

New Methodology and Instrumental System for Floating Structures Monitoring and Analysis

M. Cabrerizo-Morales, M. Rodriguez-Sanchez, J. Vaquero, A. Rodriguez-Moreno, S. Borromeo, *Member, IEEE*, and R. Molina-Sanchez

Abstract—Floating structures are widely used in Marine Civil Engineering constructions, offshore and port operations. Safe operation of those structures requires sensing, monitoring and control systems able to deal not only with the physical parameters that affect to the system behaviour, but also with other parameters related to human interaction, since they are frequently manually operated. Any failure in these operations has a very high economic impact, so detailed previous studies and simulations are needed. In this paper, it has been developed a new methodology and an instrumental system for floating structures response analysis, scalable for field and laboratory. This new approach conjugates control, monitoring and wireless communication systems in a real time basis, offering the possibility to register and simulate all the parameters involved in operations with floating structures, including human interaction. The system developed is modular. An actual implementation of the system and positive results of the tests conducted are shown.

Index Terms—Marine Civil Engineering, Floating structures, Wireless sensors and actuators networks, Intelligent sensing, Reliability and safe operation of structures.

I. INTRODUCCIÓN

EL uso de estructuras flotantes está muy extendido en la Ingeniería marítima, portuaria y en mar abierto (*offshore*). Se emplean en muchas actividades relacionadas con estructuras marítimas como puertas de diques, barcazas, grúas flotantes, terminales flotantes, estructuras *offshore* o la construcción de diques de abrigo.

Aunque a hay gran variedad de aplicaciones para estas estructuras, las restricciones relativas a su uso y explotación son muy similares. Estas estructuras forman parte de sistemas muy complejos afectados por diferentes factores, llamados agentes.

Hay agentes climáticos (viento, olas y corrientes) y los denominados de uso y explotación, derivados de la actividad

para la que fueron diseñados, por ejemplo, carga, lastre o remolque. Las reacciones de las estructuras flotantes a las demandas de los agentes están frecuentemente limitadas por amarras, defensas o incluso el fondo marino.

El funcionamiento de estas estructuras implica variaciones del nivel de lastre y de la tensión de las amarras. Esto modifica su configuración inercial y su comportamiento dinámico a través de las diferentes etapas de una operación normal. Todas estas interrelaciones dificultan la comprensión y la predicción de la respuesta dinámica de tales sistemas. Los modelos numéricos y físicos existentes están diseñados para estudiar fases particulares de las operaciones, pero ninguno cubre todo el proceso ni incluye la interacción humana [1][2][3]. Los cambios en la distribución de la carga, el control del lastrado, las restricciones de las amarras o del entorno físico están relacionados con las decisiones tomadas por el operador humano. La falta de un modelo adecuado de estos agentes forzados y su evolución durante una operación completa, dificultan el análisis y la correlación entre los resultados de las simulaciones y los datos de campo adquiridos de una estructura flotante real, llamada prototipo a escala real. Si se consiguen implementar todos los agentes mencionados, se abriría la posibilidad de trasladar el diseño de la configuración de la instrumentación desde el modelo de laboratorio al prototipo a escala real. Existen soluciones orientadas a prevenir riesgos derivados de variaciones imprevistas en factores ambientales y mejorar así la seguridad en el control de las operaciones [4][5].

Los modelos físicos de estructuras flotantes necesitan controlar y monitorizar en tiempo real la altitud, posición, tensión de la amarra, respuestas estructurales, presión del agua, superposición de olas, aceleraciones o alarmas operacionales. Típicamente se utilizan de 30 a 100 canales de datos a frecuencias de muestreo entre 1 y 100Hz. La dificultad de sincronizar esta variedad y cantidad de módulos de control y monitorización, el volumen de datos manejado y la fiabilidad de los mismos, necesaria realizar el control en tiempo real, se resuelve habitualmente mediante comunicaciones cableadas. Este cableado puede interferir en el experimento [1]. La utilización de redes inalámbricas ad-hoc se ha visto como una alternativa viable en otros contextos [6][7][8]. Por tanto, para resolver estos retos, es necesario un nuevo enfoque.

En este trabajo se presenta un sistema instrumental que permite implementar una nueva metodología de simulación basada en el uso de un modelo físico a escala para el análisis y

This paper was submitted on June 25h 2019. This work was partially supported by Public Ports of Spain and Algeciras Bay Port Authority.

M.A. Cabrerizo-Morales, A. Rodriguez-Moreno, R. Molina-Sanchez and A. Camarero-Orive, are with the Civil Engineering: Transportation and Territory Department at Technical University of Madrid (email: macabrerizo@caminos.upm.es, alberto.rodriguez@caminos.upm.es, rafael.molina@upm.es, alberto.camarero@upm.es)

J. Vaquero, M.C. Rodriguez-Sanchez and S. Borromeo are with the area of electronics at Rey Juan Carlos University (e-mail: joaquin.vaquero@urjc.es, cristina.rodriguez.sanchez@urjc.es, susana.borromeo@urjc.es).

la optimización de la operación segura de estructuras flotantes, tanto en entorno portuario como en mar abierto. La implementación de este sistema implica miniaturizar los sensores y actuadores, los sistemas de alimentación y las comunicaciones, para evitar variaciones inerciales en la estructura flotante que puedan interferir en el experimento, además de integrar al operador de la infraestructura como una variable más.

El trabajo se ha desarrollado en el marco del Proyecto *Small Scale Real-time Caisson Monitoring and Control System*. Este nuevo enfoque combina las necesidades de control y monitorización con redes inalámbricas de sensores y actuadores (WSAN) en tiempo real, ofreciendo la posibilidad de registrar y simular todos los parámetros involucrados en las operaciones marítimas mediante un modelo físico [9][10], aplicable, además, a otros escenarios [11]. El sistema también ofrece acceso y análisis de datos remotos a través de una aplicación web multiplataforma.

La metodología que se propone consta de los siguientes pasos: a) Caracterización y modelado del sistema real a estudiar (sección II); b) Identificación de variables representativas del comportamiento del sistema (sección II); c) Establecimiento de las funcionalidades del simulador a desarrollar (sección II); d) Selección de la arquitectura del sistema instrumental, acorde a las funcionalidades establecidas (sección III); e) Implementación de dicha arquitectura y del sistema completo (sección IV); f) Validación del sistema a partir de los resultados obtenidos (sección V). Todos estos pasos se detallan en las correspondientes secciones. También se presentan los resultados positivos obtenidos en el tanque de oleaje 3D del Laboratorio de Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid, España (HRL-UPM). Finalmente (sección V) se presentan las conclusiones y se plantean futuras mejoras (sección IV).

II. CARACTERIZACIÓN Y MODELADO DEL SISTEMA

La instalación a simular es el dique seco del Área de Campamento, en la Bahía de Algeciras, España. Es un dique seco de 400 metros de largo y 50 metros de ancho con un calado de 9 metros, diseñado originalmente como astillero de construcción de grandes buques, pero empleado actualmente como instalación de reparación, lo que requiere muchas más operaciones de apertura y cierre de su puerta.

Dicha puerta es una estructura flotante, un cajón de hormigón de 4,300 toneladas, 52 metros de eslora, 12 metros de manga y 11.5 metros de calado. El cajón se divide internamente en 6 celdas huecas independientes que se lastran con agua para hundirlo en su posición.

El funcionamiento típico del dique seco comienza llenando la dársena de dicho dique con agua de mar, momento en que el cajón se pone a flote bombeando el lastre de agua de las celdas internas. El cajón es arrastrado desde la posición de cierre del dique a la posición de puerta abierta o garaje, por medio de tres amarras manejadas por cabestrantes. El cierre del dique se realiza tirando de nuevo del cajón hasta la posición de cierre y hundiéndolo en su sitio (Fig. 1). Esos desplazamientos se realizan con solo 0.5 metros de calado libre, por lo que

cualquier pequeño movimiento de viraje, cabeceo o inclinación del cajón puede provocar una colisión entre el cajón y el muelle, con muy alta probabilidad de un gran impacto económico. La seguridad operativa está limitada por la magnitud de los agentes climáticos cuyos umbrales son desconocidos o estimados y dependen de la experiencia del operador. El objetivo principal de la simulación es definir y ampliar los umbrales operativos para permitir una explotación segura y mejorada de la infraestructura.

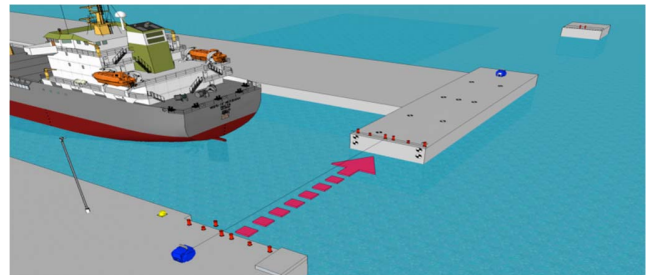


Fig. 1 Operación de apertura de la puerta para permitir la salida del barco.

La recogida de datos de campo y criterios de operación segura, se realizaron varias campañas de medición, desde febrero de 2011, para poder diseñar la configuración experimental de la simulación [3]. Para caracterizar la dinámica del cajón, se emplearon acelerómetros, giróscopos y sistemas de monitorización de movimiento por video imagen. Se instalaron sensores de presión para medir el nivel de agua de lastre de las celdas del cajón y un sistema acústico Doppler para medir las olas y las corrientes (Fig. 2).

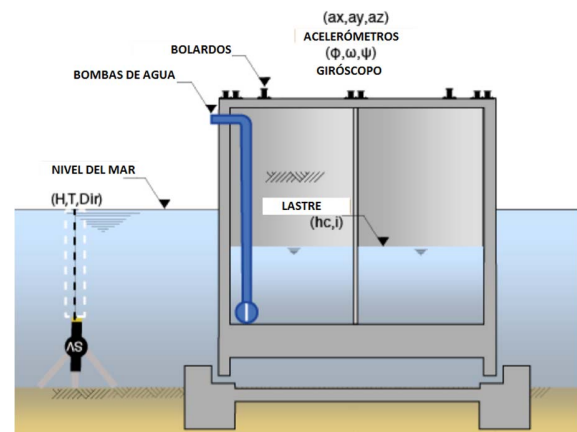


Fig. 2. Sección transversal de la puerta de cierre que muestra la ubicación de los instrumentos de monitorización.

De acuerdo a los datos recogidos, el simulador debe tener las funcionalidades de monitorización del nivel de lastre de agua, control y alarma de inundación; detección de impactos; monitorización y control de tensión de las amarras; alimentación autónoma; comunicaciones inalámbricas; sistema óptico de monitorización; registro de las acciones del operador y almacenamiento de datos sincronizados en una base de datos. La determinación correcta de las funcionalidades es crucial para que el sistema instrumental del prototipo a escala real y el modelo de laboratorio de la estructura flotante puedan monitorizarse y controlarse de igual

manera y por tanto obtener en el laboratorio conclusiones directamente extrapolables a la operativa real en campo.

III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA INSTRUMENTAL

Definidas las funcionalidades que debe cumplir el sistema, el siguiente paso de la metodología es proponer una arquitectura para el sistema instrumental acorde con dichas funcionalidades, que permita reproducir los agentes y cuyos resultados sean reproducibles a escala real.

Este sistema está basado en una WSN y un sistema de monitorización y control (SMC) (Fig. 3).

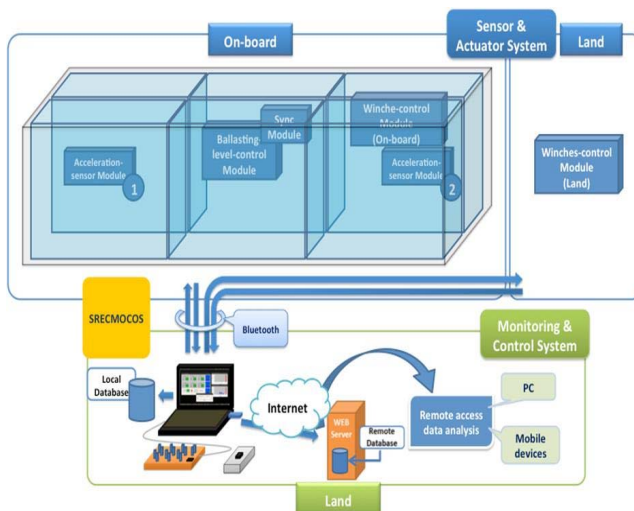


Fig. 3. Diagrama funcional del sistema propuesto. El sistema de sensores y actuadores WSN (recuadro azul) y el sistema de monitorización y control (recuadro verde) están vinculados físicamente por medio de las amarras y los cabrestantes y comunicados inalámbricamente para permitir la transferencia de datos y comandos entre ellos.

A. Sistema WSN

Típicamente las WSN se basan en módulos o nodos equipados con uno o más sensores y actuadores, capacidad de acondicionamiento y procesamiento de señales básico, almacenamiento de datos, alimentación autónoma y comunicaciones inalámbricas. Habitualmente son de bajo consumo y se destinan al sensado y actuación distribuidos [12].

Existen varias características específicas del sistema WSN desarrollado. La primera es que todos los nodos están en un área cercana, parte a bordo de la estructura flotante y parte en la infraestructura simulada en tierra. La segunda es que se utiliza en un modelo a escala reducida en laboratorio, en lugar de en el sistema real, pero empleando las mismas técnicas y metodologías que se utilizarían en la operativa real, con el fin de obtener información útil y extrapolable, como se mencionó anteriormente. La tercera es la operación manual del sistema, lo que requiere sensado y actuación en tiempo real, con una velocidad de transferencia de datos mayor que en las aplicaciones WSN típicas.

Además, hay estrictos requisitos de sincronización entre la WSN y los equipos ya existentes en el HRL-UPM, como el sistema de monitorización mediante técnicas de visión

artificial, el sistema de seguimiento óptico de 6 grados de libertad (*Optical 6DOF Tracking System*) y el Sistema de Generación de Olas. También se han tenido en cuenta otros aspectos como el coste, la disponibilidad de hardware, la modularidad, la adaptabilidad y la facilidad de prototipado.

Como ya se ha indicado, los nodos de la WSN deben recoger datos de los sensores, enviar esta información al SMC y realizar acciones de control. Hay distintos tipos de nodos tanto en la estructura flotante como en tierra.

Concretamente, en la estructura flotante o cajón existen dos nodos de detección de movimiento e impacto que miden las aceleraciones, para monitorizar los movimientos del cajón y detectar los impactos. Hay otro nodo que actúa como un cabrestante, que controla la amarra utilizada para tirar del cajón desde la posición de cierre del dique hasta el área del garaje. Este nodo también mide la tensión de la amarra, mediante una celda de carga instalada en un diseño mecánico propio. Por último, un nodo controlador de lastre acciona las bombas de llenado y vaciado de agua de lastre del cajón, mide el nivel de agua en cada una de sus seis celdas independientes mediante un sensor de presión diferencial y detecta el desbordamiento de agua de la celda mediante un sensor óptico. Este nodo tiene características de sensor inteligente [13][14], ya que detiene automáticamente la bomba de llenado de una celda si se detecta un desbordamiento de agua y lo notifica en tiempo real al SMC a través de la comunicación inalámbrica.

Los nodos en tierra son dos controladores de cabrestante, similares al embarcado en la estructura flotante. Controlan las dos amarras para tirar del cajón desde la zona del garaje hasta la posición de cierre del dique y también miden la tensión de las amarras.

B. Sistema de Monitorización y Control

Las funciones de este sistema son la adquisición y almacenamiento de los datos provenientes de la WSN y el envío de comandos de actuación a la misma. Además, dispone de una interfaz gráfica de usuario (GUI) para visualizar los diferentes tipos de variables que intervienen en la operación y las diferentes opciones de control.

Este sistema consiste en una pasarela de comunicaciones inalámbricas, denominada pasarela local (PL) y una herramienta software de monitorización y control para el control del sistema, su supervisión y la gestión de los datos recibidos.

La PL recibe los datos de todos los nodos de sensores y les transmite las órdenes de actuación. El software de monitorización y control almacena los datos recibidos en una base de datos local y envía los comandos de control. También registra las acciones del operador de la instalación. Esta herramienta muestra la información recibida, permitiendo la interacción humana en tiempo real y también puede procesar y analizar los datos. Para lograr una interacción humana en el modelo de laboratorio similar a la operación de campo, la interfaz de control software también se replica en una consola de control de hardware. Esta consola reproduce el sistema de control real utilizado en las operaciones de campo (Fig. 4).

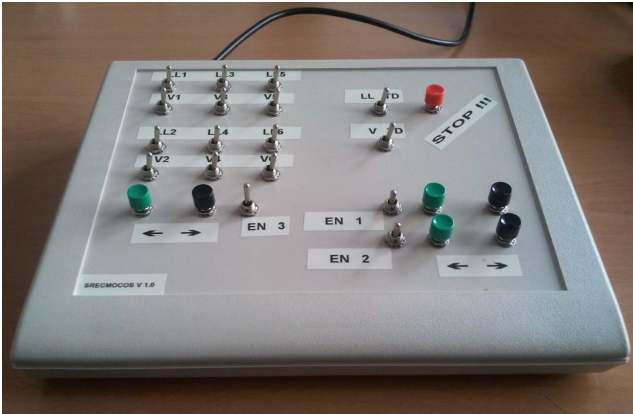


Fig. 4. Consola de control hardware. Se han replicado los mandos de las bombas de control de lastre, de los cabrestantes, así como el botón pulsador de emergencia.

Todos los datos (información, advertencias y comandos de actuación) llevan una marca temporal para permitir la sincronización en el procesamiento de los datos.

También existe un servidor de bases de datos externo para la gestión remota de la información recogida en los ensayos. Proporciona supervisión remota segura y servicios de procesamiento de datos ubicuo, basado en [15]. Es un diseño modular que permite gestionar varias bases de datos de distintas ubicaciones o laboratorios y acceso simultáneo a las mismas desde distintos tipos de dispositivos móviles. El sistema replica la base de datos local en un servidor remoto, añadiendo capacidades de copia de seguridad al sistema y permitiendo la colaboración a distancia entre laboratorios e instalaciones portuarias.

IV. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA COMPLETO

El sistema completo propuesto consiste en una instalación para simular los agentes, un modelo a escala de la estructura flotante a simular y el sistema instrumental. Como se ha mencionado anteriormente, la implementación y las simulaciones se han realizado en el HRL-UPM.

A. Instalaciones del HRL-UPM

El dique seco del astillero de Campamento (Algeciras) se ha reproducido en un tanque de experimentación a una escala de 1:22, de acuerdo con [1] (Fig. 5).



Fig. 5. Modelo a escala 1:22 del dique seco de la zona de Campamento, en la Bahía de Algeciras, realizado en el laboratorio HRL-UPM.

El tanque de oleaje multidireccional del HRL tiene 32 metros de largo, 11 metros de ancho y una profundidad total

de 1.3 metros. Está equipado con un sistema de generación de olas multidireccional, que incluye la absorción dinámica de las olas. Consta de 2 módulos HR-Wallingford, cada uno de los cuales tiene ocho palas individuales que pueden moverse de forma independiente entre sí. El sistema dinámico de absorción de olas evita que las olas reflejadas del modelo bajo ensayo reboten en las palas. Los contornos cuentan con un medio poroso de absorción, descrito en [15].

B. Descripción del Modelo de la Estructura Flotante

Se ha diseñado un modelo a escala que mantiene la similitud geométrica de la estructura flotante, incluyendo las celdas internas para el lastrado con agua. Es un cajón de contrachapado marino de 2.36x0.54x0.52m, con unos pesos colocados para que tenga una masa y una inercia similar al real, incluyendo la WSAN. El modelo final pesa 395kg. El cajón está dividido en 6 celdas principales, cada una de ellas está dotada con un sistema de lastrado y deslastrado, sensores de nivel de lastrado y detección de desbordamiento. Se han instalado dos unidades de medidas inerciales, una en la proa y otra en la popa, mientras que las baterías, el control principal del cajón y los módulos de comunicaciones inalámbricas se han colocado en las celdas centrales. El cabestrante embarcado se ha colocado directamente sobre la tapa superior. El comportamiento naval del modelo del cajón es similar al del real. El caudal de las bombas de lastrado se ha ajustado a los valores medidos en el cajón real. También se han escalado los cables de acero de las amarras y la máxima tensión permitida en ellos, así como la velocidad de rebobinado de los cabestrantes [1].

C. Sistema Instrumental

Existe una gran variedad de nodos de sensores disponibles en el mercado [17][18]. Sin embargo, los requisitos específicos de este sistema los convierten en una opción de alto coste y difíciles de adaptar. Así, se ha diseñado un sistema ad-hoc con los requisitos de modularidad, escalabilidad, coste accesible, disponibilidad y facilidad de despliegue.

1) Sistema WSAN

El diseño del sistema requiere el desarrollo adecuado de las comunicaciones inalámbricas, la sincronización entre nodos, su compatibilidad con el modelo a escala de la estructura flotante y un hardware de sensores y actuadores lo menos intrusivo posible.

Las comunicaciones inalámbricas evitan las restricciones inerciales que imponen a la estructura flotante un sistema cableado de sensorización y actuación. La tasa de datos de envío desde los nodos es alta debido a la cantidad de variables que hay que enviar para permitir la monitorización en tiempo real. El muestreo se realiza a 100Hz máximo y existen hasta 36 canales de datos (6 canales de los dos sensores de aceleraciones, 18 canales del control de lastrado del cajón, 6 canales para el control de las amarras y otros 6 para el sistema óptico de seguimiento).

La tecnología actual permite la implementación de sistemas de radio de baja/media potencia y corto/medio alcance basados en protocolos estándar como ZigBee o Bluetooth

(BT). ZigBee se emplea habitualmente en redes de sensores inalámbricos [19][20], pero la alta tasa de datos mencionada para adquirir, almacenar y visualizar los datos en tiempo real sugiere la utilización de la tecnología BT en esta aplicación.

En lo que respecta al WiFi, cumple con los requisitos de alta tasa de transferencia de datos, pero tradicionalmente tenía un mayor consumo de energía. Además, en el momento del desarrollo del proyecto, había menos disponibilidad de módulos y a un coste más elevado. Actualmente, los módulos de bajo consumo de WiFi, LORA o BT Low Energy disponibles podrían ser también opciones viables.

BT opera en la banda libre de 2.4GHz ISM (Industrial, Scientific and Medical) con una velocidad de 3Mbps, frente a los 250Kbps de ZigBee, según la configuración. La limitación de BT en cuanto al número de dispositivos que pueden conectarse simultáneamente, 7 frente a los 65,536 de ZigBee [21], se puede solventar mediante técnicas de multiplexación [22] o mediante el uso de múltiples dispositivos BT receptores.

Por lo tanto, es posible crear red con topología en estrella mediante varias subredes con topología en estrella a su vez (Fig. 6). Esta topología añade flexibilidad al sistema, permitiendo aumentar el número de nodos conectados mediante el aumento del número de dispositivos maestros BT.

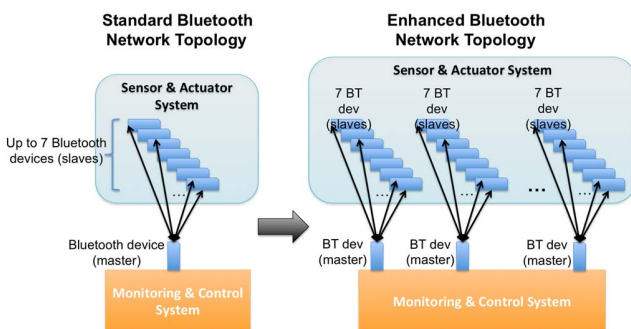


Fig. 6. Estándar de la topología de red estándar de BT frente a la topología de red mejorada de BT utilizada en este sistema.

Nodo de detección de movimiento e impacto

Este nodo adquiere datos de aceleración de 3 ejes a una frecuencia de muestreo de 100Hz y transfiere esta información a través de un enlace de BT al SMC. De esta forma se monitoriza el movimiento del cajón y se detectan impactos que se pudieran producir en sus maniobras. Incluye una placa Arduino Mini [23], como unidad de control, y una Unidad Inercial (MinIMU-9 v2 de Pololu) y el ya mencionado módulo de comunicaciones BT WT-11.

La tarjeta MinIMU-9 v2 dispone de un acelerómetro digital de 3 ejes con una resolución de hasta 0,001 G/muestra por eje.

Nodo controlador de lastre.

Este nodo controla seis bombas de llenado LVM Niagara y seis bombas de vaciado Attwod Tsunami T500 para lastrear el cajón. El nivel de agua de cada una de las seis celdas independientes se mide con un sensor de presión diferencial Honeywell 26PC, con un rango de 0 a 0,07 bares, cuya señal se amplifica y digitaliza mediante un convertidor

analógico/digital ADC121S101 de 12 bits de Analog Devices. También puede detectar el desbordamiento de cada celda mediante un sensor de nivel óptico digital Honeywell LLE. Este sensor es el que proporciona la característica de nodo inteligente ya mencionada, al detener automáticamente la bomba de llenado de una celda si se detecta un desbordamiento de agua y notificarlo en tiempo real al SMC a través de la comunicación inalámbrica.

La unidad de control está basada en la placa Arduino Mega y las comunicaciones en el módulo BT WT-11.

Nodo controlador de cabrestante.

Este nodo controla un motor paso a paso (tamaño 23-88), que hace la función de cabestrante, que tira de una amarra para desplazar el cajón. Este motor incluye un controlador PWM manejado mediante una placa Arduino Mini. El control permite cuatro modos de funcionamiento: amarra libre, bloqueada, recogida de amarra y suelta de amarra.

La tensión de la amarra se mide mediante una microcelda de carga Honeywell FSG-15N1A instalada en un diseño mecánico propio. El rango de tensión es ajustable entre 0 y 20N. Las comunicaciones, de nuevo, están basadas en el módulo BT WT-11.

Existen tres de estos nodos, uno embarcado en el cajón y otros dos en tierra firme.

2) Sistema de Monitorización y Control

Como se ha mencionado anteriormente, el SMC está compuesto por la PL y el software de monitorización y control. El PL implementado con tres dispositivos BT F8T017 de Belkin, utilizando una topología en estrella, como se comentó anteriormente.

El software de monitorización y control ha sido desarrollado en lenguaje Java. Establece una comunicación serie con cada nodo a través de la PL. Esta comunicación serie permite recibir datos y enviar comandos.

Para ello, se ha definido una trama de comunicaciones de recepción de datos (*data frame*) y otra de envío de comandos de actuación (*command frame*). La trama de recepción de datos contiene la información proveniente de los sensores y los estados de los actuadores. La estructura de esta trama consta de 3 bytes de sincronización y un número variable de campos, cada uno de ellos con un número variable de bytes. Cada campo se define primero con un byte de longitud del campo seguido de los bytes de información. La trama termina con un byte de parada.

Se definen hasta tres tipos de campos: de identificador del sensor, de datos enviados y de marca de tiempo (*time-stamp*). La trama de comandos tiene la misma estructura, pero sin el campo de marca de tiempo (Fig. 7).

El software de monitorización y control dispone, además, de una GUI que permite visualizar los diferentes tipos de datos recibidos y controlar los diferentes actuadores involucrados en la operativa de la estructura flotante. Esta GUI ha sido desarrollada en lenguaje Java y consiste en una ventana para manejar las variables del experimento como el tiempo del experimento y el tiempo actual, nombre del experimento o

ruta de almacenamiento de los datos. Hay una segunda ventana con botones para controlar los diferentes actuadores (bombas de llenado y vaciado y motores paso a paso de los cabestrantes). Además, esta ventana puede mostrar alarmas de sobrellenado e impactos. Hay dos ventanas más con presentaciones gráficas sobre la medida del nivel del agua (en cada una de las seis celdas independientes del modelo) y la tensión de las amarras (Fig 8).

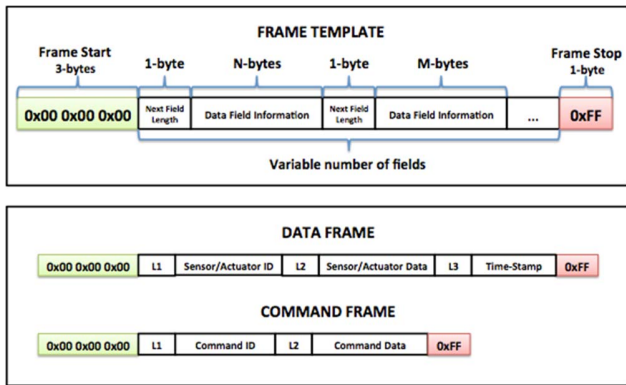


Fig. 7. Descripción de las tramas o datagramas empleados.



Fig. 8. GUI para el control de lastrado y del cabrestante (ventana izquierda). La tensión del cabrestante y el nivel de lastrado se encuentran en las ventanas superiores e inferiores de la derecha, respectivamente.

Para la gestión remota de datos de ha implementado un servidor de base de datos externo. Como servidor se ha utilizado MySQL Server 5.0 en una máquina Ubuntu 12.4 LTS (Long Time Service).

El acceso al contenido de la base de datos está asegurado con HTTPS y autenticación segura. Por lo tanto, sólo los usuarios autorizados pueden obtener permisos de acceso. Todos los datos almacenados están marcados con la hora y asociados a un experimento específico, lo que permite comparar los resultados entre diferentes pruebas.

V. RESULTADOS

El análisis de operaciones marítimas y portuarias se ha basado en modelos físicos durante décadas. Sin embargo, la integración de las acciones de los operarios o una simulación de todas las etapas en que se divide una operativa completa, son aspectos que no se han sido abordables hasta ahora.

Las fuerzas que inducen los cables de alimentación y de transmisión de datos afectan a la respuesta dinámica de las estructuras flotantes a escala reducida, pues no son elementos

reales que se pretendan modelizar. El uso de tecnologías inalámbricas y alimentación autónoma embarcada, elimina este inconveniente. El tamaño reducido de los sensores permite integrarlos en los lugares más apropiados sin modificar la geometría ni la inercia del modelo.

El sistema permite realizar la operativa completa de la estructura flotante bajo estudio. Al implementar todos los agentes y funcionalidades derivados de uso y explotación, como el control de lastrado y de amarras, el análisis de la respuesta a los agentes climáticos se puede realizar de manera continua. A diferencia de las metodologías de ensayos existentes, el ensayo no necesita ser dividido en ensayos más simples y parciales, como ensayos a lastre y tensión de amarras fijo. Además, se pueden analizar las transiciones entre las distintas etapas, como el paso de cajón fondeado a cajón flotando.

Las operaciones marítimas están condicionadas por las decisiones humanas, que a su vez dependen de la destreza, experiencia o, incluso, la motivación del operario. La persona que conduce el ensayo puede ver todas las variables monitorizadas. El operario puede tomar decisiones basadas en el comportamiento que observa directamente del modelo físico y de los valores que muestra el sistema, de manera similar a la operativa real. La inclusión en el ensayo del operario y sus decisiones añade fiabilidad a los resultados. Los datos registrados y almacenados en la base de datos permanecen accesibles tanto durante como después del ensayo. Dado que la adquisición de datos se realiza de manera sincronizada, se pueden analizar y realizar correlaciones causa-efecto de la maniobra realizada.

La nueva metodología presentada y el sistema de instrumentación desarrollado se han aplicado en la caracterización del comportamiento de la puerta flotante en el astillero de Campamento (Algeciras) ante los agentes climáticos y los procedimientos operativos.

La Fig. 9 presenta los umbrales operativos iniciales para este caso de estudio.

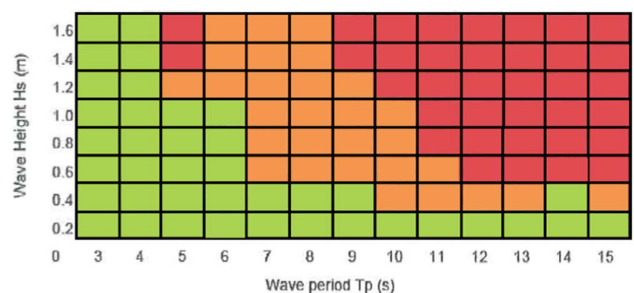


Fig. 9 En el cuadro se indican los estados del mar relacionados con los umbrales de operación (período de oleaje y altura) en la zona de operaciones. Las celdas verdes (izquierda) representan los estados del mar en los que la operación puede realizarse sin exceder los umbrales de movimiento, las celdas naranjas (centro) representan aquellas condiciones que son seguras para la operación sin ningún margen de seguridad y las celdas rojas (derecha) son aquellos estados del mar en los que ocurren los movimientos de la estructura más allá de los umbrales de seguridad o colisiones.

Tras el análisis realizado, se decidió modificar la estructura del cajón para cambiar su inercia, así como la configuración

de las amarras de arrastre. Como resultado de estos cambios, se incrementó la ventana de operación segura un 10%. Estas modificaciones, una vez implementadas en la compuerta, supondrán un impacto operacional y económico para el astillero.

La Fig. 10 presenta de manera cualitativa la mejora de los márgenes de operación segura, tras el estudio realizado. Por motivos de confidencialidad, no se pueden mostrar valores cuantitativos.

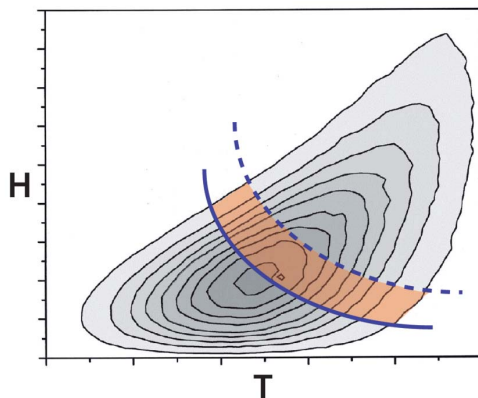


Fig. 10. Distribución conjunta de probabilidad para la altura de ola H y el período de ola T . Las áreas de operación seguras están por debajo de las líneas trazadas. La línea sólida representa el umbral inicial de funcionamiento. La línea de puntos muestra un umbral mejorado.

VI. CONCLUSIONES

Se ha presentado una nueva metodología y un sistema de instrumentación para el análisis de la respuesta de estructuras flotantes, escalable a la operativa en campo y en el laboratorio. El sistema es modular, fácil de reutilizar y de un coste asequible.

La arquitectura descrita es escalable respecto del número de nodos a utilizar en un ensayo, respecto del número de emplazamientos en los que se pueden realizar los ensayos, y respecto del número de usuarios que pueden participar, tanto in-situ como de manera remota. El coste total del sistema es económicamente viable.

En el caso de querer estudiar una estructura nueva, el sistema puede ser utilizado para definir estrategias de operación, funcionando como un simulador físico, y posteriormente trasladar los resultados a un prototipo a escala real, empleando el mismo tipo de instrumental, pero realizado con sensores, actuadores y comunicaciones de rango industrial.

El sistema de instrumentación puede ser implementado con componentes comercialmente disponibles, reduciendo el coste y el tiempo de desarrollo.

La réplica en un servidor remoto de la base de datos local, añade funcionalidad de copia de seguridad de los datos. Se puede acceder a la base de datos remota desde cualquier tipo de dispositivo con conexión a internet. Esto permite la colaboración a distancia entre distintos centros de investigación, laboratorios e instalaciones portuarias.

Esta metodología es una herramienta muy útil para la definición de umbrales operativos seguros y para el entrenamiento del operario, especialmente cuando se quiere ensayar una nueva estructura flotante o un nuevo procedimiento operativo, reduciendo la curva de aprendizaje y el riesgo de fallo o parada en la estructura real.

Podemos mejorar los datos de análisis en tiempo real utilizando nodos de sensores inalámbricos basados en FPGA [24] para monitorizar el diagnóstico de fallos. Esto podría ser crítico en emergencias civiles marítimas. Esta metodología proporciona una herramienta útil para la definición de umbrales y la formación de operadores, especialmente cuando se va a implantar una nueva estructura o procedimiento, reduciendo la curva de aprendizaje y, por tanto, los riesgos operativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo prestado por Puertos del Estado, la Autoridad Portuaria de la Bahía de Algeciras y por Astilleros Cernaival.

REFERENCIAS

- [1] Chakrabarty, S.K., 1994. 'Offshore Structure Modeling'. World Scientific, ISBN 981-02-1512-6.
- [2] Hughes, S.A., 1993. 'Physical models and laboratory techniques in coastal engineering', World Scientific. ISBN 981-02-1540-1.
- [3] Zamuda, A., & Sosa, J. D. H. (2014). Differential evolution and underwater glider path planning applied to the short-term opportunistic sampling of dynamic mesoscale ocean structures. *Applied Soft Computing*, 24, 95-108.
- [4] Kantilal, V. M., & Lakhani, A. P. (2014). Zigbee based wireless monitoring and controlling of automation system using plc & scada. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 3(1).
- [5] Liu, Z., Yu, Y., Liu, G., Wang, J., & Mao, X. (2014). Design of a wireless measurement system based on WSNs for large bridges. *Measurement*, 50, 324-330.
- [6] Devaraju, J. T., Suhas, K. R., Mohana, H. K., & Patil, V. A. (2015). Wireless portable microcontroller based weather monitoring station. *Measurement*, 76, 189-200.
- [7] Gerla, M. (2005). From battlefields to urban grids: New research challenges in ad hoc wireless networks. *Pervasive and mobile computing*, 1(1), 77-93.
- [8] Zhang, W., Xiao, J., Chen, H., & Zhang, Y. (2014). Measurement of three-dimensional welding torch orientation for manual arc welding process. *Measurement Science and Technology*, 25(3), 035010.
- [9] Yuan, D., Kanhere, S. S., & Hollick, M. (2017). Instrumenting wireless sensor networks—a survey on the metrics that matter. *Pervasive and Mobile Computing*, 37, 45-62.
- [10] Molina, R., Cabrerizo, M.A., De los Santos, F., Camarero, A., 2012, 'Control of the six degrees of freedom of a floating body using video imaging techniques: Monitoring the operation of a floating gate opening and closing at Campamento's dry dock (Algeciras Bay, Spain)', ICCE 2012, Santander.
- [11] Messelodi, S., Modena, C. M., Zanin, M., De Natale, F. G., Granelli, F., Betterle, E., & Guarise, A. (2009). Intelligent extended floating car data collection. *Expert systems with applications*, 36(3), 4213-4227.
- [12] I. F. Akyildiz and I. H. Kasimoglu, "Wireless sensor and actor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, vol. 2, no. 4, pp. 351-367, October 2004.
- [13] J. Yick, B. Mukherjee, and D. Ghosal. "Wireless sensor network Survey". *Computer Networks*, vol. 52, no. 12, 2008.
- [14] Rawat, P., Singh, K. D., Chaouchi, H., & Bonnin, J. M. (2014). Wireless sensor networks: a survey on recent developments and potential synergies. *The Journal of Supercomputing*, 68(1), 1-48.

- [15] M.C. Rodríguez-Sánchez, S. Borromeo, and J. Hernández-Tamames, 2011, 'Wireless sensor networks for conservation and monitoring cultural assets', *IEEE Sensor Journal*, vol.11, no.1, pp. 1382 – 1389.
- [16] Cabrerizo, M.A., Molina, R., Matutano, C., Llana, A., 2010, 'Control of porosity, reflection and transmission coefficients using polymeric porous media and their application in testing physical models', Costlab 2010, Barcelona.
- [17] Official Web of Crossbow Technology, Inc. [Online]. Available: <http://www.xbow.com>
- [18] J. L. Hill and D. E. Culler, "Mica: A wireless platform for deeply embedded networks," *IEEE Micro*, vol. 22, no. 6, pp. 12–24, Dec. 2002.
- [19] N. Baker, "ZigBee and Bluetooth strengths and weaknesses for industrial applications," *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 16, no. 2, pp. 20–25, Apr. 2005.
- [20] "Co-existence of IEEE 802.15.4 at 2.4 Ghz". Application Note, Jennic. 2008. [Online]. Available: <http://www.jennic.com/>
- [21] ZigBee specifications. Available: <http://www.zigbee.org/>
- [22] MC. Rodríguez-Sánchez, "Infraestructura para distribución de información y servicios contextuales basada en sistemas electrónicos embebidos," Ph.D. dissertation, Dept. Elect Tech, Rey Juan Carlos, Univ., Móstoles, Spain, 2010.
- [23] Arduino official website. Available: <https://www.arduino.cc/>
- [24] Bengherbia, B., Zmirli, M. O., Toubal, A., & Guessoum, A. (2017). FPGA-based wireless sensor nodes for vibration monitoring system and fault diagnosis. *Measurement*, 101, 81-92.



Miguel Ángel Cabrerizo-Morales nació en Granada (España) en 1979. Es Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad de Granada y actualmente cursa el doctorado en Ingeniería de Transportes en la Universidad Politécnica de Madrid.

Ha sido investigador asociado del Grupo de Investigación de Costas de la Universidad de Granada desde 2006 hasta 2008. Desde 2009 es investigador del HRL de la Universidad Politécnica de Madrid. Sus intereses de investigación incluyen el modelado físico y el desarrollo instrumental relacionado con estructuras marítimas y offshore. También es experto en diseño y operaciones de estructuras flotantes.



Joaquín Vaquero López es ingeniero eléctrico y electrónico por la Universidad Politécnica de Madrid, España, en 1994. En 1995 se incorporó a la Universidad Nacional a Distancia de España como Profesor Asistente, obteniendo el título de Doctor en 2000. Fue Ingeniero de Diseño y Jefe de Proyecto de convertidores electrónicos de alta potencia en SEPSA desde el año 2000 hasta el 2007. En 2007 a la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid como Profesor. Es coinventor de 10 patentes. Sus intereses y objetivos científico-técnicos están relacionados con la instrumentación electrónica y la electrónica de potencia.



Alberto Rodríguez-Moreno nació en Madrid (España) en 1988. Se licenció en Telecomunicaciones e Ingeniería Informática en 2011 y tiene un Máster en Visión por Computadora en 2013 por la Universidad Rey Juan Carlos de Móstoles, España. Actualmente es Ayudante de Investigación en el Laboratorio de Investigación del Puerto de la Universidad Politécnica de Madrid. Sus principales

líneas de investigación se centran en el desarrollo de arquitecturas

y dispositivos para redes de sensores inalámbricos móviles y para sistemas de comunicaciones inalámbricas de alta velocidad.



Maria Cristina Rodríguez-Sánchez nació en Madrid (España) en 1982. Máster en Informática en 2005 y el Doctora en Ingeniería Informática por la Universidad Rey Juan Carlos de Móstoles, España, en 2009. Actualmente es Profesora de la Universidad Rey Juan Carlos de Madrid. Sus intereses de investigación actuales incluyen la electrónica para servicios sensibles al contexto, sistemas digitales e inalámbricos, aplicaciones móviles, aplicaciones de accesibilidad, aplicaciones de m-salud y bioingeniería. Ha participado en más de 40 proyectos de I+D financiados tanto con fondos públicos como privados, tiene más de 40 publicaciones en congresos, es coinventora de 4 patentes.



Susana Borromeo obtuvo el título de M.Sc. y Ph.D. en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica de Madrid, España, en 1998 y 2004, respectivamente. En 2004 se incorporó al grupo de Bioingeniería e Imagen Médica de la Universidad Rey Juan Carlos, del que es Profesora Asociada.

Ha participado en 20 proyectos de I+D financiados en convocatorias públicas y en más de 30 contratos de I+D con empresas y hospitales, en más de 40 congresos y es coinventora de 4 patentes. Sus intereses y objetivos científico-técnicos están relacionados con el desarrollo de hardware específico dentro del campo de la bioingeniería y la imagen médica.



Rafael Molina-Sánchez, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Doctor en Ciencias Económicas y Empresariales (Universidad de Granada y Universidad Politécnica de Madrid). Licenciado en Hidráulica Ambiental, especializado en Puertos y Costas (Universidad de Granada) y Especialista en Transporte Marítimo y Gestión Portuaria (Autoridad Portuaria Nacional de España, Universidad Politécnica de Madrid).

Sus principales áreas de trabajo son la caracterización del entorno físico, modelización de mares y vertidos, monitorización del entorno físico y de infraestructuras, diseño de estructuras singulares y la gestión y operación portuaria. Posee 5 premios a la innovación académica y empresarial. Desde 2001 colabora en el Programa de Recomendación de Obras Marítimas (ROM) y Miembro de la Comisión ROM desde 2007 (Ministerio de Fomento, España).