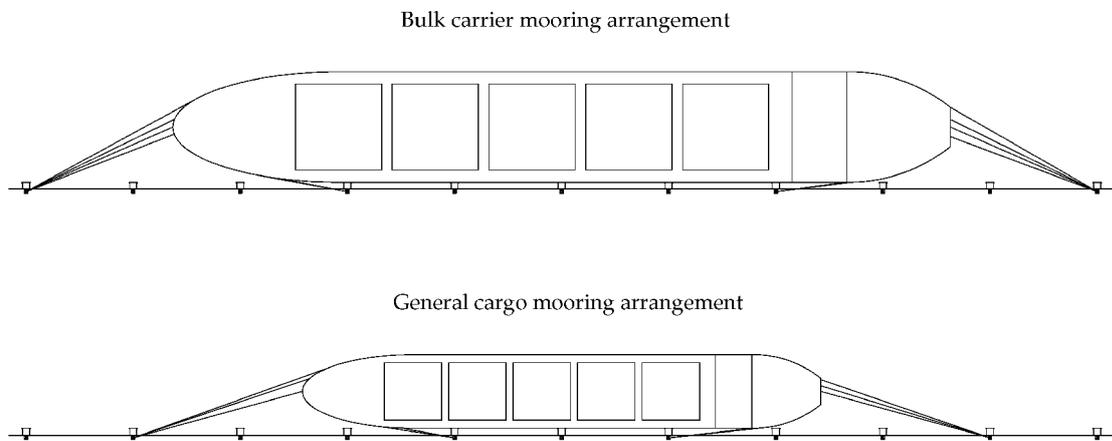


Figura 52. Configuración de amarre utilizada por cada tipo de buque.

5.4. Base de datos

Una vez finalizada la campaña de recogida de información, se creó la base de datos a partir de la cual se aplicaría la metodología para la obtención de las funciones de transferencia. Cada dato horario de movimiento se relacionó con los forzadores océano-meteorológicos concomitantes, y con los valores de la eslora (L) y la manga (B) del buque correspondiente, obteniendo así más de 1200 h de datos para el cálculo de los modelos de balance, cabeceo,

guiñada y deriva, y más de 500 h para los de alzada y vaivén. Esta diferencia en el número de datos estuvo motivada por la limitación en la monitorización nocturna de estos movimientos con la técnica de seguimiento por imagen.

La Tabla 26 muestra la horquilla de valores entre los que se encontraron cada una de las variables utilizadas en el estudio, y que a su vez define el rango de aplicación de las funciones calculadas.

Tabla 26. Rango de valores de las variables utilizadas en la obtención de las funciones de transferencia.

Range	L (m)	B (m)	Hs (m)	DirW (°)	Tp (s)	Vw (km/h)	DirVw (°)
Min.	88.0	12.5	1.04	1.0	5.5	0.1	4.0
Max.	229.5	36.9	8.95	359	18.2	80.0	351.0

Para estudiar la homogeneidad en el reparto de cada variable, se adimensionalizó cada dato dividiéndolo entre el valor más alto de la misma. De esta manera, el espectro de valores estaría contenido en el rango [0;1]. A continuación, se calculó la frecuencia acumulada de presentación de cada variable dentro de su rango adimensional. Los resultados se muestran en la Figura 53. Tal y como se ha definido el análisis, en una situación ideal, la distribución homogénea de datos se correspondería con la bisectriz del gráfico.

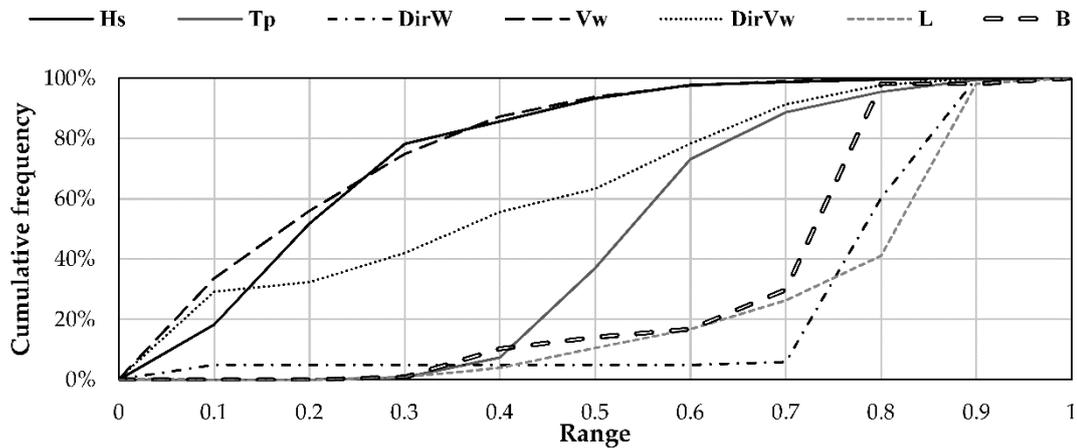


Figura 53. Distribución de frecuencia acumulada de cada una de las variables registradas.

Los resultados muestran que las variables altura de la ola significativa (*Hs*) y velocidad del viento (*Vw*) se concentraron entre el 0.1 y 0.4 de su rango. La dirección del viento (*DirVw*) presentó una distribución homogénea en su rango. Y las variables periodo pico del oleaje (*Tp*), dirección del oleaje (*DirW*), eslora (*L*), y manga (*B*), se concentraron entre el 0.6 y 1.

Con el objetivo de clarificar esta información, se muestra en la Tabla 27 el porcentaje de datos incluidos en cada uno de los intervalos definidos en el análisis.

Tabla 27. Distribución de los datos registrados de cada variable durante la campaña de campo.

Hs (m)		Tp (s)		DirW (°)		Vw (km/h)		DirVw (°)		L (m)		B (m)	
Range	%	Range	%	Range	%	Range	%	Range	%	Range	%	Range	%
<1.0	0%	<4	0%	N [337.5–22.5]	16%	0–10	14%	N [337.5–22.5]	2%	<100	1%	<10	0%
1–2	27%	4–6	0%	NE [22.5–67.5]	0%	10–20	35%	NE [22.5–67.5]	27%	100–150	13%	10–15	1%
2–3	37%	6–8	2%	E [67.5–112.5]	0%	20–30	24%	E [67.5–112.5]	4%	150–200	27%	15–20	9%
3–4	19%	8–10	19%	SE [112.5–157.5]	0%	30–40	16%	SE [112.5–157.5]	19%	200–250	59%	20–25	6%
4–5	8%	10–12	38%	S [157.5–202.5]	0%	40–50	7%	S [157.5–202.5]	8%	>250	0%	25–30	13%
5–6	7%	12–14	21%	SW [202.5–247.5]	0%	50–60	3%	SW [202.5–247.5]	19%			>30	70%
6–7	1%	14–16	15%	W [247.5–292.5]	2%	60–70	1%	W [247.5–292.5]	14%				
7–8	1%	16–18	4%	NW [292.5–337.5]	81%	>70	0%	NW [292.5–337.5]	6%				
8–9	1%	>18	1%										
>9.0	0%												

Como puede verse, el 83% de los datos de altura de ola significativa se concentraron en el rango $1.0 \leq Hs \text{ (m)} \leq 4$. El 93% de los datos de periodo pico del oleaje entre $8 \leq Tp \text{ (s)} \leq 16$, estando un 38% de los mismos concentrados en un intervalo de 2 s (10 s-12 s). En cuanto a la dirección de procedencia del oleaje, la mayoría de los datos correspondieron al sector noroeste (81%). Por último, en lo que respecta a las dimensiones del buque, el 59% de los datos de eslora y el 70% de los datos de manga correspondieron a los buques más grandes. A la vista de los resultados, puede verse como algunas de las posibles combinaciones entre variables están definidas por un número reducido de datos, lo que condiciona el funcionamiento de los modelos obtenidos.

5.5. Metodología de cálculo

A partir de la información recogida en la base de datos, se propuso un conjunto de variables predictoras candidatas a formar parte las funciones de transferencia. Éstas fueron escogidas teniendo en cuenta su posible influencia sobre los movimientos del buque. Por un lado, las variables océano-meteorológicas directas (Hs , Tp , $DirW$, Vw y $DirVw$), más dos parámetros del oleaje derivados de las anteriores, como son el peralte (s) y la longitud de onda del oleaje (Lop) en profundidades indefinidas. Por otro lado, las dos dimensiones características del

buque, eslora (L) y manga (B). Por último, un conjunto de variables adimensionales obtenidas a partir de las dimensiones del buque y los parámetros del oleaje H_s y Lop . En la Tabla 27 se muestran las 14 variables consideradas “a priori” para su participación en la obtención de los modelos de cada movimiento.

Tabla 28. Posibles variables predictoras candidatas a participar en la obtención de los modelos de cada movimiento.

Variables (X_m)	Name	Typology
Wave height (H_s)	X_1	Meteorological and ocean variables
Wave period (T_p)	X_2	
Wave length (Lop)	X_3	
Wave steepness (s)	X_4	
Wave direction ($DirW$)	X_5	
Wind velocity (V_w)	X_6	
Wind direction ($DirV_w$)	X_7	
Length (L)	X_8	Vessel dimensions
Beam (B)	X_9	
L/B	X_{10}	Dimensionless variables
L/H_s	X_{11}	
L/Lop	X_{12}	
B/H_s	X_{13}	
B/Lop	X_{14}	

Una vez definidos los posibles predictores, las funciones de transferencia de cada movimiento se calcularon mediante la aplicación de estudios de correlación y técnicas de regresión lineal múltiple (Zeltermann, 2015). Esta metodología ha sido aplicada con éxito en el ámbito de la ingeniería naval y marítima, para la estimación tanto de esfuerzos en los cabrestantes de buques (Carral-Couce et al., 2016; Carral Couce et al., 2017), como para modelar tiempos de tránsito (Carral et al., 2017) y los flujos de tráfico de embarcaciones (Wang & Xiong, 2010), o incluso para desarrollar herramientas de predicción de oleaje (Jain & Deo, 2008). Esta estrategia ha sido la utilizada en el marco de esta Tesis Doctoral. Sin embargo, en la actualidad, el grupo de investigación al que pertenezco está explorando otro tipo de metodologías basadas en técnicas de inteligencia artificial. Esta información se detalla como futuro desarrollo dentro del Capítulo 6.

Para el caso de estudio, la estructura de los modelos propuestos puede expresarse de la siguiente manera:

$$y_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m x_m, \text{ con } i = 1, 2, \dots, 6 \text{ y } m = 1, 2, \dots, 14 \quad (50)$$

Donde y_i representa la amplitud pronóstico del movimiento i descrito por el modelo (1-balance; 2-cabeceo; 3-guiñada; 4-alteada; 5-vaivén; 6-deriva), x_m representa el valor de cada una de las m posibles variables predictoras, $\hat{\beta}_0$ el término independiente y $\hat{\beta}_m$ representa los parámetros ajustados aplicables a cada una de las variables predictoras de un determinado modelo.

5.6. Resultados de la modelización

5.6.1. Análisis de correlación y selección de variables predictoras

Para que un modelo de regresión lineal múltiple funcione adecuadamente, las variables predictoras que lo integran deben de ser independientes entre sí (Kutner et al., 2005). De hecho, la existencia de multicolinealidad entre estas variables hace que la estimación de los parámetros de ajuste del modelo ($\hat{\beta}_m$) dependa en gran medida de los datos de la muestra a partir de la cual se calculan. Este hecho impide estudiar el efecto de cada predictor en la respuesta, y limita la capacidad del modelo para generar predicciones precisas. Es por ello que se debe realizar un análisis de dependencia antes de incluir las variables predictoras en el modelo final, siendo uno de los indicadores más utilizados para estudiar las relaciones de dependencia el conocido coeficiente de correlación de *Pearson* (r).

Teniendo en cuenta lo expuesto, se realizó un análisis de la estructura de dependencia de las 14 posibles variables predictoras propuestas anteriormente, con el objetivo de evitar seleccionar aquellas cuyas relaciones entre sí pudieran generar modelos inexactos. En la Tabla 29 se muestran los resultados de este estudio, resaltando en gris aquellos pares de variables que mostraron cierto nivel de correlación ($r \geq 0.6$ o $r \leq -0.6$).

Tabla 29. Coeficientes de correlación de *Pearson* (r) obtenidos en el análisis de dependencia por pares de las posibles variables predictoras (en gris los valores de $r \geq 0.6$ y $r \leq -0.6$).

	Hs	Tp	Lop	s	DirW	Vw	DirVw	L	B	L/B	L/Hs	L/Lop	B/Hs	B/Lop
Hs	1.0	0.3	0.3	0.7	0.1	0.3	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.8	-0.3	-0.8	-0.3
Tp	0.3	1.0	1.0	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.7	-0.2	-0.8
Lop	0.3	1.0	1.0	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.7	-0.2	-0.7
s	0.7	-0.4	-0.4	1.0	0.1	0.3	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.6	0.4	-0.6	0.4
DirW	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Vw	0.3	-0.1	-0.1	0.3	-0.1	1.0	0.1	-0.1	0.0	-0.2	-0.3	0.0	-0.3	0.0
DirVw	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0
L	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	1.0	0.9	0.2	0.5	0.4	0.4	0.4
B	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.0	-0.1	0.9	1.0	0.0	0.5	0.4	0.5	0.4
L/B	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.1	0.2	0.0	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0
L/Hs	-0.8	-0.2	-0.2	-0.6	0.0	-0.3	-0.1	0.5	0.5	0.1	1.0	0.4	1.0	0.4
L/Lop	-0.3	-0.7	-0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.1	0.4	1.0	0.4	1.0
B/Hs	-0.8	-0.2	-0.2	-0.6	0.0	-0.3	-0.1	0.4	0.5	0.0	1.0	0.4	1.0	0.4
B/Lop	-0.3	-0.8	-0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.4	1.0	0.4	1.0

Como puede verse en la tabla anterior, tanto el periodo pico del oleaje (Tp) como la longitud de onda (Lop) presentaron una relación lineal directa ($r = 1$) debido a su propia definición (correspondencia biunívoca). Todas las variables adimensionales, a excepción de L/B , mostraron una estructura de dependencia similar, algo evidente teniendo en cuenta que éstas se obtienen de relaciones directas entre los parámetros de tamaño de buque y las variables océano-meteorológicas. A su vez, las variables eslora (L) y manga (B), estaban fuertemente correlacionadas ($r = 0.9$) reflejando la relación existente entre las principales dimensiones de un buque. Sin embargo, la variable adimensional L/B se mostró independiente, lo que permitió introducirla para considerar el efecto del tamaño del buque en cada modelo.

En base a los resultados obtenidos, se seleccionaron aquellas variables que resultaron independientes entre sí. De esta manera, los modelos fueron calculados utilizando 5 variables océano-meteorológicas y una variable adimensional (Tabla 30).

Tabla 30. Variables predictoras seleccionadas para participar en la obtención de los modelos.

Selected Predictors
Wave height (H_s)
Wave period (T_p)
Wave direction ($DirW$)
Wind speed (V_w)
Wind direction ($DirV_w$)
Length/Beam (L/B)

Las variables de clima marítimo H_s y T_p se seleccionaron frente al peralte (s) y la longitud de onda (Lop) del oleaje en profundidades indefinidas, puesto que representan los principales parámetros utilizados en la caracterización de un determinado estado de mar (junto con la dirección de procedencia del oleaje $DirW$). Además, los valores de estas variables son proporcionados de forma directa tanto por la boya de oleaje como por el sistema de previsión meteorológica, lo que facilita la adquisición de datos y la futura implementación de los modelos en un sistema de alerta o de ayuda a la toma de decisiones en la operatividad portuaria. En cuanto a las dimensiones de los buques, ni la eslora (L) ni la manga (B) fueron seleccionados para participar como variable independiente, ya que su información ya estaba incluida en la variable adimensional L/B .

5.6.2. Obtención de los modelos de cada movimiento

Una vez seleccionadas las variables predictoras que inicialmente participarían en la obtención de los modelos, el siguiente paso consistió en determinar cuál de ellas tenía una relevancia importante en la predicción proporcionada. Para ello, se calcularon los seis modelos de regresión lineal múltiple con todas las variables seleccionadas, estimando cada uno de los parámetros $\hat{\beta}_m$ a partir de la información incluida en la base de datos mediante el método de mínimos cuadrados. A continuación, se realizó un análisis de significación estadística de cada variable, seleccionando las que tenían un nivel de significación $\alpha \leq 0.01$ (Tabla 31).

Tabla 31. Variables con un efecto estadísticamente significativo ($\alpha \leq 0.01$) en cada uno de los modelos de movimiento.

	Roll (y_1)	Pitch (y_2)	Yaw (y_3)	Heave (y_4)	Surge (y_5)	Sway (y_6)
Hs	x	x	x	x	x	x
Tp	x	x				x
DirW	x		x	x	x	
Vw	x			x		x
DirVw					x	x
L/B	x	x	x	x	x	x

Como puede verse, la altura de ola significante (H_s) y la variable adimensional L/B presentaron un efecto estadísticamente significativo en todos los modelos. Por el contrario, la dirección de procedencia del viento ($DirVw$) fue la que menor relevancia mostró, presentando un efecto significativo sólo en los modelos del vaivén (y_5) y la deriva (y_6).

Una vez analizada la relevancia de las variables predictoras en el estudio de significación (Tabla 31), los modelos fueron re-calculados utilizando sólo aquellas variables más influyentes en cada uno de los movimientos del buque. Se muestra a continuación la estructura final y las variables seleccionadas para cada función de transferencia:

$$y_1 (Roll) = \beta_{0_{Roll}} + \beta_{1_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{1_{T_p}} \cdot T_p + \beta_{1_{DirW}} \cdot DirW + \beta_{1_{V_W}} \cdot V_W + \beta_{1_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (51)$$

$$y_2 (Pitch) = \beta_{0_{Pitch}} + \beta_{2_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{2_{T_p}} \cdot T_p + \beta_{2_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (52)$$

$$y_3 (Yaw) = \beta_{0_{Yaw}} + \beta_{3_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{3_{DirW}} \cdot DirW + \beta_{3_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (53)$$

$$y_4 (Heave) = \beta_{0_{Heave}} + \beta_{4_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{4_{DirW}} \cdot DirW + \beta_{4_{V_W}} \cdot V_W + \beta_{4_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (54)$$

$$y_5 (Surge) = \beta_{0_{Surge}} + \beta_{5_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{5_{DirW}} \cdot DirW + \beta_{5_{DirV_W}} \cdot DirV_W + \beta_{5_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (55)$$

$$y_6 (Sway) = \beta_{0_{Sway}} + \beta_{6_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{6_{T_p}} \cdot T_p + \beta_{6_{V_W}} \cdot V_W + \beta_{6_{DirV_W}} \cdot DirV_W + \beta_{6_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (56)$$

Cada uno de estos modelos se ajustó utilizando el 80% de la información contenida en la base de datos, utilizando el restante 20% para validar el funcionamiento de las funciones de transferencia con datos externos que no participaron en su obtención. Estos porcentajes son los habitualmente utilizados en este tipo de ajustes, teniendo en cuenta el volumen de

datos disponibles (Principio de *Pareto*). La Figura 54 muestra los resultados obtenidos con cada uno de los modelos.

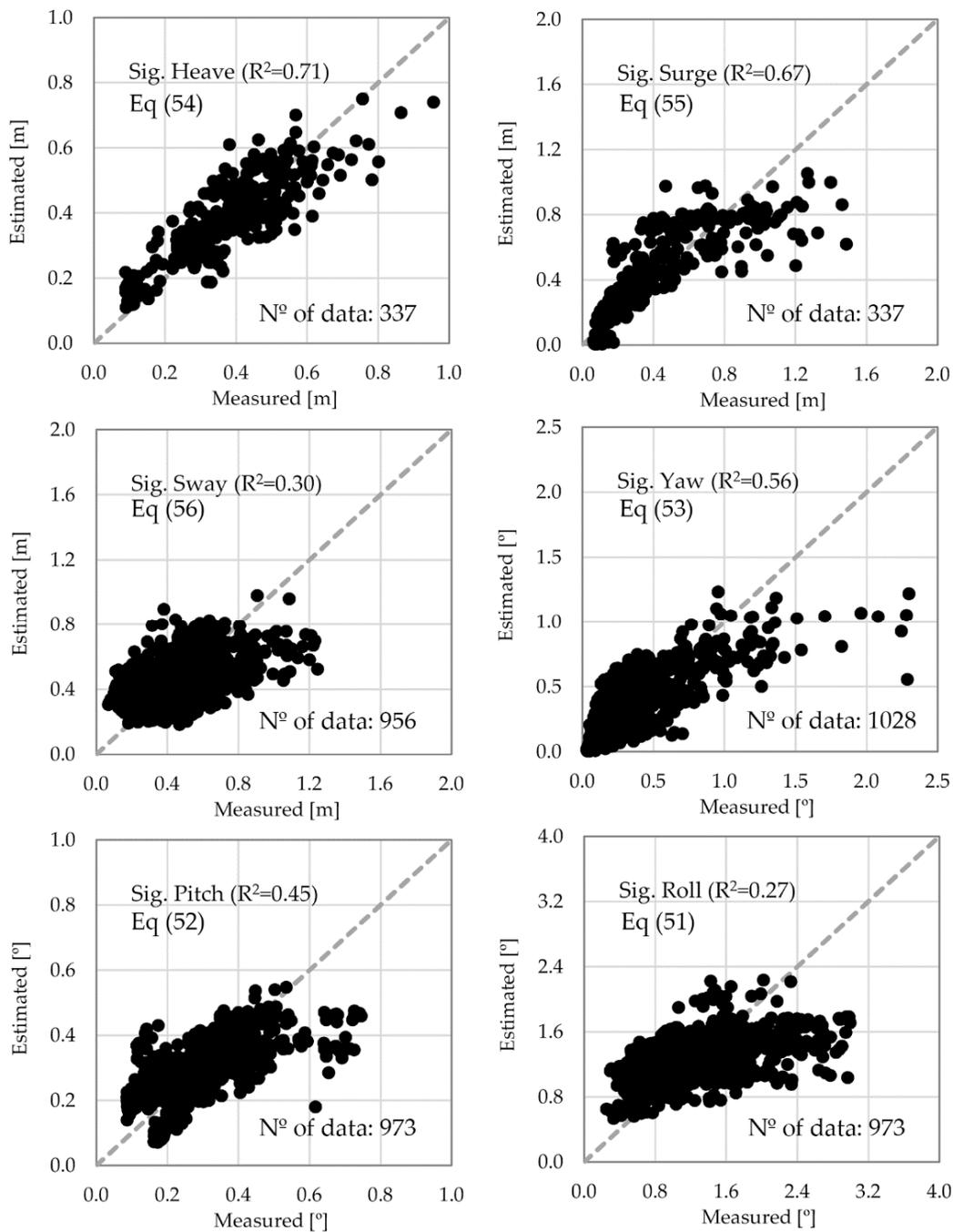


Figura 54. Gráficos de dispersión de las amplitudes significativas medidas frente a las estimadas por los modelos de cada movimiento.

Para analizar de forma cuantitativa su funcionamiento, se obtuvo el valor del coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio ($RMSE$) de cada modelo (Tabla 32).

Tabla 32. Valores del coeficiente de determinación (R^2) y del error cuadrático medio (RMSE) de las funciones de transferencia.

Movement	R^2	RMSE
Heave	0.71	0.08 m
Surge	0.67	0.18 m
Sway	0.30	0.18 m
Yaw	0.56	0.21°
Pitch	0.45	0.09°
Roll	0.27	0.46°

Como puede verse, los modelos de la alzada y el vaivén fueron los que mejor replicaron el comportamiento de estos movimientos, alcanzando valores del coeficiente de determinación (R^2) de 0.71 y 0.67, respectivamente. Los movimientos de guiñada y cabeceo mostraron valores de R^2 inferiores a los anteriores (0.56 y 0.45, respectivamente), siendo los modelos de deriva y balance los que menor bondad en el ajuste presentaron. En términos de errores de estimación, a pesar del bajo coeficiente de determinación obtenidos en algunos casos, todos los modelos mostraron valores aceptables de $RMSE$, considerando la magnitud habitual de las amplitudes de cada movimiento. Estos resultados mostraron que, aunque los modelos no contemplan todas las posibles variables que afectan al comportamiento de los buques atracados, es posible estimar con una precisión media de al menos 0.46° las rotaciones y 0.18 m los desplazamientos.

Sin embargo, observando la Figura 54 puede verse como, en todos los modelos excepto el correspondiente al movimiento de alzada, se han producido errores de estimación mucho mayores que los valores mostrados anteriormente. En general, estas grandes desviaciones entre la amplitud estimada y su valor real se han producido en la horquilla de grandes amplitudes, donde había un menor número de datos para obtener los modelos. Esto puede mejorarse cubriendo las carencias existentes en la base de datos mediante la recogida de nueva información. En la actualidad se está trabajando en esta línea, con la inclusión de los registros obtenidos en las campañas de monitorización de 2018/2019 y de 2019/2020. Además, se espera ampliar el abanico de situaciones cubiertas con la extensión de las campañas hasta el año 2024, dentro del marco del convenio firmado entre la Autoridad Portuaria de A Coruña y el grupo de investigación del que formo parte.

5.6.3. Validación de los modelos

Una vez calculadas las funciones de transferencia, se realizó una validación de su funcionamiento con el 20% de los datos que no fueron utilizados en su diseño (Figura 55).

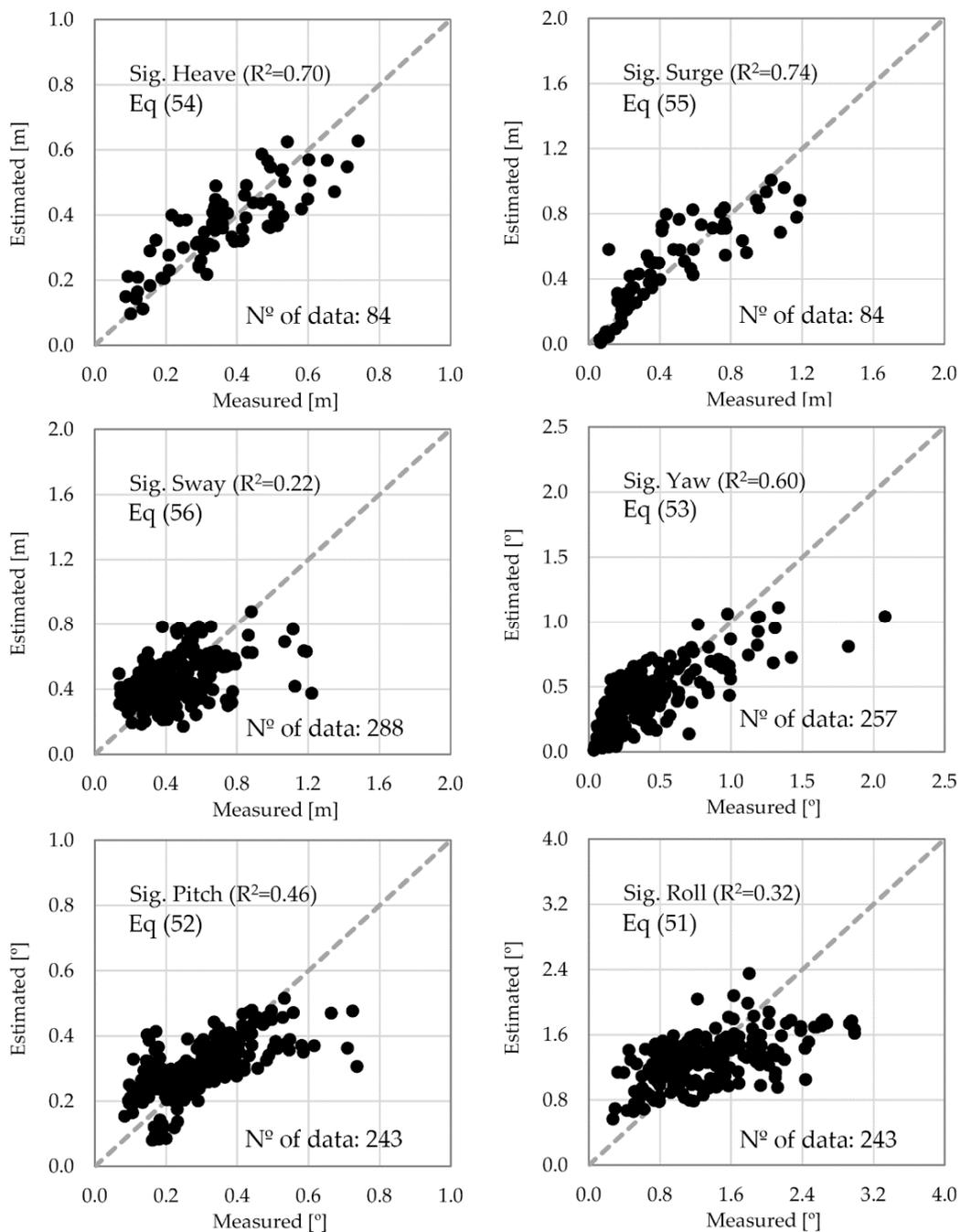


Figura 55. Gráficos de dispersión de las amplitudes significativas medidas frente a las estimadas por los modelos de cada movimiento con datos de validación.

Con el objetivo de comparar los resultados con los obtenidos en la sección anterior, de nuevo se obtuvo el valor del coeficiente de determinación (R^2) y el error cuadrático medio ($RMSE$) de cada modelo (Tabla 33).

Tabla 33. Valores del coeficiente de determinación (R^2) y del error cuadrático medio ($RMSE$) de las funciones de transferencia obtenidos en la validación.

Movement	R^2	$RMSE$
Heave	0.70	0.08 m
Surge	0.74	0.16 m
Sway	0.22	0.18 m
Yaw	0.60	0.20°
Pitch	0.46	0.09°
Roll	0.32	0.44°

Si se comparan las figuras 54 y 55 puede verse como el patrón de comportamiento de las funciones de transferencia en la validación fue análogo al mostrado por éstas en la sección anterior. En términos de ajuste y errores de predicción (tablas 32 y 33), se repite la tendencia registrando valores de R^2 y $RMSE$ muy similares. De nuevo, los modelos de la alzada y el vaivén fueron los que mejor reprodujeron el comportamiento real, mientras que los del balance y la deriva fueron los que peor bondad de ajuste mostraron. Estos resultados demuestran que los modelos obtenidos mantuvieron su capacidad predictiva con datos externos no utilizados en su obtención, validando así su funcionamiento. Es importante recordar en este punto que estas herramientas funcionarían dentro de un sistema de alerta o de ayuda a la toma de decisiones en la operatividad portuaria con datos de previsión meteorológica, por lo que su precisión también estará condicionada por la de los datos que las alimentan.

Se destaca que, a pesar de ser una aproximación inicial sencilla, susceptible de ser mejorada, las ecuaciones calculadas han mostrado una predicción razonable de los movimientos. Incluso los modelos con valores de R^2 más bajos (movimientos de deriva y balance) fueron capaces de estimar la tendencia principal de los movimientos esperados.

Este es el primer paso para generar sistemas que ayuden a la gestión del puerto y contribuyan a optimizar el uso de los recursos e instalaciones del mismo. La comparación de la información proporcionada por estas herramientas, con los umbrales de movimiento

específicos propuestos en base a campañas de campo como las realizadas en esta Tesis Doctoral, permitirá detectar posibles paradas operativas y situaciones de riesgo en la zona de atraque, ayudando a identificar las ventanas operativas para los buques y facilitando la toma de decisiones en la planificación de la ocupación de atraques.

Finalmente, y como resultado también derivado de la aplicación de esta metodología, se propuso el criterio de permanencia en el atraque para buques de eslora inferior a 140 m, adaptado a las instalaciones del Puerto Exterior de A Coruña. La condición límite de clima marítimo (combinación de altura de ola en el interior del puerto y periodo pico del oleaje) que define dicho criterio fue establecida en base a los datos de comportamiento de buque atracado, variables océano-meteorológicas e incidencias registradas durante las campañas de monitorización.

Esta aportación pone en valor este tipo de estudios, demostrando su potencial para la obtención de resultados aplicables a la gestión diaria de la operatividad de un puerto. De hecho, este criterio está actualmente en servicio dentro del Cuadro de Mando Ambiental de la Autoridad Portuaria de A Coruña (CMA - Puerto Coruña).

Capítulo 6

Conclusiones y Futuros Desarrollos

En el marco de esta Tesis Doctoral se presenta el desarrollo y la validación de dos técnicas para la monitorización en campo de los movimientos del buque atracado, y su aplicación en campañas intensivas en los Puertos Interior y Exterior de A Coruña, para evaluar las condiciones operativas en estas instalaciones y la propuesta de herramientas de predicción del comportamiento de buque atracado y mejora de los sistemas de ayuda a la toma de decisiones de la operatividad portuaria.

A continuación, se exponen las principales conclusiones obtenidas en esta Tesis.

Herramientas de monitorización del comportamiento de buque atracado

- Las herramientas desarrolladas, basadas en la adaptación de dos tecnologías muy extendidas en el ámbito de la ingeniería, como son las unidades de medida inercial (IMU) y la visión artificial orientada al seguimiento de objetos, han demostrado su potencial aplicación para la monitorización en campo de los movimientos de un buque atracado. Ambas técnicas fueron validadas tanto en ensayos de laboratorio, bajo condiciones controladas, como en un escenario real, verificando su aplicación en cualquier instalación portuaria.
- La unidad de medida inercial (IMU), integrada por tres tipos de sensores (giróscopos, acelerómetros y magnetómetros), permite caracterizar los tres movimientos angulares de un buque atracado sin necesidad de disponer de una referencia externa, con una precisión en la medida de ángulos de 0.1° .
- A pesar de ser un equipo intrusivo, que requiere ser colocado en el interior del puente de mando del buque, su bajo coste computacional y de fabricación, unido a la rapidez y facilidad de instalación, hacen viable su utilización como herramienta de monitorización intensiva.
- La técnica de seguimiento por imagen ha sido utilizada para analizar desplazamientos y rotaciones de los buques atracados. Aunque en los trabajos desarrollados solo se han caracterizado los movimientos de vaivén, alteada y

cabeceo (movimientos en el plano vertical-longitudinal del buque), ésta podría emplearse para analizar el resto de movimientos mediante la instalación de cámaras con visión del plano vertical-transversal del buque.

- La aplicación de esta técnica tal y como se ha descrito en esta Tesis Doctoral, reduce considerablemente el proceso de calibración de las cámaras y permite alcanzar una precisión en la medida superior a la de la unidad IMU, facilitando así el proceso de monitorización.
- La robustez del algoritmo de seguimiento, capaz de adaptarse a los cambios de luz que experimenta la escena durante el día, y de recuperar el punto de referencia ante posibles interferencias, da solución a los principales problemas de la aplicación de técnicas de visión artificial en un entorno exterior como el portuario. Esto permite emplear la técnica propuesta para la monitorización en intervalos de tiempo prolongados.
- Los requisitos de resolución para la aplicación de la técnica de seguimiento por imagen con la precisión requerida, permiten la utilización de cámaras comerciales, lo que reduce considerablemente los costes de implantación del sistema, permitiendo incluso su instalación permanente.
- El conjunto hardware – software (cámaras - IMU - algoritmos) ha demostrado su versatilidad en entornos portuarios con distintos condicionantes, permitiendo la monitorización tanto en terminales especializadas con atraques definidos, como en instalaciones portuarias con una línea de atraque continua.

Evaluación de las condiciones operativas de los buques en puerto mediante la monitorización en campo

- La monitorización *in-situ* de los movimientos del buque atracado con herramientas precisas y de bajo coste, representa una alternativa viable frente a la utilización del modelado físico y numérico, para la evaluación de las condiciones reales de operación en una determinada instalación.
- Las campañas de campo como las realizadas en esta tesis, pueden utilizarse como instrumento eficaz para identificar los agentes forzadores que producen los problemas operacionales en las diferentes zonas de atraque de un puerto y, a su vez,

servir como método de evaluación de las actuaciones orientadas a la mejora de la operatividad.

- Los resultados obtenidos han servido para constatar que los umbrales de movimiento propuestos por las normativas son susceptibles de ser actualizados o adaptados a las características específicas de una instalación portuaria. En concreto, en el Puerto Interior de A Coruña se ha identificado que los buques gaseros y quimiqueros pequeños han operado con normalidad a pesar de experimentar amplitudes significantes de balance y guiñada superiores a los límites propuestos, tanto a nivel nacional (ROM 2.0-11) como internacional (PIANC, 1995). Esta información, junto con el resto de datos recogidos en el marco de esta Tesis Doctoral, ya han sido trasladados al Grupo de Trabajo WG212 del PIANC que en la actualidad está revisando las recomendaciones publicadas hasta la fecha.
- Con la monitorización de campo es posible identificar situaciones límite, de forma que los datos recabados ayuden a establecer criterios particulares para un determinado puerto.

Herramientas de predicción del comportamiento de buque atracado

- Los modelos predictivos de regresión lineal múltiple, desarrollados en base a datos de movimientos de buque atracado y de los forzadores océano-meteorológicos, aun siendo aproximaciones iniciales simplificadas, han mostrado una capacidad razonable de predicción de los movimientos. Incluso los modelos con valores de ajuste más bajos fueron capaces de estimar la tendencia principal de los movimientos esperados.
- La combinación de estos modelos, junto con la correcta definición de umbrales de movimiento específicos, constituye un primer paso para generar sistemas que ayuden a la gestión del puerto y contribuyan a optimizar el uso de los recursos e instalaciones. Su funcionamiento con datos de previsión océano-meteorológica permite conocer con una determinada antelación (horizonte temporal de la previsión) las posibles ventanas operativas, facilitando así la planificación de escalas y operaciones.

- La aplicación concreta al Puerto Exterior de A Coruña ha mostrado que los modelos con mejores resultados son los de la alteada y el vaivén. Los coeficientes de ajuste y errores de predicción obtenidos se consideran aceptables en el marco de la investigación desarrollada, en la que no se incluyeron factores influyentes en el comportamiento de buque atracado como son el sistema de amarre y las defensas, o la posible influencia de la onda larga, entre otros. Estos aspectos no fueron incluidos en parte dado que el sistema de previsión del Puerto no proporciona esa información de forma que pueda ser implementada en la herramienta.
- El desarrollo de la metodología incrementa el conocimiento sobre las condiciones operativas de los buques en la instalación de estudio. Esta información puede derivar en la obtención de resultados complementarios con una aplicación práctica, como el criterio de permanencia en el atraque aplicable al Puerto Exterior de A Coruña, definido en el marco de esta Tesis Doctoral.
- La metodología propuesta para el desarrollo de los modelos podría ser exportable a cualquier instalación, incluso ser adaptada a sus características e información disponible.

Futuros Desarrollos

El trabajo presentado en esta tesis abre la puerta a varias líneas de investigación que pueden ser abordadas en el futuro. Entre ellas, se pueden destacar las siguientes:

- Desarrollo de un equipo de monitorización de los movimientos del buque atracado compacto y económico, basado en técnicas no intrusivas, que permita su instalación permanente en el muelle para la recogida sistemática de información, garantizando así la generación de bases de datos amplias que abarquen el abanico completo de situaciones. Actualmente se está trabajando en la creación del primer prototipo que integra la tecnología láser y el seguimiento por imagen para el análisis de los seis movimientos del buque atracado sin necesidad de acceder físicamente al barco.
- Optimización de los algoritmos de procesado de la técnica de seguimiento por imagen para la obtención en tiempo real de los movimientos de un buque. Integración en el nuevo prototipo del equipo de monitorización para su implementación como sistema de ayuda a la estancia en el atraque.

- Aplicación de técnicas no lineales para generar modelos predictivos capaces de mejorar la interpretación de las complejas relaciones entre los movimientos experimentados por los buques atracados y los forzadores océano-meteorológicos. En la actualidad se está trabajando en dos vías que utilizan aplicaciones de inteligencia artificial (*Machine Learning*), como son las técnicas estadísticas no paramétricas basadas en la construcción de árboles de decisión y las redes neuronales profundas. Todas estas técnicas dependen de la cantidad y calidad de los datos de partida, por lo que el trabajo de monitorización realizado en esta Tesis Doctoral se está continuando con nuevas campañas de campo aseguradas hasta el año 2021, con una previsible extensión hasta el año 2024. El objetivo final será la obtención de un sistema de ayuda a la toma de decisiones en la gestión de la operatividad adaptado a las características del Puerto Exterior de A Coruña.
- Búsqueda de nuevos indicadores de seguridad y eficiencia en las operaciones, basados en el estudio de la evolución temporal del espectro de frecuencia del movimiento del buque y el oleaje. Análisis de la influencia de la onda larga sobre el comportamiento de buque atracado, en especial su efecto amplificador de los movimientos de baja frecuencia en plano horizontal (guiñada, deriva y vaivén).
- Análisis en modelo a escala del efecto de la modificación del esquema de amarre, la pretensión de las líneas y la rigidez de las defensas sobre los movimientos del buque atracado. Propuesta de actuaciones blandas extrapolables a instalaciones reales como solución a problemas de operatividad.

Anexo I

**Artículos publicados en el JCR para la tramitación de la Tesis
Doctoral por compendio de publicaciones**

Artículo I

Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application

Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application

Andrés Figuero¹, Alvaro Rodriguez², Jose Sande³, Enrique Peña⁴, Juan R. Rabuñal⁵

¹Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), University of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. e-mail: andres.figuero@udc.es

²Department of Physics, Umeå University, Linneaus Väg, SE-901 87 Umeå, Sweden. e-mail: alvaro.rodriguez@umu.se

³Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), University of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. e-mail: jose.sande@udc.es

⁴Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), University of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. e-mail: epena@udc.es

⁵Department of Information and Communications Technologies, University of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain. e-mail: juanra@udc.es

Abstract: The study of the oscillations of a moored vessel has a major importance in port operational efficiency, not only in the design of mooring and anchoring systems, but also in preventing the movement of the cargo, minimizing damages in the ship and dock and optimizing the operations which take place while the ship is moored. Also, this information provides useful data to develop new port regulations and recommendations.

The dynamic behavior of a moored vessel has been mathematically described and interactions between ships and environmental loads such as waves, wind, currents and ice are commonly tested for different docks and mooring systems in scale models. However, field studies of the behavior moored ships and its influence over critical situations, accidental events, and mooring breakage have not been properly addressed so far.

This paper proposes a novel application of Inertial Measurement Units to estimate the angular movements (roll, pitch and yaw) of a moored vessel which can contribute to improve operational conditions and establish new safety criteria for port regulators. The proposed technique has been validated in laboratory conditions and the behavior of the ship *Urania Mella* in the Outer Port of Punta Langosteira (A Coruña, Spain), has been analyzed, obtaining very promising results.

Keywords: Port operational, Inertial Measurement Unit, Ship orientation, Mooring.

1. INTRODUCTION

Operational efficiency is a major concern for port authorities, with new challenges to face for the civil engineering community. The construction of larger vessels leads to the necessity to develop new harbors, normally in outer locations with more severe climate conditions. To this purpose the analysis of the dynamic mooring conditions of the vessels, characterizing the movements and mooring is essential to increase the capacity of these new ports.

One of the key aspects for institutions and companies is the necessity to determine the limiting operational conditions and define in an optimal way which terminal should be better to use for each operation, reducing the probability for downtimes. Several international organizations have developed acceptable motions criteria for moored vessels during the cargo operation (PIANC 1995, 2012; Puertos del Estado, 2011). The values of these recommendations depend on the type of vessel and cargo handling equipment, being generally applicable in port facilities all over the world.

Keeping the ship moored with acceptable values of motion is important for the operational efficiency, since many ports

suffer downtimes problems in some berths. An example can be found in the oil terminal of the port of Leixoes (Portugal) which has a berth zone with some problems, not assuring the operational conditions during about 20% of the time, with its associated economic losses (Jorge Rosa-Santos and Taveira-Pinto, 2013).

In addition to operational problems, excessive movements of vessels can cause the breaking of mooring lines, damage to the port fenders or to the ship, or even lead to serious accidents with significant costs, as happened with *Discoverer Enterprise* drillship in Ferrol (Spain). The vessel broke its moorings during a storm, coming adrift and hitting the *As Pias* Bridge which joins Ferrol to A Coruña. The impact destroyed four piers and their pertinent decks, which fell into the sea and caused major damage to the rest of the bridge structure (Quintero et al., 2000). The accident generated important socio-economic problems in the region. The city of Ferrol lost its main road transport network during three months and nearby urban areas such as Fene or Mugarbos lost their water supply. A more recent accident occurred in Durban Harbour located in South Africa during autumn 2017. Due to a heavy storm, the container ship *MSC Ines* broke its

moorings, drifted abeam and blocked the harbour entrance, forcing to suspend the port activity. Also, the vessel suffered serious damages on its rudder.

The scientific community has made many efforts to describe the vessels behavior at port, including civil, naval and industrial engineers. An early mathematical approach can be found in (Finkelstein, 1957), and these equations were later used to describe impulsive forces in a floating body (Wehausen, 1967). Other perspective was presented by (Cummins, 1962), introducing the analysis of six degrees of freedom, and the separation of the problem in instantaneous and memory effects in the vessel.

Mooring has been specifically analyzed in more recent studies (Kat and Pauling, 2001; Rosa-Santos et al., 2014), usually focused on the capacity to maintain the vessel as fixed as possible to the berth. Several companies have also invested resources in developing innovative mooring systems to minimize vessel motions and their associated problems. Some examples are MoorMasterTM automated vacuum pads mooring system (Automated Mooring | Cavotec SA) or the ShoreTension[®] constant tension system in mooring lines (Dynamic Mooring Systems - ShoreTension).

A particular hazardous situation is the breaking of mooring lines, which can result in damages to port structures and serious injuries to workers. These incidents are often related to extreme moored ship motions caused by waves, winds or passing vessels. In this field can also find different international publications which include recommendations for safe mooring of ships based on data recorded by mooring service providers or harbour pilots (BSRA, 1971; OCIMF, 1978).

The wave climate is another complex factor that affects the operational conditions. As the locations of the new ports are normally outside the main cities, these conditions tend to be more severe, especially waves, currents and winds. Other less studied mechanisms are harbour resonance and oscillations (Van Oortmerssen, 1976). Their effects, observed, among other locations, in Galician and Northern Spain coast, are usually formed by long period waves that are difficult to dissipate and influence dramatically the port operations (Rabinovich, 2009; Sammartino et al., 2014; Uzaki et al., 2010). These oscillations cause that small vertical motions may result in very large horizontal motion amplitudes when waves frequency is close to the natural frequency of the moored ship. This phenomenon increases the risk of damaging ships or harbour structures and affects harbour procedures. The excessive motions of moored ships as a consequence of long-period wave effect occur in many harbors, not only in exposed locations but also in sheltered areas. An example can be found in the Geraldton Harbour, located on the west coast of Australia. Some of its berthing zones have frequent issues like broken mooring lines and excessive motions resulting in a decrease of operability (van der Molen et al., 2015).

Due to the complexity of these factors, and in order to reduce difficulty and other practical considerations, the study of the behavior of a moored vessel is commonly tested using scale models (Malheiros et al., 2009, 2013).

A different approach to analyze the vessel behavior is combining numerical models for vessel motions, mooring line tensions and wave climate (van der Molen et al., 2003; Oortmerssen et al., 1986). However, this tool is more appropriate for the hydrodynamic characterization of the basins under study (Grifoll et al., 2009; López et al., 2012; Sammartino et al. 2014), and rarely includes the moored vessels behavior (Ven, 2012).

Recently, with the development of instrumentation techniques and computer programming, a new approach is appearing using field data. The use of inertial measurement units, cameras, and computer simulations provides to the civil engineering and scientific community new capacities, that could be used by port regulators to increase their facilities efficiency. An example of the application of new technologies can be found in Bremen Port (Germany) where a full-automatic measuring system for berthing velocities has been developed.

This paper focuses on the application of Inertial Measurement Unit (IMU) and computing techniques in the study of a moored vessel at port, offering a powerful tool to analyze and improve the port operations. IMU systems are the main part of inertial systems in navigation (Ayub et al., 2012), allowing to characterize the orientation and position of a moving object such as a vessel regarding to an initial point.

While IMUs are commonly studied by industrial engineers and informatics, this research focuses on their application to civil engineering in combination with computing techniques. The construction and application of low-cost IMU unit without external positioning sources are described next.

2. MEASURING ANGULAR MOVEMENTS

The approach presented in this study focuses on the analysis of the three angular motions of a vessel, which represents a key part of the ship behavior at the port. (Fig. 1). The pitch represents the rotation around the transverse axis of the ship, which is referred here as the Y axis. Pitching periods are typically short and they are not significantly altered by the mooring system. The roll refers to the transverse stability, in the front to back or longitudinal one. Roll axis is referred to as the X axis. Rolling shares the characteristics of pitching, but can lead to the ship capsizing, even in moored ships. Rolling can affect port operations and may lead to damages in the cargo, the dock or the vessel. Finally, the yaw represents the rotation within the horizontal plane or vertical axis, which is referred as Z axis in the frame of reference of the vessel. Yawing is characterized for long periods of oscillation, and very dependent on the mooring mechanism. Large yaw motions can produce the breakage of mooring lines.

To measure these motions, the built IMU unit integrates data from different sensors (Figuro et al., 2016). The angular velocity of the moving object is measured with three orthogonal gyroscopes. Three accelerometers measure the acceleration of the body, and three orthogonal magnetometers, are used to calibrate the intensity and direction of the magnetic field.

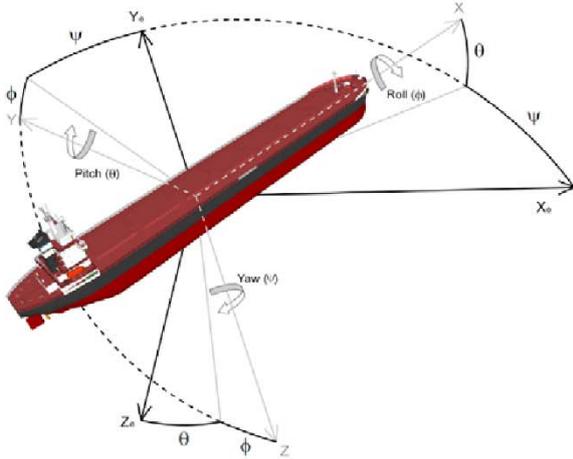


Fig. 1. Vessel gyros and orientation. Roll (ϕ), pitch (θ) and yaw (ψ).

The data provided by the sensors present two sources of error. First, the noise component or bias that is controlled subtracting the average signal registered in the long term analysis with no rotation (Groves, 2015; Woodman, 2007). The same procedure is applied to the three accelerometers to measure the acceleration of the body.

The second source of error is the tendency of the signal to drift out from the initial position. Drift is one of the biggest problems of gyroscopes in IMU units. This source of error is controlled using the information from accelerometers and magnetometers. Drift correction is discussed later in the results section.

From a numerical point of view, the orientation of a ship can be defined with rotation matrices that describe the orientation of one coordinate system (ship) with respect to another (Earth). A vector in one system can be transformed into the other system by multiplying it by the rotation matrix, which is orthogonal.

A moored vessel can suffer rotations in three axis X , Y , Z . That is, it may have three rotation angles ϕ , θ , ψ which rotations are called roll, pitch, and yaw respectively. Using the Earth frame reference, the vessel orientation is obtained, by applying consecutively the roll R_x , pitch R_y and yaw R_z transformations to the orientation of the vessel. These transformations can be described in Euler angles as follows:

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}, \quad R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad R_z = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R(t) = R_z R_y R_x = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \phi & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

Therefore, the equation to rotate a vector measured in the frame of reference of the vessel to the frame of reference of the Earth is expressed as follows:

$$\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

where u_x, u_y, u_z represent a vector in the frame reference of the Earth, and v_x, v_y, v_z represent a vector in the frame reference of the vessel. The R matrix is usually called Direction Cosine Matrix (DCM). The orthogonality of the R matrix, is expressed as follows:

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = R^{-1} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{yx} & r_{zx} \\ r_{xy} & r_{yy} & r_{zy} \\ r_{xz} & r_{yz} & r_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

The vector $Row_X(r_{xx}, r_{yx}, r_{zx})$, representing the x row of the R matrix, is the projection of the x axis of the coordinate system of the Earth on the coordinate system of the vessel. Thus, the vector $Col_X^T(r_{xx}, r_{xy}, r_{xz})$ represents the x column of the R matrix and is the projection of the x axis of the coordinate system of the vessel on the coordinate system of the Earth.

Taking into account the kinematics implications of rigid body rotation (Premerlani and Bizard, 2009), the time evolution of the orientation can be expressed in terms of the vector rotation rate, which can be measured by the gyroscopes. The measurements obtained by the IMU unit are performed in the vessel coordinate system, so the solution is to track the Earth axes as seen in the reference frame. The resulting equation is expressed as follows:

$$r_e(t) = r_e(0) + \int_0^t r_e(\tau) \times d\varpi(\tau) = r_e(0) + \int_0^t r_e(\tau) \times w(\tau) d\tau \quad (4)$$

where $r_e(t)$ represents the rotating vector in the Earth frame reference, viewed from the plane of the moving ship with a rotation angle ϖ ; and $r_e(0)$ is the starting value of the vector. The integral represents the change in the vector and $w(t)$ represents the rotation rate of the vector.

The vectors in the previous equation represent the rows of R matrix in Eq. (1). Taking this into account, previous equation can be expressed using a matrix approach:

$$r_e(t+dt) = r_e(t) + r_e(t) \times w(t) dt \quad (3)$$

Considering the previous equation for each of the Earth axes, the result is expressed as follows:

$$R(t+dt) = R(t) \begin{bmatrix} 1 & -w_z(t) dt & w_y(t) dt \\ w_z(t) dt & 1 & -w_x(t) dt \\ -w_y(t) dt & w_x(t) dt & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Using Eq. (6), the DCM matrix can be updated from gyro signals. However, since it is expected that numerical errors in the integration gradually violate the orthogonality of R expressed in Eq. (3), an adjustment step to enforce the orthogonality constraints is necessary. This step is described in detail in (Ayub et al., 2012).

In this point, rotation angles can be obtained from the R matrix, using the following equations:

$$\begin{aligned} \text{Yaw} \rightarrow \psi &= \arctan(r_{yx}, r_{xx}) \\ \text{Pitch} \rightarrow \theta &= \arctan\left(\frac{r_{zx}}{\sqrt{r_{zy}^2 + r_{zz}^2}}\right) = -\arcsin(r_{zx}) \\ \text{Roll} \rightarrow \phi &= \arctan(r_{zy}, r_{zz}) \end{aligned} \quad (5)$$

However, as stated before, gyroscopes are not reliable enough to measure positions in long periods of time due to its drift. Taking that into account, gyroscopes measurement need to be corrected in the long term. This is expressed as follows:

$$w(t) = w_{gyro}(t) + w_{correction}(t) \quad (6)$$

Corrections in IMU systems are usually done with different sensors (Gebre-Egziabher et al., 2004). Normally, the main orientation source are the gyros, complemented with other data to minimize errors (Ayub et al., 2012; Premerlani and Bizard, 2009). In other works, such as (Setoodeh et al., 2004; Yun and Bachmann, 2006) general data fusion algorithms based on Kalman filtering are discussed for this application. In this work, yaw and roll-pitch correction vectors are calculated using the magnetometers and accelerometers, respectively.

To increase the measurement predictions, in particular, the heading of the ship, both magnetometers and accelerometers correct the rotation and orientation of the Z axis, respectively. To compute the correction vector for each operation, the cross product of a measured reference vector with a corresponding vector computed from the R matrix is used.

In the first step, yaw (rotations in the Z axis, with angle ψ) correction vector is obtained. Yaw can be considered as the deviation in course parallel to Earth surface. Magnetometers obtain a reliable measurement of yaw using Earth magnetic field as a reference. Magnetic compasses have been widely used for navigation for hundreds of years, though they have an important drawback as they are affected by ferromagnetic metal, typical in a ship's hull. Therefore, the IMU unit has to be placed carefully. In large vessels, magnetometers may be replaced by a GPS based compass or gyrocompasses.

In the proposed work, three orthogonal anisotropic magnetoresistive (AMR) sensors have been used. The output of these sensors is a cosine function of the heading angle, providing the X, Y, Z magnetic components (north, east and vertical components of the magnetic field). In this scenario, an error source is introduced by tilt angles (Xisheng et al., 2009) and magnetic field components must be corrected according to the roll and pitch angles ϕ and θ , respectively. This can be expressed as follows (Xisheng et al., 2009):

$$\begin{aligned} x_c &= x_{mag} \cos(\theta) - z_{mag} \sin(\theta) \\ y_c &= y_{mag} \cos(\phi) + z_{mag} \sin(\phi) \end{aligned} \quad (7)$$

where x_{mag} , y_{mag} , z_{mag} represent the output of the magnetometers, x_c , y_c , z_c are the corrected values and ϕ , θ are obtained from the DCM matrix according to Eq. (7). Once the magnetic components are corrected to the horizontal plane, and considering the resulting normalized heading 2D vector in $Z=0$, with components (x_c, y_c) , the following relations can be established with the yaw measured by the magnetometers:

$$\begin{aligned} Yaw_{mag} \rightarrow \psi_{mag} &= \arctan(y_c, x_c) \\ x_c &= \cos(\psi_{mag}) \\ y_c &= \sin(\psi_{mag}) \end{aligned} \quad (8)$$

Taking the previous results into account, and since measurements of magnetometers are performed in the coordinate system of the Earth, the yaw correction vector is estimated. This is obtained as the cross product of the heading vector measured by the magnetometers and the projection of the X axis of the vessel in the plane $Z = 0$ of the Earth (which represents the sea plane). Then, the obtained result is translated to the vessel coordinate system with the R matrix. This is computed as follows:

$$\begin{aligned} Correction_{Yaw, Earth} &= \begin{bmatrix} r_{xx} \\ y_{yx} \\ 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_{xx}y_c - r_{yx}x_c \end{bmatrix} \\ Correction_{Yaw} &= R^T Correction_{Yaw, Earth} = \begin{bmatrix} r_{zx}(r_{xx}y_c - r_{yx}x_c) \\ r_{zy}(r_{xx}y_c - r_{yx}x_c) \\ r_{zy}(r_{xx}y_c - r_{yx}x_c) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

In the next step, roll and pitch drift correction vectors (rotations in the X and Y axis, with angles ϕ , θ) are estimated from accelerometers.

Accelerometers output indicates the gravity minus the acceleration in the axis X, Y, Z with a long term reliability. Therefore, roll and pitch can be corrected just by estimating the position of the gravity vector. However, the measurements of gravity obtained by the accelerometers are only reliable when the vessel is not accelerating, since acceleration due to non-gravity forces interfere with the gravity estimation.

In general, the main non-gravitational acceleration components are the forward acceleration directly induced by the propulsion system and the centrifugal acceleration caused by the inertia of a rotating vessel.

A moored vessel, by definition, remains stationary, and these main acceleration components may be disregarded. However, it suffers from accelerations and decelerations forward, backward and side to side due to waves, wind, currents and the mooring system itself. In this work, the assumption that these accelerations are canceled on mid-long term is carried out, so that, on average, accelerations of the vessel can be disregarded. Therefore, used acceleration values are averaged values with a lower frequency than gyroscopes, and outliers are explicitly filtered out if the magnitude of acceleration vector is lower than 0.5g or higher than 1.5g, where 1g represents the magnitude of gravity force on Earth (9.80665 m/s²).

Taking this into account, the accelerometers give us a reference measurement for the gravity vector in the body frame of reference, and pitch and roll are directly calculated from the accelerometers measurements as follows:

$$\begin{aligned} Pitch_{acc} \rightarrow \theta_{acc} &= \arctan\left(\frac{x_{acc}}{\sqrt{y_{acc}^2 + z_{acc}^2}}\right) = -\arcsin(x_{acc}) \\ Roll_{acc} \rightarrow \phi_{acc} &= \arctan(y_{acc}, z_{acc}) \end{aligned} \quad (10)$$

where x_{acc} , y_{acc} , z_{acc} represent the output of the accelerometers.

At this point, the correction vector for pitch and roll, is provided simple by the cross product of the accelerometers measurement vector and the projected Earth gravity vector (the Z axis) to the vessel coordinate system. This is expressed as follows:

$$Correction_{Pitch-Roll} = \begin{bmatrix} r_{zx} \\ r_{zy} \\ r_{zz} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{acc} \\ y_{acc} \\ z_{acc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

where r_{zx} , r_{zy} , r_{zz} is the Z row of the direct cosine matrix.

Finally, the yaw and pitch-roll correction vectors are weighted and fed to a proportional plus integral (PI) feedback controller.

$$Out_{pi}(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (12)$$

where $Out_{pi}(t)$ is the output of the PI controller, K_p and K_i are constant tuning parameters called proportional and integral gain respectively, and $e(t)$ represents the estimation error in moment t .

The output of the PI controller is the additive correction term to the gyroscopes output as expressed in Eq. (8). It is used to update the R matrix as expressed in Eq. (6). In practice, this correction value is calculated as follows:

$$w_{correction}(t) = w_p(t) + w_i(t) + K_i e(t) dt$$

$$w_p(t) = K_p e(t)$$

$$w_i(t) = K_i e(t)$$

$$e(t) = W_{Yaw} Correction_{Yaw}(t) + W_{Pitch-Roll} Correction_{Pitch-Roll}(t) \quad (13)$$

where W_{Yaw} and $W_{Pitch-Roll}$ are weight parameters which are adjusted empirically to provide a rapid response (large weighting) to yaw relative to pitch and roll as justified in (Premerlani and Bizard, 2009), K_p and K_i are tuned using the Ziegler–Nichols method (Ziegler and Nichols, 1942).

3. EXPERIMENTAL RESULTS

The validation of the system was done in physical modelling tests, and further applied to a real case.

3.1 Laboratory tests

Several tests were done in the wave-current flume in the Center of Technological Innovations in Construction and Civil Engineering (CITEEC) of the University of A Coruña (Spain), with dimensions 25x0.8x0.6 m. Two scaled ship models were analyzed to determine the system precision with a battery of different pairs of wave heights and periods.

First, a seven hours experiment was performed to correct the drift term. Stationary conditions at the beginning and end of the test were used, and a constant frequency and amplitude of waves (frequency: 0.8 Hz, amplitude: 8 cm). An example of the obtained results is shown in Fig. 2.

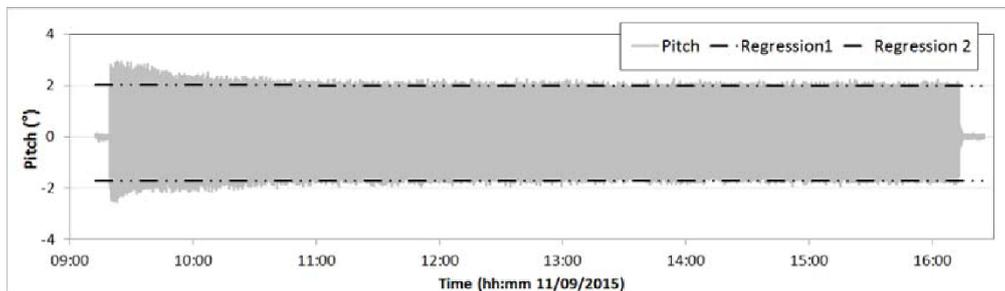


Fig. 2. Pitch measurements in the long term experiment conducted to validate the pitch correction.

The residual values were averaged in the entire test showing a deviation of 0.0015°, so no drift in the long term was found, solving one of the main concerns about the application of these devices. Also, a peak analysis was done, firstly to set initial values to be avoided in the analysis and that could be affected by the external force to move the object, and secondly to apply a regression technique between peaks, once again checking that no drift was found in those peaks.

The second battery of tests was done to validate the IMU comparing its results with a computer vision system, previously used in a similar case (Malheiros et al., 2009). The computer vision system used a video camera installed on a side of the wave-current flume to record the experiment, and track a set of visual targets in the model, with a block matching algorithm (Rodríguez et al., 2012).

An image of the experimental set-up and some results are presented in Figures 3 and 4. More details about the

correlation analysis and results are explained in previous publications (Figuero et al., 2016).

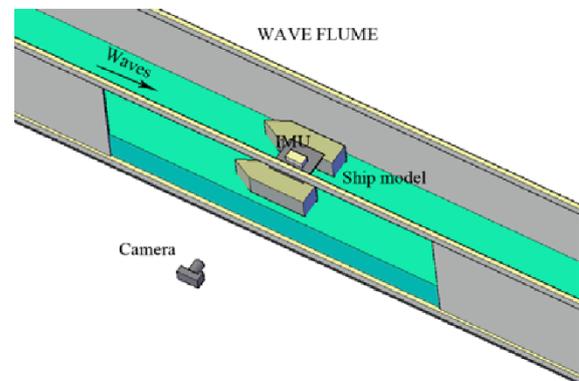


Fig. 3. Testing model in the R&D CITEEC wave-current flume.

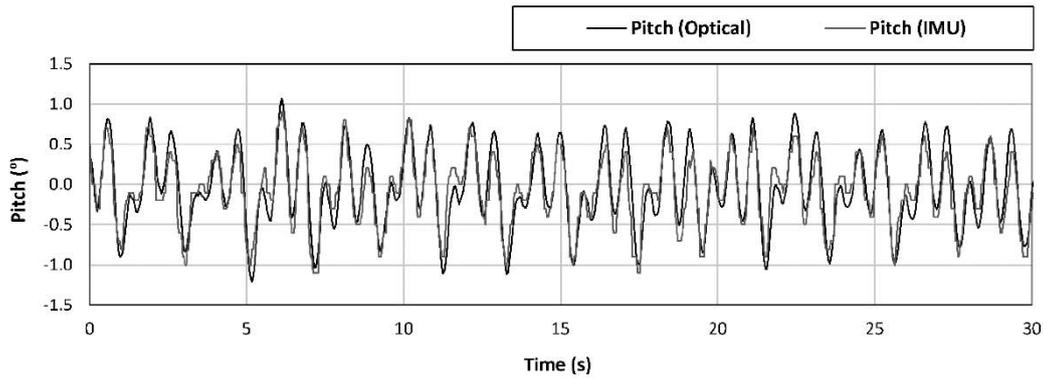


Fig. 4. Pitch measurements with the Computer Vision system and the proposed technique for a wave frequency of 0.5 Hz.

3.2 Field Campaign

The proposed technique was validated in a real scenario for the Port Authority of A Coruña (Spain), in the facilities of the Outer Port of Punta Langosteira. This port has a main breakwater of 3.3 km length that provides protection for a basin of actually 178 hectares. The field campaign was developed in the antipollution vessel *Urania Mella* moored at port during 3 months in winter, with dimensions of 72 m length and 15 m beam, gross and deadweight tonnage of 1,676 tons and 3,180 tons, respectively (Fig. 5).



Fig. 5. The vessel *Urania Mella* moored in the Inner Port of A Coruña.

Fig. 6 shows the mooring system of *Urania Mella*, which is one of the most commonly used nowadays. It consists in tying the ship to the harbour with different lines (chains, wire rope or a combination of the two), tied from the bow and stern of the ship to the dock called long forward and long aft lines, respectively. Additionally, ropes called spring lines are disposed running from the front of the ship to a tie point at the rear or vice versa, to prevent the ship from advancing or moving back. Finally, fenders are used between the boat and the dock or pier.

During the wave generation and propagation through the ocean, the nonlinear interaction among swell generates long waves, called infragravity waves. When the swell moves into shallow water and breaks, the associated infragravity waves are released as free waves which may reflect back towards the shore and keep propagating or radiate into deep ocean basins. Their periods may coincide with the eigen periods of the port basin producing oscillation amplifications and

induced currents, or with the natural motion periods of the moored ship amplifying its movements.

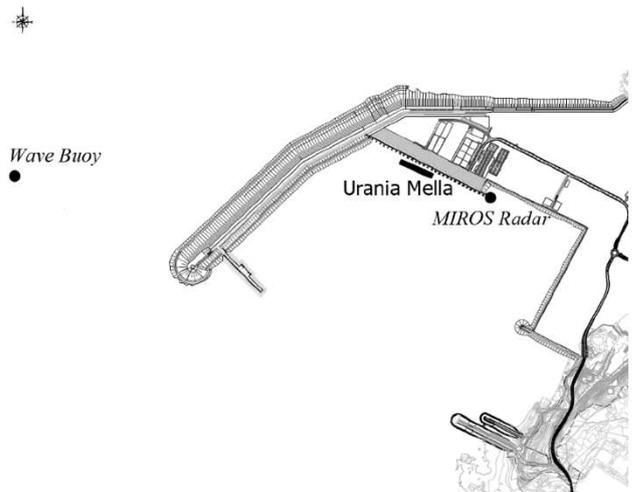


Fig. 6. Facilities at the Outer Port of Punta Langosteira (A Coruña, Spain) and location of the *Urania Mella* vessel (black shape, not scaled).

The obtained results for the monitored movements are shown in Figs. 7 and 8, where maximum and significant values of pitch and yaw angular motions are represented.

A strong linear relation between the three angular motions is observed. Since yaw is the easiest oscillation to measure onboard (most ships are equipped with a compass), relations of roll and pitch with yaw are discussed in this section, although the obtained results are generalizable to any other relation. Therefore, studying the correlation of these oscillations, Pearson values of roll and pitch with yaw of 0.87 and 0.97 respectively, with a p -value < 0.05 , were obtained.

Taking this into account, an experiment was carried out to measure the predictability of roll and pitch motions when knowing yaw. Thus, a linear model was adjusted with the first half of the obtained measurements and used it to predict the response in the second half.

Obtained results are shown in Figs. 9 and 10. Analyzing the previous results, it can be seen that two oscillations of a moored ship can be estimated from the third one in some conditions for a fixed mooring orientation and mooring

system. Obtaining an average prediction error of 0.14° in pitch and 0.16° in roll with a standard deviation in error of 0.06° and 0.14° , respectively. This result, although performed with a non-exhaustive cross validation method and without considering different ship sizes, mooring systems or mooring

orientations is important since it may help in the understanding of moored vessel behavior and provides useful information to prevent operational downtimes and critical situations with damages to the dock and vessel.

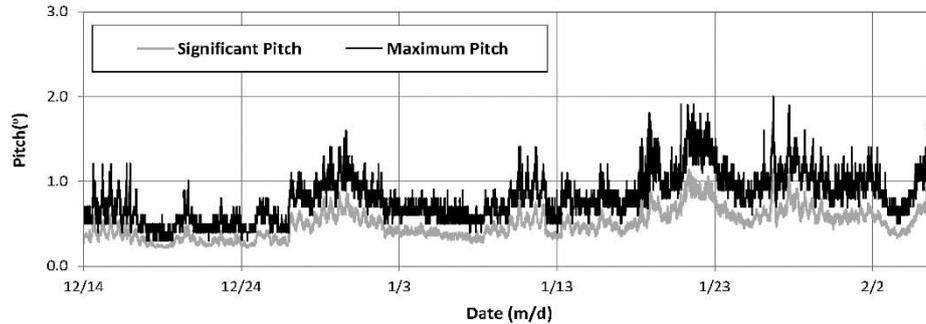


Fig. 7. Significant and maximum pitch measured with the proposed technique.

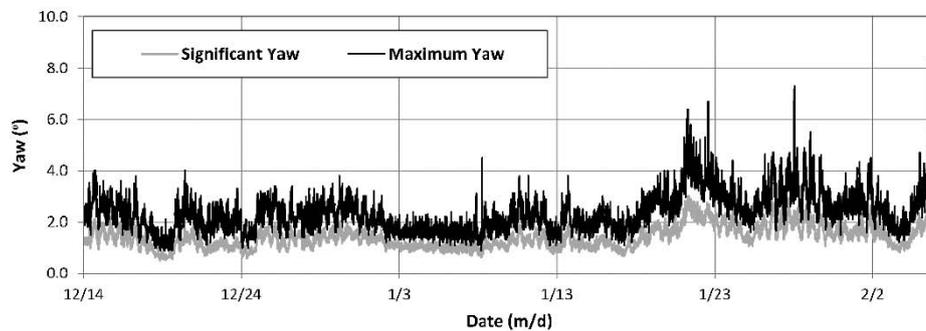


Fig. 8. Significant and maximum yaw measured with the proposed technique.

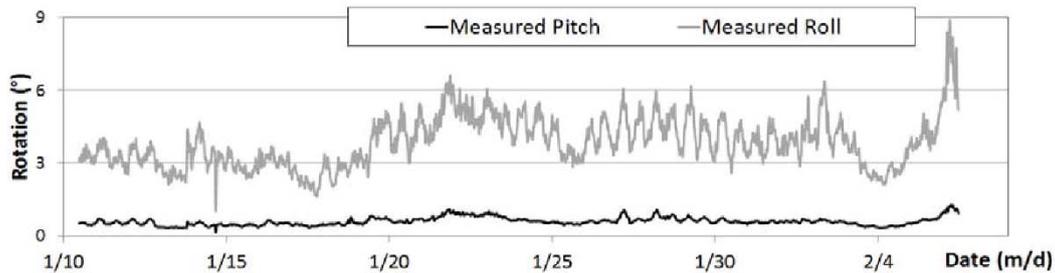


Fig. 9. Significant pitch and roll measured with the proposed technique.

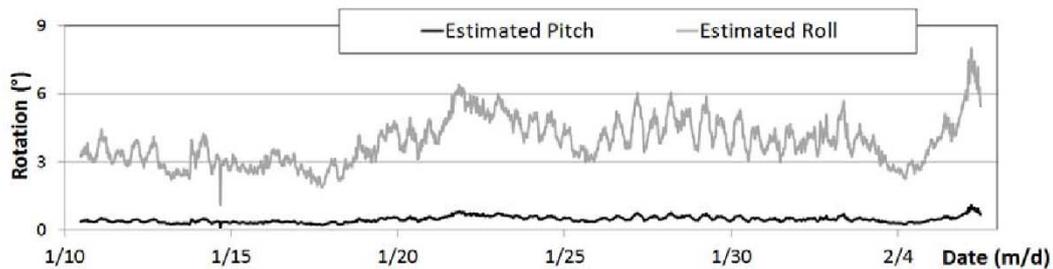


Fig. 10. Significant pitch and roll estimated from measured yaw.

During a part of the field campaign, different measurements were obtained regarding the mooring and sea conditions. On the one hand, gravity waves coming from the Atlantic Ocean were measured with a wave buoy located 1 km away from the main breakwater, and with a MIROS radar in the berthing

line where the *Urania Mella* was moored (Fig. 6). On the other hand, maximum loads were measured on the forward and stern mooring lines with calibrated load cells.

Figs 11, 12, 13, and 14 show the comparison of loads in mooring lines and wave heights with roll oscillations.

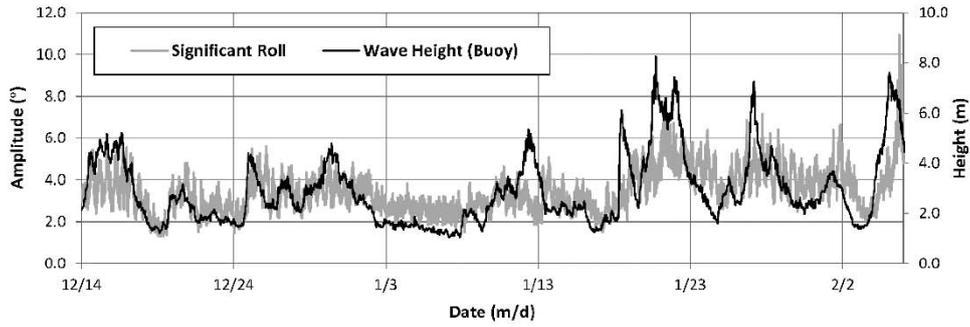


Fig. 11. Evolution of significant wave height measured with a nearby wave buoy compared with significant roll.

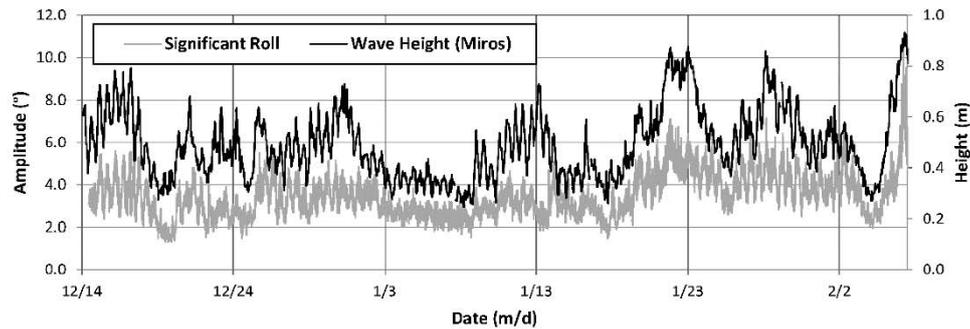


Fig. 12. Evolution of significant wave height measured with a nearby MIROS radar compared with significant roll.

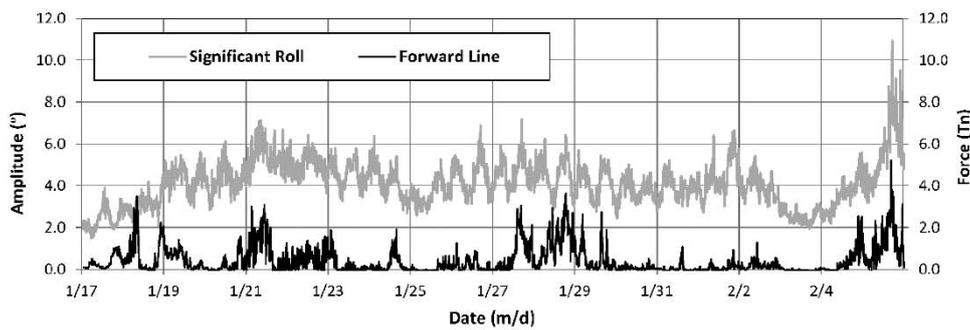


Fig. 13. Evolution of significant forces in a forward line, measured in tons-force units with a load cell, compared with significant roll.

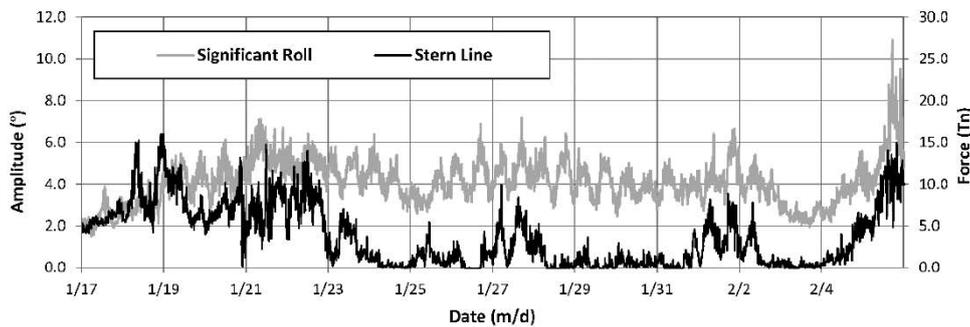


Fig. 14. Evolution of significant forces in a stern line, measured in tons-force units with a load cell, compared with significant roll.

A strong linear relation of the angular motions with wave height measured inside the port was detected. Additionally, a light linear relation with wave height in the open ocean and

with loads in the mooring lines was observed using Pearson equation. The results are statistically significant (p -value < 0.05) and are shown in Table 1.

Table 1. Pearson correlation of angular motions with wave height and loads in the mooring lines.

	Wave Height Ocean	Wave Height Port	Forward Line Load	Stern Line Load
Roll	0.64	0.79	0.29	0.39
Pitch	0.62	0.72	0.51	0.53
Yaw	0.68	0.83	0.33	0.47

4. CONCLUSIONS

An inertial measurement system to study the orientation of a moored ship was designed in this work. This system is based on the use of gyroscopes, accelerometers and magnetometers to measure the angular movements of a moored ship.

This IMU device was validated in laboratory conditions, checking that it is not affected by significant drifts, and obtaining similar results to the ones from far more complex techniques, such as a computer vision based system. In addition, computing techniques were applied to increase the accuracy of the device in order to make it useful in this relevant civil engineering field of port operational efficiency.

The proposed technique was tested with a real ship, the Urania Mella, an antipollution vessel moored in the Outer Port of Punta Langosteira in A Coruña (Spain). During the field campaign, roll, pitch and yaw were measured and compared with wave heights and loads in the mooring lines, obtaining very promising results. In particular, the angular motions showed a significant correspondence with wave height measurements inside the port, obtaining correlation coefficients of 0.79, 0.72 and 0.83, respectively.

The IMU system may contribute to characterize the behavior of the moored ships inside the port, in order to establish limiting operation conditions, quantify the availability of the terminals, evaluate meteorological forecast tools developed for the operation of the port and finally establish a methodology to analyze the impact on operations of new port final layout and how to manage new traffics.

In addition, this technique, can lead to establish a more effective way of evaluating berthing and mooring equipment of the terminals, analyzing new mooring systems to reduce downtimes of the terminals and to establish recommended mooring arrangements. Definitely, this system will provide useful information for port regulators to prevent critical situations that may generate important economic losses and personal safety risks.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness, R&D National Plan, within the project BIA2017-86738-R.

The authors wish to thank the Port Authority of A Coruña, Aquática Ingeniería Civil and Siport21 for their cooperation and technical assistance and the Urania Mella owners and crew for the facilities on board.

REFERENCES

- “Automated Mooring | Cavotec SA.” (n.d.). <<http://www.cavotec.com/en/your-applications/ports-maritime/automated-mooring>> (Feb. 22, 2018).
- Ayub, S., Bahraminisaab, A., and Honary, B. (2012). “A Sensor Fusion Method for Smart phone Orientation Estimation.” *Proceedings of the 13th Annual Postgraduate Symposium on the convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting*, Liverpool, England, June 25-26.
- BSRA. (1971). *Research Investigation for the Improvement of Ship Mooring Methods*. BSRA Report NS, (British Ship Research Association, ed.), British Ship Research Association.
- “Dynamic Mooring Systems - ShoreTension.” (n.d.). <<https://shoretension.com/>> (Feb. 22, 2018).
- Figuro, A., Peña, E., Rodríguez, A., Maciñeira, E., Rabuñal, J., Sande, J., Costa, F., Castro, A., and Maciñeira, E. (2016). “Inertial Measurement Unit to Determine Moored Vessels Movements.” *Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science COASTLAB 2016*, Ottawa, Canada.
- Finkelstein, A. B. (1957). “The initial value problem for transient water waves.” *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 10(4), 511–522.
- Gebre-Egziabher, D., Hayward, R. C., and Powell, J. D. (2004). “Design Of Multi-sensor Attitude Determination Systems.” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(2), 627–649.
- Grifoll, M., Fontán, A., Ferrer, L., Mader, J., González, M., and Espino, M. (2009). “3D hydrodynamic characterisation of a meso-tidal harbour: The case of Bilbao (northern Spain).” *Coastal Engineering*, 56(9), 907–918.
- Groves, P. D. (2015). “Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, 2nd edition [Book review].” *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*.
- Jorge Rosa-Santos, P., and Taveira-Pinto, F. (2013). “Experimental study of solutions to reduce downtime problems in ocean facing ports: the Port of Leixões, Portugal, case study.” *Journal of Applied Water Engineering and Research*, Taylor & Francis, 1(1), 80–90.
- Kat, Jan O.de; Paulling, J. R. (2001). “Prediction of Extreme Motions and Capsizing of Ships and Offshore Marine Vehicles.” *Conference The 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 3–8.
- López, M., Iglesias, G., and Kobayashi, N. (2012). “Long period oscillations and tidal level in the Port of Ferrol.” *Applied Ocean Research*, 38, 126–134.
- Malheiros, P., Rosa-Santos, P., Gonçalves, J., Costa, P., Paulo Moreira, A., Veloso-Gomes, F., and Taveira-Pinto, F. (2013). *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (A. Azcvedo, ed.), Springer International Publishing, Heidelberg.

- Malheiros, P., Santos, P. R., Moreira, A. P., Costa, P., Gomes, F. V., and Pinto, F. T. (2009). "Robust and real-time motion capture of rigid bodies based on stereoscopic vision." *3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure*, Porto, Portugal, July 20-24.
- van der Molcn, W., Ligteringen, H., van der Lem, J. C., and de Waal, J. C. M. (2003). "Behavior of a Moored LNG Ship in Swell Waves." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(1), 15–21.
- van der Molen, W., Scott, D., Taylor, D., and Elliott, T. (2015). "Improvement of Mooring Configurations in Geraldton Harbour." *Journal of Marine Science and Engineering*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 4(1), 3.
- OCIMF. (1978). *Guidelines and Recommendations for the Safe Mooring of Large Ships at Piers and Sea Islands*. (Oil Companies International Marine Forum, ed.), Witherby.
- Van Oortmerssen, G. (1976). "The motions of a moored ship in waves." *Delft University of Technology*.
- Oortmerssen, G. van, Pinkster, J. A., and van den Boom, H. J. J. (1986). "Computer Simulation of Moored Ship Behavior." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 112(2), 296–308.
- Phuong, N. H. Q., Kang, H. J., Suh, Y. S., and Ro, Y. S. (2009). "A DCM based orientation estimation algorithm with an inertial measurement unit and a magnetic compass." *Journal of Universal Computer Science*, 15(4), 859–876.
- PIANC. (1995). "Criteria for movements of moored ships in harbours: a practical guide." *Report of Working Group N° 24, Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin N° 88 (PIANC)*, Brussels, Belgium.
- PIANC. (2012). "Criteria for the (Un)loading of Container Vessels." *Report of Working Group N° 115, PIANC*.
- Premerlani, W., and Bizard, P. (2009). "Direction cosine matrix imu: Theory." *DIY Drones*.
- Puertos del Estado. (2011). *ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre*. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Quintero, F., Martin, M., and Serrano, G. (2000). "As Pias Bridge Repair And Reconstruction." *WIT Transactions on The Built Environment*, WIT Press, 47.
- Rabinovich, A. B. (2009). "Seiches and Harbour Oscillations." *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, 193–236.
- Rodriguez, A., Rabuñal, J. R., Pérez, J. L., and Martínez-Abella, F. (2012). "Optical Analysis of Strength Tests Based on Block-Matching Techniques." *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 27(8), 573–593.
- Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., and Veloso-Gomes, F. (2014). "Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships." *Coastal Engineering*, 85, 60–71.
- Sammartino, S., Garrido, J. C. S., Delgado, J., Naranjo, C., Aldeanueva, F. C., and Lafuente, J. G. (2014). "Experimental and numerical characterization of harbor oscillations in the port of Málaga, Spain." *Ocean Engineering*, Elsevier Ltd, 88, 110–119.
- Setoodeh, P., Khayatian, A., and Frajah, E. (2004). "Attitude Estimation By Separate-Bias Kalman Filter-Based Data Fusion." *Journal of Navigation*, 57(2), 261–273.
- Uzaki, K., Matsunaga, N., Nishii, Y., and Ikehata, Y. (2010). "Cause and countermeasure of long-period oscillations of moored ships and the quantification of surge and heave amplitudes." *Ocean Engineering*, 37(2–3), 155–163.
- Ven, P. Van der. (2012). "The use of numerical models to determine the response of moored vessels to waves in a complex harbour geometry." *Delft University of Technology*, (August).
- Wehausen, J. V. (1967). "Initial-value problem for the motion in an undulating sea of a body with fixed equilibrium position." *Journal of Engineering Mathematics*, Kluwer Academic Publishers, 1(1), 1–17.
- Woodman, O. J. (2007). *Introduction to Inertial Navigation. Technical Report*, Computer Laboratory, University of Cambridge.
- Xisheng, L., Ruiqing, K., Xiongying, S., and Guanghua, Y. (2009). "Tilt-Induced-Error Compensation for 2-Axis Magnetic Compass with 2-Axis Accelerometer." *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, IEEE, 122–125.
- Yun, X., and Bachmann, E. R. (2006). "Design, Implementation, and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking." *IEEE Transactions on Robotics*, 22(6), 1216–1227.
- Ziegler, J. G., and Nichols, N. B. (1942). "Optimum Sttings for Automatic Controllers." *Transacction of the A.S.M.E*, 64, 759–768.

Artículo II

Dynamical study of a moored vessel using computer vision

DYNAMICAL STUDY OF A MOORED VESSEL USING COMPUTER VISION

Andres Figuero¹, Alvaro Rodriguez², Jose Sande¹, Enrique Peña¹, and Juan R. Rabuñal³

Key words: computer vision, mooring, ship motions, block matching.

ABSTRACT

Wind and wave effects have a major impact on the design of mooring and anchoring systems, whose purpose is to prevent the movement of the cargo and the moored ship while optimizing the operations which have to take place in port.

The dynamic behavior of a ship moored in waves has been mathematically described and interactions between ships and environmental loads have been commonly tested for different docks and mooring systems in scale models. However, the behavior of real ships in true mooring conditions has not been properly addressed in scientific literature.

This paper proposes a novel computer vision technique to monitor moored ships. This approach uses the correlation of visual features in the images of the ship to estimate its movements along time.

The proposed technique has been validated in laboratory conditions and applied in a real scenario to study the behavior of the ship *Urania Mella* in the Outer Port of A Coruña (Spain), in Punta Langosteira, obtaining very promising results.

I. INTRODUCTION

Seaports are areas for berthing or anchoring ships where there is the equipment for the transfer of goods between ship and shore or between ships. Currently they should be considered not only one of the most important aspects of maritime transport but also one of the most vital aspects of a national transport infrastructure (Alderton, 2008).

There are various means of holding a ship to a dock or pier. The most common nowadays consists in tying the ship to the



Fig. 1. The ship *Urania Mella*, analyzed in the tests conducted in this paper, moored in the dock of A Coruña.

harbor with lines made of natural or artificial materials relying on the experience of the operator. In general, the lower the magnitude of the loads to be absorbed by the mooring system, the more freely the ship is left to move. However, reducing the amplitude of motions in moored ships is also crucial to increase the efficiency of loading operations, to minimize port operational costs, as well as to reduce security and environmental risks (Malheiros et al., 2013). Fig. 1 shows a ship using this mooring system.

The need to optimize dock operations while minimizing the risk of damages in the ship, dock and cargo challenged several researchers to describe mathematically the behavior of a ship moored in waves. The first milestone in these researches was achieved in the 50 s, in works such as Finkelstein (1957) where a time-domain method was applied to describe waves not as the sum of regular wave components, but as a summation of impulsive sources. Later works (Wehausen, 1967) used this approach to formulate a solution for a floating body making an impulsive displacement and to calculate the wave forces for a fixed body in waves.

The modeling of ship motion was first proposed by Cummins (1962). According to this model, a moored ship is considered as a body floating in an incompressible, homogeneous and irrotational fluid. An arbitrary motion of the ship can be mathematically described as follows (Cummins, 1962):

$$(M + A)\ddot{\vec{X}}(t) + B\dot{\vec{X}}(t) + C\vec{X}(t) + \int_0^{\infty} K(\tau)\dot{\vec{X}}(t - \tau)d\tau = \vec{F}(t) \quad (1)$$

Where M is the inertia matrix. A , B and C are the matrices

Paper submitted 09/13/16; revised 11/30/17; accepted 03/01/18. Author for correspondence: Andres Figuero (e-mail address: andres.figuero@udc.es).

¹ Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), Universidade da Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain.

² Department of Physics, Umeå University, Linneaus Väg, SE-901 87 Umeå, Sweden.

³ Department of Computer Science, and Centre of Technological Innovations in Civil Engineering, University of A Coruña, Campus Elviña s/n 15071, A Coruña, Spain.

for the added mass, linearized viscous damping and hydrostatic restoring respectively. K contains the impulse response functions. X is the position of the floating body. F represents the applied forces (forcing function). The added mass coefficients and impulse response functions can be determined directly with a time-domain boundary-integral model following Cummins (1962) and Beck and Liapis (1987).

In a more practical approach, the motion of a mooring ship can be studied according to its degrees of freedom. Therefore, the ship movement can be categorized in basic movements. Some of these movements are strongly dependent on the features of the hull and the load condition, and are not significantly altered by mooring. These are the natural oscillation modes of the ship: the rotation about the longitudinal axis (roll), related to transverse stability; the rotation about the transverse axis (pitch), related to longitudinal stability; and the vertical translation motion (heave), depending on the floating area.

The moored ship presents three additional oscillation modes: longitudinal motion (surge); lateral motion (sway); and the rotation about the vertical axis (yaw). These motions have periods higher than the previous ones, and are strongly influenced by the characteristics of the mooring and anchoring system (Pina and Alonso, 1993).

However, while these mechanics are well known, the driving mechanisms in harbor hydrodynamics are complex. Therefore, in addition to currents, wind forces and tides, the interaction of these elements with each other and with harbor infrastructures may have major influence in the seaport functioning. Furthermore, the risk of damaging moored ships or breaking mooring lines can be dramatically increased due to complex phenomena such as harbor oscillations. They are caused by small amplitude and large wavelength waves entering from the sea. These may induce large horizontal moored ship motions because their frequency is close to the natural frequency of the system made of the ship, the mooring lines and the fenders (Rabinovich, 2009; Uzaki et al., 2010).

To deal with these problems, a wide range of hydrodynamic studies has been carried out in order to characterize conditions in different ports (González-Marco et al., 2008; Grifoll et al., 2009; Sammartino et al., 2014). However, one of the established techniques to measure the movements of moored ships in actual operation conditions is based on the use of Differential GPS (DGPS) positioning systems on board (Bont et al., 2010; Ge et al., 2011). This technique implies the use of expensive devices on the moored ships making these systems unpractical in most scenarios.

In this work, a technique based on the analysis of images of moored ships is proposed. This technique uses a set of video cameras to record the ship while is moored in a harbor, and measures the movement through the tracking of feature points.

Computer vision techniques have been widely applied in naval and maritime applications. Broggi et al. (2012) described a speed warning system for boats moving in a navigation channel, Yun Jip et al. (2014) presented an automatic ship detection method in harbor areas and Malheiros et al. (2013) applied a

stereoscopic vision system to measure the motion of rigid bodies in laboratory tests. These applications are commonly based on the use of a Kalman filter to track a navigating ship. Other examples include the use of local self-similarity to detect ships in harbor areas (Hu et al., 2009) or the use of a dynamic ship model into a factor graph for ship tracking (Castaldo and Palmieri, 2014).

However, only few examples exist in literature where the movement of moored ships has been studied such as Malheiros et al. (2009) who used stereo cameras to track sets of marks placed on a model of a moored oil tanker by means of determining the best fit plane using least squares. This work was later refined in Malheiros et al. (2013) to include a Kalman filter. Important drawbacks in this research were that assays had only been conducted in indoor and controlled light conditions, without addressing the issues of a real scenario, where weather and light changes may represent important challenges. Furthermore, the use of special sets of marks in a high-contrast background of not negligible size is impractical for its use in a real ship.

The aforementioned works show the potential of computer vision to monitor the oscillations of a moored ship, and this paper presents a novel technique to deal with this question, based on the analysis of sequences of images of the vessel in field conditions.

II. PROPOSED TECHNIQUE

With the purpose of estimate the motion of the ship, firstly a set of cameras is calibrated and installed through the seaport facilities, with different points of view of the moored ship. Secondly, a set of features is selected for each view and tracked along the corresponding image sequence. Finally, the displacement information is then integrated to extract the 3D motions of the ship.

1. Calibration

To be able to obtain real scale measurements, cameras must be synchronized and calibrated. To this end, 2D and 3D camera systems can be used. While the functioning of the proposed technique is similar in both scenarios, there are important differences in the calibration process that may be pointed out.

In the 2D camera system, each camera tracks different features and is calibrated separately using the pin-hole camera equations (Zhang, 1999) expressed as follows:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = M_{3 \times 3} \times \begin{bmatrix} X_c / Z_c \\ Y_c / Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad M = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

where (X_c, Y_c, Z_c) are the coordinates of a point in the camera space, (x_i, y_i) are the corresponding pixel coordinates, M is the transformation matrix, f_x, f_y represents the focal length and

$c(c_x, c_y)$ determines the optical center, establishing as reference the image coordinates where a point is projected through the center of the lens. In practice, due to small imperfections in the lens and other factors, some distortions are integrated into the image. These distortions can be modeled using the following parametric equations (Weng et al., 1992):

$$\begin{aligned} dr_x(x) &= xk_1r^2 + xk_2r^4 + xk_3r^6 \\ dr_y(y) &= yk_1r^2 + yk_2r^4 + yk_3r^6 \\ dt_x(x, y) &= k_3(r^2 + 2x^2) + 2k_4xy \\ dt_y(x, y) &= 2k_3xy + k_4(r^2 + 2y^2) \end{aligned} \quad (3)$$

where x and y are spatial coordinates, r is the distance to the lens optical center, dr is the radial distortion, dt is the tangential distortion and k_i are the distortion parameters to be determined.

In this case, the calibration is performed taking into account the real geometry of a 2D pattern of features. The types of motions which can be measured depend on the amount and position of the cameras.

On the other hand, in a 3D camera system, two or more cameras are used to observe the same set of features. Here, the calibration process consists in determining the structure of the scene from the two or more views. This technique consists in the calibration of each one of the cameras using the same process as in a 2D case and then obtaining the estimation of the translation vectors ($T_{1 \times 3}$) and rotation matrix ($R_{3 \times 3}$) of the second camera relative to the first one. This can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} &= R_{3 \times 3} \times \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + T_{1 \times 3} \\ R &= \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad T = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

where (X, Y, Z) are the coordinates of the point in the real world, and (X_c, Y_c, Z_c) in the camera coordinate system (or reference coordinate system). The entire process is described in detail in Hannah (1974) and Bolles et al. (1993).

While the use of 3D camera systems has several advantages, they are not suitable for a general scenario, since their working distance is highly dependent of the camera baseline, and available 3D camera systems are not accurate in distances higher than 20 m, which are required for big ships in commercial ports. Therefore, in this paper, a 2D camera system was used in the conducted experiments.

2. Feature Selection

To select the points of interest which will be used to match

the image, a semiautomatic approach was conducted consisting in three main steps:

- (1) In the first step, the user selects a region of interest in one of the images of the ship, this region should ideally correspond with a part of the ship located in its sagittal or frontal plane, according to the motion of interest.
- (2) Later, in the second step, an automatic technique for feature detection is applied. In this work, the Speeded Up Robust Features (SURF) technique (Bay et al., 2008) was used. This is a scale-invariant feature detector based on the Hessian-matrix. The Hessian is calculated using approximate second-order Gaussian derivatives in the form of box-type filters (Tuytelaars and Mikolajczyk, 2008). The scale invariance is warranted by bandpass multi-resolution pyramid decomposition.
- (3) Finally, the user has the chance to add, edit or modify the resulting points.

3. Search Process

After selecting the features of interest, the strategy employed to track these features is based on an iterative multi-resolution pyramidal process. This search process is based in comparing the regions around the points of interest in the original image with the ones representing a candidate displacement according to a motion model. Here the Pearson correlation quotient (R) is used as similarity metric. The search process is divided in two stages:

- (1) First order motion model:
In this stage, the search process is restricted to find a rigid transformation of the scene. To this end, three degrees of freedom are used to represent the main effects of motion expressed as follows:

$$\begin{aligned} X_i' &= X_i - C_X \cos(\alpha) + C_Y \sin(\alpha) + C_X + d_X \\ Y_i' &= Y_i - C_X \sin(\alpha) + C_Y \cos(\alpha) + C_Y + d_Y \end{aligned} \quad (5)$$

where, (X_i, Y_i) and (X_i', Y_i') represent image coordinates before and after the first displacement of the feature i , α is a 2D rotation angle relative to the center of the image (C_X, C_Y) and (d_X, d_Y) represent a linear displacement.

This first order motion model is used with the pyramidal decomposition in a coarse-to-fine approach. Therefore, the first iteration is executed with a subsampled image and in a wide search area. To this end, a maximum rotation angle and linear displacement is selected by the user. Later, in each iteration the image resolution is increased by a factor of 2, while the search range of motions is reduced accordingly. This technique increases accuracy along time and reduces computational cost. The number of pyramidal steps and the iterations in full resolution can also be set by the user.

- (2) Second order motion model:
After obtaining the global similarity maximum in the pre-

vious step, the motion measurement is refined with a second search process to find locally linear displacements for each feature of interest. This can be represented as follows:

$$\begin{aligned} x_i^d &= X_i' + l_x \\ y_i^d &= Y_i' + l_y \end{aligned} \quad (6)$$

where (x_i^d, y_i^d) represent the refined coordinates of the feature i , after a discrete linear displacement determined by (l_x, l_y) .

With this technique, for each feature the maximum discrete correlation value lead us to the most probable linear displacement and to obtain a subpixel accuracy, the correlation values must be translated to a continuous space. To this end, the true peak of the similarity is calculated by fitting a Gaussian function in each dimension of the movement using three points to solve each equation. This can be expressed as follows for the x dimension of displacement:

$$\begin{aligned} x_i^c &= x_i^d + \frac{N}{D} \\ N &= \ln\left(R(x_i^d - 1)\right) - \ln\left(R(x_i^d + 1)\right) \\ D &= 2\ln\left(R(x_i^d - 1)\right) - 4\ln\left(R(x_i^d - 1)\right) + 2\ln\left(R(x_i^d + 1)\right) \end{aligned} \quad (7)$$

where x_i^c represent the coordinates of the feature i in a continuous space after a local linear displacement, being the maximum discrete correlation value for the feature in the dimension x noted as $R(x_i^d)$.

After this step, the local displacements of the features are constrained to a parametric global motion model using the Gauss-Newton method to solve an overdetermined homography transformation (8-parameter nonlinear transformation). This can be expressed as follows:

$$\begin{aligned} X_i'' &= (x_i^c h_1 + y_i^c h_2 + h_3) / (x_i^c h_7 + y_i^c h_8 + 1) \\ Y_i'' &= (x_i^c h_4 + y_i^c h_5 + h_6) / (x_i^c h_7 + y_i^c h_8 + 1) \end{aligned} \quad (8)$$

where (X_i'', Y_i'') represent image coordinates after the second order motion model and h_k are the homography parameters which are calculated from the previous values.

4. Long Term Tracking

Using the previous technique, it is possible to track the initial set of features in time. However, when tracking is performed during several hours, the scene will suffer dramatic lighting and color changes due to the day-night cycle, and to changes in meteorological conditions like clouds, fog or rain. Additionally, it is expected that the image will be out of focus in some frames and that extraneous bodies, such as seagulls or the crew, will interfere with the scene, occluding some of the features of interest.

Therefore, the algorithm must be able to handle occlusions and it must be robust against focus errors and fast intensity changes. Additionally, it must be able to adapt to long term changes in the scene. These issues have been addressed in different ways:

Firstly, occlusions are handled by the first order motion model, allowing the use of a subset of features in the search process. To this end, features with a low correlation are disregarded when the majority of them have achieved a good match. Additionally, in this scenario the second order search process will not update the position of a feature with low correlation. This threshold can be set by the user, its default value being 0.5.

Secondly, the used Pearson similarity metric is invariant to the average of intensity. This provides robustness to fast and short lighting changes. Furthermore, the use of a neighborhood of interest to correlate each of the features, allows achieving a high level of correlation when the image is out of focus as a consequence of large motions of the tracking object that cause its way out of the focus area manually fixed at the beginning of the monitoring.

Finally, to overcome slow and long term changes in the scene, the tracked features are updated along time, refreshing the source image after at a certain time rate selected by the user. To this end, the source point of the measurement is dynamically updated using the previous displacements to follow the position of the original features in the vessel. This strategy has been applied successfully with a block-matching algorithm in works such as Rodriguez et al. (2012) where the procedure is explained in detail.

III. EXPERIMENTAL RESULTS

1. Laboratory Experiments

To validate the technique proposed in this paper, a set of experiments were conducted in the Center of Technological Innovations in Construction and Civil Engineering (CITEEC) of the University of A Coruña.

The conducted experiments were recorded with a video camera and also with an Inertial Measurement Unit (IMU). The IMU is the main component of inertial navigation systems (Phuong et al., 2009; Ayub et al., 2012). It allows to estimate the position and orientation tracking of a moving body relative to a known starting point. Although IMUs usually require to be used in combination with absolute positioning systems to rule out long term errors (Woodman, 2007), they can be used to estimate angular movements without external references. With this purpose, the selected IMU was equipped with three different type of sensors. A 3-axis microelectromechanical (MEMS) gyroscope used to measure the angular velocity of the body (STMicroelectronics L3GD20H). A 3-axis accelerometer to obtain the accelerations of the moving object relative to itself (STMicroelectronics LSM303DLHC). And finally, three orthogonal anisotropic magneto-resistive (AMR) sensors to measure the strength and direction of the local magnetic field (STMicroelectronics LSM303DLHC). The integration of these sensors allows obtaining a robust IMU. The device was previously calibrated in dif-

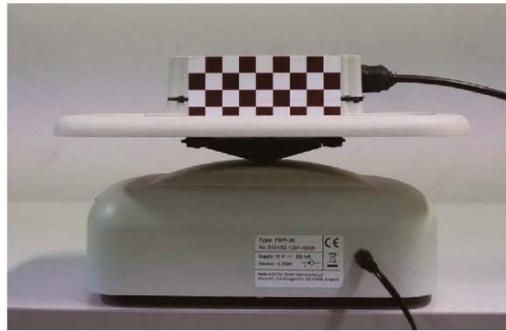


Fig. 2. IMU device placed on top of the rocker with a chess pattern used to record the oscillations with the computer vision system.

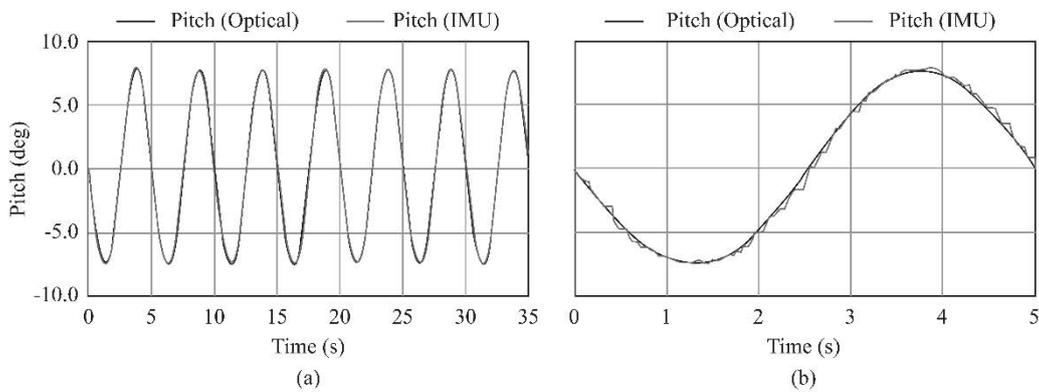


Fig. 3. Rocker movement recorded with the proposed technique and the IMU device for a 15.0° oscillation amplitude and 0.2 Hz frequency (a). One oscillation cycle sample of the same test (b).

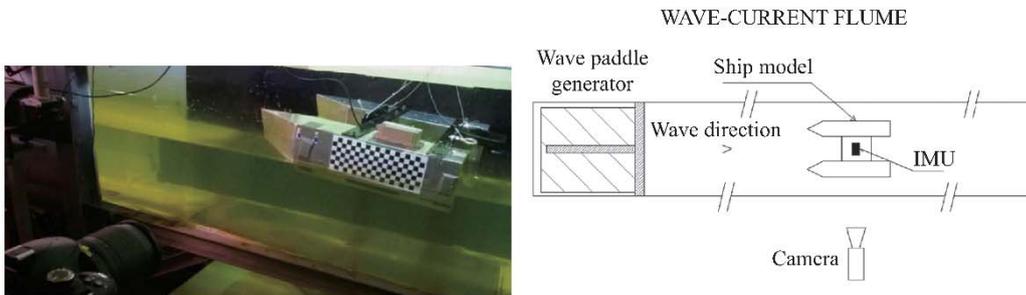


Fig. 4. Experimental assembly used in the comparative assays performed in the Center of Technological Innovations in Construction and Civil Engineering (CITEEC) of the University of A Coruña.

ferent laboratory tests, in order to measure and compare the precision of the system. The obtained results showed a precision up to 0.2°.

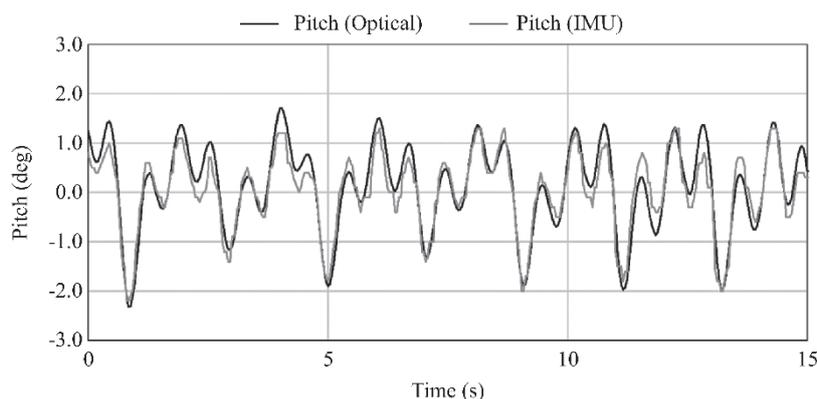
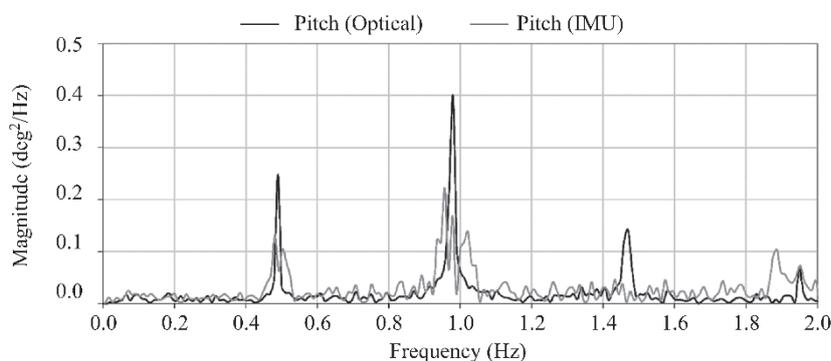
In the first tests conducted in the CITEEC, a fixed-angle platform rocker with a periodic oscillating movement of 15.0° constant amplitude was used to compare the accuracy of both the video camera and the IMU techniques. This rocker was programmed to describe a movement of 0.2 Hz oscillation frequency. The IMU was placed with its longitudinal axis perpendicularly aligned to the rotation axis of the rocker (Fig. 2). Oscillations were recorded during a period of 35 s using both techniques.

Fig. 3(a) shows the result of the rocker test. A strong correlation between the measurements of both techniques was observed, with a Pearson correlation coefficient of 0.99. Furthermore, the mean value of the oscillation amplitude was 15.20° and 14.96° for the IMU and the computer vision system, respectively. Taking into account that the oscillation amplitude of the rocker was 15.0°, the proposed technique showed a higher accuracy and uniformity in the movement record than the IMU which was noisier (Fig. 3(b)).

The second tests were conducted in the 25.0 × 0.8 × 0.6 m wave current flume located in the CITEEC. The IMU was aligned with the longitudinal axis of a scale ship model and the

Table 1. Pearson Correlation Coefficient analysis of the Pitch.

Correlation		Wave Height		
		18 cm	20 cm	24 cm
Wave Frequency	0.5 Hz	0.93	0.81	0.93
	0.7 Hz	0.95	0.93	0.96

**Fig. 5. A 15 seconds duration sample of Pitch measurements with the proposed technique and the IMU device for a wave height of 18 cm and a wave frequency of 0.5 Hz.****Fig. 6. Frequency spectrum of Pitch measured with the proposed technique and the IMU device for a wave height of 18 cm and a wave frequency of 0.5 Hz.**

pitch was measured for different wave height and frequencies.

The experimental setup used in these experiments is shown in Fig. 4.

Examples of obtained results are shown in Figs. 5-8.

Frequency spectra and waveform comparisons in Figs. 5-8 and the Pearson correlation coefficients in Table 1 clearly show how the proposed technique and the IMU device provided almost identical results, although the IMU device presented noisier measurements. This noise was also observed in the rocker test (Fig. 3(b)) even describing a more controlled movement than the generated in the wave flume. This effect is probably induced by the higher accuracy of this device.

2. Field Campaign

To validate the technique proposed in this paper in this pa-

per in real field conditions, a set of assays was performed to measure the dynamic behavior of the ship *Urania Mella*, a 2009 antipollution vessel of 72 m length \times 15 m beam and dead-weight tonnage of 3,180 tons.

The *Urania Mella* was moored in the Outer Port of A Coruña (Spain), in Punta Langosteira. The port structure is composed of a 3.300 m length main breakwater, a 400 m length spur breakwater and a 900 m length vertical wall dock with an average water depth of 22 m, where the analyzed vessel was moored (Fig. 9). This port faces the North Atlantic Ocean, and is typically exposed to the high energetic swell generated by the low pressures coming from Greenland. The interaction between swell waves generates long waves, also called infragravity waves, which are released as free waves and can be reflected from the beach (Herbers et al., 1995).

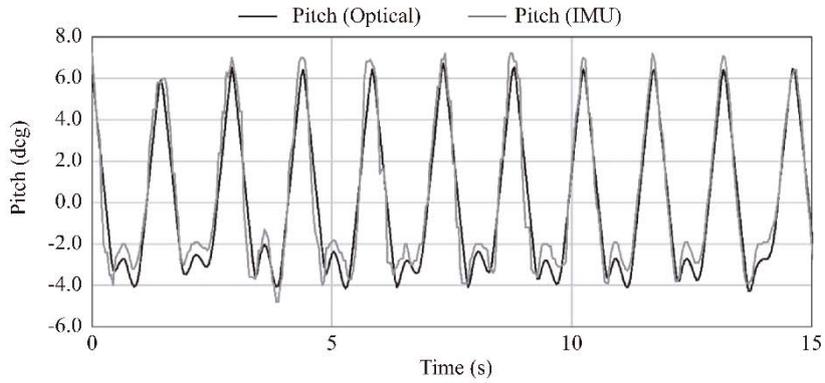


Fig. 7. A 15 seconds duration sample of Pitch measurements with the proposed technique and the IMU device for a wave height of 18 cm and a wave frequency of 0.7 Hz.

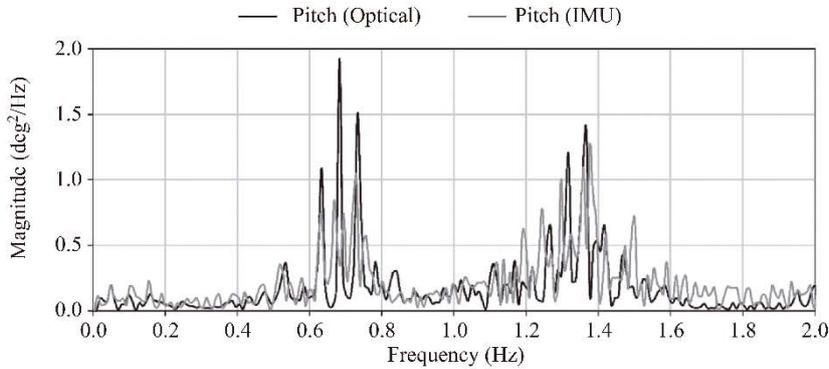


Fig. 8. Frequency spectrum of Pitch measured with the proposed technique and the IMU device for a wave height of 18 cm and a wave frequency of 0.7 Hz.



Fig. 9. Outer Port of A Coruña, in Punta Langosteira (Northwest of Spain), and mooring location of the Urania Mella during the assays, and location of the MIROS radar used to measure wave height.

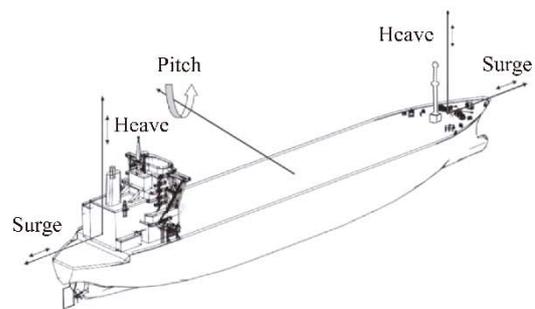


Fig. 10. Oscillation modes of the Urania Mella, measured in the assays.

The periods of the free waves may coincide with the eigen periods of the basin and the natural motion periods of the moored ship, producing harbour resonance and vessel movements amplification.

Finally at the southern part of the port there is a 2.5 km beach where cusp and rhythmic shoreline features have been detected.

The mooring configuration of the vessel was composed of 12 lines distributed in 4 headlines, 2 bow springs, 1 stern spring and 5 sternlines.

In this scenario, surge, heave and pitch were identified as three of the most limiting motions from the point of view of ship operations. This aspect was confirmed during the conversations maintained with different members of the crew.

These motions are illustrated in Fig. 10.

To measure these parameters with the proposed technique,

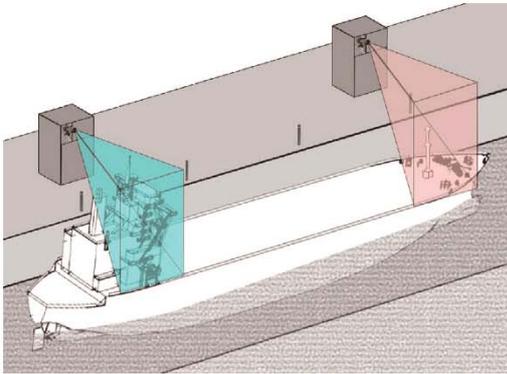


Fig. 11. Image acquisition scheme, the field of view and the location of the cameras used are represented in the image.



Fig. 12. Output of the stern camera during the assays. Selected features and corresponding displacement vectors are marked on the image.

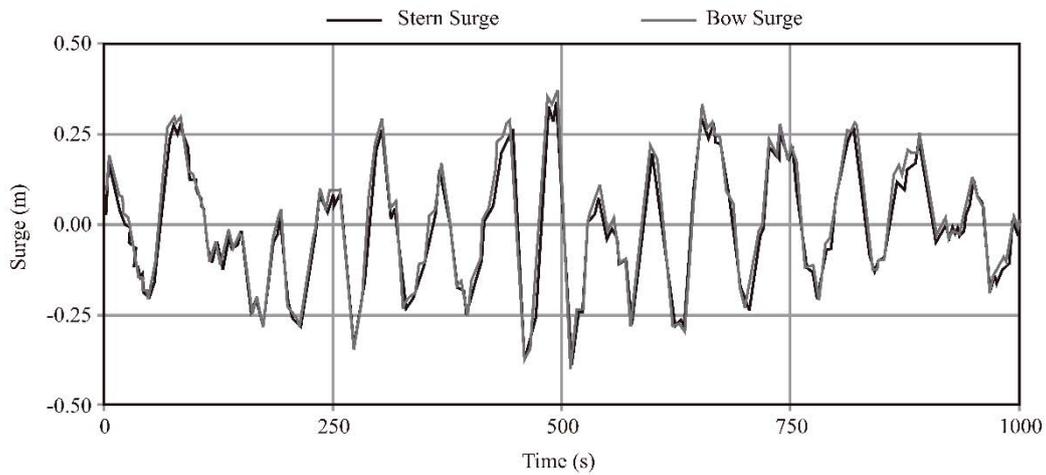


Fig. 13. A 1000 seconds duration sample of Surge measured in the bow and stern of the Urania Mella.

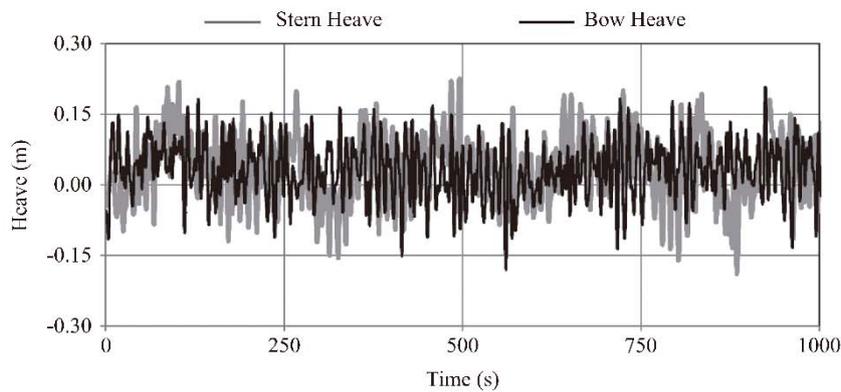


Fig. 14. A 1000 seconds duration sample of Heave measured in the bow and stern of the Urania Mella.

two digital cameras, isolated from atmospheric conditions and equipped with a remote control, were deployed in front of the bow and stern of the Urania Mella (Fig. 11). The positioning of a third camera taking pictures in the direction of the longitu-

dinal axis of the moored vessel would allow recording the other three movements (roll, sway and yaw). Unfortunately the berthing line geometry prevented the placement of this camera and these motions were not analyzed.

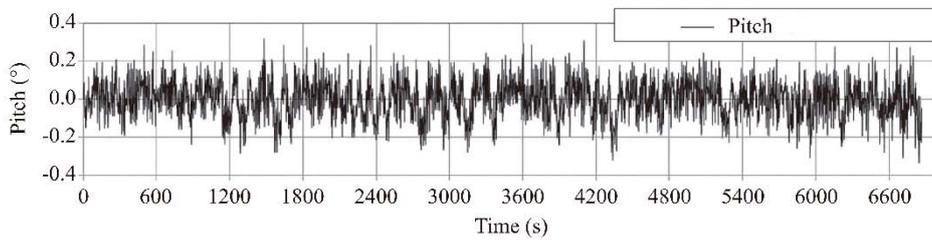


Fig. 15. Pitch calculated from differences in heave, for the Urania Mella.

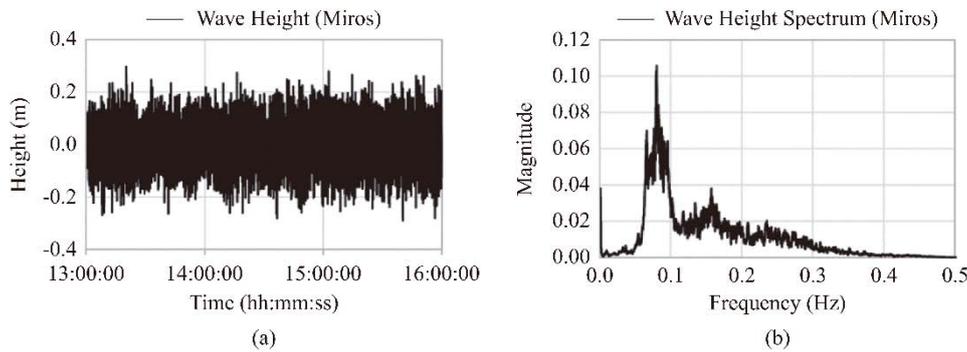


Fig. 16. Evolution of wave height (a), and wave height spectrum (b) measured with MIROS radar, which measures the free surface elevation.

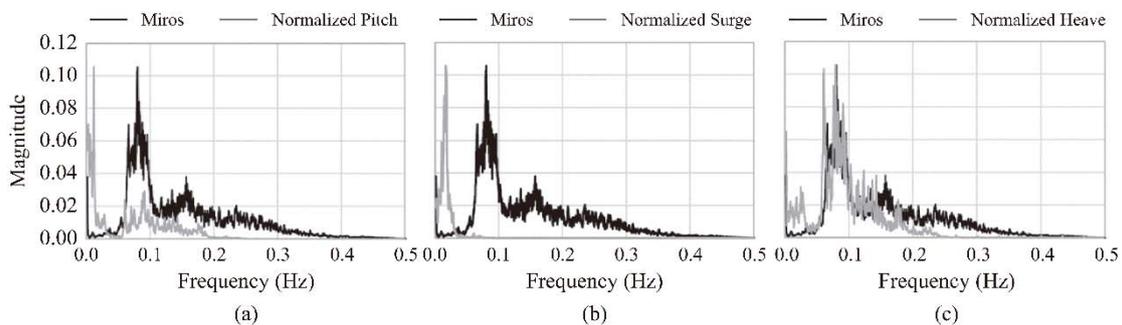


Fig. 17. Comparison between wave height spectrum (Miros) and Pitch spectrum (a), surge spectrum (b) and heave spectrum (c) measured with the proposed technique.

To measure the motion of the ship, as well as to calibrate the system, 6 control points were established in the Urania Mella (Fig. 12). The analysis of the displacement of the control points allowed calculating surge, heaving and pitching movements. The pictures were taken at established intervals along the day. A resolution of 4290×2800 px (12 Mpx) was used and the frequency of acquisition was 1 s.

The obtained results are shown in Fig. 13 and Fig. 14, where surge and heave are represented in meters measured in bow and stern regions of the ship.

Fig. 13 shows that surge measurements were almost identical in the bow and stern of the vessel, achieving both variables a correlation of 97.2%, an indication of very low measurements errors. These small differences are probably induced by the cameras reference frame distortion as a consequence of the yaw motion.

Conversely, the correlation of the two heave series was low (Fig. 14). The reason of these differences was weight and cargo variations and the time differences between waves reaching different points of the hull surface. This phenomenon produced a characteristic oscillation of the vessel, the pitch motion. Taking this into account, pitch was calculated from the differences in heave using trigonometry. The obtained values for pitch are shown in Fig. 15.

Finally, the obtained results were compared in the frequency domain with the wave heights measured near the Urania Mella with Miros radar located at the South part of the quay (Fig. 9). This high frequency vertical microwave radar provided sea level, tide and non-directional wave monitoring, with subcentimetric accuracy (± 5 mm). Fig. 16 shows the evolution of wave height during the monitoring time and its associated spectrum. The frequency analysis revealed two predominant peaks, the most

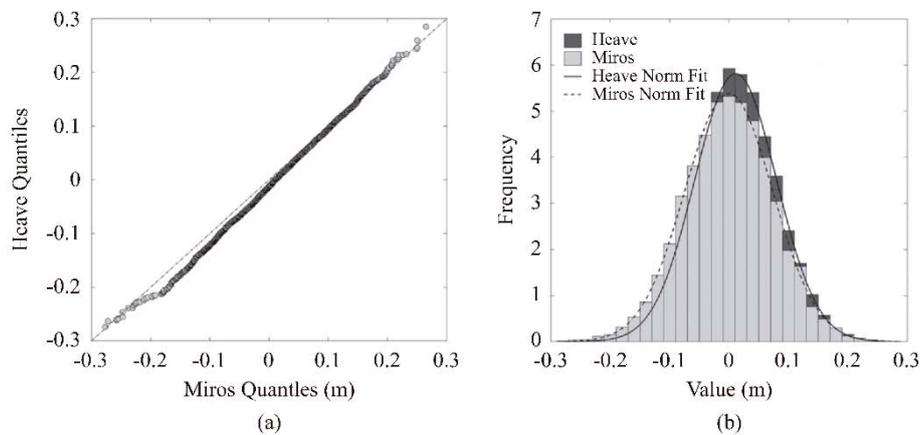


Fig. 18. QQplot (a) and Histogram-Normal PDF (b) of the heave and Miros series.

energetic (0.08 Hz) which corresponds to the peak wave period of 12.5 s, and an additional peak (0.157 Hz) associated to a period of 6.37 s, probably induced by the reflection effect of the first.

Observing Fig 17, it can be seen that the pitch movements of the ship had a frequency distribution similar to the obtained from wave elevations, with two clear peaks corresponding to oscillations of low frequency (period of 91.0 s) and high frequency (period of 11.1 s) which was close to the peak wave period. Surge, however, presented a frequency behavior not related with waves, presenting a single low frequency peak corresponding to an oscillation period of 59.7 s, and suggesting a complex oscillation behavior, probably induced by the mooring system, especially the bow and stern mooring springs which limit surge motion.

Regarding heave, the frequency distribution of this motion presented the highest similarity with the wave spectrum. Both series showed the same peak period (12.5 s). This result suggests that heave motion was closely related to wave height near the vessel. The correspondence between heave and Miros series was also analyzed comparing their quantiles. Results showed that both series came from the same type of distribution (Fig. 18(a)). Additionally, their normal probability distributions (PDF) were obtained and compared. As can be seen in Fig. 18(b), both PDFs are very similar, as occur in the frequency domain.

The obtained results validate the methodology applied to a complex real case, involving wave measurements in an outer port and ship movements. Further analysis is needed to improve the correlations between ship motions and their forcing agents.

IV. CONCLUSIONS

An optical system to study the displacements of a moored ship was designed. This system was based on the use of computer vision techniques to track feature points of the ship, allowing the measurement of the different oscillation modes of the vessel, without using expensive assemblies or on board devices.

The proposed technique was validated in laboratory conditions, comparing observed angular motions with the measurements provided by an IMU device. The results matched very satisfactorily with both techniques, showing the suitability and accuracy of the proposed approach.

Experiments in real field were conducted with the *Urania Mella*, an antipollution vessel moored in the Outer Port of A Coruña, in Punta Langosteira (Spain). During these assays, surge, heave and pitch were measured obtaining very promising results. In particular, heave motion recorded with the optical method showed a very satisfactory correspondence with the wave height measured by Miros Radar, both in frequency domain and in the magnitude of the registered values.

It is expected that this system may contribute to characterize the behavior of the moored ships inside the port, in order to establish limiting operation conditions, quantify the availability of the terminals, evaluate the meteorological forecast tools developed for the operation of the port, and finally establish a methodology to analyze the impact on operations of new port final layout and how to manage new traffics. Also, this system could be used as a real-time alert tool for the ship mooring security, through the simultaneous image transmission and processing.

In addition, the proposed technique can lead to establish a more effective way of evaluating berthing and mooring equipment of the terminals, analyzing new mooring systems to reduce the downtime of the terminals and to establish recommended mooring arrangements.

ACKNOWLEDGEMENTS

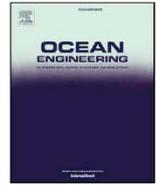
The authors wish to thank the Port Authority of A Coruña, *Aquática Ingeniería Civil* and *Siport21* for their cooperation and technical assistance, and the *Urania Mella* owners and crew for the facilities on board. The development of the artificial vision algorithm was partially funded by FEDER funds and Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness, R & D National Plan, within the projects CGL2012-34688 and BIA2017-86738-R.

REFERENCES

- Alderton, P. (2008). Port Management and Operations (Informa, London, United Kingdom).
- Ayub, S., A. Bahraminisaab and B. Honary (2012). A Sensor Fusion Method for Smart phone Orientation Estimation. In Proceedings of the 13th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting, Liverpool, England.
- Bay, H., Ess, A., T. Tuytelaars and L. Van Gool (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Comput. Vis. Image Underst.* 110, 346-359.
- Beck, R. F. and S. Liapis (1987). Transient motion of floating bodies at zero forward speed. *J. Sh. Res.* 31, 164-176.
- Bolles, R. C., H. H. Baker and M. Hannah (1993). The JISCT stereo evaluation. In Proceedings of the Image Understanding Workshop, Washington DC, Maryland, 263.
- Bont, J. De, W. Van Der Molen, J. Van Der Lem, H. Ligteringen, D. Mühlestein and M. Howie (2010). Calculations of the Motions of a Ship Moored With Moormaster TM Units. In Proceedings of the 32nd PIANC International Navigation Congress, Liverpool, United Kingdom, 622-635.
- Castaldo, F. and F. A. N. Palmieri (2014). Data fusion using a Factor Graph for ship tracking in harbour scenarios. In 23rd Workshop of the Italian Neural Networks Society, Salerno, Italy.
- Cummins, W. E. (1962). The impulse response function and ship motions. In Symposium on Ship Theory, Hamburg, Germany.
- Finkelstein, A. B. (1957). The initial value problem for transient water waves. *Commun. Pure Appl. Math.* 10, 511-522.
- Ge, S. S., C. Y. Sang and B. Voon Ee How (2011). Dynamic Positioning System for Marine Vessels. In The Impact of Control Technology, T. Samad, and A.M. Annaswamy, eds. (IEEE Contr), 137*138.
- González-Marco, D., J. P. Sierra, O. Fernández de Ybarra and A. Sánchez-Arcilla (2008). Implications of long waves in harbor management: The Gijón port case study. *Ocean Coast. Manag.* 51, 180-201.
- Grifoll, M., A. Fontán, I. Ferrer, J. Mader, M. González and M. Espino (2009). 3D hydrodynamic characterisation of a meso-tidal harbour: The case of Bilbao (northern Spain). *Coast. Eng.* 56, 907-918.
- Hannah, M. J. (1974). Computer Matching of Areas in Stereo Images. PhD. Thesis, Stanford University.
- Herbers, T. H. C., S. Elgar and R. T. Guza (1995). Generation and propagation of infragravity waves. *J. Geophys. Res.* 100, 24863.
- Hu, J.-H., S.-S. Xu, H.-L. Chen and Z. Zhang (2009). Detection of ships in harbor in remote sensing image based on local self-similarity. *J. Image Graph.* 14, 591-597.
- Malheiros, P., P. R. Santos, A. P. Moreira, P. Costa, F. V. Gomes and F. T. Pinto (2009). Robust and real-time motion capture of rigid bodies based on stereoscopic vision. In 3rd International Conference on Integrity, Reliability and Failure, Porto, Portugal.
- Malheiros, P., P. Rosa-Santos, J. Gonçalves, P. Costa, A. Paulo Moreira, F. Veloso-Gomes and F. Taveira-Pinto (2013). Real-time tracking system for a moored oil tanker: A Kalman filter approach. In Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems, A. Azevedo, ed. (Springer Heidelberg), 749-760.
- Phuong, N. H. Q., H. J. Kang, Y. S. Suh and Y. S. Ro (2009). A DCM Based Orientation Estimation Algorithm with an Inertial Measurement Unit and a Magnetic Compass. *J. Univers. Comput. Sci.* 15, 859-876.
- Pina, G. G. and R. I. Alonso (1993). Análisis crítico de los sistemas de atraque de buques (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Gabinete de Formación y Documentación).
- Rabinovich, A. B. (2009). Seiches and Harbour Oscillations. In Handbook of Coastal and Ocean Engineering, C. K. Young, ed. (World Scientific Publishing Co., Singapore), 193-236.
- Rodríguez, A., J. R. Rabuñal, J. L. Perez and F. Martínez-Abella (2012). Optical Analysis of Strength Tests Based on Block-Matching Techniques. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 27, 573-593.
- Sammartino, S., J. C. S. Garrido, J. Delgado, C. Naranjo, F. C. Aldeanueva and J. G. Lafuente (2014). Experimental and numerical characterization of harbor oscillations in the port of Málaga, Spain. *Ocean Eng.* 88, 110-119.
- Tuytelaars, T. and K. Mikolajczyk (2008). Local Invariant Feature Detectors: A Survey. *Found. Trends Comput. Graph. Vis.* 3, 177-280.
- Uzaki, K. ichi, N. Matsunaga, Y. Nishii and Y. Ikehata (2010). Cause and countermeasure of long-period oscillations of moored ships and the quantification of surge and heave amplitudes. *Ocean Eng.* 37, 155-163.
- Wehausen, J. V. (1967). Initial-value problem for the motion in an undulating sea of a body with fixed equilibrium position. *J. Eng. Math.* 1, 1-17.
- Weng, J., P. Coher and M. Herniou (1992). Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.* 14, 965-980.
- Woodman, O. J. (2007). Introduction to Inertial Navigation (Computer Laboratory, University of Cambridge).
- Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, Kerkyra, Greece.

Artículo III

Operational thresholds of moored ships at the oil terminal of inner port of A Coruña (Spain)



Operational thresholds of moored ships at the oil terminal of inner port of A Coruña (Spain)



Andres Figuero^{a,*}, Jose Sande^a, Enrique Peña^a, Alberto Alvarellos^b, Juan R. Rabuñal^c, Enrique Maciñeira^d

^a Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), Universidade da Coruña, Campus Elviña S/n, 15071, A Coruña, Spain

^b Centre for Research of Information and Communication Technologies (CITIC), Universidade da Coruña, Campus Elviña S/n, 15071, A Coruña, Spain

^c Department of Computer Science, Universidade da Coruña, Campus Elviña S/n, 15071, A Coruña, Spain

^d Port Authority of A Coruña, Avenida de La Marina 3, 15001, A Coruña, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Operational conditions
Port downtimes
Moored ships
Ship motions
Maritime conditions
Field campaigns

ABSTRACT

Minimizing the stay of a vessel in port can lead to improvements in harbor efficiency. Currently, downtimes of cargo operations or their performance reduction because of excessive vessel motion are especially relevant. This work aims to evaluate the operational conditions of moored vessels in the inner port of A Coruña (Spain), comparing them with motion thresholds established by international standards for cargo operations. To this end, motions of 19 ships were monitored. Data analysis revealed large angular motions, particularly roll and yaw, including amplitudes that exceeded the limiting criteria of the standards in most of the analyzed vessels, with no registered downtime. Regarding linear movements, heave and surge recorded lower amplitudes compared to the values of standard thresholds. The specific behavior of each vessel was analyzed in terms of its size, maritime conditions, and mooring location. Field campaigns such as those performed in this work are an effective way of analyzing the operational conditions of ports, which could help in identifying problems in the mooring zone.

1. Introduction

Improving the port efficiency involves reducing costs related to cargo handling operations. These are affected by the dynamic behavior of moored vessels. When a ship experiences large movements, negative consequences can occur. These include decrease in operation efficiency, breaking of mooring lines, or even damages to the vessel and port facilities. Excessive motions are usually caused by wave action and related phenomena, such as long waves or harbor resonance (González-Marco et al., 2008; Kwak and Pyun, 2013; Sakakibara et al., 2001).

A widely used tool to characterize the dynamic behavior of moored vessels is the small-scale physical model, which can reproduce in simplified form the characteristics of ships, mooring arrangement, and the wave, wind, and currents loads. However, to make this instrument reliable, an intensive calibration process and accurate model construction are required. Different methodologies and modeling technologies are described by Cornett (2014). Physical models have been used to analyze, among others, the effects of mooring tension and fender stiffness on the response of moored vessels (Rosa-Santos et al., 2014; Taveira Pinto et al., 2008) and to optimize the design of berthing zones in port facilities (Baker et al., 2016; Davies et al., 2001).

Recently, numerical modeling studies have gained much research attention. Numerical models can reproduce the behavior of moored ships and evaluate their movements and mooring loads with an acceptable computational cost. Several researchers have used this approach for their research (Bont et al., 2010; van der Molen et al., 2015). Moreover, the combination of numerical and physical models has also been used, such as in the study by Taveira Pinto et al. (2008), to integrate the advantages of both methods. However, these tools, especially physical models, have the disadvantage of not reproducing the variations that ships experience in the position of their centers of gravity during the cargo operation, or changes in the initial pretension of mooring lines, which can explain certain dynamic patterns.

The evaluation of the real response of a moored vessel is a less explored field. The authors could only find few examples in the literature in which a real ship was monitored during its stay in port (Jensen et al., 1991; López and Iglesias, 2014). Most of the existing data come from observations of port operators and, as mentioned previously, from physical and numerical simulations.

For years now, several institutions have recognized the need for updating the operational limits established by national and international standards (PIANC, 1995; Puertos del Estado, 2011) in order to

* Corresponding author.

E-mail address: andres.figuero@udc.es (A. Figuero).

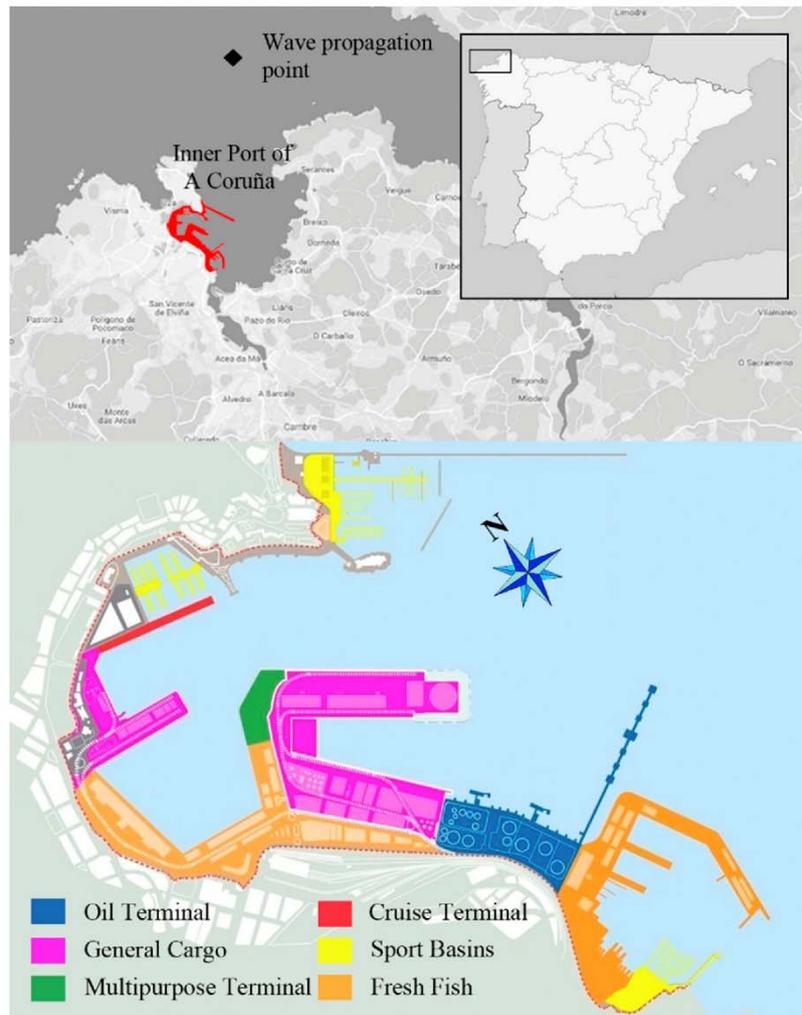


Fig. 1. Location and general layout of the inner port of A Coruña (Spain). The wave propagation point used in this study is highlighted in the upper part.

adapt them to the new requirements of modern ports and their cargo handling equipment. In this context, the aim of the present study is to evaluate if the movement thresholds proposed by PIANC (1995) and the Spanish standard ROM 2.0–11 (Puertos del Estado, 2011) for loading and unloading operations, are applicable to the facilities of the inner port of A Coruña (Spain). The monitoring of different types of vessels during their stay in port is proposed as an essential tool to achieve this goal.

2. Case study: inner port of A Coruña

The inner port of A Coruña is located inside the city of A Coruña, in the northwest part of Spain (Fig. 1). The port has a strategic geographical situation, being located in the main international maritime routes between the north of Europe, the Mediterranean and Africa, and between Western Europe and America. It is a multipurpose complex that constitutes the first industry of the city. The facilities comprise an oil terminal with four jetties, different docks for loading/unloading of dry bulks and general cargoes, a container terminal with a capacity of 2330 TEUs and mooring zones for cruise ships and leisure vessels (Fig. 1). The entrance to the port is protected by a 1330 m long rubble-mound breakwater, so-called the Barrie de la Maza Breakwater.

This study focuses on the evaluation of vessel movements that



Fig. 2. Analyzed mooring locations (white rectangles).

operate in the 1st, 2nd, and 3rd jetty of the oil terminal, and in the San Diego dock, which is used for the loading and unloading of general cargo ships (Fig. 2).

Table 1

Study fleet (sorted by type and descending amplitudes of roll motion), deadweight tonnage (DWT), overall length, mooring location, and mooring configuration (bow lines - bow breast lines - bow springs - stern springs - stern breast lines - stern lines) of each analyzed ship.

Ship name	Type	DWT (t)	Length (m)	Mooring location	Mooring config.
Scali del Teatro - III	Gas tanker	3600	88.4	1 st jetty	3-0-3-3-0-3
Scali Reali	Gas tanker	3600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Scali del Teatro - I	Gas tanker	3600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Maingas	Gas tanker	3932	96.6	2 nd jetty	3-0-2-2-0-3
Matthew	Gas tanker	3600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Scali del Teatro - II	Gas tanker	3600	88.4	2 nd jetty	3-0-3-3-0-3
Habip Bairak	Chemical tanker	8400	123.6	1 st jetty	3-0-3-3-0-3
Sichem Singapore - I	Chemical tanker	13,141	128.6	2 nd jetty	3-0-2-2-0-3
Sichem Singapore - II	Chemical tanker	13,141	128.6	1 st jetty	3-0-2-2-0-3
RC Behar	Chemical tanker	5600	107.6	2 nd jetty	3-0-2-2-0-3
Castillo de Trujillo	Chemical tanker	30,583	182.1	2 nd jetty	4-0-3-3-0-4
Nave Sextans	Chemical tanker	51,200	183.1	2 nd jetty	4-0-2-2-0-4
Acacia Noir	Chemical tanker	5895	105.5	San Diego Dock	2-0-1-1-0-2
Banda Sea	Oil tanker	105,576	237.7	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
Nissos Serifos	Oil tanker	115,500	249.0	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
SKS Saluda	Oil tanker	159,438	274.2	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
Marianna V.V	Oil tanker	84,999	239.0	3 rd jetty	4-2-2-2-2-4
Eems Exe	General cargo	3800	88.6	San Diego Dock	2-0-1-1-0-2
Esky	General cargo	3675	88.2	San Diego Dock	2-0-1-1-0-2

3. Methodology

3.1. Study fleet

During the field campaign carried out between spring 2015 and autumn 2015 to winter 2016, 19 vessels of four different types were monitored (six gas tankers, four oil tankers, seven chemical tankers, and two general cargo ships), with a mean stay in port from 0.5 to 1.5 days (Table 1). In this period, vessels were instrumented to analyze their motions during the cargo operation. Some of the ships were studied several times during the field campaign, in different loading and unloading cycles, e.g., *Sichem Singapore* chemical tanker (named as I and II) or *Scali del Teatro* gas tanker (named as I, II, and III); both were monitored twice and three times, respectively. The ships' position

within the port and the usual mooring arrangement of each berthing zone are shown in Fig. 3. As can be observed, vessels moored at the 1st and 2nd jetties have an auxiliary stern line tended to a small mooring buoy. Its main function is to facilitate the unmooring maneuver of the vessel in emergency situations, and does not contribute to the ship stability during the cargo operation.

In line with the aim of the study, selected vessels were monitored under adverse weather conditions, i.e., during situations of yellow meteorological alert according to the forecast criteria of the Port Authority of A Coruña (Table 2).

Table 3 presents the worst concomitant maritime conditions (significant wave height H_s , peak wave period T_p , and wind speed W_c) registered outside the port during the monitoring period of each vessel. These data were obtained from the official Spanish wave propagation

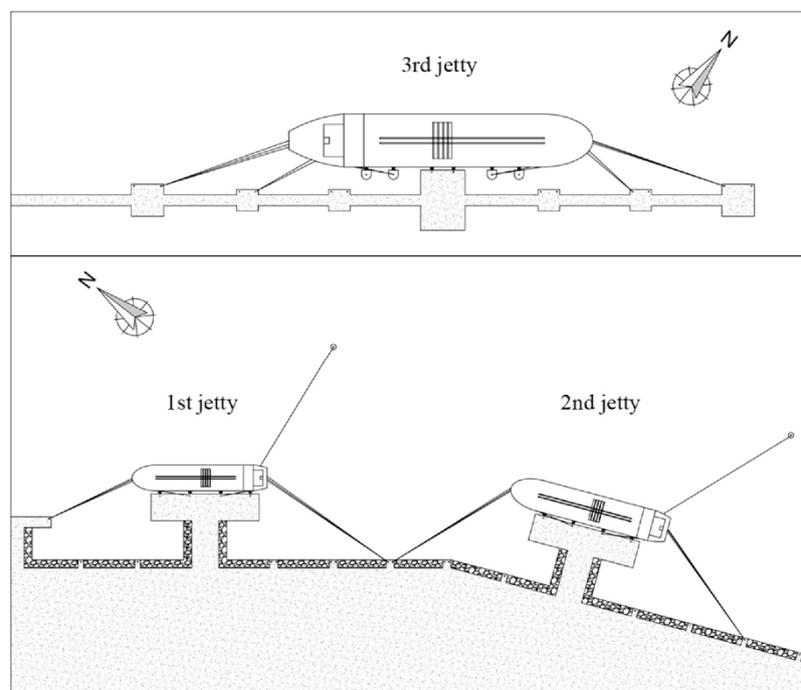


Fig. 3. Schematic representation of positions and the mooring arrangement employed in each jetty of the oil terminal.

Table 2
Meteorological alert thresholds applicable to A Coruña port facilities.

Parameters	Meteorological alert levels		
	Green	Yellow	Red
Significant wave height H_s (m)	< 3.5	≥ 3.5	≥ 7.0
Wind speed W_s (km/h)	< 45	≥ 45	≥ 70

network (Puertos del Estado, Autoridad Portuaria de A Coruña, 2017). This network provides time series of wave parameters from the real-time propagation of data measured by the outer network of wave buoys of the Spanish National Port Authority “Puertos del Estado,” to points of interest on the coast. In this work, data from the propagation point CORUÑA (43° 24′ 48″ N 08° 23′ 00″ W) located 4.8 km off the main breakwater of the inner port of A Coruña were used.

3.2. Analysis of vessel motions

A moored vessel has six degrees of freedom, divided into three rotations and three translations. Roll, pitch, and yaw are the rotations around the longitudinal, transverse, and vertical axes of the ship, respectively, and surge, sway, and heave are the corresponding translations in these axes.

In this work, five of these six motions were analyzed (roll, pitch, yaw, surge, and heave) using two different methodologies. An inertial measurement unit (IMU) integrated by three different sensors (gyroscopes, accelerometers, and magnetometers) was used to study angular motions. This device was installed inside the bridge of each monitored vessel (Fig. 4) allowing a continuous recording of roll, pitch, and yaw with a sampling rate of 4 Hz. Details about the calibration process of the measurement technique can be found in the study by Figuero et al. (2018b).

The analysis of surge and heave movements was carried out using image tracking techniques. To this end, two high resolution digital cameras were installed in front of the stern and bow of each vessel (Fig. 5), taking images with a frequency of 1 Hz. These images were processed using a block-matching algorithm to obtain heave and surge motions. Several control points were selected and analyzed in the field of view of cameras. This strategy has also been applied in other works such as that of Figuero et al. (2018a), where the procedure is explained

Table 3

Worst concomitant maritime conditions (significant wave height H_s , peak wave period T_p , wave direction Dir (North direction = 0°) and average wind speed W_s) registered outside the port during the monitoring period of each vessel.

Ship name	Type	Mooring location	Worst maritime conditions			
			H_s (m)	T_p (s)	Dir (°)	W_s (km/h)
Scali del Teatro - III	Gas tanker	1 st jetty	4.9	15.1	315.0	24.8
Scali Reali	Gas tanker	2 nd jetty	2.5	12.8	325.0	12.8
Scali del Teatro - I	Gas tanker	2 nd jetty	4.1	10.7	326.0	43.2
Maingas	Gas tanker	2 nd jetty	4.9	16.0	310.0	25.7
Matthew	Gas tanker	2 nd jetty	1.1	11.4	323.0	8.8
Scali del Teatro - II	Gas tanker	2 nd jetty	1.8	15.0	320.0	22.2
Habip Bairak	Chemical tanker	1 st jetty	3.7	12.8	302.0	12.8
Sichem Singapore - I	Chemical tanker	2 nd jetty	–	–	–	26.5
Sichem Singapore - II	Chemical tanker	1 st jetty	3.7	17.6	319.0	28.1
RC Behar	Chemical tanker	2 nd jetty	2.3	12.6	300.0	14.3
Castillo de Trujillo	Chemical tanker	2 nd jetty	2.9	12.5	321.0	10.4
Nave Sextans	Chemical tanker	2 nd jetty	3.9	15.6	314.0	35.7
Acacia Noir	Chemical tanker	San Diego Dock	–	–	–	60.4
Banda Sea	Oil tanker	3 rd jetty	3.9	14.9	308.0	25.6
Nissos Serifos	Oil tanker	3 rd jetty	–	–	–	52.9
SKS Saluda	Oil tanker	3 rd jetty	2.7	12.9	311.0	5.3
Marianna V.V	Oil tanker	3 rd jetty	1.0	14.0	308.0	4.3
Eems Exe	General cargo	San Diego Dock	–	–	–	45.7
Esky	General cargo	San Diego Dock	1.8	13.7	334.0	37.3



Fig. 4. IMU installed inside the vessel.

in detail. This technique is one of the most utilized tool for estimating movements of objects in different fields (Robertson et al., 2014; Xu et al., 2015).

Using the synchronized combination of both methodologies (IMU and cameras), the time series of angular motions ($\theta_{roll}(t)$, $\theta_{pitch}(t)$, and $\theta_{yaw}(t)$) and displacements ($\delta_{heave}(t)$ and $\delta_{surge}(t)$) are obtained. Fig. 6 shows a 1 h sample of each analyzed motion.

For safety reasons, in facilities such as oil terminals, the use of conventional laser devices such as laser distance meters employed by the research group to determine sway movements in similar projects (Peña et al., 2017) are not allowed. Thus, the analysis of this motion could not be addressed in this work.

3.3. Data analysis

The analysis of motion time series was based on a zero crossing technique, having as reference the initial position of the ship. A peak-to-peak criterion was applied to each movement to obtain their amplitudes (PIANC, 1995): A_i (°) for rotations and L_i (m) for translations.

The entire time series were split into blocks of 1200 s duration, obtaining the maximum motion amplitude (A_{max} or L_{max}), mean motion

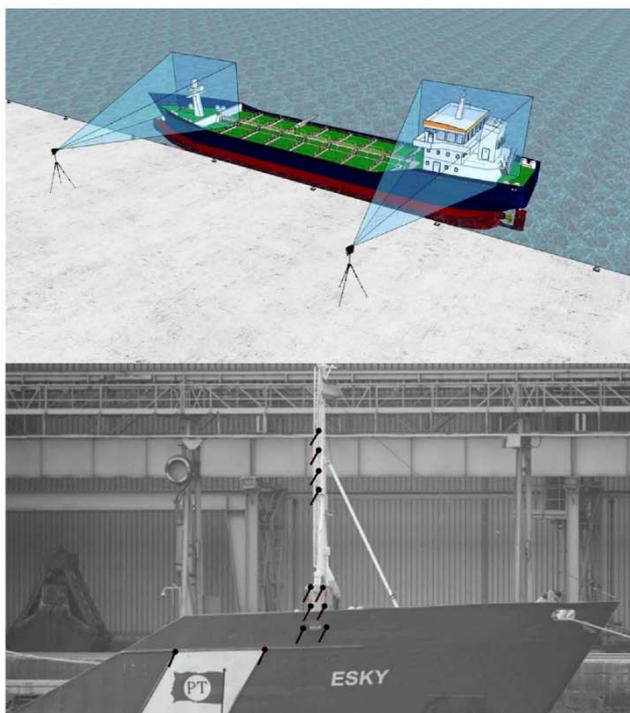


Fig. 5. Image acquisition scheme and layout of cameras on the dock (top image). Output of the bow camera of Esky general cargo ship. Selected control points and corresponding displacement vectors are represented in black marks (bottom image).

amplitude (A_m or L_m), and significant motion amplitude (A_s or L_s) calculated as the average of the highest third of each block.

For rotations:

$$A_s(^{\circ}) = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} A_i \quad (1)$$

For displacements:

$$L_s(m) = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} L_i \quad (2)$$

Additionally, the maximum, mean, and significant amplitudes of the entire measurement period were obtained for each oscillation.

The registered values of movements were compared with the maximum values of the safe working conditions proposed by the Spanish standard ROM 2.0–11 and the PIANC (1995) (Fig. 7).

These thresholds were selected among those recommended by both publications depending on the ship type and cargo handling equipment. In this work, the same limiting motion criterion was applied to gas and chemical tankers because both ship categories had similar dimensions and used the same cargo equipment.

Tables 4 and 5 present the motion amplitude thresholds applied to each ship type.

Additionally, the time series were analyzed in the frequency domain. The power spectrum of the complete record of each movement was obtained by the application of a fast Fourier transform. Data were divided into a long-period component (LF) and a short-period component (SF), using a threshold frequency of 0.04 Hz (oscillation period of 25 s). For each frequency band, the associated peak period was obtained (T_{LF} and T_{SF}) and the most energetic was also identified. This information allowed determining which frequency band was more relevant for each motion (Fig. 8).

4. Results and discussion

In this study, 19 vessels were monitored to analyze the operational conditions in the inner port of A Coruña (oil terminal facilities and San Diego dock) under adverse wave climate conditions (weather alert situations). Two different methodologies (IMU and cameras) were used to characterize five of the six degrees of freedom of a moored ship. Furthermore, relations between vessel motions and their meteorological forcings were analyzed (significant wave height H_s and peak wave period T_p outside the port).

4.1. Vessel movements and comparison with existing operational thresholds

Roll and yaw registered the largest amplitudes of angular motions, with a maximum of $A_{max}^{roll} = 10.3^{\circ}$ and $A_{max}^{yaw} = 5.4^{\circ}$, respectively (*Scali del Teatro* gas tanker). During the field campaign, 13 of the 19 monitored ships experienced amplitudes of roll that exceeded both the PIANC (1995) and ROM 2.0–11 thresholds (Table 6). It should be noted that in six of these vessels, not only the maximum values of roll exceeded the limits established in these publications, but also the significant values, with no downtime registered (Table 6).

Figs. 9 and 10 show the maximum, significant, and mean amplitudes of roll motion recorded during cargo operation in two of these six vessels (*Scali del Teatro - III* and *Scali Reali* gas tankers). As can be observed, even the mean values of roll were above the limiting criteria of the recommendations during a large part of the cargo operation.

Regarding yaw, this behavior was also observed although less frequently than roll. In five of the analyzed vessels, the maximum yaw amplitude exceeded the proposed thresholds, and in two of them (*Scali del Teatro - I* and *Maingas* gas tankers), also the significant value (Table 6).

Pitch motion recorded the lowest amplitudes of angular movements in all analyzed vessels. Maximum and significant amplitudes of pitch reached values of 1.1° and 0.6° , respectively (*Eems Exe* general cargo ship), both significantly below the limiting criteria of the recommendations (Table 6).

It is important to note that the mentioned cases in which angular movements exceeded the recommended thresholds (especially roll and yaw motions) were mainly registered by gas tankers and small chemical tankers (up to 130 m length) moored at the 1st and 2nd jetties. In contrast, oil tankers moored at the 3rd jetty experienced the smallest motions, with amplitudes below 1° . Figs. 11 and 12 show the maximum and significant value of each angular movement recorded by these vessels during their loading operation. As can be seen, the smallest ships have experienced considerably larger angular movements than the oil tankers, especially gas tankers, which reached extremely high values of roll and yaw.

The influences of maritime conditions and mooring location on the particular behavior of some vessels are analyzed in section 4.2.

As regards the linear movements, surge motion registered larger amplitudes than heave motion, especially in gas and chemical tankers (Table 7), with maximum values of $L_{max}^{surge} = 2.20$ m (*Maingas* gas tanker) and $L_{max}^{heave} = 1.00$ m (*Scali del Teatro - III* gas tanker), respectively.

As with angular motions, gas tankers and small chemical tankers registered the largest linear motions (Table 7). However, surge and heave amplitudes did not frequently record values above the maximum proposed in ROM 2.0–11 and PIANC (1995) for safe working conditions. Only two of the analyzed vessels (*Sichem Singapore - II* chemical tanker and *Maingas* gas tanker) registered amplitudes of surge that are close to these thresholds (Figs. 13 and 14), with no downtime registered.

The previously mentioned vessels (*Maingas* and *Scali del Teatro - III*) presented a similar pattern in the vertical plane, registering the highest heave and surge movements in this study (Fig. 15a and b). Apart from being ships of similar sizes, they were also subjected to the worst

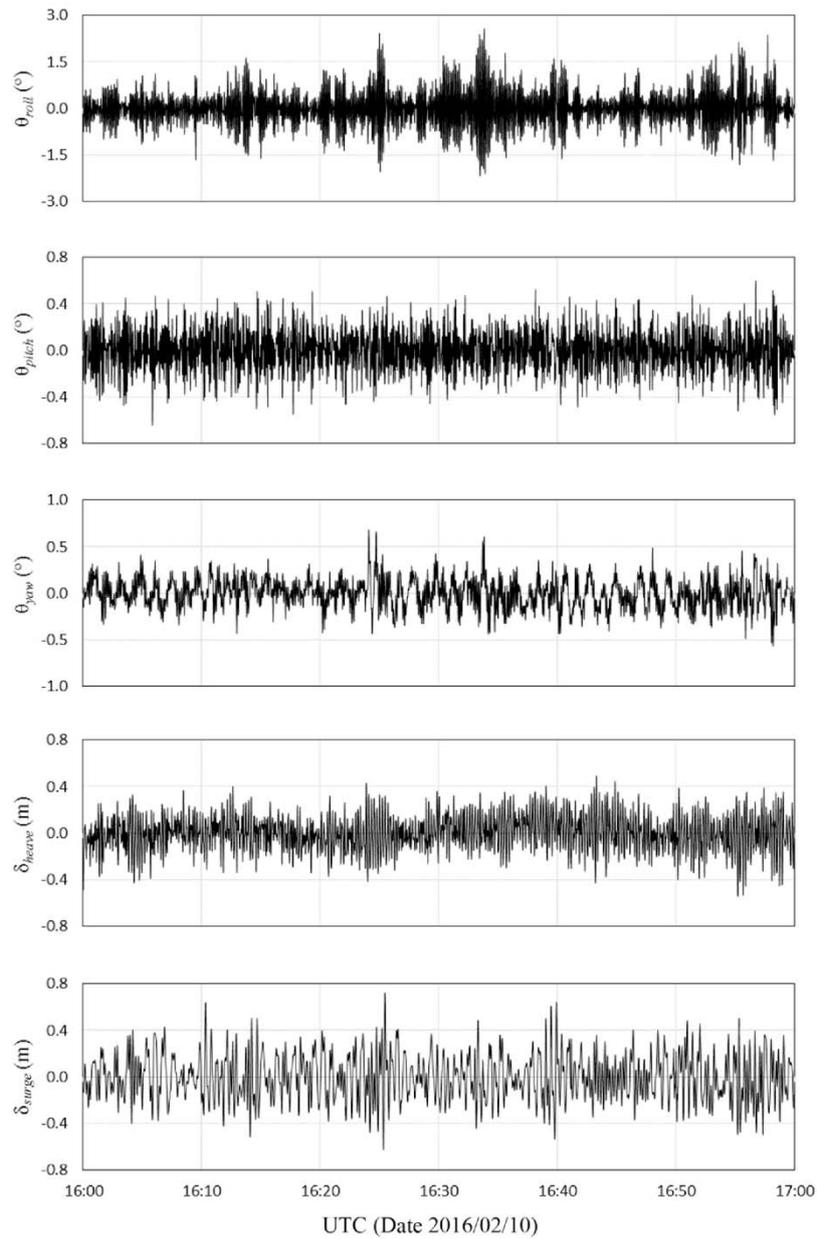


Fig. 6. A 1 h duration sample of motion time series recorded during the cargo operation of a representative vessel.

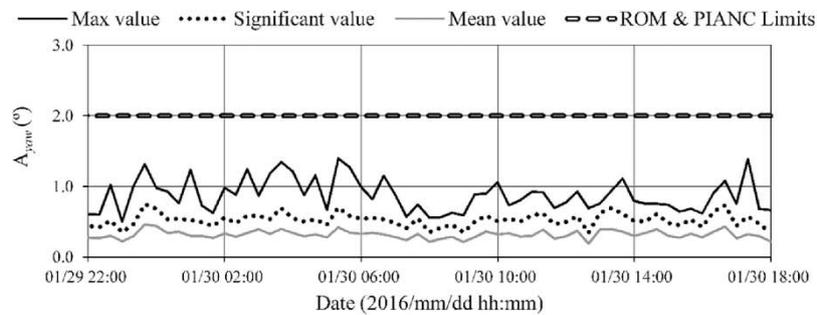


Fig. 7. Maximum, significant, and mean amplitudes of yaw motion of a representative vessel during the cargo operation.

Table 4
PIANC (PIANC, 1995) maximum recommended motion amplitudes for safe working condition.

Ship Type	Cargo handling equipment	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)	Heave (m)	Surge (m)
Oil tankers	Loading arms	–	–	–	–	3.0
Gas tankers	Loading arms	2	2	2	–	2.0
General cargo	–	5	2	3	1.0	2.0

maritime conditions, with combinations of significant wave height and peak wave period outside the port from up to 4.9 m and 16.0 s, respectively. This fact could explain their behavior, especially the large surge movements, with values close to the PIANC limit, related to the high peak wave period (as will be confirmed afterward).

Fig. 15c and d shows a comparison between the vertical plane response of a gas tanker (*Scali Reali*) and an oil tanker (*SKS Saluda*), both with similar maritime conditions during their cargo operation (Table 3). As can be observed, large vessels (Fig. 15d) presented a more restricted motion pattern.

The results obtained in this study show that the angular motions are not the determining factors of downtimes in these facilities. Although roll and yaw motions recorded maximum and significant amplitudes that are larger than standard thresholds (Fig. 11), no interruptions in cargo operations were registered. Considering the vessel type (tankers and general cargo ships) and cargo handling equipment employed in the port (loading arms and conveyor belts), downtimes will probably be induced by large linear movements of moored ships (heave, surge, and sway). In this study, surge and heave motions remained below the limiting movement thresholds (Table 7). Thus, this fact may explain the absence of motion-induced operational interruptions.

Regarding the limiting criteria of the consulted standards (PIANC, 1995; Puertos del Estado, 2011), the results indicate that thresholds of angular motions are extremely restrictive for the characteristics of these vessels and port facilities. The analyzed ships were able to operate normally, although their angular motions recorded important amplitudes during operation time, especially the gas and chemical tankers moored at the 1st and 2nd jetties. It is important to note that both criteria represent generic values applicable to facilities worldwide. This general application makes exceptions possible. The development of similar studies carried out in different ports, including wave climate measurements inside the port, would provide comparable results that could help to particularize the limiting criteria according to the characteristics of each port facility (outer or inner ports, size of vessels, maritime conditions, etc.).

4.2. Influence of maritime conditions and mooring location on vessel motions

In addition, during the field campaign, sea conditions outside the port were obtained from the Spanish wave propagation network. Significant wave heights (H_s) and peak wave periods (T_p) of each sea state were compared with the significant amplitudes of vessel motions obtained during the same period (sea states of 1-h duration) in order to analyze the existing relations between these variables. Despite its importance on ship motions, the long wave and wind effects were not analyzed in this study due to the lack of information and reliable data both outside the port and near the mooring zones. However, the

correlation between the amplitudes of each motion and the product of the wave parameters outside the port ($H_s T_p$), which was used as an estimator coefficient of the long-period wave heights (Hiraiishi et al., 1997), was determined to evaluate the influence of long waves on the vessel behavior.

Fig. 16 shows the evolution of the significant wave height outside the port compared with significant heave motions of all vessels measured during the field campaign, which are one of the least restricted movements by the mooring system. The comparison shows an acceptable relation that allows developing a more detailed analysis of the entire complex system.

After confirming in the previous results that the vessels presented a different motion pattern (Figs. 11 and 12), they were classified in two groups according to their size (small and large ships) to conduct this correlation study.

First, the relation between the movements of the gas tankers and chemical tankers from up to 130 m length and its forcing agents (H_s and T_p) was analyzed. This type of tankers showed a good linear relation with the wave height and the peak wave period, especially pitch, heave, and surge movements, whose correlation values are indicated in Table 8.

As can be observed, the pitch and heave presented a high correlation with the wave height outside the port, exposing the influence of this parameter as stimulating of both movements as well as the less restriction imposed by the mooring system (Fig. 17a and Fig. 17b). Probably, this relation would have been even higher with the wave height data inside the port, which encourages recommending specific hydrodynamic field campaigns that can help improve the analysis. Regarding the relation to the peak wave period and the $H_s T_p$ coefficient, the surge movement presented the highest correlation values in this study (Fig. 17c and d). Results showed the influence of the peak wave period on this movement, especially the incoming waves with periods higher than 14 s, which are related to the largest surge motions.

The dispersion patterns showed by each motion are related to the differences between the elements that composed the mooring ship system, in particular, the berthing location and mooring pretension. The mooring configuration can also play a relevant role, but not here, because nearly all ships had the same scheme (Table 1, section 3.1). Some of the vessels moored at the 1st jetty (Fig. 12, section 4.1) showed different behaviors. The *Scali del Teatro - III* gas tanker registered the highest value for roll, whereas the *Habip Bairak* and *Sichem Singapore - II* chemical tankers showed a lower value. These three vessels had similar yaw values and maritime conditions, and all of them were partially protected by the opposite dock; hence, the explanation of the large roll motions could be found in *Scali del Teatro - III*, which is the smallest.

The vessels moored at the 2nd jetty showed clear differences with the previous case. An example can be found in the behavior of the *Scali Reali*, *Scali del Teatro - I*, and *Maingas* gas tankers. Although they

Table 5
ROM 2.0–11 (Puertos del Estado, 2011) maximum recommended motion amplitudes for safe working condition.

Ship Type	Cargo handling equipment	Roll (°)	Pitch (°)	Yaw (°)	Heave (m)	Surge (m)
Oil tankers	Loading arms	–	–	–	–	7.0
Gas tankers	Loading arms	2	2	2	–	4.0
General cargo	–	5	2	3	1.0	2.0

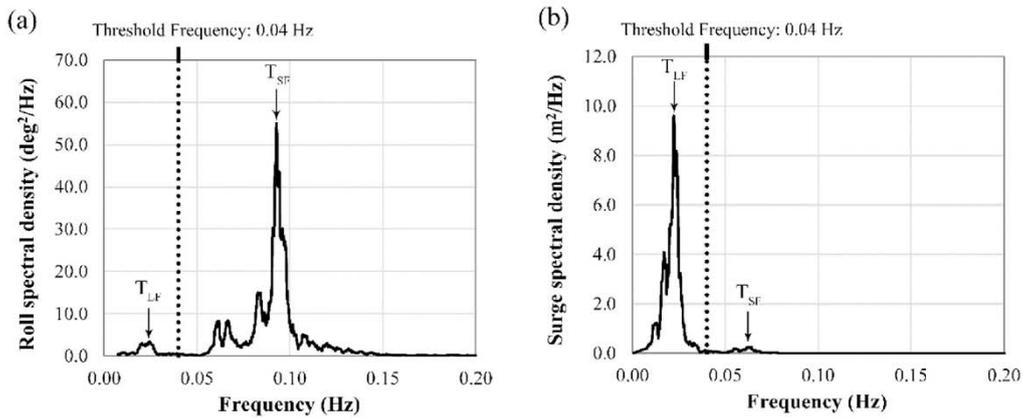


Fig. 8. Sample of the power spectrum of (a) roll and (b) surge motions of a representative vessel.

Table 6

Maximum and significant amplitude of angular motions recorded during the entire measurement period and motion limiting criteria for each vessel.

Type	Ship Name	Roll (°)		Pitch (°)		Yaw (°)		PIANC Limits (°)			ROM Limits (°)		
		A _{max}	A _s	A _{max}	A _s	A _{max}	A _s	A _{Roll}	A _{Pitch}	A _{Yaw}	A _{Roll}	A _{Pitch}	A _{Yaw}
Gas tankers	Scali del T. - III	10.3	4.2	0.8	0.4	1.4	0.5				2.0		
	Scali Reali	7.6	3.4	0.5	0.3	3.6	1.7				2.0		
	Scali del T. - I	7.4	2.9	0.8	0.4	5.4	2.5				2.0		
	Maingas	6.8	2.8	1.0	0.4	5.6	3.1				2.0		
	Matthew	6.0	2.1	0.4	0.1	2.5	0.7				2.0		
	Scali del T. - II	4.3	1.3	0.6	0.3	1.2	0.4				2.0		
Chemical tankers	Habip Bairak	4.7	2.1	1.0	0.4	1.8	0.8				2.0		
	Sichem S. - I	3.9	1.8	0.5	0.3	3.2	1.4				2.0		
	Sichem S. - II	3.8	1.7	0.9	0.4	1.6	0.7				2.0		
	RC Behar	3.3	1.1	0.4	0.2	0.6	0.2				2.0		
	Castillo de T.	4.4	1.8	0.6	0.3	0.9	0.4				2.0		
	Nave Sextans	3.2	1.4	0.3	0.1	1.1	0.5				2.0		
Acacia Noir	2.6	1.1	0.9	0.5	1.7	0.7				2.0			
Oil tankers	Banda Sea	1.0	0.4	0.6	0.3	0.4	0.2	–	–	–	–	–	–
	Nissos Serifos	0.7	0.3	0.2	0.1	0.2	0.1	–	–	–	–	–	–
	Marianna V.V	0.4	0.2	0.4	0.2	0.7	0.2	–	–	–	–	–	–
	SKS Saluda	0.6	0.3	0.2	0.1	0.6	0.3	–	–	–	–	–	–
General cargo	Eems Exe	4.7	2.1	1.1	0.6	0.9	0.4	5.0	2.0	3.0	5.0	2.0	3.0
	Esky	2.9	1.3	0.4	0.3	1.7	0.6	5.0	2.0	3.0	5.0	2.0	3.0

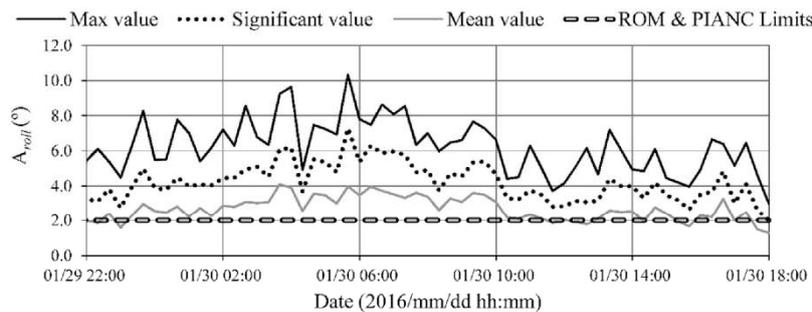


Fig. 9. Maximum, significant, and mean amplitudes of roll angular motion of Scali del Teatro - III gas tanker during cargo operation.

registered similar values of roll, reaching the maximum amplitudes for this location, the yaw motion of Maingas gas tanker experienced a different pattern: only this vessel showed larger significant yaw motions than roll (Fig. 12, section 4.1). While these vessels had similar sizes and the same mooring location, Maingas gas tanker was exposed to larger wave heights and periods, and a different incident wave direction of up to 15° (Table 3, section 3.1), which may justify its unique behavior.

Despite these differences and taking into consideration the

correlation values between motions and wave parameters (Table 8), three linear regression models were constructed to estimate pitch, heave, and surge responses of vessels moored at the 1st and 2nd jetties. Linear models were adjusted with 60% of the obtained data and were validated with the remaining 40%. Eqs. (3)–(5) indicate the structure of each estimator and their explanatory variables.

$$A_{Estimated\ Pitch} = b_1 \cdot H_s + b_2 \cdot T_p + b_0 \tag{3}$$

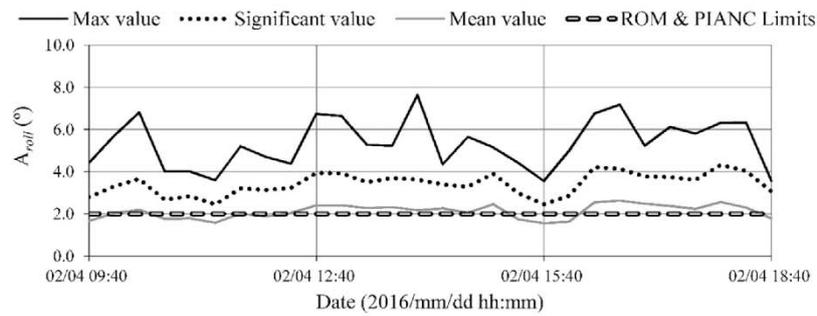


Fig. 10. Maximum, significant, and mean amplitudes of roll angular motion of *Scali Reali* gas tanker during cargo operation.

$$L_{Estimated\ Heave} = c_1 \cdot H_s + c_2 \cdot T_p + c_0 \tag{4}$$

$$L_{Estimated\ Surge} = d_1 \cdot H_s \cdot T_p + d_0 \tag{5}$$

Results are shown in Table 9 and Fig. 18. As can be observed, the pitch, heave, and surge estimators provided reasonable prediction values with root mean square errors (RMSEs) of 0.056°, 0.057 m, and 0.129 m, respectively. These results, although being an initial approximation calculated with a simplified method and, without considering other factors that affect the behavior of moored vessel (size, mooring, wind, etc.), show the potential application of regression models as a useful tool for predicting risk situations and operational downtimes in ports.

The analysis of the relations between motions and wave parameters was repeated using the data of large vessels. The results showed lower correlation values than the ones obtained from small vessels, especially in the case of angular movements (Table 10).

The linear movements showed the highest correlation values within this vessel group. However, only the heave movement presented a linear relation with the wave height outside the port (Fig. 19a). This linear relation was already shown by the small vessels.

The obtained correlation values and the small number of available data did not allow the construction of reliable linear regression models for estimating large vessel motions.

The different behaviors among vessels of different sizes, in the amplitude of registered movements and its relation to the forcing agents (especially the angular movements), is due not only to the vessels size, but also to the different characteristics of the set ship-mooring system. As a clear difference from the smallest ships, the oil tankers present a mooring configuration with more lines and higher initial pretension.

This restricts the vessel movement capacity, which reduces the amplitude of its movements and modifies its oscillation mode. The orientation of the mooring locations (Fig. 2), is also another determining factor of this different behavior, particularly in the case of the roll movement amplitudes registered by the small vessels (moored at the 1st and 2nd jetties), to which the diffracted waves affect transversely.

Additionally, the complete time-series of each motion were analyzed in the frequency domain to obtain the peak oscillation periods of the vessels. Furthermore, the obtained results were compared with the peak wave periods provided by the Spanish wave propagation network. As previously mentioned, despite its importance on the ship motions, the long wave effects were not analyzed due to the lack of wave data with enough sampling interval to conduct a frequency-domain analysis.

In general, the power spectra showed a predominant frequency peak (Fig. 8). The oscillation periods associated with those predominant frequency peaks varied depending on the vessel motion. The obtained values were in the range of the following intervals: $T_{Roll} = 6.0\text{--}17.2\text{ s}$, $T_{Pitch} = 6.6\text{--}14.6\text{ s}$, $T_{Yaw} = 10.4\text{--}68.8\text{ s}$, $T_{Heave} = 10.8\text{--}16.8\text{ s}$, and $T_{Surge} = 25.2\text{--}98.0\text{ s}$ (Table 11).

As can be observed in Table 11, vertical plane motions (roll, pitch, and heave) registered shorter oscillation periods than those of the horizontal plane (yaw and surge). These results suggested that yaw and especially surge were governed by the low-frequency band that can be excited in many ports as a consequence of long-period waves. Conversely, the short-frequency band was more relevant for roll, pitch, and heave motions, which are directly excited by short-period waves. This influence on the vertical plane motions was more significant in the heave motion. Not only the values of peak wave period and heave oscillation period during the monitoring time were similar, as with pitch

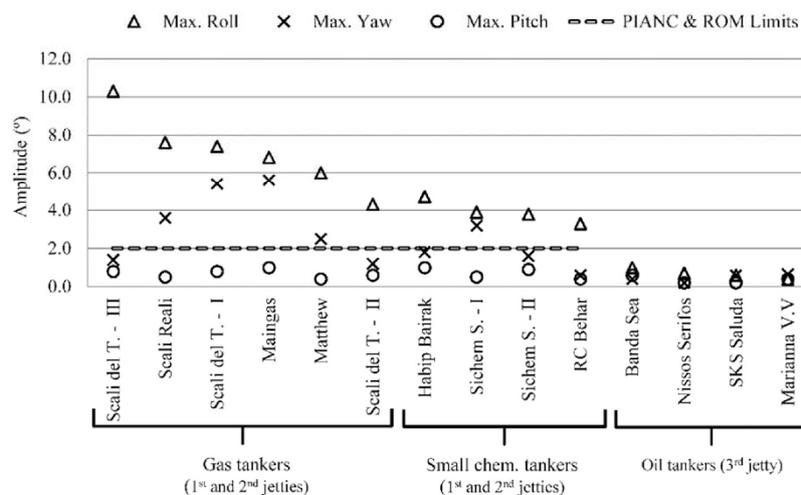


Fig. 11. Comparison between the maximum amplitudes of angular movements recorded by small gas and chemical tankers, oil tankers, and the PIANC and ROM 2.0–11 motion thresholds.

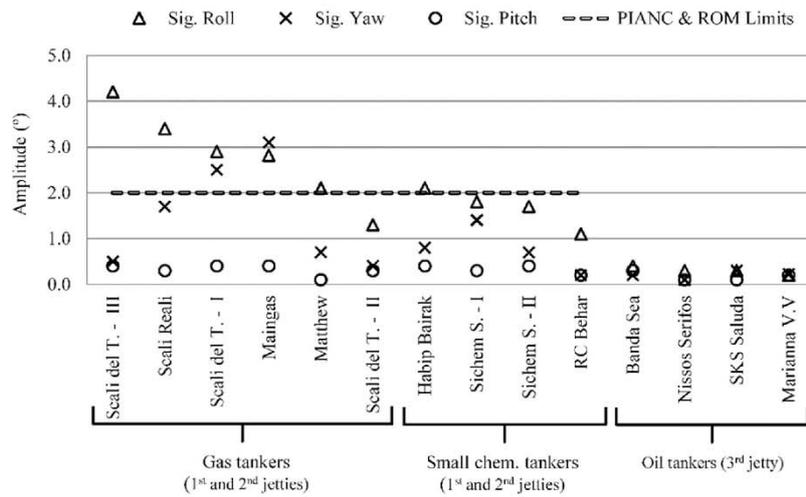


Fig. 12. Comparison between significant amplitudes of angular movements recorded by small gas and chemical tankers, oil tankers, and the PIANC and ROM 2.0–11 motion thresholds.

Table 7

Maximum and significant amplitude of linear motions recorded during the entire measurement period and limiting criteria for each vessel.

Type	Ship Name	Heave (m)		Surge (m)		PIANC Limits (m)		ROM Limits (m)	
		L _{max}	L _s	L _{max}	L _s	L _{leave}	L _{Surge}	L _{leave}	L _{Surge}
Gas tankers	Scali del T. - III	1.00	0.50	1.55	0.60	–	2.0	–	4.0
	Scali Reali	0.65	0.30	0.70	0.30	–	2.0	–	4.0
	Scali del T. - I	0.60	0.30	1.20	0.40	–	2.0	–	4.0
	Maingas	0.86	0.43	2.20	1.13	–	2.0	–	4.0
	Matthew	0.35	0.20	0.25	0.12	–	2.0	–	4.0
	Scali del T. - II	0.35	0.15	0.60	0.20	–	2.0	–	4.0
Chemical tankers	Habip Bairak	0.75	0.35	1.30	0.5	–	2.0	–	4.0
	Sichem S. - I	0.55	0.25	0.40	0.20	–	2.0	–	4.0
	Sichem S. - II	0.45	0.25	2.00	0.75	–	2.0	–	4.0
	RC Behar	0.40	0.15	0.55	0.25	–	2.0	–	4.0
	Castillo de T.	0.30	0.10	1.10	0.45	–	2.0	–	4.0
	Nave Sextans	–	–	–	–	–	2.0	–	4.0
	Acacia Noir	–	–	–	–	–	2.0	–	4.0
Oil tankers	Banda Sea	–	–	–	–	–	3.0	–	7.0
	Nissos Serifos	–	–	–	–	–	3.0	–	7.0
	Marianna V.V	0.14	0.05	0.05	0.03	–	3.0	–	7.0
	SKS Saluda	0.20	0.10	0.15	0.10	–	3.0	–	7.0
General cargo	Fsky	0.40	0.20	1.10	0.45	1.0	2.0	1.0	2.0
	Eems Exe	0.85	0.45	1.75	0.8	1.0	2.0	1.0	2.0

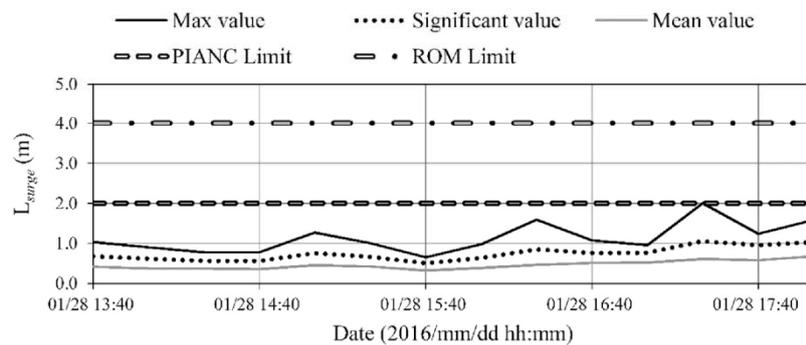


Fig. 13. Maximum, significant, and mean amplitudes of surge motion of *SicheM Singapore - II* chemical tanker during cargo operation.

and roll, but also a strong linear relation between both values was identified, especially in the case of gas tankers and small chemical tankers (Fig. 20).

Moreover, an approximation of surge natural periods of four representative vessels in the study fleet (3800 DWT gas tanker, 13,000 DWT chemical tanker, 30,000 DWT chemical tanker, and 115,000 DWT

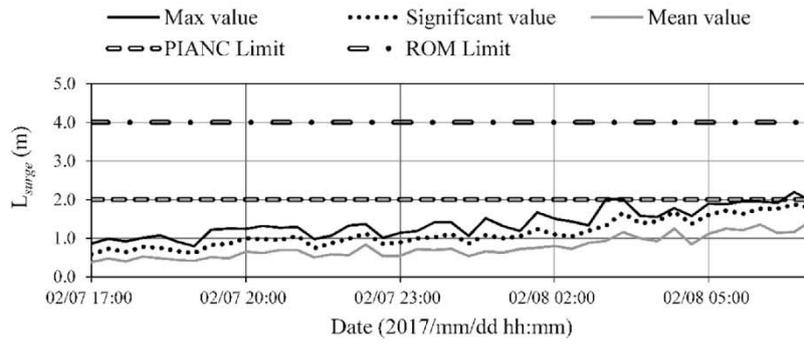


Fig. 14. Maximum, significant, and mean amplitudes of surge motion of *Maingas* gas tanker during cargo operation.

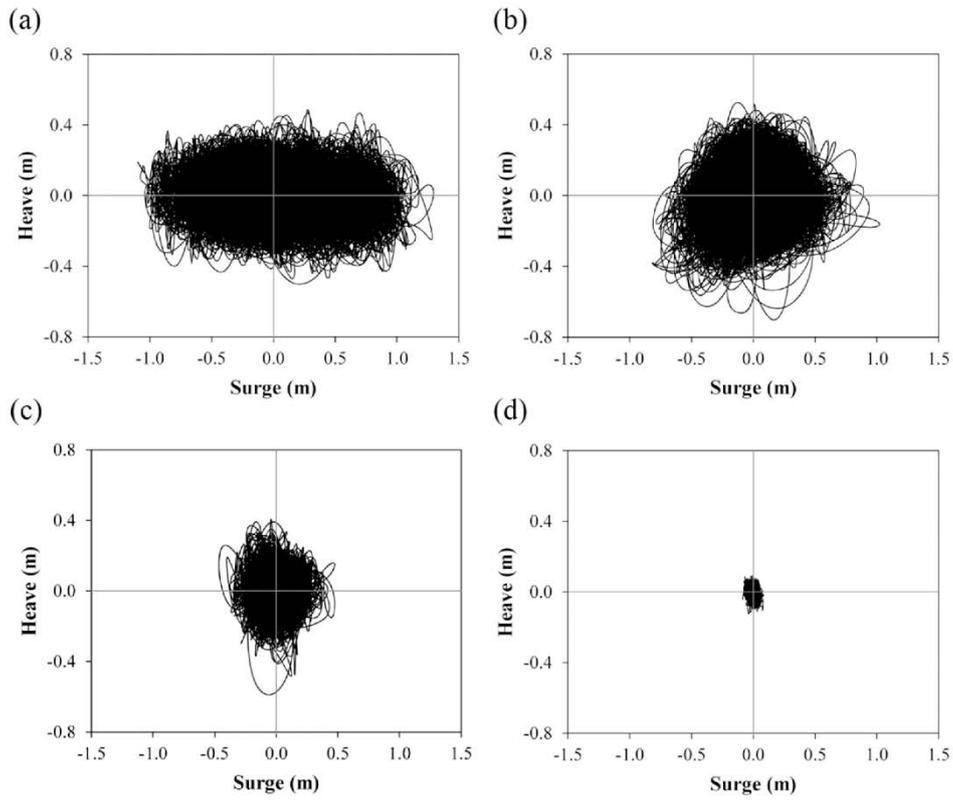


Fig. 15. Vertical plane response (surge–heave) of (a) *Maingas* gas tanker, (b) *Scali del Teatro - III* gas tanker, (c) *Scali Reali* gas tanker, and (d) *SKS Saluda* oil tanker during their cargo operation.

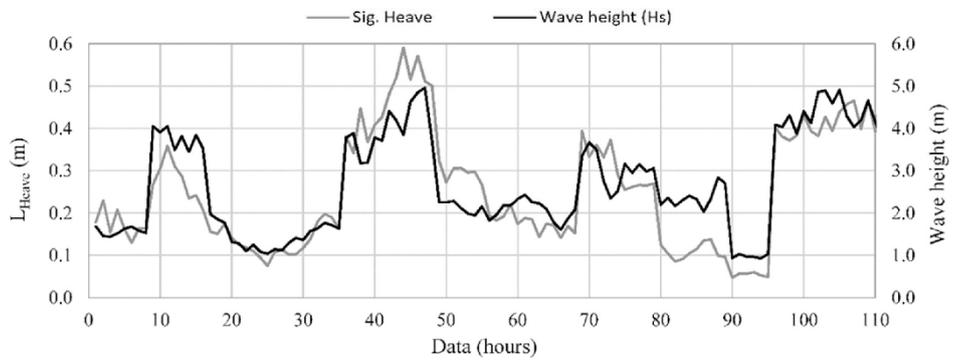


Fig. 16. Evolution of significant wave height outside the port compared with significant heave motions measured during the field campaign.

Table 8
Pearson correlation coefficients of gas and small chemical tanker motions with wave height and peak wave period outside the port.

Motion	Maritime condition outside the port		
	Hs	Tp	Hs·Tp
Sig. Roll	0.64	0.35	0.59
Sig. Pitch	0.86	0.66	0.84
Sig. Yaw	0.63	0.45	0.55
Sig. Heave	0.87	0.65	0.89
Sig. Surge	0.76	0.73	0.90

oil tanker) has been performed to compare their values with the results obtained in the frequency analysis. The estimation of the natural period of surge (T_{nSurge}) has been made considering the moored vessel as an ordinary mass-spring system:

$$T_{nSurge} = 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{M}{K} \right)^{1/2} \tag{6}$$

where M (t) represents the displacement of the vessel and K (kN/m) represents the total spring constant of mooring lines in the surge motion direction (only the spring, head, and stern line contribution are considered).

Two different loading conditions (ballasted and loaded) and two expected line stiffness (maximum and minimum) were considered to obtain the T_{nSurge} bandwidth of each vessel type (Table 12).

The obtained results are presented in Table 13. By comparing T_{nSurge} values with those obtained in the frequency analysis, it can be observed that only *Sichem Singapore (I and II)* and *Habip Bairak* chemical tankers (13,141 DWT and 8400 DWT, respectively) registered surge oscillation periods within their natural frequency band (Tables 11

Table 9
Regression model coefficients and validation parameters, R-square and root mean square error (RMSE).

Model	Coefficients			Validation	
				R-square	RMSE
Pitch	b_0	b_1	b_2	0.770	0.056°
	-0.033	0.09	0.006		
Heave	c_0	c_1	c_2	0.801	0.057 m
	-0.093	0.076	0.012		
Surge	d_0	d_1		0.762	0.129 m
	-0.042	0.013			

and 13), and only one of them (*Sichem Singapore II*) recorded large amplitudes of surge that are close to 2.0 m. These results could explain the absence of large surge motions in most of the analyzed vessels.

The oscillation periods of a moored ship depend on multiple parameters, such as the berthing location, motion forcings (maritime conditions and wind), loading condition, or mooring configuration. Changes of these parameters can generate variations in those periods even in the same ship. An example can be found in the results of the estimation of surge natural periods. Modifications of the loading condition or the line stiffness generated changes of up to 20 s in the obtained values, and this variation is greater in large vessels. In addition, these effects can be observed in *Sichem Singapore* and *Scali del Teatro* vessels, both monitored twice and three times, respectively, in different loading cycles and berthing locations (1st and 2nd jetties). These vessels experienced changes in their oscillation periods, being more relevant in the yaw and surge, probably due to the more complex behavior and the significant influence of the mooring system on the horizontal motions.

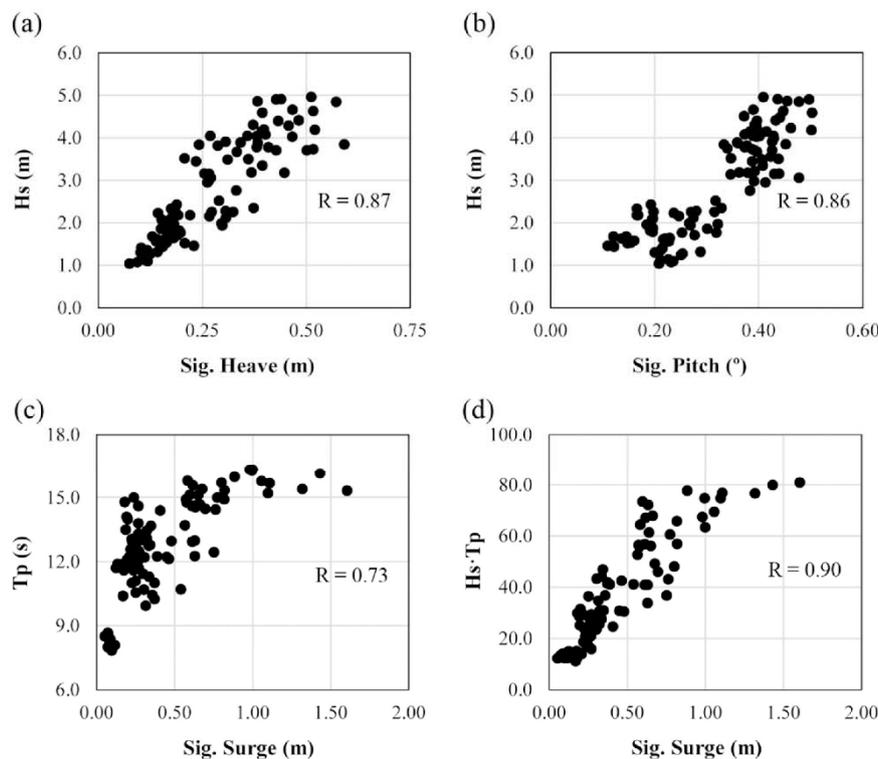


Fig. 17. Scatter plots of (a)–(b) significant heave and pitch motions vs. significant wave height (H_s) outside the port and (c)–(d) significant surge motion vs. peak wave period (T_p) outside the port and the product $H_s \cdot T_p$ of the gas and small chemical tankers.

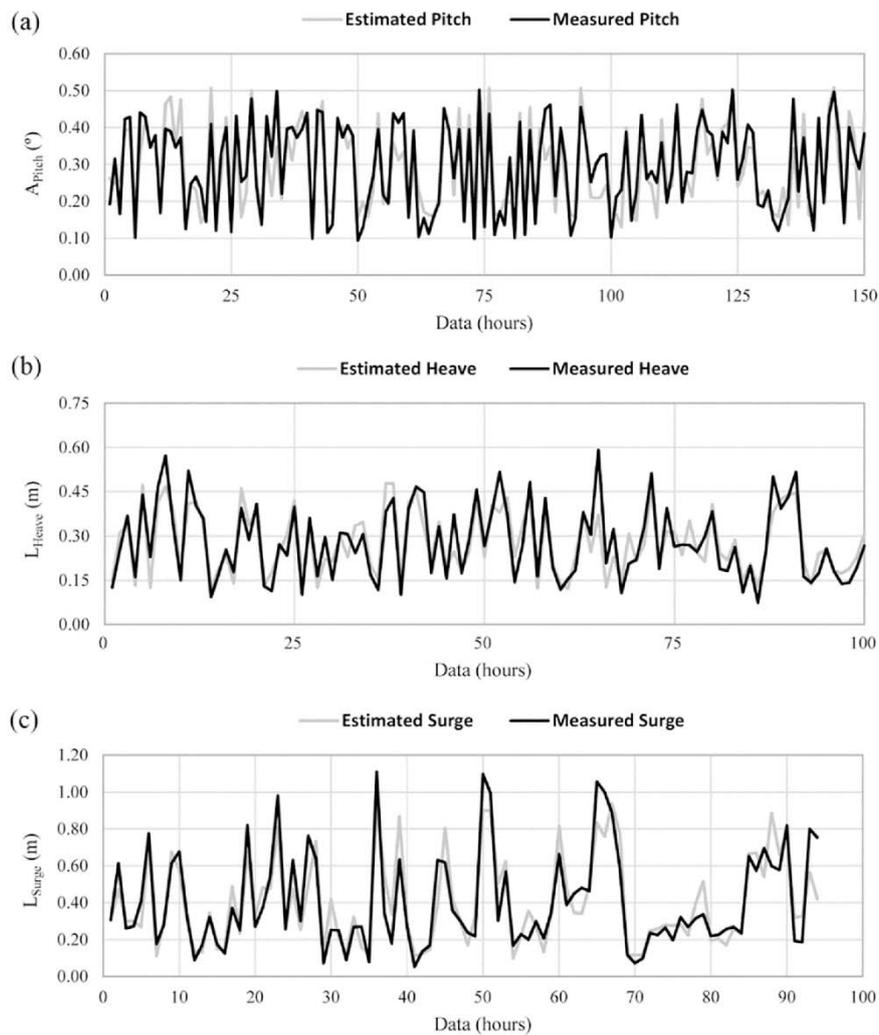


Fig. 18. Measured vs. estimated values of (a) pitch, (b) heave, and (c) surge motions.

Table 10
Pearson correlation coefficients of large vessel motions with wave height and peak wave period outside the port.

Motion	Maritime condition outside the port		
	Hs	Tp	Hs-Tp
Sig. Roll	0.17	0.29	0.19
Sig. Pitch	0.41	0.16	0.57
Sig. Yaw	0.12	0.03	0.25
Sig. Heave	0.81	0.62	0.79
Sig. Surge	0.61	0.56	0.61

5. Conclusions

This paper presents the results of a field campaign carried out in the inner port of A Coruña (Spain) for evaluating and comparing the real motions of moored vessels with the safe movement thresholds defined by international standards and to determine if they are applicable to these facilities. The campaign was developed between spring to autumn 2015 and winter 2016 to record the movements of 19 vessels of four different categories (gas tankers, oil tankers, chemical tankers, and general cargo ships) moored at the oil and general cargo terminals of this port during their loading and unloading operations, in adverse wave conditions.

The data analysis revealed large angular motions, especially roll and yaw, including amplitudes exceeding the limiting criteria for safe working conditions of the standards in 13 of the 19 analyzed ships. Despite these large amplitudes, ships could operate normally with no downtime or any consequence affecting safety. These results suggest that thresholds for angular motions represent conservative values for the characteristics of the port analyzed, and therefore, they could be adapted. During the study execution, no downtime was recorded; thus, new thresholds could not be defined.

Regarding linear movements, heave and surge remained at tolerable values in all analyzed ships, which recorded lower amplitudes compared to the standard thresholds. Only two of the analyzed vessels registered surge values that are close to the limits. As with angular motions, the largest movements were found in gas tankers and small chemical tankers of up to 130 m length moored at the 1st and 2nd jetties of the oil terminal facilities. These results could explain the absence of downtimes despite the large angular motions, suggesting that cargo interruptions would be induced by large linear motions.

Additionally, an integrated analysis of maritime conditions and berthing locations with vessel movements was carried out. Motions showed a good linear relation with significant wave height and peak period outside the port. Differences between the response of small and large vessels were induced by the higher motion restriction introduced by the mooring system of large vessels and the different orientation of

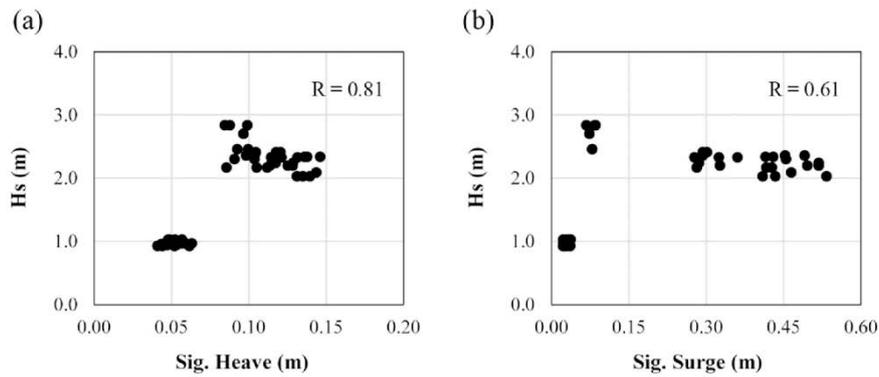


Fig. 19. Scatter plots of (a) significant heave and (b) surge motions vs. significant wave height (H_s) outside the port of large oil tankers.

Table 11

Peak oscillation periods of each motion and average peak wave period outside the port during monitoring time.

Type	Ship Name	Peak oscillation periods of each motion					Avg. T_{p_Buoy} (s)
		T_{Roll} (s)	T_{Pitch} (s)	T_{Yaw} (s)	T_{Heave} (s)	T_{Surge} (s)	
Gas tankers	Scali del Teatro-III	16.1	7.5	32.9	15.0	43.0	14.6
	Scali Reali	14.0	6.2	14.0	14.1	49.3	13.0
	Scali del Teatro-I	17.2	11.4	15.7	11.2	32.6	10.6
	Maingas	11.0	8.6	47.4	16.5	68.6	15.6
	Matthew	12.5	5.7	60.0	11.6	25.2	11.3
	Scali del Teatro-II	16.5	8.3	40.7	16.8	37.7	13.2
Chemical tankers	Habip Bairak	12.6	12.6	12.6	11.4	45.8	12.5
	Sichem Singapore I	10.8	7.4	11.0	14.9	35.9	–
	Sichem Singapore II	10.5	10.7	10.4	13.6	43.8	12.9
	Rc Behar	11.9	12.3	11.6	13.1	36.6	12.4
	Castillo de Trujillo	11.8	13.2	37.6	10.8	98.0	13.5
	Nave Sextans	10.7	9.3	41.6	–	–	16.4
Acacia Noir SD	9.7	10.3	68.0	–	–	–	
Oil tankers	Banda Sea	11.8	14.6	11.8	–	–	14.9
	Nissos Serifos	10.6	10.6	10.3	–	–	–
	SKS Saluda	12.4	11.4	12.4	10.8	49.9	11.8
General cargo	Eems Exe	8.0	6.9	38.5	13.6	44.6	–
	Esky	6.0	6.6	37.3	14.3	42.9	12.2

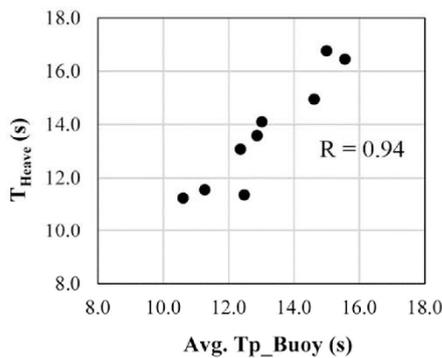


Fig. 20. Scatter plot of peak oscillation periods of heave motion (T_{Heave}) vs. the average peak wave period (T_{p_Buoy}) outside the port during monitoring time of the gas and small chemical tankers.

their mooring locations. Finally, three linear regression models were constructed to estimate the pitch, heave, and surge responses of vessels moored at the 1st and 2nd jetties using wave parameters outside the port (H_s and T_p) as variables. Adjusted estimators showed reasonable

Table 12

Ship and mooring parameters.

DWT	Displacement (t)		Mooring lines	
	Ballasted	Loaded	MBL (kN)	N
3800	3908	6010	320	12
13,000	10,588	17,472	500	10
30,000	24,414	40,690	500	12
115,000	63,632	134,346	900	12

prediction values with RMSEs of 0.056°, 0.057 m, and 0.129 m, respectively. These results, although being an initial approximation, show the potential application of regression models as a useful tool to predict risk situations and operational downtimes in ports.

Field campaigns, such as those performed in this work, complemented with wave climate analysis, contribute to evaluate real limiting operation conditions in a specific terminal and their results may lead to establish new limiting criteria according to the characteristics of the port facility. Furthermore, they could be used as an effective tool for assessing the improvement that a specific mooring system could have on port safety and operability.

Table 13
Estimated bandwidth of surge natural oscillation period of each vessel type.

3800 DWT Gas tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
Spring constant TnSurge (s)	stiff <i>K</i> 15	soft <i>K</i> 21	stiff <i>K</i> 18	soft <i>K</i> 26
13,000 DWT Chemical tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
Spring constant TnSurge (s)	stiff <i>K</i> 29	soft <i>K</i> 41	stiff <i>K</i> 38	soft <i>K</i> 53
30,000 DWT Chemical tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
Spring constant TnSurge (s)	stiff <i>K</i> 46	soft <i>K</i> 65	stiff <i>K</i> 59	soft <i>K</i> 84
115,000 DWT Oil tanker				
Loading condition	Ballasted		Loaded	
Spring constant TnSurge (s)	stiff <i>K</i> 45	soft <i>K</i> 63	stiff <i>K</i> 65	soft <i>K</i> 92

Acknowledgments

This research was funded by the Spanish Ministry of Economy, Industry, and Competitiveness, R&D National Plan, within the project BIA2017-86738-R.

The authors wish to thank the staff of Port Authority of A Coruña and Repsol Maritime Terminal for their cooperation. Moreover, the authors are grateful to the owners and crew of the vessels for their collaboration on board.

References

- Baker, S., Frank, G., Cornett, A., Williamson, D., Kingery, D., 2016. Physical modelling and design optimizations for a new container terminal at the port of Moín, Costa Rica. In: Oates, D., Burkhart, E., Grob, J. (Eds.), Proceedings Ports '16: Port Engineering, 14th Triennial International Conference - ASCE. American Society of Civil Engineers (ASCE), Varna, Bulgaria, pp. 560–569.
- Bont, J. De, Molen, W. Van Der, Lem, J. Van Der, Ligteringen, H., Mühlestein, D., Howie, M., 2010. Calculations of the motions of a ship moored with Moormaster™ units. In: Proceedings of the 32nd PIANC International Navigation Congress. The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC), Liverpool, United Kingdom, pp. 622–635.
- Cornett, A., 2014. Physical modelling of moored ships for optimized design of ports and marine. In: Proceedings of the 5th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection. Varna, Bulgaria.
- Davies, M., MacDonald, N., Cornett, A., 2001. Optimization of port design using physical modeling. In: Collins, T.J. (Ed.), Proceedings of the Ports '01: America's Ports: Gateway to the Global Economy, 9th Triennial International Conference - ASCE. American Society of Civil Engineers (ASCE), Norfolk, Virginia, USA.
- Figuero, A., Rodríguez, A., Sande, J., Peña, E., Rabuñal, J.R., 2018a. Dynamical study of a moored vessel using computer vision. *J. Mar. Sci. Technol.* 26, 240–250.
- Figuero, A., Rodríguez, A., Sande, J., Peña, E., Rabuñal, J.R., 2018b. Field measurements of angular motions of a vessel at berth: inertial device application. *Control Eng. Appl. Informatics.* 20, 79–88.
- González-Marco, D., Sierra, J.P., Fernández de Ybarra, O., Sánchez-Arcilla, A., 2008. Implications of long waves in harbor management: the Gijón port case study. *Ocean Coast Manag.* 51, 180–201.
- Hiraishi, T., Atsumi, Y., Kunita, A., Sekiguchi, S., 1997. Observations of long period wave and ship motion in Tomakomai-port. In: 7th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE). Honolulu, USA, pp. 546–551.
- Jensen, O.J., Viggooson, G., Thomsen, J., Bjordal, S., Lundgren, J., 1991. Criteria for ship movements in harbours. In: Edge, B.L. (Ed.), Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering (ICCE). American Society of Civil Engineers (ASCE), Delft, The Netherlands, pp. 3074–3087.
- Kwak, M., Pyun, C., 2013. Computer simulation of moored ship motion considering harbor resonance in Pohang New Harbor. In: Ostbo, B.L., Oates, D. (Eds.), Proceedings of the Ports '13: Success through Diversification, 13th Triennial International Conference. American Society of Civil Engineers (ASCE), Seattle, Washington, pp. 1415–1424.
- López, M., Iglesias, G., 2014. Long wave effects on a vessel at berth. *Appl. Ocean Res.* 47, 63–72.
- Peña, E., Figuero, A., Sande, J., Guerra, A., Perez, J.D., Maciñeira, E., 2017. Integrated system to evaluate moored ship behavior. In: Proceedings of the ASME 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (OMAE2017). American Society of Mechanical Engineers (ASME), Trondheim, Norway.
- PIANC, 1995. Criteria for movements of moored ships in harbours: a practical guide. Rep. Work. Gr. N° 24. Perm. Tech. Comm. II, Suppl. to Bull. N° 88.
- Puertos del Estado, Autoridad Portuaria de A Coruña, 2017. Cuadro de Mando Ambiental - Puerto A Coruña. URL: <http://ema.puertocoruna.com/> (accessed 11.28.2017).
- Puertos del Estado, 2011. ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre. Ministerio de Fomento, Madrid, Spain.
- Robertson, S.P., Weiss, E., Hugo, G.D., 2014. A block matching-based registration algorithm for localization of locally advanced lung tumors. *Med. Phys.* 41.
- Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Veloso-Gomes, F., 2014. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. *Coast. Eng.* 85, 60–71.
- Sakakibara, S., Saito, K., Kubo, M., Shiraishi, S., Nagai, T., Yazaki, F., 2001. A study on long-period moored ship motions in a harbor induced by a resonant large roll motion under long-period waves. In: Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, pp. 326–333.
- Taveira Pinto, F., Veloso Gomes, F., Rosa Santos, P., Guedes Soares, C., Fonseca, N., Santos, J.A., Moreira, A.P., Costa, P., Brógueira Dias, F., 2008. Analysis of the behavior of moored tankers. In: Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008). American Society of Mechanical Engineers (ASME), Estoril, Portugal, pp. 755–764.
- van der Molen, W., Scott, D., Taylor, D., Elliott, T., 2015. Improvement of mooring configurations in Geraldton Harbour. *J. Mar. Sci. Eng.* 4, 3.
- Xu, M., Shang, Y., Jin, K., 2015. An effective algorithm for motion estimation of human faces. In: Proceedings of the Visual Communications and Image Processing Conference, VCIP 2015. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. (IEEE), Singapore.

Artículo IV

Application of an analytic methodology to estimate the movements of moored vessels based on forecast data

Article

Application of an Analytic Methodology to Estimate the Movements of Moored Vessels Based on Forecast Data

José Sande ¹, Andrés Figuero ^{1,*} , Javier Tarrío-Saavedra ² , Enrique Peña ¹ , Alberto Alvarelos ²  and Juan Ramón Rabuñal ³ 

¹ Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), Universidade da Coruña, Campus Elviña S/n, 15071 A Coruña, Spain

² Centre for Research of Information and Communication Technologies (CITIC), Universidade da Coruña, Campus Elviña S/n, 15071 A Coruña, Spain

³ Department of Computer Science, Universidade da Coruña, Campus Elviña S/n, 15071 A Coruña, Spain

* Correspondence: andres.figuero@udc.es

Received: 21 June 2019; Accepted: 1 September 2019; Published: 4 September 2019



Abstract: A port's operating capacity and the economic performance of its concessions are intimately related to the quality of its operational conditions. This paper presents an analytical methodology for estimating the movements of a moored vessel based on field measurements and forecast data, specifically including ship dimensions and meteorological and maritime conditions. The methodology was tested and validated in the Outer Port of Punta Langosteira, A Coruña, Spain. It was determined that the significant wave height outside the port, and the ratio of the vessel's length divided by its beam (L/B), are the variables that most influence movements. Furthermore, heave and surge are the movements with a better value of the coefficient of determination (R^2 values of 0.71 and 0.67, respectively), the sway ($R^2 = 0.30$) and roll ($R^2 = 0.27$) being the worst when using the available forecast variables of the Outer Port of Punta Langosteira. Despite their low R^2 values, sway and roll models are able to estimate the main trends of these movements. The obtained estimators provide good predictions with assumable error values (root mean square error—RMSE and mean absolute error—MAE), showing their potential application as a predictive tool. Finally, as a consequence, the A Coruña Port Authority has included the results of the methodology in its port management system allowing them to predict moored vessel behavior in the port.

Keywords: ship motions; in-situ observations; port operation; transfer functions; meteorological and ocean conditions; vessel dimensions

1. Introduction and Objectives

In one respect, the quality of port operations can be defined by the maxim “the better a vessel's stay in port, the greater the economic returns”. An important aspect that affects this process is the movements of the moored vessels. These movements are divided into three rotations (roll, pitch, and yaw) and three linear displacements (heave, surge, and sway). Each of these degrees of freedom is dependent on many variables, including climatic conditions, the vessel load cargo configuration, the vessel type, its location in the dock, the available defenses (fenders, bollards, etc.), and the mooring system employed [1].

On the other hand, decisions relating to the number of mooring lines, the ropes material (steel wire, synthetic fiber ropes, etc.), and the mooring arrangement depend on harbor pilot considerations, the mooring service providers, the mooring equipment on the berths, and the vessel captain. Finally,

the vessel's cargo configuration during operations modifies its center of gravity. This variation is difficult to ascertain with precision and would require a continuous record [2].

At present, there are a number of general recommendations regarding threshold values for movements during vessel loading and unloading operations [3,4]. Although these regulations establish movement criteria for safe working conditions, they do not clearly specify what type of statistical value of the movement they refer to (maximum, average or significant motion amplitudes). Moreover, because they are general recommendations, their specific application to each individual port requires a separate study [5].

Studies relating to operational capacity are traditionally conducted using three methodologies: numerical models, physical models, and field campaigns. Small-scale physical models [6–8] allow the simplified reproduction of port characteristics, vessel dimensions, mooring configuration, and different climatic conditions, but do not permit the accurate analysis of the variation in cargo configuration which occurs during operations. In addition, for a physical model to be reliable, it is important to assure that the model is accurate and realistic, which is achieved by costly construction and intense calibration [9,10]. On the other hand, although the advancement of numerical models facilitates the analysis of the behavior of a moored vessel and the influence on it of the mooring configurations or the effect of passing ships with lower computational and economic costs [11–13], these tools also have similar limitations as the physical models, such as the disadvantage of not reproducing the variations experienced by the position of the vessel's center of gravity during the cargo operation. Therefore, using these two methodologies it is possible to analyze a specific loading condition (ship fully loaded, ballasted, etc.) but not the continuous variation of the same. Finally, studies conducted through field campaigns allow a comprehensive analysis of this process and its influence on the dynamic behavior of moored vessels. However, the current measurement techniques and data processing technology have limitations in terms of accuracy, the resolution of the instrumentation, temporary data logging, information storage, and computational cost. Nevertheless, at present there are studies in which some of the degrees of freedom are analyzed, together with the equations that define them and the loads that moored vessels are subjected to in specific situations, such as the swell generated by a vessel navigating in the port [14,15].

The objective of the present work was the development of an analytical methodology to predict the movements of moored vessels based on the data available by the Port Authority forecast and the vessel movements measured in a field campaign. This methodology has been applied and validated at the facilities of the Outer Port of Punta Langosteira, in A Coruña, Spain (Figure 1a). Each of the degrees of freedom was correlated to climatic variables and vessel dimensions, by means of multivariate linear approximation (transfer functions). These results allowed the A Coruña Port Authority to develop a management system to determine the port's operating capacity, based on forecast data. With this system, it will be possible to evaluate the quality of the port's operational facilities, determine the ideal working windows, and optimize the use of the port's spaces. Furthermore, this methodology could be exportable to other ports if an analysis of the influential and available forecast variables is made, as well as a record of the movements of the moored vessels. Despite the influence of mooring lines on the behavior of vessels at berth, the mooring system information (material, initial pretension, and mooring arrangement) was not introduced as a variable to obtain the transfer functions, since no forecast data on these parameters would be available to subsequently feed the obtained models. In addition, as a results of the characteristics and layout of the port mooring equipment, vessels use two mooring arrangements (Figure 1b): 4-2-2-4 for large bulk carriers (4 bow lines–2 bow spring–2 stern springs–4 stern lines) and 3-2-2-3 for general cargo ships (3 bow lines–2 bow spring–2 stern springs–3 stern lines). Therefore, there is no variability in the number of moorings lines within the same vessel type.

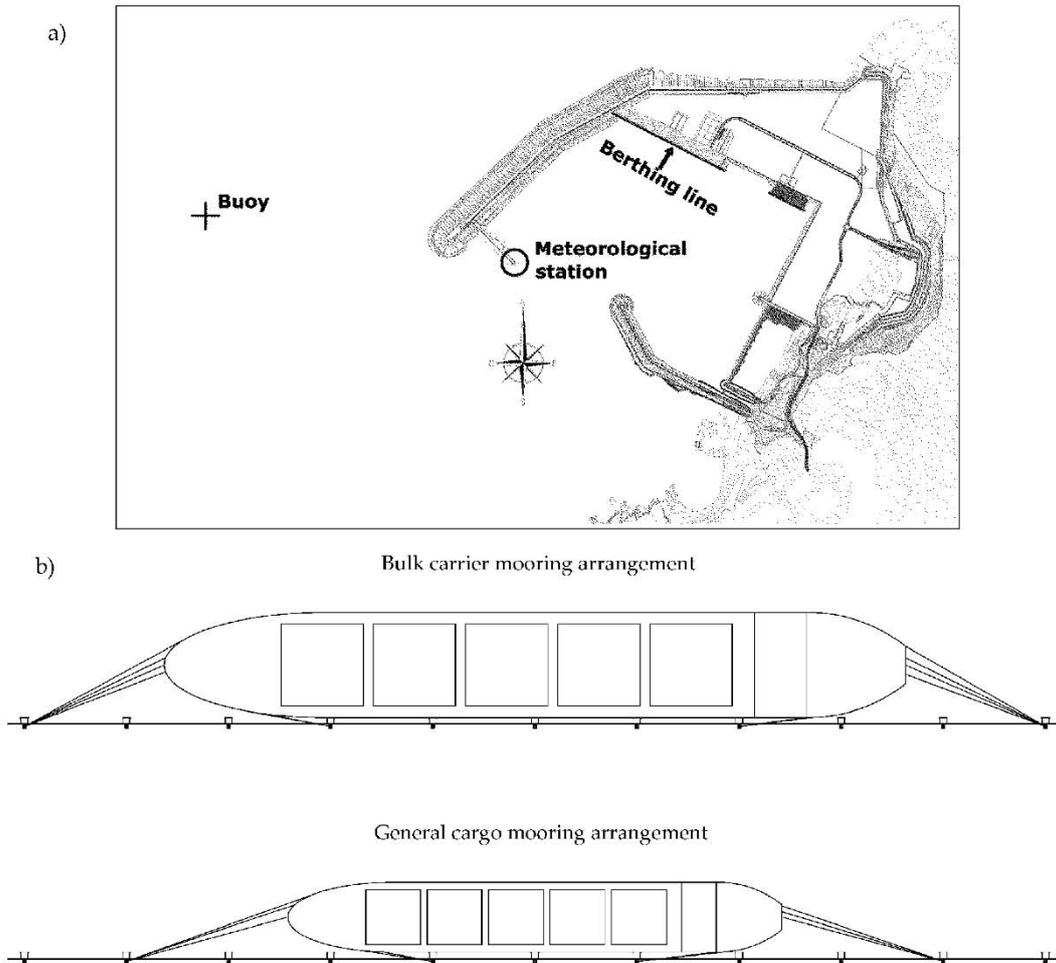


Figure 1. The Outer Port of Punta Langosteira, A Coruña, Spain. The berthing line and the location of the wave buoy and the weather station used in this study are highlighted (a). Mooring arrangement of each vessel type (b).

2. Field Campaign and Forecast Data

Three field campaigns were conducted at the facilities of the Outer Port of Punta Langosteira in A Coruña for the measurement of the variables involved, lasting a total of 18 months (October–March 2015–2016, 2016–2017, and 2017–2018). The port is located 10 km southeast of the city of A Coruña in Spain and is protected by a 3360 m-long main breakwater and a spur breakwater 1320 m long. The current berthing line is 914 m long with an average depth of 22 m. The orientation of the dock is N62.7W and reaches a crest height 6.5 m above the zero datum of the port. A set of bollards spaced 31 m apart with a load capacity of 200 t is situated 0.75 m from the dock. In addition, there is a double-fender system protected by a shield to streamline vessel operations.

In order to compute the transfer functions, the six degrees of freedom of 27 vessels (15 Bulk carriers and 12 General cargo vessels) were recorded under different climatic conditions (Table 1). These vessels were located along the entire berthing line and represent a typical harbor fleet in this port.

Table 1. Characteristics of the vessels measured during the field campaign.

Vessel	Type	Deadweight Tonnage DWT (t)	Length (m)	Beam (m)
Fu Da	Bulk carrier	71,330	224.9	32.2
Avax	Bulk carrier	87,030	225.0	32.2
Yannis	Bulk carrier	50,792	189.9	32.2
Western Boheme	Bulk carrier	37,000	186.9	28.6
Pina Cafiero	Bulk carrier	75,668	225.0	32.2
Jing Jin Hai	Bulk carrier	77,872	225.0	32.2
Lowlands Saguenay	Bulk carrier	37,152	179.9	30.0
Aloe	Bulk carrier	30,618	178.7	28.0
CSK Unity	Bulk carrier	77,105	225.0	32.2
Topaz	Bulk carrier	75,499	225.0	32.2
Walsall	Bulk carrier	58,018	189.9	32.3
Kyzicos	Bulk carrier	92,598	229.5	36.9
Nautical Lucia	Bulk carrier	63,548	199.9	32.2
Nord Saturn	Bulk carrier	77,288	225.0	32.2
Orange Harmony	Bulk carrier	81,837	229.0	32.2
Marc	General cargo	4135	89.8	13.6
Celine	General cargo	8600	129.4	15.8
Dominica	General cargo	13,022	127.3	21.2
Kelly C	General cargo	6250	106.0	15.5
Notos	General cargo	8049	125.1	16.4
Don Juan	General cargo	21,057	158.0	23.0
Ecms River	General cargo	4066	89.9	12.5
Linau	General cargo	3699	88.0	12.8
Fortune	General cargo	12,692	138.9	21.3
Moraime	General cargo	7300	118.0	16.5
Onego Capri	General cargo	10,273	138.9	15.9
Oppland	General cargo	9273	107.0	18.4

The methodology used for the measurement of the movements was validated in other studies by the authors of this paper [16]. The measurement equipment consists of three systems that continuously record each of the vessel's degrees of freedom with a frequency of 1 Hz. The first of these systems is an inertial measurement unit (IMU) [17] consisting of three accelerometers and three gyroscopes that record the roll and the pitch (Figure 2, Left). The second system comprises two electronic distance-measuring lasers for the sway and yaw measurements (Figure 2, Right). Finally, photogrammetric techniques were employed to measure the heave and surge movements [18] (Figure 2, Center).



Figure 2. Left: IMU (Inertial measurement unit), Center: Photogrammetric techniques, Right: Laser distance sensor.

The climatic variables were measured using the available instrumentation in the Spanish Port Authority network and the A Coruña Port Authority. The location of the instruments is shown in Figure 1. This decision was made since the port's own meteorological forecasting system collects data at these points. In first place, the hydrodynamic variables were measured at the outer buoy of the Port of Punta Langosteira, located at 43°20'58.34" N–8°33'41.32" W at a depth of 60 m. During the first 20 min of each hour it recorded the following variables: significant wave height (H_s (m)), maximum wave height (H_{max} (m)), peak wave period (T_p (s)), average wave period (T_m (s)), and wave direction (Dir_W (°)). Second, the weather station located near the roundhead of the main breakwater was used to record wind speed and direction. The instrumentation continuously records the average wind

speed (V_w (km/h)), wind gust speed (V_g (km/h)), average direction, and wind gust direction (Dir_{V_w} ($^\circ$) and Dir_{V_g} ($^\circ$)). However, the port weather forecast system only provides 72 h in advance data of the variables H_s (m), T_p (s), and Dir_w ($^\circ$) at the buoy location, and, V_w (km/h) and Dir_{V_w} ($^\circ$) at the weather station, so these variables were finally used in this study. This forecasting system was developed by the Spanish government agency Puertos del Estado in collaboration with the State Meteorological Agency (AEMET). This system is driven by wind fields supplied by AEMET from the High Resolution Limited Area Model (HIRLAM). The system starts a new execution twice a day providing data outputs with a time resolution of 1 h. To ensure good initial conditions, before the forecast starts, the model is forced using wind analyzed fields of the 12 h prior to forecast initialization [19].

The seasonal wind and wave roses (winter and summer) at the buoy position for the period 2015–2018 are shown in Figure 3, in order to clarify the values of the main forcings acting in the Outer Port of Punta Langosteira.

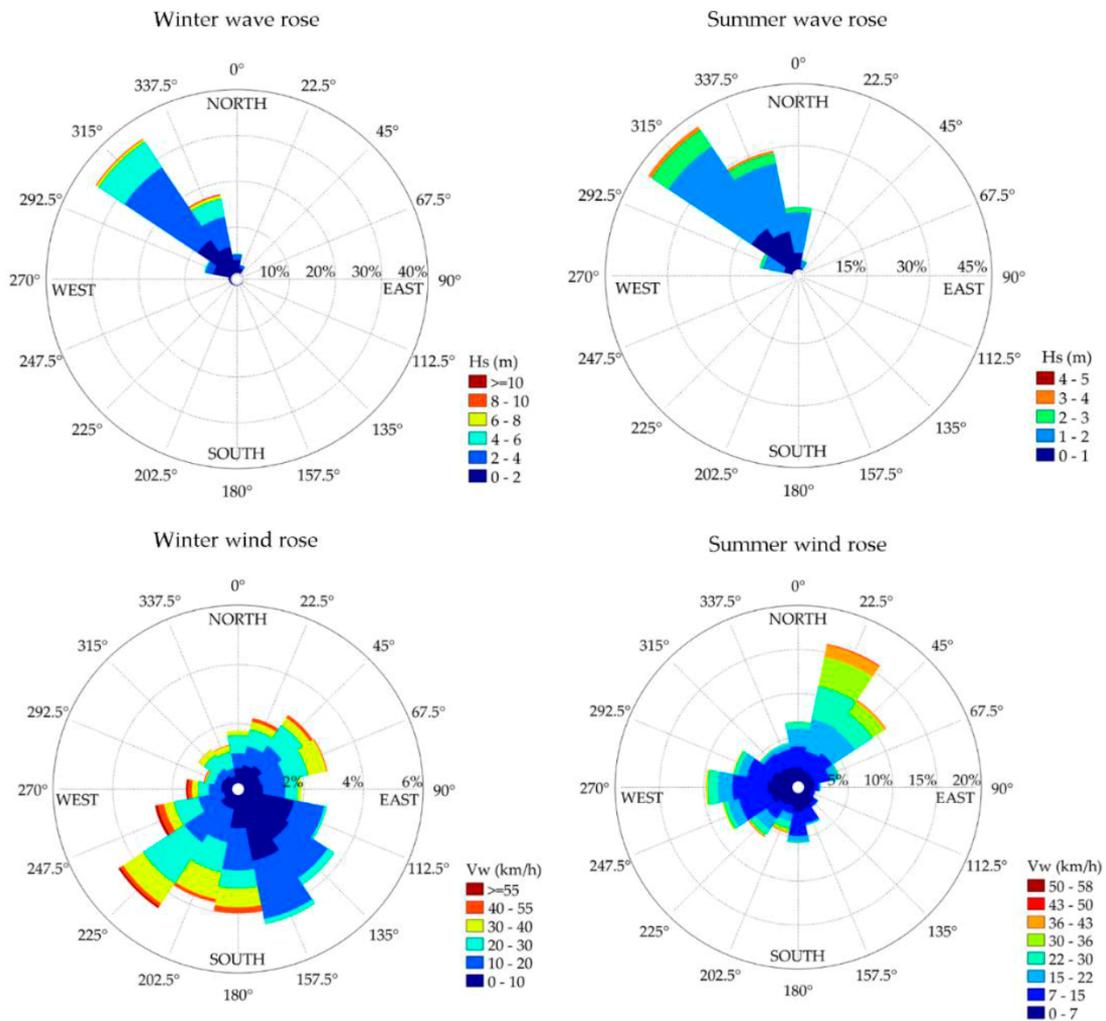


Figure 3. Seasonal wind and wave roses (winter and summer) at the buoy position for the period 2015–2018.

Although the models for estimating the movements of moored vessels were obtained with observational meteorological and ocean data (recorded by the wave buoy and the weather station), they are run with forecast data. Therefore, it is important to know the differences between both sources of information (observational data vs. forecast data). To this end, an analysis of the estimation errors

of each variable (H_s (m), T_p (s), Dir_w ($^\circ$), V_w (km/h), and Dir_{Vw} ($^\circ$)) was conducted. Table 2 shows the obtained results.

Table 2. Coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE) and mean absolute error (MAE) of forecast and observed meteorological and ocean variables.

Forecast Variable vs. Observed Variable	R^2	RMSE	MAE
H_s (m) forecast vs. H_s (m) observed	0.86	0.39 m	0.29 m
T_p (s) forecast vs. T_p (s) observed	0.63	1.9 s	1.2 s
Dir_w ($^\circ$) forecast vs. Dir_w ($^\circ$) observed	0.77	18.2 $^\circ$	11.3 $^\circ$
V_w (km/h) forecast vs. V_w (km/h) observed	0.64	6.8 km/h	5.2 km/h
Dir_{Vw} ($^\circ$) forecast vs. Dir_{Vw} ($^\circ$) observed	0.51	55.1 $^\circ$	36.5 $^\circ$

On the one hand, H_s (m), T_p (s), Dir_w ($^\circ$), and V_w (km/h) variables present a better approximation to the observed value, showing acceptable prediction errors (MAE values of 0.29 m, 1.2 s, 11.3 $^\circ$, and 5.2 km/h, respectively). On the other hand, Dir_{Vw} ($^\circ$) shows the largest deviation between the observed and the forecast value (MAE value of 36.5 $^\circ$). Since the models are fed with forecast data, having an accurate weather forecasting system will provide similar results in terms of accuracy to those obtained by these models in their development stage.

As previously mentioned, the wave buoy employed in this study characterizes the main ocean variables of each sea state (1-h duration) using the records obtained during the first 20 min of each hour. For this reason, the joint analysis of the data was carried out using only the concomitant data of both wind, waves, and vessel movements. Regarding moored vessels behavior, the analysis of motion time series was based on a zero crossing technique. A peak-to-peak criterion was applied to each movement to obtain their amplitudes, except in the case of sway motion, for which the zero-peak criterion was used. Complete time series of each motion were split into blocks of 1-h duration, obtaining the maximum motion amplitude, average motion amplitude, and significant motion amplitude calculated as the average of the highest third for each block [16]. Figure 4 shows a sample of roll motion time series recorded on the bulk carrier vessel *WESTERN BOHEME*. The analysis of the maximum, average, and significant amplitudes of each motion and their concomitant climatic forcings recorded on the same vessel are shown in Figure 5.

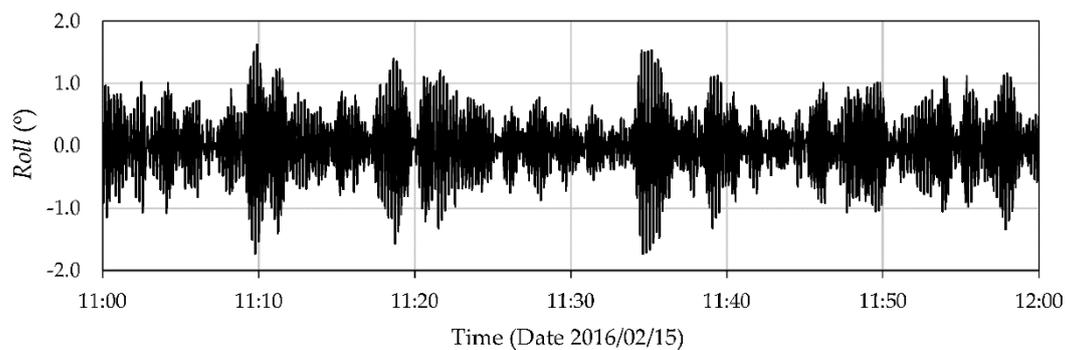


Figure 4. A 1 h sample of roll time series recorded on the bulk carrier vessel *WESTERN BOHEME*.

As can be seen in Figure 5, a moored ship that under specific meteorological and ocean conditions moves with certain amplitudes may experience a maximum punctual movement much larger than its significant or average movement. This value that stands out from the main trend of the movement could be occasionally caused by the action of other external agents such as the waves generated by passing vessels or the punctual modification of the mooring lines tension to adapt them to the tidal variations.

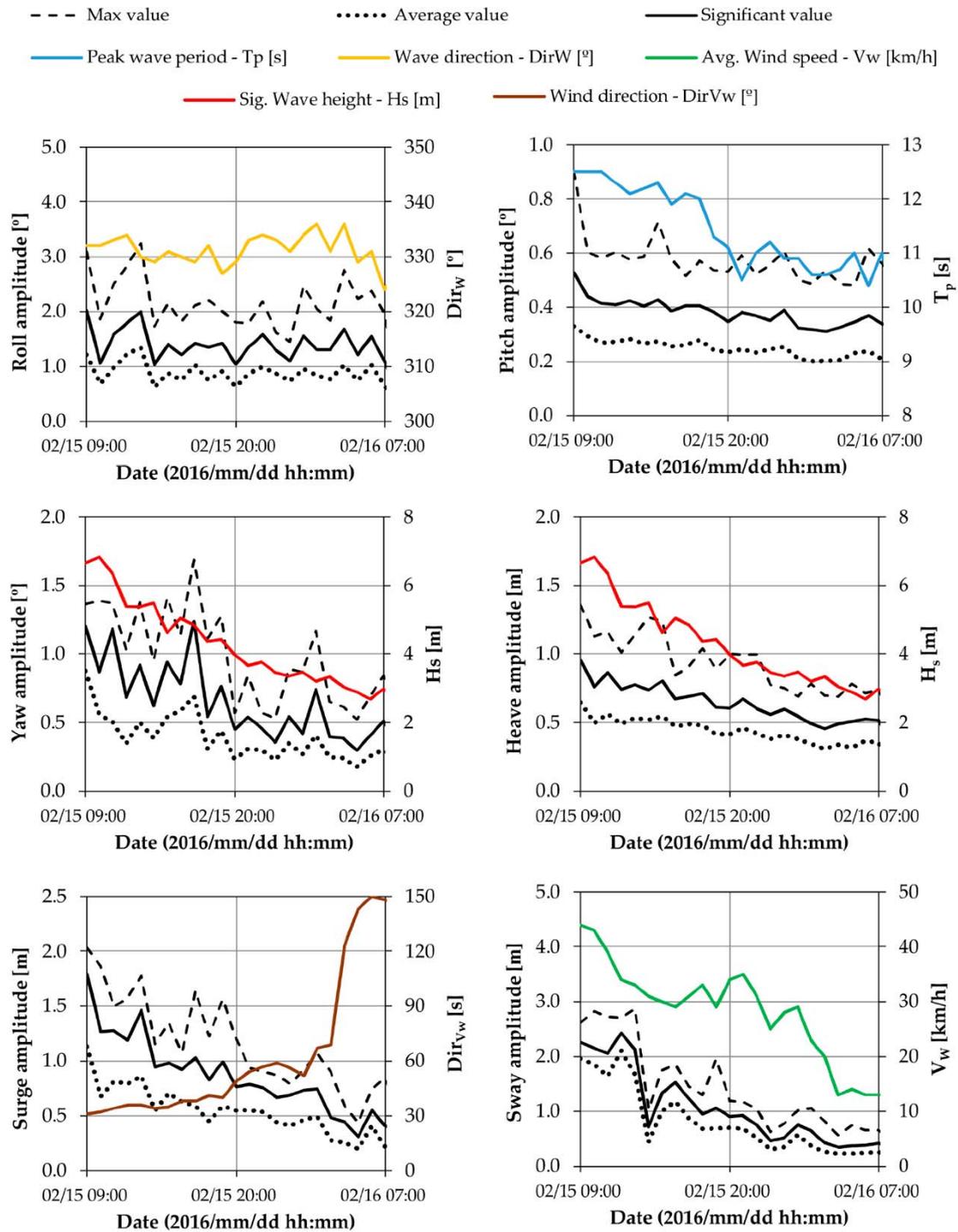


Figure 5. Maximum, average and significant amplitudes of each motion recorded during the WESTERN BOHEME bulk carrier vessel’s stay in port and its concomitant climatic forcings.

3. Analytic Methodology

This section presents the analytical methodology developed in this study for the calculation of each of the transfer functions. The analysis was performed for significant movements. This parameter has commonly been used in similar studies to evaluate the dynamic behavior of a moored vessel during its stay in port [16,20,21]. Also, the use of the significant value assures that motions and wave

parameters (significant wave height and peak wave period) are obtained following the same statistical analysis. This can contribute to achieving better relations with the main forcings of moored vessels' behavior. In addition, the range and independence of each of the variables used were also calculated.

3.1. Dataset Creation

First, a dataset was created to handle the calculation of the transfer functions. The range of validity is shown in Table 3 and defines the values of each of the variables recommended for the equations calculated in this study.

Table 3. Range of the variables considered for the calculation of the transfer functions.

Range	Length (m)	Beam (m)	H _s (m)	Dir _W (°)	T _p (s)	V _w (km/h)	Dir _{Vw} (°)
Min.	88.0	12.5	1.04	1.0	5.5	0.1	4.0
Max.	229.5	36.9	8.95	359	18.2	80.0	351.0

Abbreviations: H_s (m)—Significant wave height; Dir_W (°)—Wave direction; T_p (s)—Peak wave period; V_w (km/h)—Average wind speed; Dir_{Vw} (°)—Wind direction.

The homogeneity in the distribution of variables of the dataset was analyzed. To this end, each data of a given variable was dimensionalized with the highest value of the same (Variable value (i)/Maximum variable value). In this way, the spectrum of values was contained between 0 and 1. Figure 6 shows the cumulative frequency of each parameter (Y-axis) within its range (X-axis). Therefore, in a situation of homogeneous distribution of the data, the plot would correspond with the bisector of the graph.

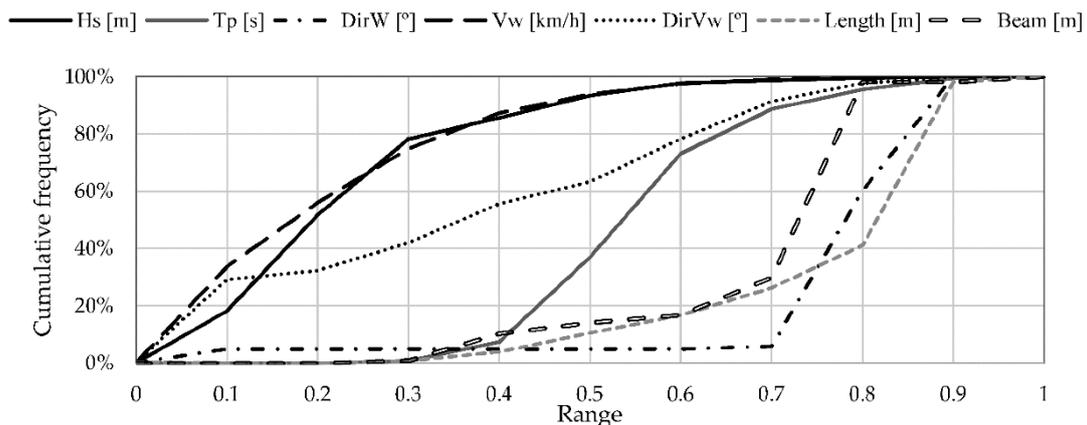


Figure 6. Cumulative frequency distribution of each of the recorded variables (Dimensionless variable range (Variable value (i)/Maximum variable value) vs. Accumulated frequency for each of the variables).

The results show that the significant wave height (H_s (m)) and wind velocity (V_w (km/h)) variables are concentrated between 0.1 and 0.4 of their range. The wind direction (Dir_{Vw} (°)) presents a homogeneous distribution in its range. However, the variables representing the peak wave period (T_p (s)), wave direction (Dir_w (°)), length (m), and beam (B [m]), are all concentrated between 0.6 and 1 for the majority of the data. With the aim of more precisely quantifying the variables without dimensionalizing them, Table 4 shows the frequency ranges and values for each of the variables.

An amount of 83% of the significant wave height data (H_s (m)) is concentrated in the range $1.0 \leq H_s (m) \leq 4$. For the peak period, 93% of the data lies between $8 \leq T_p (s) \leq 16$. Moreover, 38% of the data is concentrated within a 2-s range (10 s–12 s). Most of the data pertaining to the wave direction come from the NW direction (81%). Regarding the ship's dimension, 59% of the length values and 70% of the beam values are for the largest vessels (200–250 m length and > 30 m beam). In view of the

results it can be seen that some of the possible combinations between the variables are not defined by a very high number of data points.

Table 4. Frequency of the data recorded during the field campaign for each of the variables.

H_s (m)		T_p (s)		Dir_W (°)		V_w (km/h)		Dir_{V_w} (°)		Length (m)		Beam (m)	
Range	%	Range	%	Range	%	Range	%	Range	%	Range	%	Range	%
<1.0	0%	<4	0%	N [337.5–22.5]	16%	0–10	14%	N [337.5–22.5]	2%	<100	1%	<10	0%
1–2	27%	4–6	0%	NE [22.5–67.5]	0%	10–20	35%	NE [22.5–67.5]	27%	100–150	13%	10–15	1%
2–3	37%	6–8	2%	E [67.5–112.5]	0%	20–30	24%	E [67.5–112.5]	4%	150–200	27%	15–20	9%
3–4	19%	8–10	19%	SE [112.5–157.5]	0%	30–40	16%	SE [112.5–157.5]	19%	200–250	59%	20–25	6%
4–5	8%	10–12	38%	S [157.5–202.5]	0%	40–50	7%	S [157.5–202.5]	8%	>250	0%	25–30	13%
5–6	7%	12–14	21%	SW [202.5–247.5]	0%	50–60	3%	SW [202.5–247.5]	19%			>30	70%
6–7	1%	14–16	15%	W [247.5–292.5]	2%	60–70	1%	W [247.5–292.5]	14%				
7–8	1%	16–18	4%	NW [292.5–337.5]	81%	>70	0%	NW [292.5–337.5]	6%				
8–9	1%	>18	1%										
>9.0	0%												

3.2. Statistical Response, Variables and Predictors

Next, the analytical methodology employed, the variables used, and their influence on each of the degrees of freedom is presented.

The variables were selected taking their a priori possible influence on vessel movements into account. They were divided into three groups, depending on whether they were climatic variables, vessel dimensions, or dimensionless vessel size features. The latter were obtained by scaling the vessel size measurements with the following wave characteristics: significant wave height (H_s (m)), and wave length in deep water (L_{op} (m)). Table 5 shows the description of all the predictor and response (vessel movements) variables obtained, studied, and modeled in this work.

Table 5. Response and predictor variables, with corresponding tags.

Movement (y_i)	Name	Variables (X_m)	Name	Typology
Roll	y_1	Wave height (H_s (m))	X_1	Meteorological and ocean variables
Pitch	y_2	Wave period (T_p (m))	X_2	
Heave	y_3	Wave length (L_{op} (m))	X_3	
Surge	y_4	Wave steepness (s)	X_4	
Sway	y_5	Wave direction (Dir_W (°))	X_5	
Yaw	y_6	Wind velocity (V_w (km/h))	X_6	
		Wind direction (Dir_{V_w} (°))	X_7	
		Length (L (m))	X_8	Vessel dimensions
		Beam (B (m))	X_9	
		Length/Beam (L/B)	X_{10}	Dimensionless
		Length/ H_s	X_{11}	
		Length/ L_{op}	X_{12}	
		Beam/ H_s	X_{13}	
		Beam/ L_{op}	X_{14}	

The transfer functions were calculated and analyzed using statistical correlation studies and multivariate linear regression techniques [22]. This methodology has recently been applied to various different engineering domains, including naval and oceanic engineering [23–25]. In the case of ocean engineering, following a similar methodology, Carral-Couce et al. [23] developed nonlinear and multivariate linear regression models to estimate the traction of towing and anchor-handling winches. Additionally, the transit time to cross the Panama Canal’s new locks was estimated using multivariate linear regression [24], and the effect of vessel dimensions, type, and fishing ground were also modeled to estimate net drum and winch traction for trawler design tasks [25]. These techniques were also used

to forecast wave height [26] and vessel traffic flow [27], among various other applications. For the present case, the proposed multivariate regression model can be expressed as Equation (1):

$$y_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m x_m + \varepsilon_i, \text{ with } i = 1, 2, \dots, 6 \text{ and } m = 1, 2, \dots, 14 \tag{1}$$

where y_i represents the sample values of the response variable (vessel movement) corresponding to the multivariate linear model, x_m represents the m predictor variables (there were up to $M = 14$ variables analyzed), and ε_i represents the model’s residuals or the discrepancy between the real y_i and the model estimates, $\hat{y}_i = \hat{\beta}_0 + \sum_{m=1}^M \hat{\beta}_m x_m$. The i index accounts for the vessel’s degrees of freedom (roll, pitch, heave, surge, sway, and yaw). $\hat{\beta}_0$ represents the constant term of each model, and $\hat{\beta}_m$ represents the model’s parameter estimates corresponding to each of the independent variables. They account for the linear effect of each predictor on the response.

4. Results and Discussion

This section includes the descriptive analysis, including the predictor correlation study, the multivariate linear model’s estimation, and the model’s predictions of vessel movements obtained from the previously described dataset.

4.1. Correlation Analysis

The predictors of a multivariate linear model should be uncorrelated in order to obtain reliable model parameter estimations, and, hence, accurate and precise predictions [23–25,28]. Indeed, the existence of multicollinearity leads to estimates of model parameters being highly dependent on sample data, preventing an analysis of the effect of each predictor or covariate on the response, and limiting the model’s ability to generate accurate predictions. Accordingly, a pairwise dependence relationship analysis should be performed prior to including the predictors in the final model [28]. The most widely used measurement for goodness of fit is the Pearson coefficient (r). At this point, it is important to note that the inclusion of new additional predictors to the model always increases the Pearson coefficient. Nevertheless, those predictors must be uncorrelated to prevent spurious dependence relationships and inaccurate models. Accordingly, the dependence structure of the predictors was analyzed by calculating the Pearson coefficient, r (Table 6).

Table 6. Pairwise Pearson linear correlation coefficients for the predictors (in gray when $r \geq 0.6$ or $r < -0.6$).

		r													
		H_s (m)	T_p (s)	L_{op} (m)	s	Dir_w (°)	V_w (km/h)	Dir_{vw} (°)	L (m)	B (m)	L/B	L/H_s	L/L_{op}	B/H_s	B/L_{op}
r	H_s (m)	1.0	0.3	0.3	0.7	0.1	0.3	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.8	-0.3	-0.8	-0.3
	T_p (s)	0.3	1.0	1.0	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.7	-0.2	-0.8
	L_{op} (m)	0.3	1.0	1.0	-0.4	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	-0.2	-0.7	-0.2	-0.7
	s	0.7	-0.4	-0.4	1.0	0.1	0.3	0.1	-0.1	-0.1	0.1	-0.6	0.4	-0.6	0.4
	Dir_w (°)	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	-0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	V_w (km/h)	0.3	-0.1	-0.1	0.3	-0.1	1.0	0.1	-0.1	0.0	-0.2	-0.3	0.0	-0.3	0.0
	Dir_{vw} (°)	0.1	-0.1	-0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	0.0	-0.1	0.0
	L (m)	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	-0.1	-0.1	1.0	0.9	0.2	0.5	0.4	0.4	0.4
	B (m)	-0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.0	-0.1	0.9	1.0	0.0	0.5	0.4	0.5	0.4
	L/B	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.2	-0.1	0.2	0.0	1.0	0.1	0.1	0.0	0.0
	L/H_s	-0.8	-0.2	-0.2	-0.6	0.0	-0.3	-0.1	0.5	0.5	0.1	1.0	0.4	1.0	0.4
	L/L_{op}	-0.3	-0.7	-0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.1	0.4	1.0	0.4	1.0
	B/H_s	-0.8	-0.2	-0.2	-0.6	0.0	-0.3	-0.1	0.4	0.5	0.0	1.0	0.4	1.0	0.4
	B/L_{op}	-0.3	-0.8	-0.7	0.4	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0.0	0.4	1.0	0.4	1.0

Table 6 shows that the wave period (T_p (s)) and wave length (L_{op} (m)) present a direct linear relationship ($r = 1$) due to their definition. In addition, the wave height (H_s (m)) and steepness (s) are also correlated ($r > 0.6$). Additionally, the vessel size predictors are also significantly correlated.

This is the case for vessel length (L (m)) and beam (B (m)), which are very strongly correlated ($r \geq 0.9$). A similar dependence structure is obtained when the size dimensionless predictor variables are studied. Taking into account the fact that the dimensionless variables were derived from the vessel size and meteorological and ocean variables, Table 6 shows that they are strongly correlated with both size and meteorological and ocean predictors. On the other hand, it can be observed that the dimensionless variable Length/Beam is independent, and this allows the influence of the size of the vessel to be introduced into the analysis.

On the basis of the results depicted in Table 6, linear regression models were developed using variables that were independent of each other. Thus, these models were constructed using five hydrodynamic predictors (H_s (m), T_p (s), Dir_W ($^\circ$), V_w (km/h), Dir_{V_w} ($^\circ$)) and the dimensionless variable Length/Beam (Table 7).

Table 7. Predictors involved in fitting regression models.

Selected Predictors
Wave height (H_s (m))
Wave period (T_p (s))
Wave direction (Dir_W ($^\circ$))
Wind velocity (V_w (km/h))
Wind direction (Dir_{V_w} ($^\circ$))
Length/Beam (L/B)

The variables H_s (m) and T_p (s) were selected instead of s (wave steepness) and L_{op} (m) since they are the main parameters that define the characteristics of a sea state (together with Dir_W ($^\circ$)). In addition, their values are directly provided by both the wave buoy and the weather forecasting system of the Port, facilitating the data acquisition and the implementation of the models. Regarding vessel dimensions, neither L (m) nor B (m) was selected to participate as an independent variable since their information was already included in the dimensionless variable L/B.

4.2. Regression Modelling of Vessel Movements

Once the variables that could potentially participate in the generation of the models were selected, the next step consisted in identifying those that had an important influence on the prediction provided by each model. To this end, an Akaike criterion (AIC) was used [29]. First, the multivariate linear regression models were calculated including all selected predictors. The parameters corresponding to each predictor, $\hat{\beta}_m$ were estimated from the data base by means of the least squares method. Then, a statistical significance analysis of each variable was carried out, selecting those with a level of significance $\alpha \leq 0.01$ (Table 8).

Table 8. Summary of the selected predictors for each response variable. Variables that have an effect on the response significantly different from zero are indicated by a cross (significance level $\alpha \leq 0.01$).

	Roll (y_1)	Pitch (y_2)	Heave (y_3)	Surge (y_4)	Sway (y_5)	Yaw (y_6)
H_s	x	x	x	x	x	x
T_p	x	x			x	
Dir_W	x		x	x		x
V_w	x		x		x	
Dir_{V_w}				x	x	
L/B	x	x	x	x	x	x

Finally, models were re-calculated using only the most influential predictors in each vessel movement, obtained from the significance analysis (Table 8). Adopting this methodology ensured

that the models would provide predictive results. The following expressions show the structure and selected variables for each transfer function:

$$y_1 (\text{Roll}) = \beta_{0_{\text{Roll}}} + \beta_{1_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{1_{T_p}} \cdot T_p + \beta_{1_{\text{Dir}_W}} \cdot \text{Dir}_W + \beta_{1_{V_W}} \cdot V_W + \beta_{1_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (2)$$

$$y_2 (\text{Pitch}) = \beta_{0_{\text{Pitch}}} + \beta_{2_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{2_{T_p}} \cdot T_p + \beta_{2_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (3)$$

$$y_3 (\text{Heave}) = \beta_{0_{\text{Heave}}} + \beta_{3_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{3_{\text{Dir}_W}} \cdot \text{Dir}_W + \beta_{3_{V_W}} \cdot V_W + \beta_{3_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (4)$$

$$y_4 (\text{Surge}) = \beta_{0_{\text{Surge}}} + \beta_{4_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{4_{\text{Dir}_W}} \cdot \text{Dir}_W + \beta_{4_{\text{Dir}_{V_W}}} \cdot \text{Dir}_{V_W} + \beta_{4_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (5)$$

$$y_5 (\text{Sway}) = \beta_{0_{\text{Sway}}} + \beta_{5_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{5_{T_p}} \cdot T_p + \beta_{5_{V_W}} \cdot V_W + \beta_{5_{\text{Dir}_{V_W}}} \cdot \text{Dir}_{V_W} + \beta_{5_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (6)$$

$$y_6 (\text{Yaw}) = \beta_{0_{\text{Yaw}}} + \beta_{6_{H_s}} \cdot H_s + \beta_{6_{\text{Dir}_W}} \cdot \text{Dir}_W + \beta_{6_{\frac{L}{B}}} \cdot \frac{L}{B} \quad (7)$$

Each multivariate linear regression model was adjusted with 80% of the composed data sample. The rest of the data was reserved for external validation of the transfer functions calculated by the models.

In order to quantify the importance of each variable for vessel movements, a relative frequency descriptive analysis was performed (Figure 7). From this analysis, the wave height (H_s (m)) and the dimensionless variable Length/Beam (L/B) effect on the response was found to be significant in all (100%) of the regression models performed (transfer functions), while the wave direction (Dir_W ($^\circ$)) effect was non-zero in 66.67% of the transfer functions performed. In addition, the wave period (T_p (s)) and wind velocity (V_w (km/h)) were significant in 50% of the movements. Finally, wind direction (Dir_{V_w} ($^\circ$)) effect was only significant for surge and sway movements.

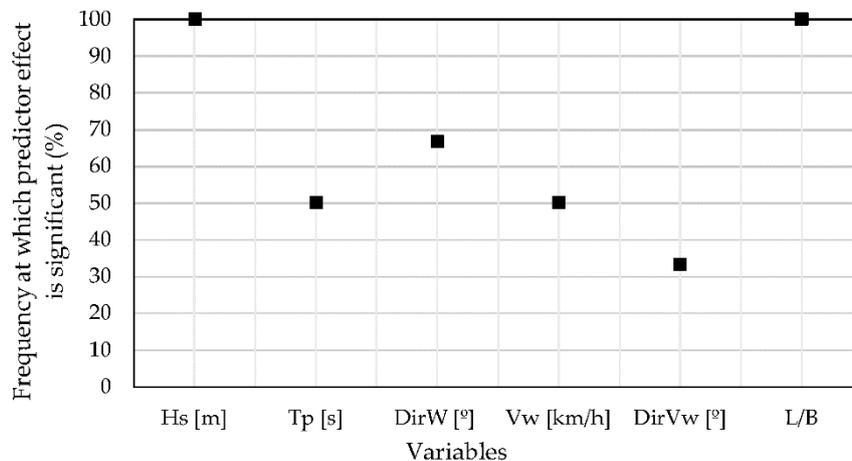


Figure 7. The relative frequency corresponding to the models where the effect of each predictor on the response is significantly different from zero.

Figure 8 shows the results obtained with each of the models constructed. This data visualization provides information about the goodness of fit, the ability to predict vessel movements using a variable-dependent model, and the model’s accuracy and precision.

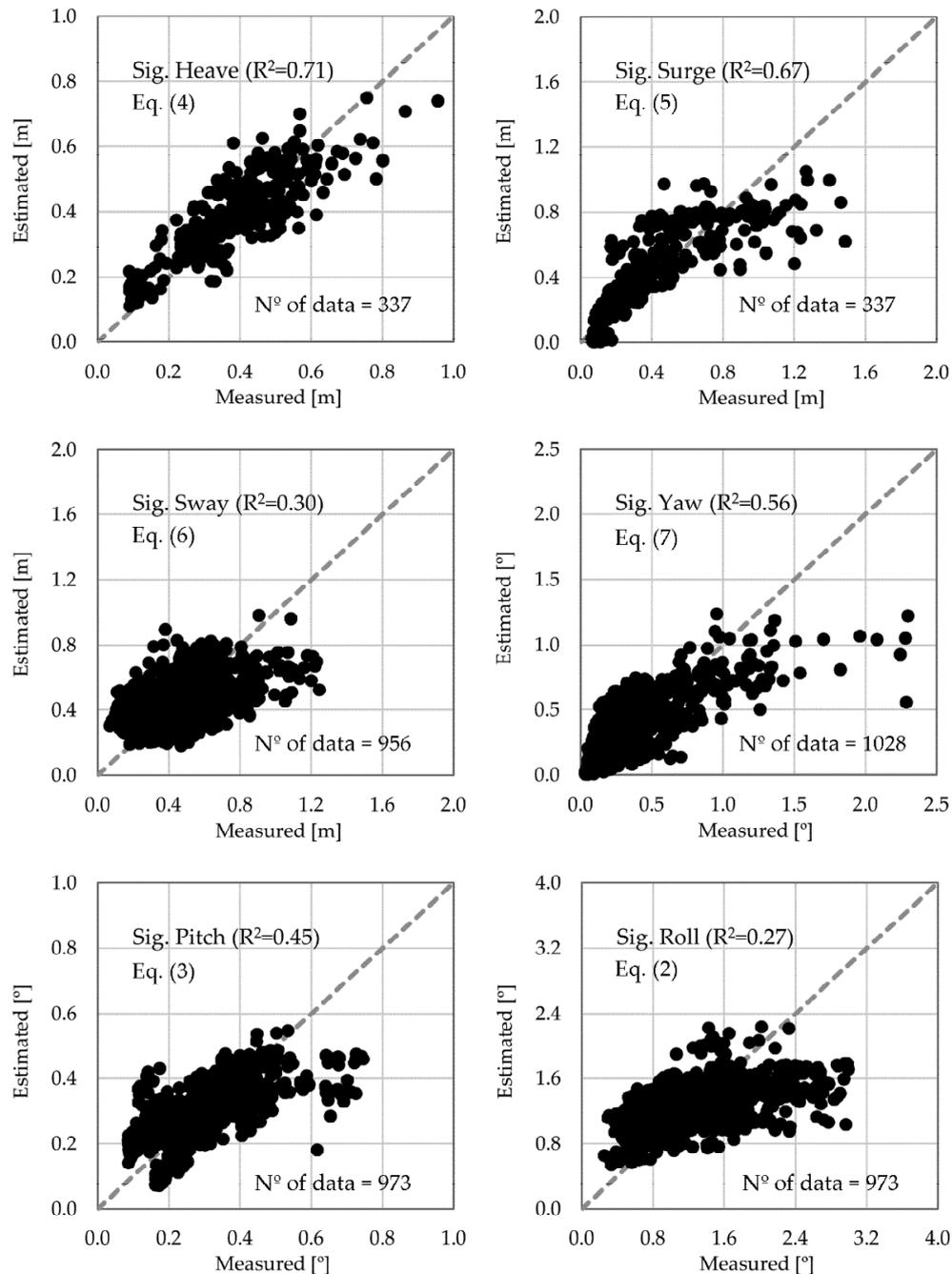


Figure 8. Scatter plots of measured values versus predicted values for the multivariate linear models fitted to significant vessel movements.

As can be observed, the models with the highest accuracy and precision were those that estimate the heave and the surge. This trend was also observed for the yaw and pitch movements. The lowest accuracy was obtained for the sway and the roll. These two movements had greater variability over time, as well as an inertial component from the vessel and the cargo, so their accuracies were lower. Accordingly, the fittings for these latter vessel movements were less precise (a greater dispersion of points around the diagonal). However, although these models did not allow the real motion amplitude to be predicted accurately, they were able to estimate the main trends of these movements.

In addition, the R^2 coefficients and the root mean square error (RMSE) provided a quantitative measure of each model's goodness of fit (Table 9). The best goodness of fit was produced for the heave movement, with an R^2 value of 0.71 and an RMSE of 0.08 m.

The surge movements fitted with $R^2 = 0.67$, while the yaw and pitch movements had R^2 values of 0.56 and 0.45, respectively. In addition, the RMSE is 0.18 m for the first, 0.21° for yaw, and 0.09° for the pitch. Finally, the movements with the lowest goodness of fit values were the sway ($R^2 = 0.30$) and the roll ($R^2 = 0.27$). In these two cases it was verified that the RMSE of the sway was about 0.18 m, while for the roll it was 0.46° .

Table 9. Values of the R^2 coefficient and the root mean square error (RMSE) of the calculated transfer functions.

Movement	R^2	RMSE
Heave	0.71	0.08 m
Surge	0.67	0.18 m
Sway	0.30	0.18 m
Yaw	0.56	0.21°
Pitch	0.45	0.09°
Roll	0.27	0.46°

Additionally, the error for each function was quantified. This was done using the mean absolute error (MAE) parameter (Table 10). The objective was to estimate the deviation of the functions, because all the variables involved in the process were not taken into account. The joint analysis of these three parameters allows for a determination to be made as to whether the error obtained was acceptable for use in a port operational management system.

Table 10. Mean absolute error (MAE) for each of the six degrees of freedom analyzed using transfer functions.

	Heave (m)	Surge (m)	Sway (m)	Yaw ($^\circ$)	Pitch ($^\circ$)	Roll ($^\circ$)
Mean Absolute Error	0.06	0.14	0.14	0.15	0.07	0.36

The results show that despite not having all the variables referenced in the model, it is possible to estimate with a mean precision of at least 0.36° the rotations, and 14 cm the displacements. From Table 10 it can be seen that, coinciding with the values of R^2 , the largest errors were produced in the case of the roll, and the smallest for the heave.

4.3. Model Validation

An external validation procedure was implemented in order to evaluate the predictive ability of the transfer functions compared in the previous section. For this purpose, 20% of the data obtained in the field campaigns was applied to the transfer functions and the results were compared (Figure 9).

As can be observed in Figure 9, heave, surge, yaw, and pitch estimated and measured movements conform to the bisector of the first quadrant. Sway and roll movements present a similar fit, but in a less precise way. This fact demonstrates that the proposed models achieve their objective. However, as before, the existing differences were produced by climatic characteristics, the mooring lines and the cargo configuration. Figure 10 shows the comparison between the measured heave and roll motions, and those estimated by the transfer functions from the validation data.

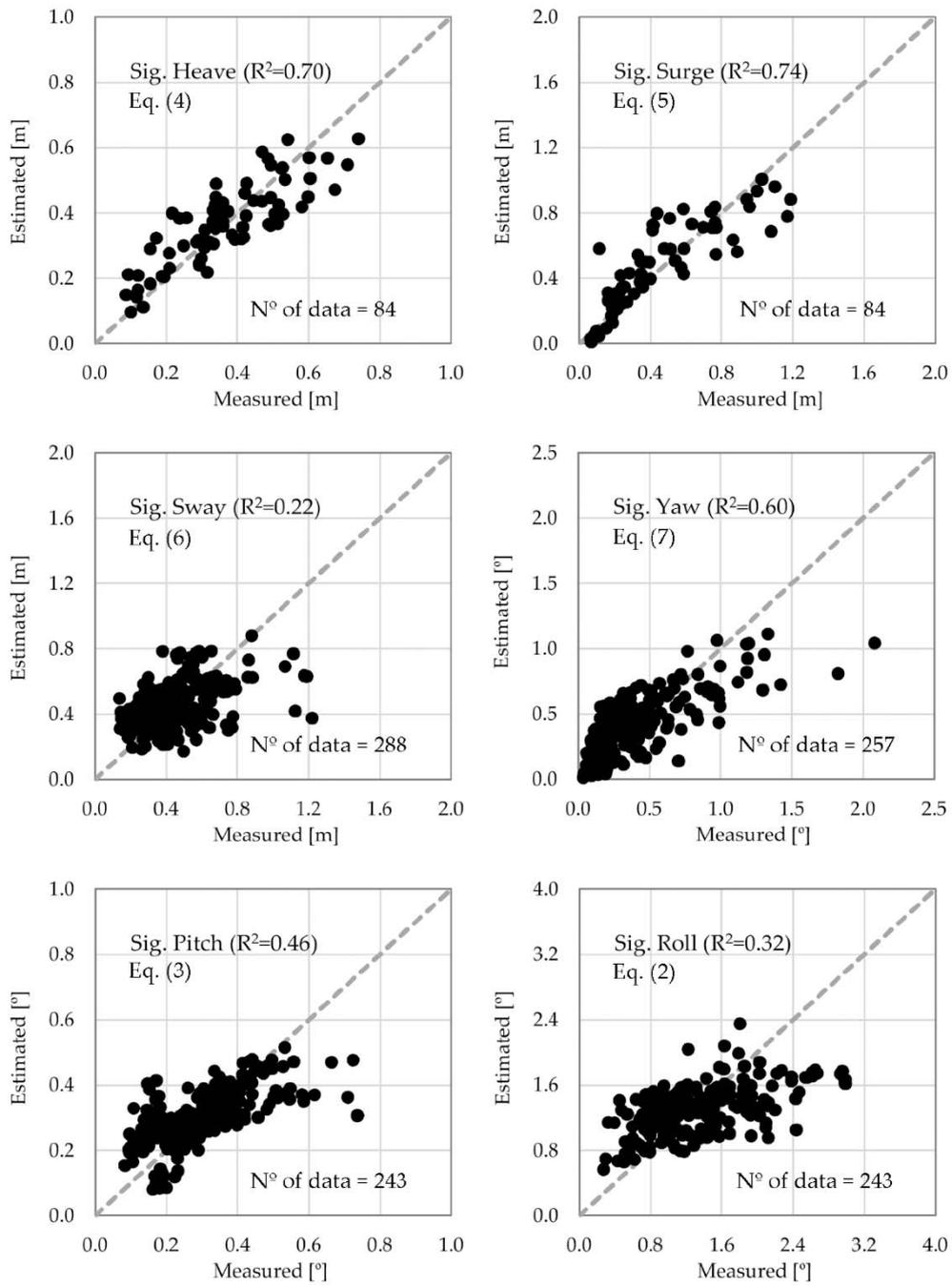


Figure 9. Validation of the multivariate linear models.

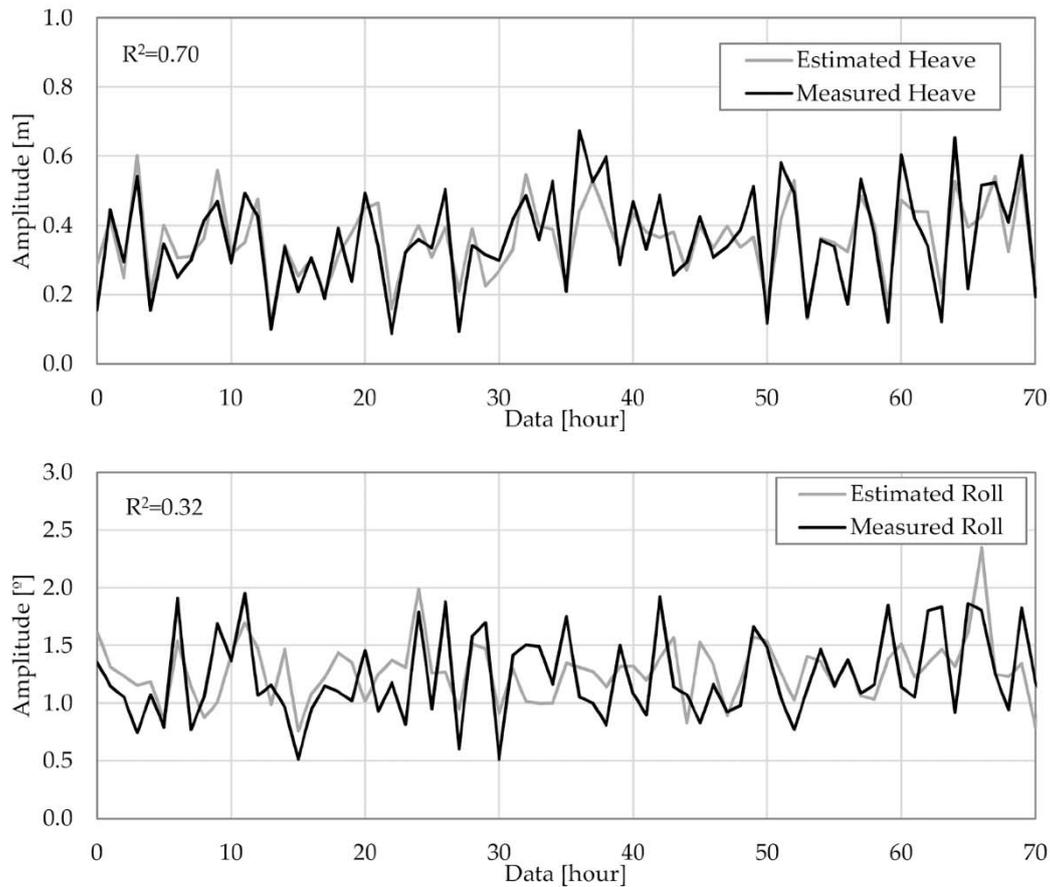


Figure 10. Comparison between measured and estimated values of heave and roll motions.

To quantify the accuracy of the estimations, the determination coefficient (R^2) and the root mean square error (RMSE) of each movement were analyzed (Table 11).

Table 11. Obtained values of the R^2 coefficient and the root mean square error (RMSE) in transfer functions validation.

Movement	R^2	RMSE
Heave	0.70	0.08 m
Surge	0.74	0.16 m
Sway	0.22	0.18 m
Yaw	0.60	0.20°
Pitch	0.46	0.09°
Roll	0.32	0.44°

Comparing Tables 9 and 11, the obtained validations reflect the same pattern as the calculated transfer functions. Similarly, both the determination coefficient (R^2) and the root mean square error (RMSE) obtained were shown to be of the same order of magnitude. Therefore, it can be concluded that the accuracy of the validation is similar to that of the calculated functions. Moreover, it was also verified that the mean absolute error (MAE) had a similar value to that calculated by the models: 0.35° for the rotations, and 14 cm for the displacements (Table 12). However, as mentioned in Section 2, these tools will be fed with weather forecast data, so their accuracy will also be conditioned by the port's own forecasting system (Table 2).

Table 12. Mean absolute error (MAE) for each of the six degrees of freedom studied in the validation of the transfer functions.

	Mean Absolute Error					
	Heave (m)	Surge (m)	Sway (m)	Yaw (°)	Pitch (°)	Roll (°)
Validation	0.07	0.12	0.14	0.14	0.07	0.35

Finally, the application of this methodology and the implementation of the obtained models in a port management system would provide reasonable predictions of the expected movements of moored vessels from weather forecast data. Comparing this information with the movement thresholds specified by the different standards would detect possible operational downtimes and risk situations in the berthing area. Therefore, this tool would help to identify operational windows for ships, facilitating decision making on port berth occupancy planning.

5. Conclusions

This paper presents an analytical methodology to relate the movements of moored vessels using the variables available in forecast data including specifically, ship dimensions and climatic conditions. This work was applied and validated for 27 moored vessels (15 Bulk carrier and 12 General cargo) at the facilities of the Outer Port of Punta Langosteira, A Coruña, Spain. The results obtained are currently incorporated in its port management system.

The results show that this methodology can be used to predict the six degrees of freedom of moored vessels. These models were obtained assuring that the variables used were independent of each other. The values of the determination coefficient (R^2) and of the root mean square error (RMSE) indicate that the equations calculated allow a reasonable prediction of the movements. Even models with lower R^2 values (sway and roll movements) are able to estimate the main trend of the expected movements. In addition, the mean absolute error reveals that the errors are less than 14 cm for the displacements, and less than 0.36° for the rotations.

As a conclusion, it can be verified that the methodology proposed facilitates an advance towards a better understanding of the factors that influence port operations in the Outer Port of Punta Langosteira. This is the first step in order to generate warnings that assist port management and help to optimize the use of the port's resources and facilities. Also, this methodology could be exportable to other ports providing an analysis of the influential and available forecast variables is made, as well as a record of the movements of the moored vessels.

Author Contributions: Investigation and data acquisition: J.S., A.F. and A.A.; conceptualization and methodology: J.S., A.F., and J.T.-S.; writing—original draft: J.S. and A.F.; writing—review and editing: A.F.; supervision and critical revision: E.P. and J.R.R.

Funding: This research was funded by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness, R & D National Plan, within the project BIA2017-86738-R.

Acknowledgments: The authors gratefully acknowledge the financial support of the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness, R & D National Plan, within the project BIA2017-86738-R. In addition, special thanks to the Port Authority of A Coruña, Spain.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Kumar, P.; Batra, G.; Kim, K.I. A Moored Ship Motion Analysis in Realistic Pohang New Harbor and Modified PNH. In Proceedings of the 1st International Conference on Modern Mathematical Methods and High Performance Computing in Science and Technology, M3HPCST, Ghaziabad, India, 27–29 December 2015; Springer International Publishing: Ghaziabad, India, 2016; pp. 207–214.

2. Peña, E.; Figuero, A.; Sande, J.; Guerra, A.; Perez, J.D.; Maciñeira, E. Integrated system to evaluate moored ship behavior. In Proceedings of the 36th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, Trondheim, Norway, 25–30 June 2017; Volume 7A-2017.
3. PIANC. *Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours: A Practical Guide*; PIANC General Secretariat: Brussels, Belgium, 1995.
4. Puertos del Estado. ROM 2.0-11. *Recomendaciones para el Proyecto y Ejecución en Obras de Atraque y Amarre*; Ministerio de Fomento: Madrid, Spain, 2011; ISBN 9788488975409.
5. Figuero, A.; Peña, E.; Sande, J.; Costa, F. Analysis of the movements and operational limits of moored vessels in outer and inner ports of A Coruña (Spain). In Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2016, Lisbon, Portugal, 4–6 July 2016; Volume 1.
6. Natarajan, R.; Ganapathy, C. Model experiments on moored ships. *Ocean Eng.* **1997**, *24*, 665–676. [[CrossRef](#)]
7. Rosa-Santos, P.; Taveira-Pinto, F.; Veloso-Gomes, F. Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. *Coast. Eng.* **2014**, *85*, 60–71. [[CrossRef](#)]
8. Baker, S.; Frank, G.; Cornett, A.; Williamson, D.; Kingery, D. Physical Modelling and Design Optimizations for a New Container Terminal at the Port of Moin, Costa Rica. In *Ports 2016: Port Engineering Proceedings of the 14th Triennial International Conference, New Orleans, LA, USA, 12–15 June 2016*; Oates, D., Burkhart, E., Grob, J., Eds.; American Society of Civil Engineers (ASCE): Reston, VA, USA, 2016; pp. 560–569.
9. Taveira Pinto, F.; Veloso Gomes, F.; Rosa Santos, P.; Guedes Soares, C.; Fonseca, N.; Santos, J.A.; Moreira, A.P.; Costa, P.; Brógueira Dias, E. Analysis of the Behavior of Moored Tankers. In Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008), Estoril, Portugal, 15–20 June 2008; American Society of Mechanical Engineers (ASME): New York, NY, USA, 2008; Volume 4, pp. 755–764.
10. Cornett, A. Physical modelling of moored ships for optimized design of ports and marine. In Proceedings of the 5th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection, Varna, Bulgaria, 29 September–2 October 2014.
11. Pawar, R.; Bhar, A.; Dhavalikar, S.S. Numerical prediction of hydrodynamic forces on a moored ship due to a passing ship. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part. M J. Eng. Marit. Environ.* **2019**, *233*, 575–585. [[CrossRef](#)]
12. Kwak, M. Numerical Simulation of Moored Ship Motion Considering Harbor Resonance. In *Handbook of Coastal and Ocean Engineering: Expanded Edition*; Kim, Y.C., Ed.; World Scientific Publishing Company: Singapore, 2017; Volume 2, pp. 1081–1110.
13. Pinheiro, L.; Fortes, C.J.; Santos, J.A.; Rosa-Santos, P. Numerical simulation of the motions and forces of a moored ship in Leixões harbour. In Proceedings of the 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2016, Lisbon, Portugal, 4–6 July 2016; Volume 1, pp. 217–226.
14. Varyani, K.S.; Vantorre, M. New generic equation for interaction effects on a moored containership due to a passing tanker. *J. Ship Res.* **2006**, *50*, 278–287.
15. Aksnes, V. A simplified interaction model for moored ships in level ice. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2010**, *63*, 29–39. [[CrossRef](#)]
16. Figuero, A.; Sande, J.; Peña, E.; Alvarellós, A.; Rabuñal, J.R.; Maciñeira, E. Operational thresholds of moored ships at the oil terminal of inner port of A Coruña (Spain). *Ocean Eng.* **2019**, *172*, 599–613. [[CrossRef](#)]
17. Figuero, A.; Rodríguez, A.; Sande, J.; Peña, E.; Rabuñal, J.R. Field measurements of angular motions of a vessel at berth: Inertial device application. *Control Eng. Appl. Inform.* **2018**, *20*, 79–88.
18. Figuero, A.; Rodríguez, A.; Sande, J.; Peña, E.; Rabuñal, J.R. Dynamical study of a moored vessel using computer vision. *J. Mar. Sci. Technol.* **2018**, *26*, 240–250.
19. Gómez Lahoz, M.; Carretero Albiach, J.C. Wave forecasting at the Spanish coasts. *J. Atmos. Ocean Sci.* **2005**, *10*, 389–405. [[CrossRef](#)]
20. López, M.; Iglesias, G. Long wave effects on a vessel at berth. *Appl. Ocean Res.* **2014**, *47*, 63–72. [[CrossRef](#)]
21. Van der Molen, W.; Scott, D.; Taylor, D.; Elliott, T. Improvement of Mooring Configurations in Geraldton Harbour. *J. Mar. Sci. Eng.* **2016**, *4*, 3. [[CrossRef](#)]
22. Zelterman, D. *Applied Multivariate Statistics with R*; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2015; ISBN 978-3-319-14093-3.
23. Carral-Couce, L.; Naya, S.; Álvarez Feal, C.; Lamas Pardo, M.; Tarrío-Saavedra, J. Estimating the traction factor and designing the deck gear for the anchor handling tug. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part. M J. Eng. Marit. Environ.* **2016**, *231*, 600–615. [[CrossRef](#)]

24. Carral, L.; Tarrío-Saavedra, J.; Naya, S.; Bogle, J.; Sabonge, R. Effect of Inaugurating the Third Set of Locks in the Panama Canal on Vessel Size, Manoeuvring and Lockage Time. *J. Navig.* **2017**, *70*, 1205–1223. [CrossRef]
25. Carral Couce, L.; Couce, J.C.; Tarrío-Saavedra, J.; Formoso, J.A.F. Net winch design in trawlers, influence of vessel size and fishing ground. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part. M J. Eng. Marit. Environ.* **2017**, *233*, 108–123. [CrossRef]
26. Jain, P.; Deo, M.C. Artificial Intelligence Tools to Forecast Ocean Waves in Real Time. *Open Ocean Eng. J.* **2008**, *1*, 13–20. [CrossRef]
27. Wang, D.; Xiong, X.L. Multivariate Linear Regression Model for Ship Traffic Flow Prediction Based on Influence Factors Analysis. *Ship Ocean Eng.* **2010**, *3*, 178–180.
28. Kutner, M.H.; Nachtsheim, C.; Neter, J.; Li, W. *Applied Linear Statistical Models*, 5th ed.; McGraw-Hill/Irwin: New York, NY, USA, 2005; ISBN 0072386886.
29. Burnham, K.P.; Anderson, D.R. *Model. Selection and Multimodel Inference. A Practical Information-Theoretic Approach*, 2nd ed.; Springer: New York, NY, USA, 2002; ISBN 978-0-387-22456-5.



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Anexo II

**Otros artículos indexados en bases de datos SCOPUS/WOS
relacionados con la Tesis Doctoral**

Artículo I

**Analysis of movements and operational limits of moored vessels in
Outer and Inner ports of A Coruña (Spain)**

Analysis of movements and operational limits of moored vessels in Outer and Inner ports of A Coruña (Spain)

A. Figuero, E. Peña, J. Sande, F. Costa

Water and Environmental Engineering Group (GEAMA), University of A Coruña, A Coruña, Spain

ABSTRACT: The characterization of the dynamic behavior of moored vessels inside the port has a major importance not only in the design of mooring systems, but also to establish limiting operation conditions. This paper presents the results obtained in two different projects developed in Outer and Inner ports of A Coruña (Spain). In the first field campaign, the dynamic behavior of an antipollution vessel was monitored in order to validate an innovative procedure based on a self-made inertial measurement unit (IMU), capable of measure three of the six degrees of freedom of a floating body, together with complementary visual images techniques. In the second project, the dynamic behavior of different moored vessels was measured. The aim of this project was to determine ship movements, comparing them with operational limits established by the PIANC and Spanish ROM Recommendations. Some monitored vessels had higher movements than the maximum values established by these recommendations.

1 INTRODUCTION

The knowledge of the response of moored vessels could contribute to optimize harbour operations, minimizing damages in docks and cargo, and reducing downtime in loading and unloading operations. Mooring problems in port facilities are often related with excessive movements of the moored ships caused by wave action and its related phenomena, such as long waves or harbor resonance (e.g. González-Marco et al. 2008, Kwak et al. 2012). Several studies have focused on the characterization of dynamic behaviour of moored ships through numerical and physical modelling.

Since 2013, A Coruña Port Authority has shown special interest in the monitoring and control of the ship movements, and has carried out two different projects with field campaigns developed in Outer and Inner Ports of A Coruña (Spain). The first field campaign was developed in the Outer Port of Punta Langosteira, located 20 km away from the city of A Coruña. The dynamic behavior of an antipollution vessel, of 72 m length and 3300 dwt, moored for three months, was monitored (Fig. 1). In addition, a hydrodynamic study was done in collaboration with consultancies, Aquática Ingeniería Civil and Siport21 (Trejo et al. 2014).

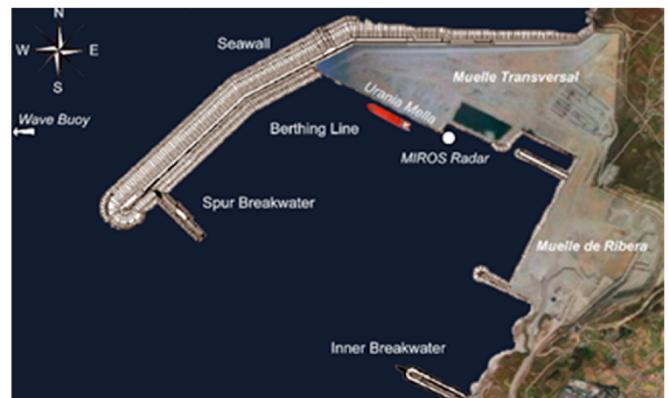


Figure 1. Outer Port of A Coruña, and mooring location of the Urania Mella during the field campaign.

The second field campaign was carried out during the spring and autumn of 2015 in the Inner Port of San Diego, located inside the city (Fig. 2). In this case, the dynamic behavior of different types of vessels (gas tankers, oil tankers and general cargo ships) was measured with an average staying in port of 1.5 days. The main goal of this project was to determine ship motions and mooring tensions during extreme events, comparing them to the operational limits established by the PIANC and Spanish ROM Recommendations.



Figure 2. Inner Port of A Coruña, and mooring locations during the field campaign.

In both projects an innovative procedure was used for monitoring vessel movements, based on a self-made inertial measurement unit (IMU) carefully calibrated (Rodríguez et al. 2015), capable of measure the angular movements of a ship, together with complementary visual images techniques to analyzed vessel displacements (heave and surge). As a complement to develop improvement strategies in harbour operability, tensions were measured at mooring lines with load cells.

2 METHODOLOGY

This section presents the theoretical explanation of the proposed techniques (IMU and visual imaging technique) to characterize the dynamic behavior of moored vessels. Then, data analysis procedure is described.

2.1 *Measuring angular movements with an Inertial Measurement Unit (IMU)*

Ship orientation can be modified by three angular movements: pitch, roll and yaw (Fig. 3). To measure these motions, an Inertial Measurement Unit (IMU) was built by integrating data of three different sensors.

First, a 3-axis microelectromechanical (MEMS) gyroscope was used to measure the angular velocity of the body. Gyroscopes suffer from noise component, called bias, which is the average output from the gyroscope when the body is not undergoing any rotation. This error can be ruled out measuring the long-term average signal obtained without any rotation and subtracting it from the output (Woodman 2007). One of the biggest problems of using gyroscopes in IMU units is that they have tendency to drift, not returning to zero when the system went back to its original position. As a result, gyroscope data is reliable only on the short term, as it starts to drift on the long term.

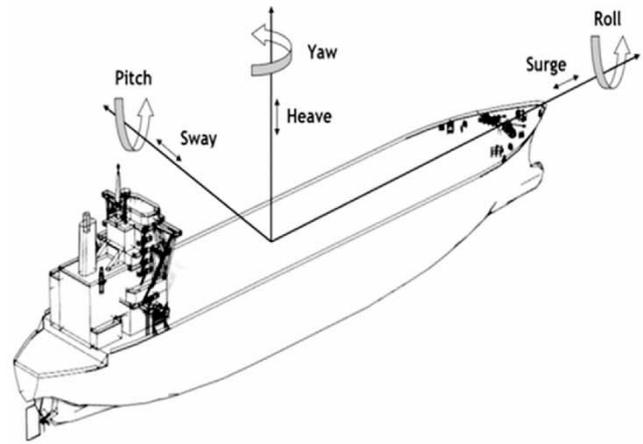


Figure 3. Six possible movements of moored vessels.

The IMU device used in this work was also equipped with three accelerometers. Accelerometers measure the acceleration of the moving object relative to itself. The most important source of error from accelerometers is also the bias constant error (Woodman 2007). Accelerometers are very sensible to disturbances due to small forces acting on the body. In general, the accelerometer data is reliable only on the long term.

Finally, the proposed device was equipped with three orthogonal anisotropic magneto-resistive (AMR) sensors. The magnetometers measure the strength and direction of the local magnetic field, allowing the north direction to be found. Magnetometers are not accurate enough to replace gyroscopes or accelerometers and they are affected by local disturbances in the earth's magnetic field caused by nearby magnetic objects.

Integration of different sensor devices to obtain a robust IMU unit has been studied in works such as Gebre-Egziabher et al. (2004). In this device, the gyro was used as the primary source of orientation information, and other measurements were used as a feedback to the system to dissipate the errors. Therefore, two corrections were applied. First, the magnetometers were used to correct the heading of the vessel, i.e. the rotation on the Z axis. Roll and Pitch drift correction vectors were estimated from the output provided by these sensors. Then the accelerometers were used to correct the orientation of the Z axis, which, in the frame reference of the earth, coincides with the orientation of the gravity vector. The output of these sensors was used to correct yaw angular movement.

The device was carefully calibrated in different laboratory tests, in order to measure and compare the accuracy of the system (Rodríguez et al. 2015). The obtained results showed a precision up to 0.2° .

IMU was installed inside the bridge of each monitored vessel (Fig. 4), registering uninterruptedly the angular movements of the ship with a frequency of 4 Hz during its stay in port. The device has to be

placed carefully, the magnetometers are affected by ferromagnetic metal and yaw measure could be altered.



Figure 4. IMU installed inside of the vessel.

2.2 Measuring displacement with visual imaging technique

The proposed technique was based on the analysis of image sequences from cameras with different perspectives of the moored ship.

With the purpose of estimate heave, surge and pitch movements of the ships, a set of features was tracked in different sequences and the displacement information was then integrated to extract the movements of the ships. To this end, cameras were synchronized in time, and calibrated.

The employed strategy to track ship features was based on a principle called Block-Matching. This technique was first proposed in Jain & Jain (1981) and nowadays is one of the most popular techniques for estimating motion in different fields (Rodriguez et al. 2012, Wiest-Daessle & Prima 2012). Over time, several contributions and theoretical approaches have been explored in research works regarding Block-Matching until today (e.g. Alex Pandian et al. 2013, Cuevas et al. 2013).

According to this technique (Fig. 5), regions called blocks are created around each point of interest and the correspondence problem is then solved for each of the blocks maximizing a similarity value. To this end, given a block B_{XY} the similarity value $S_{u,v}$ will be the result of comparing the initial block with a candidate one $B'_{X'Y'}$ in the next images using a function $f(B_{XY}, B'_{X'Y'})$. This comparison output measures the confidence in the hypothesis $B_{XY} = B'_{X'Y'}$ being $d(x, y) = (u, v)$ a displacement accomplishing $(x + u, y + v) = (x', y')$.

To measure heave, surge and pitch movements of the ship with the proposed technique, two digital cameras, isolated from atmospheric conditions and equipped with a remote control, were deployed in front of the ships: the first in front of the bow and the other one in front of the stern (Fig. 6).

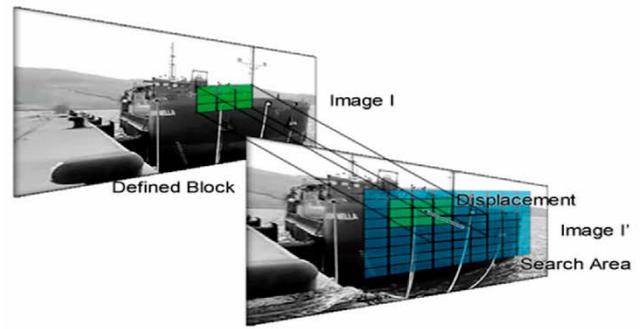


Figure 5. Block matching technique. One block in a frame is compared with multiple regions representing different possible displacements in the next frame.

Ten control points were established over the vessel, in the field of view of each camera. The analysis of the displacement of the control points allowed calculating surge, heaving and pitching movements. The pictures were taken uninterruptedly with a frequency of 1 second along the day.

To obtain better results, cameras must be placed as perpendicular to the longitudinal axis of the ship as possible, without obstacles that hinder vision.

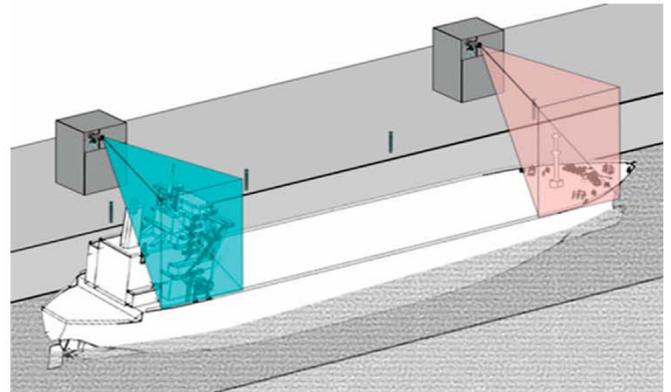


Figure 6. Image acquisition scheme, the field of view and the location of the cameras used are represented in the image.

2.3 Data analysis procedure

Described techniques allowed monitoring the dynamic response of moored vessels uninterruptedly during their stay in port. The time domain analysis of the motion series was based on a zero crossing technique having as reference the ship initial position. Therefore, for each specific oscillation mode, peak-to-peak motion amplitudes were the differences between the maximum and minimum positions of the ship's center of gravity between two successive down-crossing zeros (which define a ship oscillation, PIANC 1995). Data were split in blocks of 10 minutes and then a statistical analysis was performed to compare the maximum and significant values of each movement.

3 RESULTS

In the following section, the results of Outer and Inner Port are presented. The first project was developed in the Outer Port of A Coruña in order to validate both described techniques in a real scenario. A field campaign was performed to measure the dynamic behavior of the ship *Urania Mella*, moored in these facilities. The three angular movements of the vessel were measured uninterruptedly with IMU during its stay in port. Figure 7 shows maximum and significant values of yaw angular movement.

Heave, surge and additional measurement of pitch were obtained using the visual imaging technique. Figure 8 represents surge movement measured in bow and stern regions of the ship.

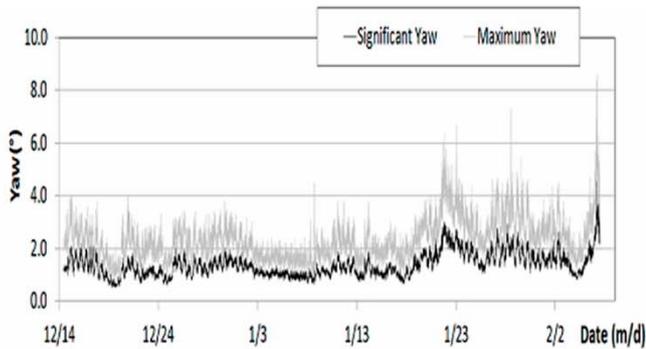


Figure 7. Significant and maximum yaw measured with the IMU.

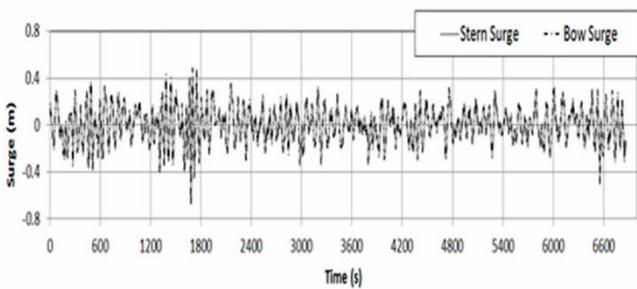


Figure 8. Surge measured along time in the bow and stern parts of the *Urania Mella*.

Analyzing the obtained results, it can be seen that surge measurements are identical in the front and fore part of the vessel, achieving both variables a correlation rate of 97.2%.

In order to validate the methodology, pitch angular movements obtained with both technologies were compared. As Figure 9 shows both techniques obtained almost identical results measuring significant values of pitch.

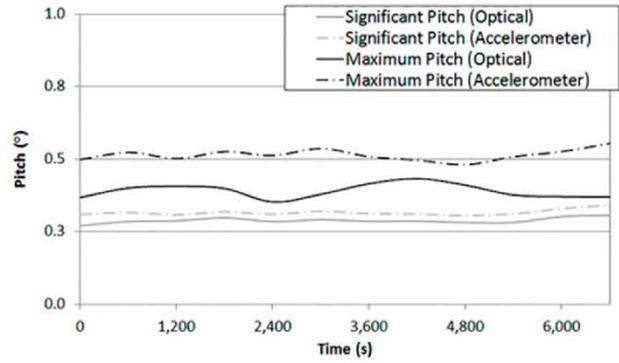


Figure 9. Significant and maximum pitch measured with image system and IMU.

Additionally, during the measurement period, a hydrodynamic campaign was developed and mooring tensions were quantified. A strong linear relation of the angular movements with wave height measured inside the port was detected. In addition, a light linear relation with wave height in the open ocean was observed. Obtained results are statistically significant using Pearson equation (p -value < 0.05) and are shown in Table 1.

Table 1. Pearson correlation of angular movements with wave height.

	Wave Height Ocean	Wave Height Port
Roll	0.64	0.79
Pitch	0.62	0.72
Yaw	0.68	0.83

Once validated the utility of the technologies to study the dynamic behavior of moored vessels, a second project is being carried out in the Inner Port of A Coruña, which is allowing determining new port operability thresholds comparing with current recommendations. The dynamic behavior of ten vessels has been monitored during their operation time. Roll movement presented the highest amplitudes in most of the analyzed vessels. Figures 10-11 show significant amplitudes of movements of a representative ship obtained with IMU and visual image technique, respectively.

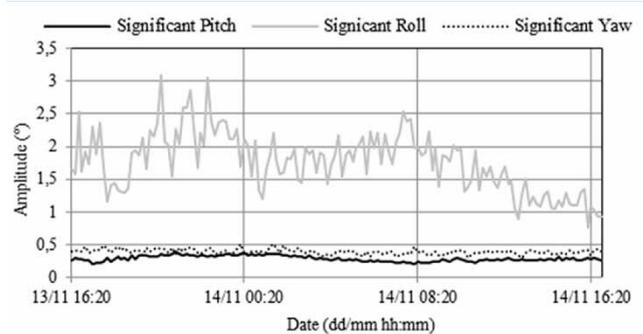


Figure 10. Significant values of angular movements of *Castillo de Trujillo* oil tanker obtained with IMU.

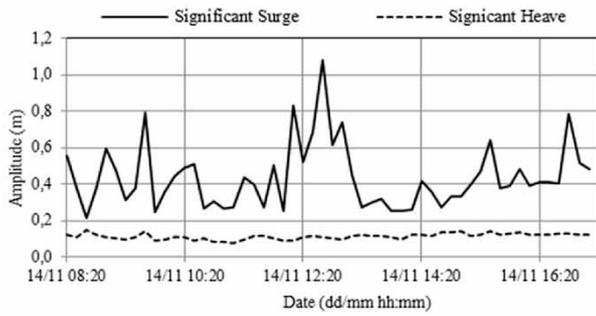


Figure 11. Significant values of displacements of Castillo de Trujillo oil tanker obtained with visual image technique.

It is remarkable, the amplitudes of roll and yaw movements measured during cargo operations in two of the analyzed vessels, Matthew and Scali del Teatro LPG tankers moored in the 2nd jetty of the Inner Port (Fig. 2), exceeded PIANC and Spanish ROM Recommendations standards (Fig. 12), without downtimes or any consequences to the safety of the vessels.

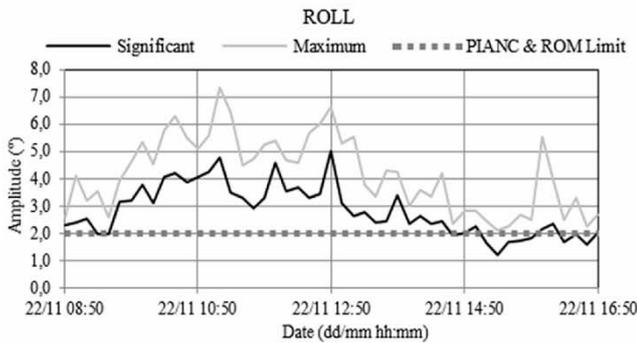


Figure 12. Maximum and significant values of roll angular movement of Scali del Teatro LPG tanker.

It should be note that not only maximum and significant peak values of roll and yaw exceeded the operational limits, but also the mean significant value of these movements during the analyzed period (Table 2-3).

Table 2. Maximum and Mean Significant values during cargo operation of Matthew LPG tanker.

	Max.	Mean Sign.	PIANC Limits	ROM Limits
Pitch (°)	0.58	0.16	2.0	2.0
Roll (°)	6.38	2.14	2.0	2.0
Yaw (°)	4.52	0.99	2.0	2.0

Table 3. Maximum and Mean Significant values of movements during cargo operation of Scali del Teatro LPG tanker.

	Max.	Mean Sign.	PIANC Limits	ROM Limits
Pitch (°)	0.76	0.38	2.0	2.0
Roll (°)	7.36	2.84	2.0	2.0
Yaw (°)	6.15	3.70	2.0	2.0
Heave (m)	0.61	0.26	--	--
Surge (m)	1.02	0.31	2.0	4.0

Surge and heave motions registered during the cargo operation of Scali del Teatro LPG tanker did not exceed operational thresholds, under the same climate conditions (Table 3). May be downtimes for this type of ships are more influenced by displacements (mainly surge) rather than by angular motions.

As PIANC and Spanish ROM are useful guidelines, their motion limiting criteria represent generic values applicable to facilities all over the world and exceptions are possible. Currently, the number of monitored vessels is being increased in order to establish optimal operational thresholds for these facilities. In addition, since December 2015 a hydrodynamic campaign is being developed with the aim of determining relations between wave parameters and the dynamic behavior of moored vessels.

In order to complete the obtained information, tensions were measured in two mooring lines of analyzed vessels with load cells (head line and stern line). No excessive tensions were registered at any monitored ship.

4 CONCLUSIONS

The main conclusion obtained with this study is that the proposed techniques (IMU and visual imaging technique) allow characterizing the dynamic behavior of moored ships inside ports in field campaigns. The results obtained allow establishing limiting operation conditions and quantifying the availability of the terminals.

In the first project of this work, both technologies were tested in the Urania Mella, moored in the Outer Port of A Coruña (Spain), in order to analyze its dynamic response. Movements were characterized and compared with wave parameters. Obtained results showed that wave height was the most determinant factor in the dynamic behavior of Urania Mella.

In the second project, developed in the Inner Port, ten different vessels were analyzed. Some of the monitored ships had higher angular movements than the maximum values established for loading and un-

loading operations by the PIANC and Spanish ROM Recommendations. However, these operations were carried out without any problem. Although the obtained results suggest that angular movement thresholds established by the recommendations should be revised, it is necessary more in-depth studies to determine the limiting criteria applicable to these facilities.

Final goal is to determine new thresholds specifically to be applied in the increasing number of Outer Ports worldwide, to become competitive in maritime transport.

ACKNOWLEDGEMENT

The research team wishes to thank Port Authority of A Coruña, Siport21 and Acuática Ingeniería Civil for the financial support and technical assistance.

REFERENCES

- Alex Pandian, S.I., Bala, G.I. and Anitha, J. 2013. A pattern based PSO approach for block matching in motion estimation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26: 1811-1817.
- Cuevas, E., Zaldívar, D., Pérez-Cisneros, M., Oliva, D. 2013. Block-matching algorithm based on differential evolution for motion estimation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 26 (1): 488-498.
- Gebre-Egziabher, D., Hayward, R.C. and Powell, J.D. 2004. Design of multi-sensor attitude determination systems. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on Communications* 40: 627-649.
- González-Marco, D., Sierra, J.P., Ybarra, O.F., Sánchez-Arcilla, A. 2008. Implications of long waves in harbor management: the Gijón port case study. *Ocean Coast. Manag.* 51 (2): 180-201.
- Jain, J.R. and Jain, A.K. 1981. Displacement Measurement And Its Application In Interframe Image Coding, *IEEE Transactions on Communications* 29: 1799-1808.
- Kwak, M., Moon, Y., Pyun, C. 2012. Computer simulation of moored ship motions induced by harbour resonance in Pohang new harbour. In: Lynett, P., Smith, J.M. (Eds.), *Proceedings of the 33rd International Conference on Coastal Engineering—ICCE*: 2156-1028. Santander, Spain.
- Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC) 1995. Criteria for movements of moored ships in harbours, a practical guide. *Report of the WG24 of the Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin N°88*. PIANC, Brussels, Belgium.
- Rodríguez, A., Rabuñal, JR., Peña, E., Costa, F., Figuero, A. 2015. Inertial measurement of moored vessel dynamics in the Outer Port of A Coruña. *Journal of Ship Research* (under review).
- Rodríguez, A., Rabuñal, J. R., Pérez, J. L. and Martínez-Abella, F. 2012. Optical Analysis of Strength Tests Based on Block-Matching Techniques. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 27: 573-593.
- Trejo, I., Pérez, JD., Guerra, A., Iribarren, JR., Gómez, J., Sopelana, J., Peña, E. 2014. Onsite Measurement of Moored Ships Behaviour (RTK GPS), Waves and Long Waves in the Outer Port of A Coruña (Spain). *Proceedings of PIANC World Congress*. San Francisco, USA.
- Wiest-Daessle, N. & Prima, S. 2012. Block-matching strategies for rigid registration of multimodal medical images. *IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI)*: 700-703.
- Woodman, O.J. 2007. An introduction to inertial navigation. *University of Cambridge Computer Laboratory*. ISSN 1476-2968.

Artículo II

Integrated system to evaluate moored ship behavior

OMAE2017-61110

INTEGRATED SYSTEM TO EVALUATE MOORED SHIP BEHAVIOR

E. Peña

Water and Environmental
Engineering Group (GEAMA)
University of A Coruña
A Coruña, Spain

A. Figuero

Water and Environmental
Engineering Group (GEAMA)
University of A Coruña
A Coruña, Spain

J. Sande

Water and Environmental
Engineering Group (GEAMA)
University of A Coruña
A Coruña, Spain

A. Guerra

Port Authority of A Coruña
A Coruña, Spain

J. D. Perez

Port Authority of A Coruña
A Coruña, Spain

E. Maciñeira

Port Authority of A Coruña
A Coruña, Spain

ABSTRACT

The development of loading and unloading operations is an essential part of the logistical chain of maritime transportation. One of the determining factors in this process is the movement of moored ships, which has a notable influence over the efficiency of the operation. The implementation of systems to characterize their real behavior would provide an important tool for the management of these activities.

In this context the Water and Environmental Engineering Group (GEAMA) at the University of A Coruña, Spain (UDC), through different projects executed in collaboration with the Port Authority of A Coruña (Spain), has developed an integrated system for monitoring the dynamic behavior of moored vessels. This system includes different devices which allow to characterize their six degrees of freedom and tensions in certain mooring lines.

The analysis of motions is carried out using three combined technologies. Ship rotations (roll, pitch and yaw) are registered by means of an Inertial Measurement Unit (IMU) developed by the Research Group. The translations of heave and surge are analyzed with a visual tracking system using fixed cameras deployed near the location. Finally, the evaluation of sway motion and an additional measure of yaw are obtained using two laser-distance meters located over the dock.

All devices integrated in the system were calibrated in laboratory at the R+D Centre CITTEC-UDC with several series of tests. Once the methodology was validated, the system has been employed in different projects carried out in Inner and

Outer Ports of the city of A Coruña, with more than 30 monitored ships.

INTRODUCTION

The increase of the ships size generates the need to have larger maneuver areas and important water depth to operate in safety conditions. For this reason, new port facilities are built in more exposed areas (outer ports) with worse climatological conditions than the traditional ports located inside the estuaries and bays.

The aim of a berthing zone is to favor the development of goods handling processes. Loading and unloading operations represent the main activity of a port, and their capacity is directly related to the efficiency of port facilities. One of the determining factors in these activities is the behavior of moored ships. Downtimes are often related with large movements of the moored vessels caused by wave action and its related phenomena, such as long waves or harbour resonance [1].

The characterization of the response of moored ships inside the ports is a useful tool not only for designing berthing zones and equipment but also for determining the availability of the terminals and their limiting operation conditions. This behavior has been commonly analyzed by means of numerical and physical modelling.

Physical models of ports and harbors allow the reproduction of the most significant phenomena involved in the problem of moored ship behavior [2]. This tool is usually employed in final design stage of port facilities [1,3]. However, to make this instrument reliable it is necessary an intensive

calibration process as well as accuracy in the model construction which involves large economic costs.

Numerical models have grown in importance with the development of computers. Several authors have used this tool to calculate motions of moored ships and forces in mooring lines and fenders [4–6]. Nowadays, there are commercial products available to perform these simulations with a modest consumption of computational time, allowing to analyze different case studies [7]. Nevertheless, phenomena as turbulence and other effects rely on tuning in calculation models, therefore numerical tools cannot still replace entirely physical modelling for studying the response of moored ships [1,8].

The analysis of the real behavior of a moored vessel is a little bit explored practice. There are only few examples in the literature in which a real ship was monitored during its stay in port [9,10]. The implementation of this methodology would provide valuable information about the behavior of each port facility, allowing to identify real operational thresholds and potential issues of berthing zones. In addition, recorded data could be used to calibrate and validate numerical and physical models. In this context the Water and Environmental Engineering Group (GEAMA) at the University of A Coruña, Spain (UDC) has developed an integrated system for monitoring the dynamic behavior of moored vessels. This work presents the description of each device involved in the system and their application in a real project.

MOORED SHIP BEHAVIOR

A moored ship has six degrees of freedom classified into linear and angular motions. Surge, sway and heave represent the displacements in the longitudinal, transverse and vertical axis of the ship, and roll, pitch and yaw are the rotations around these axes. To analyze each motion, GEAMA uses a system composed of three different devices. Ship rotations (roll, pitch and yaw) are registered by means of an Inertial Measurement Unit (IMU). The displacements of heave and surge are analyzed with a visual tracking system. Finally, the evaluation of sway motion and an additional measure of yaw are obtained using two laser-distance meters. As a complement to the motion information, tensions in certain mooring lines are measured by means of load cells.

INERTIAL MEASUREMENT UNIT (IMU)

The IMU is the main component of inertial navigation systems [11,12]. It allows to track the position and orientation of a moving body object relative to a known starting point. In this work the application of an IMU to estimate angular movements of a moored ship is presented. The developed device is equipped with three different type of sensors. A 3-axis microelectromechanical (MEMs) gyroscope used to measure the angular velocity of the body. A 3-axis accelerometer to obtain the accelerations of the moving object relative to itself.

And finally, three orthogonal anisotropic magneto-resistive (AMR) sensors to measure the strength and direction of the local magnetic field.

These sensors separately have different sources of error. Gyroscopes suffer from noise component, called bias, which is the average output from the gyroscope when the body is not undergoing any rotation. This error can be easily corrected measuring the long-term average signal obtained without any rotation and subtracting it from the output [13]. Those also have tendency to drift, not returning to zero when the system goes back to its original position. The most important source of error from accelerometers is also the bias constant error [13]. Finally, magnetometers are affected by local disturbances in the earth's magnetic field caused by nearby magnetic objects.

The integration of these sensors allows to obtain a robust IMU [14]. This device uses gyro as primary source of orientation information, and other measurements are used as a feedback to the system to dissipate the errors. Therefore, two corrections are applied. First, yaw (rotations in the Z axis) correction vector is obtained from the output of the magnetometers. Then, roll and pitch (rotations in the X and Y axis) drift correction vectors are estimated from accelerometers. As mentioned, these sensors allow to measure accelerations. The data could be used to obtain the linear movements by integration. However moored vessels experience small changes of acceleration which are not recorded with accuracy by the accelerometers installed in the IMU. Therefore their data are only used to improve the measure of the gyro.

IMU was carefully calibrated in different laboratory tests at the R+D Centre CITTEC-UDC, in order to measure and compare its accuracy. Mathematical background applied in this device and the results of the validation tests are shown in Figuero et al. [15]. This device must be carefully installed inside the bridge of the monitored ship as far as possible from electromagnetic sources, in order to avoid possible interferences in yaw measure (Fig. 1). IMU allows to register roll, pitch and yaw during the ship stay in port with a recording frequency of 4 Hz.



Figure 1. IMU installed inside the ship.

VISUAL TRACKING SYSTEM

Visual tracking of moving objects is one of the most used technique in applications of fields such as video surveillance and process monitoring [16]. In this work, visual tracking was applied to obtain surge and heave motions of a moored vessel, using the correlation of visual features of images sequences of the ship to estimate these movements along time.

To this end, images from high resolution digital cameras are processed with a Block-Matching algorithm to obtain ship translations. This strategy is one of the most popular techniques for estimating motion in different fields [17,18]. This images are obtained by means of two digital cameras, isolated from atmospheric conditions and equipped with a remote control, located in front of the bow and stern of the ships (Fig. 2). Images are taken with a frequency of 1 Hz during the ship stay in port. This recording frequency is considered sufficient, taking in account the low-velocity of ship motions.

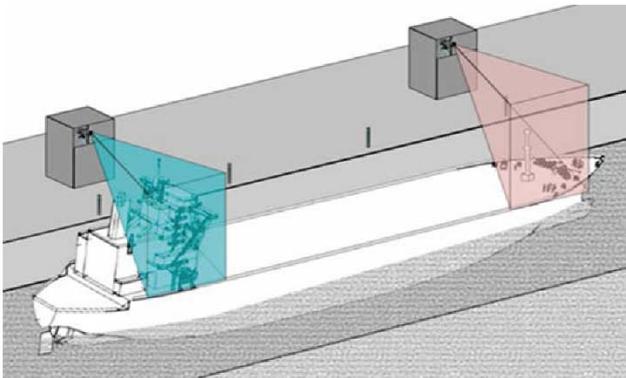


Figure 2. Image acquisition scheme.

The application of this technique starts selecting points and regions of interest in one of the images of the ship. Then, an automatic technique for feature detection is applied. In this work, the Speeded Up Robust Features (SURF) technique is used [19]. After selecting the features of interest, the employed strategy to track these points is based on an iterative multi-resolution pyramidal search process. This process is based on comparing the regions around the points of interest in the original image with the ones representing a candidate displacement according to a motion model (Fig. 3). The data obtained are a statistical measurement of the most probable discrete displacement.

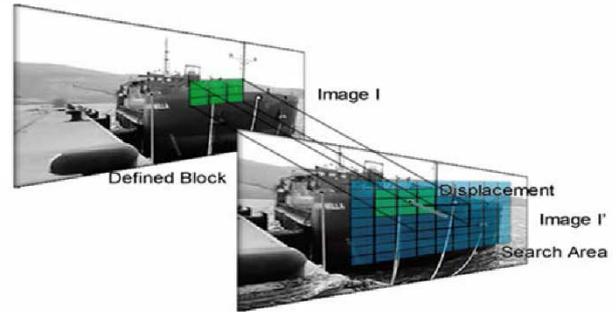


Figure 3. Block matching technique.

Finally, this algorithm extracts the 2D vector displacement field from each point of interest (Fig. 4). This strategy has been applied in other works of the GEAMA Research Group such as Rodriguez et al. [17], where the procedure is explained in detail.

This technique has as main source of error the distortion of the cameras frame of view as a consequence of roll and sway motions. The error can be minimized deploying carefully the cameras and selecting points of interest over the middle line of the ship. In addition, this technique has the advantage of being a non-intrusive methodology that improves the vessel monitoring.



Figure 4. Points of interest and displacement vectors.

LASER DISTANCE METERS

Laser distance meters (LDMs) are equipment widely used in industrial applications. Those can accurately measure the position of objects, the filling of tanks or the dimensions of manufactured products. In this case, LDMs have been used to analyze sway motion of the ships and to obtain an additional measure of yaw.

To this end, two industrial LDMs are used. The devices are deployed with the beam pointing to both ends of the central third of the ship. In most vessels this hull zone presents a flat

surface which facilitates the measure. Figure 5 shows the localization scheme of LDMs.

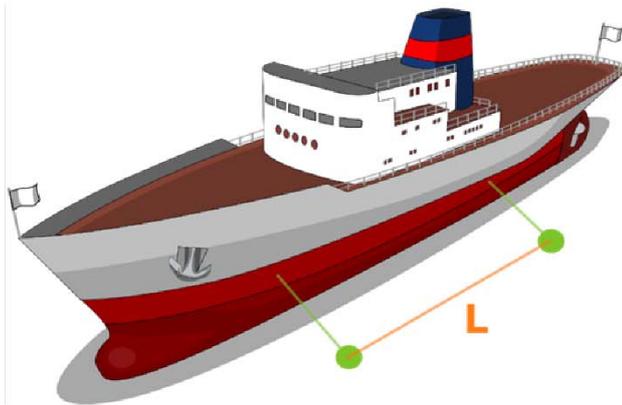


Figure 5. Localization scheme of LDMs.

Data from LDMs are recorded by means of dataloggers based on Arduino® technology, equipped with a SD shield and a RTC (Real Time Clock) chip as reliable source of time. This system (LDMs + dataloggers) employs rechargeable batteries as electric supply allowing the continuous register of sway motion. The set of devices is installed over the dock wall, inside an electric panel box (Fig. 6).



Figure 6. LDM and installation over the dock wall.

Moreover, LDMs allow to determine an additional measure of yaw applying the equation (1):

$$\theta (^{\circ}) = \tan^{-1} \left(\frac{d_1 - d_2}{L} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

Where d_1 represents the measured distance (m) of LDM of bow, d_2 represents the measured distance (m) of LDM of stern and L the distance (m) between both devices.

As the visual tracking system, LDMs are a non-intrusive monitoring method, very robust with few limitations.

MOORING TENSION

Changes in mooring tension can cause variations in the dynamic behavior of the ship. To complete the motion information, tensions in several mooring lines can be monitored using load cells. In the different projects carried out by the Research Team, two or three mooring lines were analyzed. This data does not allow to extract global conclusions but provides information about changes in mooring tension which can explain irregular ship motions.

This system is composed of load cells, rechargeable batteries and Arduino® board dataloggers, allowing continuous recording of tensions (Fig. 7).



Figure 7. Load cell installed in the Inner Port of A Coruña (Spain).

DEVICES SYNCHRONIZATION

Data fusion processes require an accurate time synchronization of the involved devices that will allow a direct comparison between the obtained information. Each device is synchronized using the official time of Spain (UTC ROA) provided by the NTP (Network Time Protocol) time server in "Real Instituto y Observatorio de la Armada" (<http://www.armada.mde.es/>).

To synchronize the equipment that use Arduino® dataloggers to store the data (LDMs and load cells), a specific code was developed which uses the NTP protocol to set the datalogger RTC chip (Fig. 8).



Figure 8. Arduino® datalogger and Ethernet board used to synchronize RTC chip.

DATA ANALYSIS

The combination of described technologies (IMU, Visual tracking system and LDMs) allow to obtain the time series of angular motions ($\theta_{Roll}(t)$, $\theta_{Pitch}(t)$ and $\theta_{Yaw}(t)$) and displacements ($\delta_{Heave}(t)$, $\delta_{Surge}(t)$ and $\delta_{Sway}(t)$) of moored ships during their stay in port. Figure 9 shows a one-hour sample of one of these motions.

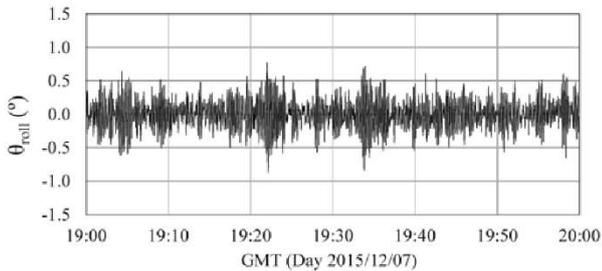


Figure 9. One-hour sample of roll time series.

The time domain analysis of the motion series is based on a zero crossing technique, having as reference the initial position of the ship. A peak-to-peak criterion is applied to each individual motion to obtain their amplitudes, except in the case of sway in which a zero-peak criterion is applied [20].

Complete time series are split into blocks of 20 minutes of duration. Then, a statistical analysis is performed to obtain for each block the maximum motion amplitude and significant motion amplitude, calculated as the average of the highest third amplitudes of the block (Fig. 10). Additionally, maximum and

significant amplitude of the entire measurement period is obtained for each motion.

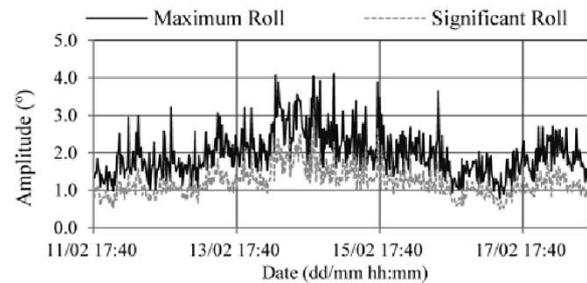


Figure 10. Sample of maximum and significant values of roll angular motion.

When mooring tensions are monitored, data from load cells are also split in blocks of 20 minutes obtaining the maximum and significant tension values of each one.

CASE STUDY: OUTER PORT OF A CORUÑA

In recent years, GEAMA was carried out different projects to study the behavior of moored vessels, employing the described systems. More than 30 ships have been analyzed during their stay in port. Then, results of one of these projects are presented (Outer Port Project).

The Outer Port of A Coruña is located 10 km from the city of A Coruña, in the northwest of Spain. Since 2015, the geometry of these facilities has experienced significant changes with the construction of the inner breakwater or the improvement of the berthing line (Fig. 11).



Figure 11. Outer Port of A Coruña, final geometry. Berthing line (red shape).

Once completed the final port geometry, the Port Authority of A Coruña (APAC) showed special interest in how changes

affected to the harbour behavior. To this end, GEAMA carried out a project to analyze the response of moored vessels during loading and unloading operations.

The field campaign was developed between November 2015 - March 2016 and motions of 11 vessels moored in Transversal Dock (Fig. 11, red shape) were measured. These ships were classified in two typologies, Bulk Carriers and General Cargo ships, with a mean stay in port of 3.5 and 1.5 days, respectively. The cargo handling operation were carried out by means of dock cranes. Table 1 shows the study fleet and the worst maritime conditions outside the port during the measuring period (significant wave height H_s and peak period T_p). H_s and T_p were obtained from a directional wave buoy located outside the harbour, about 1.500 meters off the main breakwater, property of the Spanish National Port Authority – “Puertos del Estado” (Fig. 12).



Figure 12. Location of the wave buoy (red shape).

Vessel name	Type	DWT (Tn)	Maritime cond.	
			H_s (m)	T_p (s)
Fu Da	Bulk carrier	71330	5.6	16.7
Marc	General cargo	4135	3.3	11.8
Celine	General cargo	8600	3.5	13.3
Dominica	General cargo	13022	2.2	13.3
Avax	Bulk carrier	87030	3.5	14.3
Yannis	Bulk carrier	50792	--	--
Kelly C	General cargo	6250	2.7	13.3
Notos	General cargo	8049	3.8	15.7
West. Boheme	Bulk carrier	37000	8.8	15.4
Pina Cafiero	Bulk carrier	75668	6.3	10.8
Jing Jin Hai	Bulk carrier	77872	2.8	15.3

Table 1. Study fleet and the worst maritime conditions outside the port during the measuring period.

In this project, roll registered the largest amplitudes of angular motions in all analyzed ships, with a maximum value of 5.2° (Fig. 13). The significant value of this motion exceeded 1.5° in most vessels, achieving a maximum of 2.9°. Yaw and pitch maximum amplitudes remained under 2.0° and 1.0° respectively in most cases. Only two vessels exceeded these values. Table 2 shows maximum amplitudes of each angular motion recorded during the field campaign.

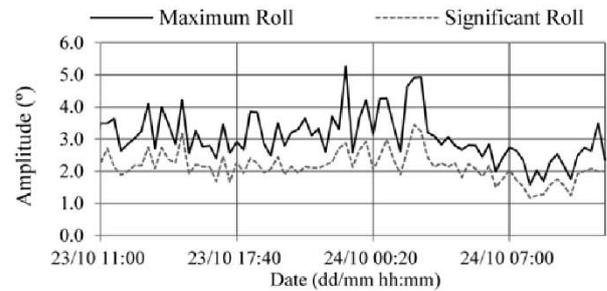


Figure 13. Maximum and significant values of roll angular movement of Fu Da Bulk carrier.

Vessel name	Maximum Values		
	Pitch (°)	Roll (°)	Yaw (°)
Fu Da	0.4	5.2	0.7
Marc	0.9	2.9	2.1
Celine	0.8	2.9	--
Dominica	0.8	3.2	1.2
Avax	0.6	3.8	0.5
Yannis	0.5	4.2	0.5
Kelly C	1.0	4.0	1.9
Notos	0.8	3.4	--
Western Boheme	1.1	4.1	3.3
Pina Cafiero	0.6	4.1	0.6
Jing Jin Hai	--	--	0.3

Table 2. Maximum amplitudes of angular motions.

Regarding displacements, the largest amplitudes recorded were 1.38 m, 2.72 m and 3.79 m for heave, surge and sway respectively (Table 3).

Vessel name	Maximum Values		
	Sway (m)	Surge (m)	Heave (m)
Fu Da	1.98	--	--
Marc	--	0.89	0.70
Celine	0.93	--	--
Dominica	0.74	1.99	0.82
Avax	0.74	0.61	0.96
Yannis	0.87	1.42	1.13
Kelly C	0.87	1.81	1.34
Notos	--	--	--
Western Boheme	3.79	2.72	1.38
Pina Cafiero	1.24	1.12	1.20
Jing Jin Hai	1.43	--	--

Table 3. Maximum amplitudes of displacements

Western Boheme Bulk carrier experienced the largest motion amplitudes in 5 of the 6 degrees of freedom (Table 4). It is remarkable that, during ship stay in port, the worst weather and maritime conditions were registered with important winds and significant wave heights up to 8.8 m outside the port.

Movements	Maximum	Significant
Pitch (°)	1.10	0.56
Roll (°)	4.1	2.91
Yaw (°)	3.3	0.66
Sway (m)	3.79	0.63
Surge (m)	2.72	0.88
Heave (m)	1.38	0.97

Table 4. Maximum and Significant values of movements during cargo operation of Western Boheme.

The effect of wind speed and direction over the behavior of moored vessel can be observed analyzing sway results of Western Boheme. Figure 14 shows maximum and significant amplitudes of this motion. Between February 14 and 15 ship experienced an increase of the values of sway. This behavior was probably induced by wind. In these dates, strong wind gusts acting perpendicular to the longitudinal axis of the ship were registered tending to separate vessel from the dock.

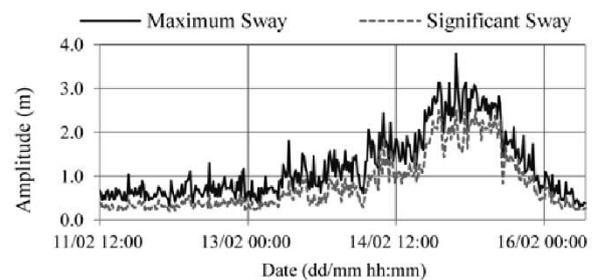


Figure 14. Maximum and significant values of sway movement of Western Boheme Bulk carrier.

Regarding port operability, no operational downtimes or any negative consequences to the safety of ships were registered during the field campaign. Although the maximum amplitudes of the motions registered large values, the significant ones stayed in the tolerable values range.

Further analysis is now under development with the comparison with the threshold operational limits (PIANC, Spanish ROM Recommendations), including the analysis of more detailed sea conditions and tensions in mooring lines.

CONCLUDING REMARKS

An integrated system to study the behavior of moored ships has been described in this work. This methodology is based on the use of three different technologies, inertial measurement unit (IMU), visual tracking system and laser-distance meters (LDMs) to measure the movements of a moored ship. These techniques were validated in laboratory test and applied in real projects such as Outer Port Project presented in this work. The system allows to characterize the motions of a moored ship inside the port.

The study presents a real application in 11 vessels in the Outer Port of Punta Langosteira (A Coruña, Spain) under relevant sea conditions, $H_s = [2.2 - 8.8]$ m, $T_p = [10.8 - 16.7]$ s, obtaining some relevant movements in roll and sway. The effect of wind magnitude and direction has also been analyzed. A significant result is that no downtimes were registered in any loading and unloading operations under these conditions.

As a final conclusion, these technologies can be used by Port Authorities as a useful tool, not only for evaluating the availability of the terminals and their limiting operation conditions, but also for designing berthing zones and mooring equipment.

ACKNOWLEDGMENTS

The research team thanks the Port Authority of A Coruña for the financial support and technical assistance.

REFERENCES

- [1] Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., and Veloso-Gomes, F., 2014, "Experimental Evaluation of the Tension Mooring Effect on the Response of Moored Ships," *Coast. Eng.*, **85**, pp. 60–71.
- [2] Taveira Pinto, F., Veloso Gomes, F., Rosa Santos, P., Guedes Soares, C., Fonseca, N., Santos, J. A., Morcira, A. P., Costa, P., and Brógueira Dias, E., 2008, "Analysis of the Behavior of Moored Tankers," *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)*, American Society of Mechanical Engineers, Estoril, Portugal, pp. 755–764.
- [3] van der Molen, W., and Moes, H., 2009, "General Characteristics of South African Ports and the Safe Mooring of Ships," *Proceedings of the 28th Annual Southern African Transport Conference*, Pretoria, South Africa, pp. 308–314.
- [4] van der Molen, W., and Wenneker, I., 2008, "Time-Domain Calculation of Moored Ship Motions in Nonlinear Waves," *Coast. Eng.*, **55**(5), pp. 409–422.
- [5] van der Molen, W., Scott, D., Taylor, D., and Elliott, T., 2015, "Improvement of Mooring Configurations in Geraldton Harbour," *J. Mar. Sci. Eng.*, **4**(1), p. 3.
- [6] Bont, J. De, Molen, W. Van Der, Lem, J. Van Der, Ligteringen, H., and Howie, M., 2010, "Calculations of the Motions of a Ship Moored With Moormaster™ Units," *Environment*, pp. 1–14.
- [7] MA Software, 2005, "OPTIMOOR Mooring Analysis Software for Ships & Barges," (January).
- [8] van der Molen, W., 2006, "Behaviour of Moored Ships in Harbours."
- [9] López, M., and Iglesias, G., 2014, "Long Wave Effects on a Vessel at Berth," **47**, pp. 63–72.
- [10] Jensen, O. J., Viggosson, G., Thomsen, J., Bjordal, S., and Lundgren, J., 1991, "Criteria for Ship Movements in Harbours," *Coastal Engineering 1990*, American Society of Civil Engineers, New York, NY, pp. 3074–3087.
- [11] Ayub, S., Bahraminisaab, A., and Honary, B., 2012, "A Sensor Fusion Method for Smart Phone Orientation Estimation," *Proceedings of the 13th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting*, Liverpool, England, June 25-26.
- [12] Phuong, N. H. Q., Kang, H. J., Suh, Y. S., and Ro, Y. S., 2009, "A DCM Based Orientation Estimation Algorithm with an Inertial Measurement Unit and a Magnetic Compass," *J. Univers. Comput. Sci.*, **15**(4), pp. 859–876.
- [13] Woodman, O. J., 2007, *Introduction to Inertial Navigation*, Computer Laboratory, University of Cambridge.
- [14] Gebre-Egziabher, D., Hayward, R. C., and Powell, J. D., 2004, "Design Of Multi-Sensor Attitude Determination Systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, **40**(2), pp. 627–649.
- [15] Figuero, A., Peña, E., Rodríguez, A., Maciñeira, E., Rabuñal, J., Sande, J., Costa, F., Castro, A., and Maciñeira, E., 2016, "Inertial Measurement Unit to Determine Moored Vessels Movements," *Proceedings of the 6th International Conference on the Application of Physical Modelling in Coastal and Port Engineering and Science COASTLAB 2016*, Ottawa, Canada.
- [16] Wang, N., Shi, J., Yeung, D.-Y., and Jia, J., 2016, "Understanding and Diagnosing Visual Tracking Systems," *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*.
- [17] Rodríguez, A., Rabuñal, J. R., Pérez, J. L., and Martínez-Abella, F., 2012, "Optical Analysis of Strength Tests Based on Block-Matching Techniques," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, **27**(8), pp. 573–593.
- [18] Robertson, S. P., Weiss, E., and Hugo, G. D., 2014, "A Block Matching-Based Registration Algorithm for Localization of Locally Advanced Lung Tumors," *Med. Phys.*, **41**(4).
- [19] Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., and Van Gool, L., 2008, "Speeded-Up Robust Features (SURF)," *Comput. Vis. Image Underst.*, **110**(3), pp. 346–359.
- [20] PIANC, 1995, *Criteria for Movements of Moored Ships in Harbours: A Practical Guide*, Brussels, Belgium.

Bibliografía

- Aksnes, V. (2010). A simplified interaction model for moored ships in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 63(1–2), 29–39.
- Alderton, P. (2008). *Port Management and Operations* (3rd Ed.). London: Informa Law.
- ASCE. (2014). Mooring of Ships to Piers and Wharves. In J. W. Gaythwaite (Ed.), *ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice*, (Vol. 129).
- Ayub, S., Bahraminisaab, A., & Honary, B. (2012). A Sensor Fusion Method for Smart phone Orientation Estimation. *Proceedings of the 13th Annual Postgraduate Symposium on the Convergence of Telecommunications, Networking and Broadcasting*.
- Baker, S., Frank, G., Cornett, A., Williamson, D., & Kingery, D. (2016). Physical Modelling and Design Optimizations for a New Container Terminal at the Port of Moin, Costa Rica. In D. Oates, E. Burkhart, & J. Grob (Eds.), *Proceedings Ports '16: Port Engineering, 14th Triennial International Conference - ASCE* (pp. 560–569). Varna, Bulgaria: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Bay, H., Ess, A., Tuytelaars, T., & Gool, L. van. (2008). Speeded-Up Robust Features (SURF). *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3), 346–359.
- Bolles, R. C., Baker, H. H., & Hannah, M. . (1993). The JISCT stereo evaluation. *Proceedings of the Image Understanding Workshop*, 263. Washington DC, Maryland, April 18-20.
- Bont, J. De, Molen, W. van der, Lem, J. van der, Ligteringen, H., Mühlestein, D., & Howie, M. (2010). Calculations of the Motions of a Ship Moored With Moormaster™ Units. *Proceedings of the 32nd PIANC International Navigation Congress*, 622–635. Liverpool, United Kingdom: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC).
- British Standards Institute. (1994). Maritime structures, part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems. In *BS 6349-4*.
- Broggi, A., Cerri, P., & Grisleri, P. (2012). Maritime Traffic Speed Enforcement. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 4(1), 21–32.
- Brunn, P. (1981). *Port Engineering* (4th Editio). Gulf Publishing.

- BSRA. (1971). *Research Investigation for the Improvement of Ship Mooring Methods* (British Ship Research Association, ed.).
- C.E.P.Y.C. (1987). *Ensayos sobre el comportamiento de un buque tipo atracado en el Nuevo Muelle de Graneles de la Dársena de Escombreras (Puerto de Cartagena)*.
- Carral-Couce, L., Naya, S., Álvarez Feal, C., Lamas Pardo, M., & Tarrío-Saavedra, J. (2016). Estimating the traction factor and designing the deck gear for the anchor handling tug. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 231(2), 600–615.
- Carral Couce, L., Couce, J. C., Tarrío-Saavedra, J., & Formoso, J. A. F. (2017). Net winch design in trawlers, influence of vessel size and fishing ground. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(1), 108–123.
- Carral, L., Tarrío-Saavedra, J., Naya, S., Bogle, J., & Sabonge, R. (2017). Effect of Inaugurating the Third Set of Locks in the Panama Canal on Vessel Size, Manoeuvring and Lockage Time. *Journal of Navigation*, 70(6), 1205–1223.
- Castaldo, F., & Palmieri, F. A. N. (2014). Data fusion using a Factor Graph for ship tracking in harbour scenarios. *23rd Workshop of the Italian Neural Networks Society*.
- Cornett, A., Wijdeven, B., Boeijinga, J., & Ostrovsky, O. (2012). 3-D Physical model studies of wave agitation and moored ship motions at Ashdod Port. *8th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries (COPEDEC)*. Chennai (India).
- Cornett, Andrew. (2014). Physical modelling of moored ships for optimized design of ports and marine. *Proceedings of the 5th International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection*, (Volume I). Varna, Bulgaria.
- Cuadro de Mando Ambiental - Puerto A Coruña. (<http://cma.puertocoruna.com/>).
- Cummins, W. E. (1962). The impulse response function and ship motions. *Symposium on Ship Theory*.
- Davies, M., MacDonald, N., & Cornett, A. (2001). Optimization of port design using physical modeling. In T. J. Collins (Ed.), *Proceedings of the Ports '01: America's Ports: Gateway to the Global Economy, 9th Triennial International Conference - ASCE*. Norfolk, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE).

-
- Deyzen, A. F. van, Beimers, P., Lem, J. van der, Messiter, D., & de Bont, J. A. (2015). To improve the efficiency of ports exposed to swell. *Australasian Coasts & Ports Conference 2015: 22nd Australasian Coastal and Ocean Engineering Conference and the 15th Australasian Port and Harbour Conference*, 919–926. Auckland, New Zealand: Engineers Australia and IPENZ.
- Finkelstein, A. B. (1957). The initial value problem for transient water waves. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 10(4), 511–522.
- Gebre-Egziabher, D., Hayward, R. C., & Powell, J. D. (2004). Design Of Multi-sensor Attitude Determination Systems. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(2), 627–649.
- Gomez, G., & Iribarren, R. (1993). *Análisis crítico de los sistemas de atraque de buques*. In *Manuales y Recomendaciones*.
- González-Marco, D., Sierra, J. P., Fernández de Ybarra, O., & Sánchez-Arcilla, A. (2008). Implications of long waves in harbor management: The Gijón port case study. *Ocean & Coastal Management*, 51(2), 180–201.
- Grifoll, M., Fontán, A., Ferrer, L., Mader, J., González, M., & Espino, M. (2009). 3D hydrodynamic characterisation of a meso-tidal harbour: The case of Bilbao (northern Spain). *Coastal Engineering*, 56(9), 907–918.
- Groves, P. D. (2015). Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems, 2nd edition [Book review]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, Vol. 30, pp. 26–27.
- Hannah, M. J. (1974). *Computer Matching of Areas in Stereo Images*. PhD.Thesis, Stanford University.
- Herbers, T. H. C., Elgar, S., & Guza, R. T. (1995). Generation and propagation of infragravity waves. *Journal of Geophysical Research*, 100(C12), 24863–24872.
- Hiraishi, T., Atsumi, Y., Kunita, A., & Sekiguchi, S. (1997). Observations of Long Period Wave and Ship Motion in Tomakomai-Port. *7th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, 546–551. Honolulu, USA.
- Hu, J.-H., Xu, S.-S., Chen, H.-L., & Zhang, Z. (2009). Detection of ships in harbor in remote sensing image based on local self-similarity. *Journal of Image and Graphics*, 14, 591–597.
-

- Hughes, S. A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering. In *Advanced Series on Ocean Engineering*.
- Iribarren, J. (1988). Metodología para los ensayos de agitación y barcos atracados en modelo reducido. Una técnica útil. *Ingeniería Civil*, (66), 85–100.
- Jain, P., & Deo, M. C. (2008). Artificial Intelligence Tools to Forecast Ocean Waves in Real Time. *The Open Ocean Engineering Journal*, 1, 13–20.
- Jensen, O. J., Viggosson, G., Thomsen, J., Bjordal, S., & Lundgren, J. (1991). Criteria for Ship Movements in Harbours. In B. L. Edge (Ed.), *Proceedings of the 22nd International Conference on Coastal Engineering (ICCE)* (pp. 3074–3087).
- Kat, J. O. de. (2001). Prediction of Extreme Motions and Capsizing of Ships and Offshore Marine Vehicles. *Conference The 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 3–8.
- Kumar, P., Batra, G., & Kim, K. I. (2016). A Moored Ship Motion Analysis in Realistic Pohang New Harbor and Modified PNH. *1st International Conference on Modern Mathematical Methods and High Performance Computing in Science and Technology, M3HPCST 2015*, 207–214.
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (5th Editio; McGraw-Hill Irwin, Ed.).
- Kwak, M. (2017). Numerical simulation of moored ship motion considering harbor resonance. In *Handbook of Coastal and Ocean Engineering: Expanded Edition* (Vol. 2–2, pp. 1081–1110).
- Kwak, Moonsu, & Pyun, C. (2013). Computer simulation of moored ship motion considering harbor resonance in Pohang New Harbor. In B. I. Ostbo & D. Oates (Eds.), *Proceedings of the Ports '13: Success through Diversification, 13th Triennial International Conference* (pp. 1415–1424).
- López, M., & Iglesias, G. (2014). Long wave effects on a vessel at berth. *Applied Ocean Research*, 47, 63–72.
- López, M., Iglesias, G., & Kobayashi, N. (2012). Long period oscillations and tidal level in the Port of Ferrol. *Applied Ocean Research*, 38, 126–134.
- Malheiros, P., Rosa-Santos, P., Gonçalves, J., Costa, P., Paulo Moreira, A., Veloso-Gomes,

-
- F., & Taveira-Pinto, F. (2013). Real-time tracking system for a moored oil tanker: A Kalman filter approach. In A. Azevedo (Ed.), *Advances in Sustainable and Competitive Manufacturing Systems* (Vol. 7, pp. 749–760).
- Mansard, E., & Pratte, B. (1982). Moored ship response in irregular waves. *Coastal Engineering*, 2621–2640.
- MarineTraffic: Global Ship Tracking Intelligence | AIS Marine Traffic. (<https://www.marinetraffic.com>).
- Molen, W. van der. (2006). Behaviour of Moored Ships in Harbours.
- Molen, W. van der, Ligteringen, H., van der Lem, J. C., & de Waal, J. C. M. (2003). Behavior of a Moored LNG Ship in Swell Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 129(1), 15–21.
- Molen, W. van der, Scott, D., Taylor, D., & Elliott, T. (2015). Improvement of Mooring Configurations in Geraldton Harbour. *Journal of Marine Science and Engineering*, 4(1), 3.
- Natarajan, R., & Ganapathy, C. (1997). Model experiments on moored ships. *Ocean Engineering*, 24(7), 665–676.
- OCIMF. (2018). *Mooring equipment guidelines: MEG4* (4rd ed.; Oil Companies International Marine Forum (OCIMF), Ed.). Witherby Seamanship International.
- Oortmerssen, G. van. (1976). The motions of a moored ship in waves. *Delft University of Technology*.
- Oortmerssen, G. van, Pinkster, J. A., & Boom, H. J. J. van den. (1986). Computer Simulation of Moored Ship Behavior. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 112(2), 296–308.
- OptiTrack. (<https://optitrack.com>).
- Pawar, R., Bhar, A., & Dhavalikar, S. S. (2019). Numerical prediction of hydrodynamic forces on a moored ship due to a passing ship. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 233(2), 575–585.
- Phuong, N. H. Q., Kang, H. J., Suh, Y. S., & Ro, Y. S. (2009). A DCM Based Orientation Estimation Algorithm with an Inertial Measurement Unit and a Magnetic Compass. *Journal of Universal Computer Science*, 15(4), 859–876.
-

- PIANC. (1995). Criteria for movements of moored ships in harbours: a practical guide. *Report of Working Group N° 24, Permanent Technical Committee II, Supplement to Bulletin N° 88 (PIANC)*.
- PIANC. (2012). Criteria for the (Un)loading of Container Vessels. *Report of Working Group N° 115, PIANC*.
- Pinheiro, L., Fortes, C. J., Santos, J. A., & Rosa-Santos, P. (2016). Numerical simulation of the motions and forces of a moored ship in Leixões harbour. *Proceedings of 3rd International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2016, 1, 217–226*.
- PitStop Port Operations | Puerto de Algeciras. (<https://innovacion.apba.es/en/pit-stop-port-operations-algeciras>).
- PORTUS (Puertos del Estado). (<https://portus.puertos.es>).
- Premerlani, W., & Bizard, P. (2009). Direction cosine matrix imu: Theory. *DIY Drones*.
- PROAS – Port Risk Optimized Advanced System – Portal de Innovación. (<https://innovacion.apba.es/proas-port-risk-optimized-advanced-system>).
- Pronto | Port of Rotterdam. (<https://www.portofrotterdam.com/en/tools-services/pronto>).
- Puertos del Estado. (2011). *ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre*. Madrid, Spain: Ministerio de Fomento.
- Puertos del Estado. (2017). *Anuario estadístico del sistema portuario estatal 2017*.
- Qualisys. (<https://www.qualisys.com>).
- Rabinovich, A. B. (2009). Seiches and Harbour Oscillations. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, 193–236.
- Robertson, S. P., Weiss, E., & Hugo, G. D. (2014). A block matching-based registration algorithm for localization of locally advanced lung tumors. *Medical Physics*, 41(4).
- Rodriguez, A., Fernandez-Lozano, C., Seoane, J. A., Rabuñal, J. R., & Dorado, J. (2012). Analysis of deformation processes using block-matching techniques. *Proceedings of the International Conference on Computer Vision Theory and Applications, 2, 327–332*. Rome, Italy, February 24-26.
- Rosa-Santos, P., & Taveira-Pinto, F. (2013). Experimental study of solutions to reduce

- downtime problems in ocean facing ports: the Port of Leixões, Portugal, case study. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 1(1), 80–90.
- Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., & Veloso-Gomes, F. (2014). Experimental evaluation of the tension mooring effect on the response of moored ships. *Coastal Engineering*, 85, 60–71.
- Sakakibara, S., Saito, K., Kubo, M., Shiraishi, S., Nagai, T., & Yazaki, F. (2001). A study on long-period moored ship motions in a harbor induced by a resonant large roll motion under long-period waves. *Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Stavanger, Norway.
- Sammartino, S., Garrido, J. C. S., Delgado, J., Naranjo, C., Aldeanueva, F. C., & Lafuente, J. G. (2014). Experimental and numerical characterization of harbor oscillations in the port of Málaga, Spain. *Ocean Engineering*, 88, 110–119.
- Sea Traffic Management Project - STM. (<https://www.stmvalidation.eu>).
- Setoodeh, P., Khayatian, A., & Frajah, E. (2004). Attitude Estimation By Separate-Bias Kalman Filter-Based Data Fusion. *Journal of Navigation*, 57(2), 261–273.
- Taveira Pinto, F., Veloso Gomes, F., Rosa Santos, P., Guedes Soares, C., Fonseca, N., Santos, J. A., & Brógueira Dias, E. (2008). Analysis of the Behavior of Moored Tankers. *Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE2008)*, 4, 755–764.
- Thoresen, C. A. (2003). *Port designer's handbook: Recommendations and guidelines*.
- TOC Europe. (2013). Global container shipping and ports. *The 38th TOC Container Supply Chain Europe Conference*, 4–7. Rotterdam, June 25-27.
- Trejo, I., Pérez, J. D., Guerra, A., Iribarren, J. R., Gómez, J., Sopelana, J., & Peña, E. (2014). Onsite Measurement of Moored Ships Behaviour (RTK GPS), Waves and Long Waves in the Outer Port of A Coruña (Spain). *33rd PIANC World Congress*. San Francisco, USA.
- Tuytelaars, T., & Mikolajczyk, K. (2008). Local Invariant Feature Detectors: A Survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 3(3), 177–280.
- Ueda, S., & Shiraishi, S. (1988). *The allowable ship motions for cargo handling at wharves*.
- UNCTAD. (2018). *Review of Maritime Transport 2018*. New York and Geneva: United Nations publication, Sales No. E. 18. II. D. 5.

- Uzaki, K., Matsunaga, N., Nishii, Y., & Ikehata, Y. (2010). Cause and countermeasure of long-period oscillations of moored ships and the quantification of surge and heave amplitudes. *Ocean Engineering*, 37(2–3), 155–163.
- Varyani, K. S., & Vantorre, M. (2006). New generic equation for interaction effects on a moored containership due to a passing tanker. *Journal of Ship Research*, 50(3), 278–287.
- Ven, P. van der. (2012). The use of numerical models to determine the response of moored vessels to waves in a complex harbour geometry. *Delft University of Technology*, (August).
- Wang, D., & Xiong, X. L. (2010). Multivariate Linear Regression Model for Ship Traffic Flow Prediction Based on Influence Factors Analysis. *Ship and Ocean Engineering*, 3(52).
- Wehausen, J. V. (1967). Initial-value problem for the motion in an undulating sea of a body with fixed equilibrium position. *Journal of Engineering Mathematics*, 1(1), 1–17.
- Weng, J., Coher, P., & Herniou, M. (1992). Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(10), 965–980.
- Woodman, O. J. (2007). Introduction to Inertial Navigation. In *Technical Report*.
- Xisheng, L., Ruiqing, K., Xiongying, S., & Guanghua, Y. (2009). Tilt-Induced-Error Compensation for 2-Axis Magnetic Compass with 2-Axis Accelerometer. *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering*, 3, 122–125.
- Xu, M., Shang, Y., & Jin, K. (2015). An effective algorithm for motion estimation of human faces. *Proceedings of the Visual Communications and Image Processing Conference, VCIP 2015*.
- Yun Jip, K., Yun Koo, C., & Byung Gil, L. (2014). Vessel Tracking Vision System using a combination of Kalman Filter, Bayesian Classification, and Adaptive Tracking Algorithm. *16th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Session 2C. Pyeong Chang, South Korea, February 16-19.
- Yun, X., & Bachmann, E. R. (2006). Design, Implementation, and Experimental Results of a Quaternion-Based Kalman Filter for Human Body Motion Tracking. *IEEE Transactions on Robotics*, 22(6), 1216–1227.
- Zelterman, D. (2015). *Applied Multivariate Statistics with R*.

- Zhang, Z. (1999). Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. Kerkyra, Greece, September 20-27.
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transaction of the A.S.M.E*, 64, 759–768.
- Zwijnsvoorde, T. van, Vantorre, M., & Ides, S. (2018). Container ships moored at the port of Antwerp: Modelling response to passing vessels. *34th PIANC World Congress*. Panama City, Panama.



UNIVERSIDADE DA CORUÑA